

2022년 한국지진공학회 학술발표회 논문집

Vol.25

일시 : 2022년 3월 18일(금)

장소 : 서울대학교 글로벌공학교육센터

주관 : 사단법인 한국지진공학회, 서울대학교



사 단 법 인 **한 국 지 진 공 학 회**
Earthquake Engineering Society of Korea

세션 1 : 국내 액상화 설계기준 개정 연구

좌장: 최재순

소회의실 512호

3월 18일(금), 13:30~15:30

- 내진설계 일반(KDS 17 10 00) 개정안 - 액상화 평가 관련
..... 이진선, 추연옥, 김병민, 강기천, 박헌준, 김재현 3
- 액상화 평가를 위한 반복삼축압축시험 표준화
..... 김종관, 이석형, 박가현, 한진태 5
- 철도제방 액상화 피해 영향인자 도출을 위한 1g 진동대실험
..... 하익수, 오이태, 이원준, 유민택 7
- 액상화 지반에 근입된 교각 말뚝기초의 지진거동
..... 황병윤, 황태훈, 김성렬 9
- 궤도시설물에 대한 액상화 피해평가 지표 도출
..... 유민택, 이명재 11
- 현장 및 실내실험을 활용한 포항 액상화 평가
..... 김병민, 조영규, 김기석, 한진태 13

세션 2 : 지반운동산정과 지반구조물 지진해석

좌장: 김성렬

소회의실 515호

3월 18일(금), 13:30~15:30

- 국내 지반분류체계 및 설계스펙트럼 개선 방법
..... 박두희, 이용국, 아킵 무하마드 17
- 지진파의 주파수 성분이 굴착터널의 지진응답에 미치는 영향
..... 응엔반캉, 박두희 19
- 지반공학적 지역특성을 고려한 전단파속도 주상도 추정방법 연구
..... 김한샘, 선창국, 조형익, 이문교 21
- A 3D model for dynamic soil-structure interaction and its application to Sherman Oaks building
..... NGUYEN Quang Thien Buu, 김성렬 23
- 중력식 안벽의 내진성능 평가방법 개선에 관한 연구
..... 이문교, 선창국, 김한샘, 조형익 25
- 수직방향 지진입력에 대한 지중구조물의 지진응답해석을 위한 응답변위법
..... 양대승, 임재성, 김재민 27

- 응답진도법을 사용한 지중 도시철도구조물 지진응답의 3차원 효과 분석
..... 김기배, 임재성, 김재민 29
- 제주 지진 MEMS 설치 구조물의 고유주기 산정
..... 김민영, 장동일, 유병호, 박동엽 31

세션 3 : 사회기반시설물의 지진안전성 향상을 위한 최신 연구 현황 좌장: 이진호

중회의실 519호 3월 18일(금), 13:30~15:30

- KIGAM 지진관측자료 공유 시범 서비스 공개
..... 조형익, 김영채, 이문교, 김인호, 제일영 35
- 사회기반시설 네트워크의 지진 복원력 평가 및 네트워크 구성 요소의 상대적 중요도 지표 제시
..... 권영준, 송준호 37
- 수요자 관점을 고려한 전략적 평가 기준 개발 연구: 지진조기경보 사례
..... 안재광, 조성흠, 황의홍, 박순천 39
- 산업시설 구조설계기준 제정(안) 마련을 위한 검증 연구 결과 -내진설계기준을 중심으로-
..... 이진형, 김익현, 홍기증 41
- Unscented Kalman Filter를 사용한 총상 반무한 지반의 물성치 추정 기법
..... 이진호, Nguyen Van Hieu, 이세혁 43
- 지진에 의한 구조물의 진동 데이터로부터 물성치를 추정하기 위한 Extended Kalman Filter
..... 이진호, Nguyen Van Hieu 45
- 머신러닝을 이용한 철골모멘트골조의 확률적 지진요구모델 도출
..... 장학중, 김준희, 최인섭 47
- MACHINE LEARNING FOR RAPID SEISMIC DAMAGE-STATE PREDICTION
OF STEEL MOMENT FRAMES
..... 신명수, Hoang Nguyen 49

세션 4 : 건축물 지진거동 및 성능 평가 좌장: 엄태성

대회의실 513호 3월 18일(금), 13:30~15:30

- 수치해석을 통한 지면에 고정된 캐비닛의 지진응답특성 분석
..... 김성용, 이철호, 전수찬, 배창준 53
- 현실적인 경계조건을 갖는 파일-슬래브 직접 접합부의 내진성능
..... 이득행, James LaFave 55

■ 700 MPa 철근의 벽체 최소 철근비 검증	김성현, 박홍근	57
■ 조적허리벽이 있는 RC기둥의 단주효과	엄태성, 한광희, 이상현	59
■ 파이เบอร์소 모델링 기법을 이용한 구조해석 프로그램 별 철근콘크리트 벽식 구조물의 비선형 해석결과 비교	이상현, 엄태성, 전민준, 남승현, 이지은	61
■ 내진보강용 동조질량감쇠기의 성능 시험	이상현, 이용훈	63
■ 휨거동을 하는 U형 합성보의 모멘트-회전각 관계	황현중	65
■ 절곡앵글을 사용한 매입형 합성기둥의 내진성능평가	김철구, 이상현, 김형섭	67
■ 국내 철근콘크리트 구조벽체 내진설계 현황 및 문제점	강수민	69

세션 5 : 내진 성능 및 손상 평가

좌장: 김유석

대회의실 517호

3월 18일(금), 13:30~15:30

■ 자립형 프리캐스트 콘크리트 기둥 접합부의 내진 성능 연구	강현구, 안성룡, 성한석	73
■ 철골 보통모멘트골조의 지진손실평가와 풍하중의 영향 분석	김태오, 한상환	75
■ 노후한 RC 기둥의 파괴모드에 따른 변환 능력 평가	구수현, 한상환	77
■ Investigation of performance of 3D printing sandwich structure by experimental-analytical and DIC analysis	Pham Vo Anh Khoa, 이기학, 송민아	79
■ 얇은 기초가 있는 다자유도 구조물의 지진응답의 제한	김동관, 김진우, 박희철	81
■ 조적채움벽 골조의 면내 방향 파괴모드 예측에 관한 연구	김민재, 유은종	83
■ 지진파 주기 특성에 따른 지진피해 사례	김유석	85

세션 6 : 건축물 구조요소와 비구조요소의 내진성능

좌장: 김형준

소회의실 512호

3월 18일(금), 15:50~17:50

- 진동대 실험을 통한 바닥고정형 비구조요소 앵글형 정착부의 내진성능평가
..... 배창준, 이철호, 전수찬, 오나윤 89
- 실대형 2층 철골구조물 진동대 실험을 통한 비구조요소 설계지진력 평가
..... 전수찬, 이철호, 배창준 91
- 전산도구를 활용한 음압격리병동 비구조요소의 내진설계
..... 추유림, 김태진 93
- 단일 스퍼드 경량칸막이벽의 지진 손상
..... 김형준, 신동현 95
- 반복하중을 받는 강판패널의 거동
..... 김형준, 신동현 97
- 에너지소산과 자가복원 기능이 복합된 내진보강장치 성능실험
..... 김진구, Mohamed Nouredin, 전승호, Masoum Gharagoz 99
- 지진하중을 받는 유리구조의 내진설계
..... 김남희, 홍성걸 100

세션 7 : 토목구조물의 내진설계

좌장: 김태훈

중회의실 515호

3월 18일(금), 15:50~17:50

- 손상지수를 이용한 열화된 철근콘크리트 교량의 내진성능평가
..... 김태훈, 김기현 105
- 다지점 지진입력과 지반-구조물 상호작용을 고려한 교량의 지진응답해석
..... 임재성, 김재민 107
- 실험자료를 기반한 국내 철근콘크리트 힙거동 교각의 손상수준 별 횡변위비 산정
..... 남현웅, 홍기증 109
- 수평과 수직 지반운동이 동시에 작용하는 교각에 대한 실시간 하이브리드 실험
..... 채윤병, 박민석, 김철영 111
- 철근과 강연선 복합이음 방식 조립식 기둥의 내진 성능실험
..... 정길제, 김종현, 이장석, 이성형 113
- 편심 회전체를 이용한 스페리컬 받침의 수평변위 제어
..... 박수민, 하동호, 지용수, 김봉식 115
- 골조 구조물의 국내 지진파에 대한 면진설계 효용성 검토
..... 김대곤, 김창현 117

세션 8 : 지반진동

좌장: 김병민

중회의실 519호

3월 18일(금), 15:50~17:50

- 지형 효과를 고려한 포항 분지 지진파 증폭 모델 개발
..... 김병민, 이준영, 김광희, 강수영 121
- GAN 모델에 따른 가상 지진파 생성 결과 비교 연구
..... 안재광, 김병학, 황의홍, 박순천 123
- 2017년 M5.4 포항 지진의 광대역 지반운동 시뮬레이션
..... 정석호, 배성은, 김광영 125
- 한반도 지역 지반분류별 지반운동 감쇠 예측식 구축
..... 지현우, 한상환 127
- 장거리(>30km) 지중 광통신 분산형 진동센서를 이용한 지진파 감지 사례 연구
..... 연관희, 최신규, 이강렬, 송석용 129
- 2016 경주지진 관측 지진동 부지응답 보정 및 지진동 모사
..... 안병석, 강태섭, 유현재 131
- 한반도 남동부 제 4기 단층 지진재현모델 추정을 위한 단층지진원의 지진발생을 산정
..... 박제찬, 한신애, 임성빈, 유현재 133
- 주파수 특성을 이용한 국내 지진관측소 부지 분류
..... 최세운, 박동희, 홍성일, 한아림 135

세션 9 : 포항 지진과 지진 방재 정책

좌장: 황하

대회의실 513호

3월 18일(금), 15:50~17:50

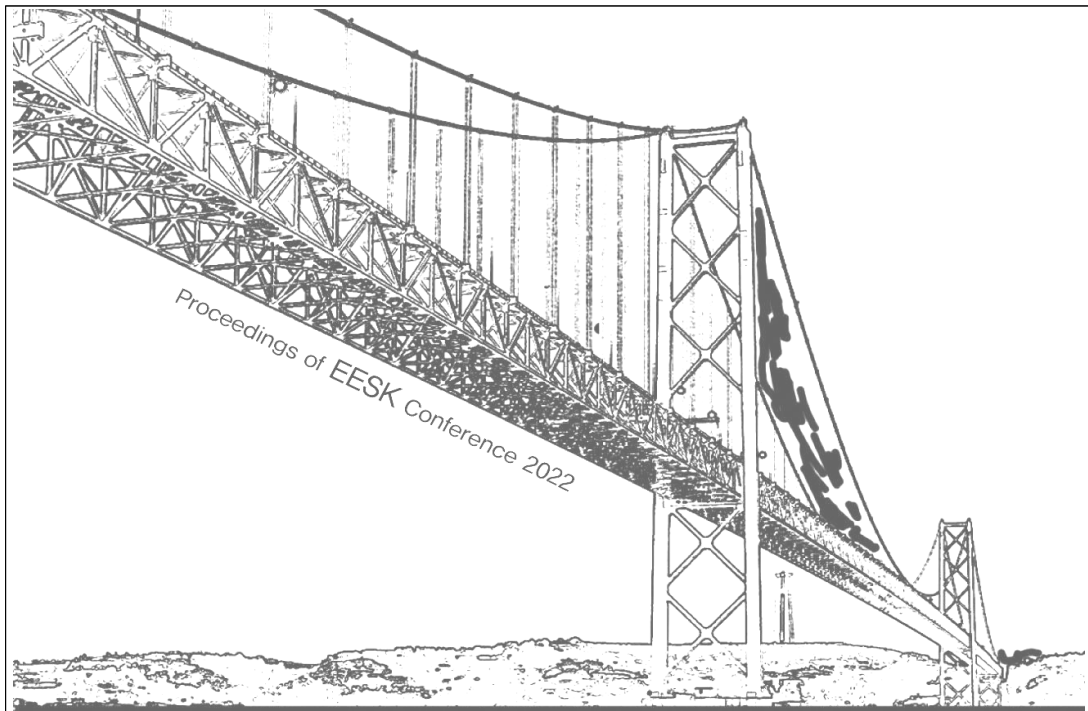
- 지진 발생시 도로망 용량감소로 인한 교통운영분석 기법에 관한 연구
..... 서원호, 조중민, 장선희, 김성하, 이채린 139
- 도로망의 내진성능을 고려한 교량의 최적 복구 계획 수립 기법 개발
..... 이영주, 윤성식, 김민선 141
- 2017 포항지진이 지역상권에 미친 시·공간적 영향
..... 김정섭, 서정석 143
- 2017 포항 지진 경험이 대비행위에 미친 영향 분석
..... 정지범, 장상훈, 김청일 147
- 재난회복력을 고려한 교통로 복구 우선순위 지표 개발 연구
..... 조기혁, 심재웅 149
- 국내 지반 특성에 적합한 최적의 지반 운동 감쇠식 선정
..... 김병민, 이혜진 153

■ 포항시 액상화 확률 모델 개발	김병민, 서환우, 김한샘	155
--------------------	---------------	-----

세션 10 : 원자력발전소 및 산업시설물의 내진설계 및 내진성능평가 좌장: 김두기

대회의실 517호 3월 18일(금), 15:50~17:50

■ 중·저준위 방사성 폐기물 처분시설에 대한 지진취약도 평가	하정곤, 박준희, 김민규	159
■ 원전부지 설계지진 결정을 위한 규제지침 개정(안)	최호선	161
■ 원전 기기의 지진취약도 분석에 관한 고찰	김두기, 김석철	163
■ 기기-구조물 상호작용을 고려한 원전 보조건물의 총응답스펙트럼	안숙진, 박지훈	165
■ 그룹화된 원전설비 내진시험 지진응답 분석	김석철, 김두기, 박동희	167
■ 비탄성 에너지 흡수 계수를 고려한 앵커의 지진취약도 평가	임승현, 곽신영, 최인길, 정재욱, 김석철	169
■ 수직 평저 유체저장탱크의 지진취약도 분석 방법에 대한 비교 검토	조성국, 소기환, 모지훈	171
■ 국외 기준 분석을 통한 설비 내진검증 기준 제안	김정한, 홍기증	173



국내 액상화 설계기준 개정 연구

내진설계 일반(KDS 17 10 00)개정안 - 액상화 평가 관련

Revision Proposal of Seismic Design Guidelines(KDS 17 10 00) - Liquefaction Triggering

이진선*1) 추연옥** 김병민*** 강기천**** 박헌준***** 김재현*****
Lee, Jinsun Choo, Yunwook Kim, Byungmin Kang, Gichun Park, Heonjoon Kim, Jaehyun

지난 2016, 2017년 연이어 발생한 경주, 포항지진은 지진재해에 대한 사회 전반의 인식을 일거에 전환시키는 큰 사건이었다고 할 수 있다. 특히, 2017년 규모 5.4 포항지진으로 인하여 포항일대에서 관측된 액상화 현상은 사회 및 학계의 지대한 관심으로 이어져, 해외 액상화 평가기준을 그대로 차용하고 있는 우리나라 액상화 평가기준에 대한 검토필요성이 제기되어 2018년 한국건설기술연구원과 한국지반공학회의 주도로 “액상화 공통설계기준 제정 및 중·장기 개선 방안 수립연구”를 시행, 국토교통부의 “내진설계일반(KDS 17 10 00)”의 액상화관련 기준을 제정하였으며 후속 연구로 2019년 국토교통과학기술진흥원의 건설기술 연구사업인 “지반함몰 및 액상화에 관한 지하안전 위험도 평가 고도화 기술개발” 사업단이 발족하였다. 한국지진공학회에서는 지난 2021년 지반구조물 내진설계위원회를 주축으로 상기 연구사업의 성과에 기반하여 액상화 평가기준 및 해설서 개정안 마련하였다. 개정안 마련을 위하여 2018년 시행된 “액상화 공통설계기준 제정 및 중·장기 개선방안 수립연구”의 연구결과와 지난 2년(2019~2020)간 시행된 사업단의 연구성과를 분석하였으며, 추가로 액상화 피해사례에 근거한 해외의 액상화 평가기준을 수집·분석하여 개정안에 반영하였다. 본 논문에서 소개하는 개정안의 주요내용은 다음과 같다.

- 1) 액상화평가 관련용어의 명확한 정의
 - 반복전단응력비(CSR, Cyclic stress ratio), 반복저항응력비(CRR, Cyclic resistance ratio)
 - 부지특성평가(Site characterization), 지반응답해석(Site response analysis)
- 2) 제3자 검증을 통한 내진설계의 신뢰성 확보방안 제시
 - 지반응답해석결과 및 절차에 대한 제3자 검증(Peer review)절차의 도입
- 3) 예비평가 방법의 구체화
 - 액상화 발생가능성이 없는 지반의 분류법 및 입도분포곡선의 제시
- 4) 현장, 실내시험을 이용한 반복저항응력비(CRR)의 결정방법 구체화
 - 표준관입시험, 콘관입시험, 전단파속도 등을 이용한 CRR결정방법 제시
 - 반복삼축강도시험(KS F 2498)방법의 제정 및 적용

* 정회원, 원광대학교 토목환경공학과, 교수 (E-mail: blueguy@wku.ac.kr)

** 정회원, 공주대학교 토목환경공학과, 교수 (E-mail: ywchoo@kongju.ac.kr)

*** 정회원, UNIST, 도시환경공학부, 교수 (E-mail: byungmin.kim@unist.ac.kr)

**** 경상국립대학교, 토목공학과, 부교수 (E-mail: gkang@gnu.ac.kr)

***** 서울과학기술대학교, 건설시스템공학과, 교수 (heonjoon@seoultech.ac.kr)

***** 강원대학교 건축토목·환경공학부 교수 (jaehyun2@kangwon.ac.kr)

5) 액상화 평가방법의 제시

- 지반응답해석을 이용한 CSR의 결정방법 명기
- 지반응답해석을 위한 표준절차 제공

6) 지반응답해석, 액상화 평가에 사용되는 입력지진기록 선정방법의 제안

- 스펙트럼 보정방법에 대한 설명 추가
- 지반응답해석을 위한 지진기록의 조합방법, 결과분석방법의 제안

상기 개정안은 한국지진공학회 및 한국지반공학회의 지반내진공학 전문가 그룹을 중심으로 수행되었다. 특히, 2017년도 발생한 포항지진의 액상화 사례에 대해서 심도깊은 사례연구를 진행하여 기준안에 반영하였으며 연구내용은 ‘포항지진 액상화 상세분석기술서’의 형태로 연구보고서[1]에 수록되어 있다. 외국기준의 검토는 지진활동이 빈번하여 액상화 피해사례가 있는 국가의 기준을 중심으로 이루어졌다. 미국, 일본, 뉴질랜드 기준을 중심으로 검토가 이루어졌으며, 이탈리아, 그리스 등 유럽의 기준에 대한 검토도 이루어졌다. 본 개정안을 통하여 우리나라 액상화 사례에 기반한 액상화 판정기준을 제시하고, 외국의 최신기준과의 비교검토를 통하여 명확한 판정기준을 제시하고자 한다. 제안된 개정안은 개정안 준비과정에서 많은 외부 전문가 그룹의 의견과 조언을 반영하여 완성되었으며, 앞으로 우리나라 내진설계기술 및 기존시설물의 내진성능평가, 나아가 성능기반 내진설계기술의 발전에 큰 역할을 할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다.
(과제번호 22SCIP-C151438-04)

참고 문헌

1. Earthquake Engineering Society of Korea(EESK), Revision work for liquefaction criteria reflecting domestic site characteristics and seismic activities, Report No. KICT 2021-067, 2021

액상화 평가를 위한 반복삼축압축시험 표준화

standardization of cyclic triaxial test for liquefaction assessment

김종관*1)
Jongkwan Kim

이석형**
Seokhyung Lee

박가현***
Kahyun Park

한진태****
Jin-Tae Han

1964년 알래스카 및 니이가타 지진에서 액상화가 처음 보고된 이래 액상화에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. 국내에서도 2017년 포항지진에서 계기지진 이래 최초로 액상화 현상이 보고된 후 연구가 활발하게 수행되고 있다. 액상화를 평가하는 방법은 크게 지진외력을 평가하는 부분과 지반의 액상화에 대한 저항성을 평가하는 부분으로 나뉜다. 지반의 액상화에 대한 저항성을 평가하는 방법에는 실내실험을 통한 방법과 지반정수(표준관입시험 타격횟수 등 현장실험결과)등을 바탕으로 한 간편법이 있다[1]. 일반적으로 내진설계 시 액상화평가를 수행할 때는 구조물기초구조설계지침 등에서 제시하는 간편법을 바탕으로 액상화 발생 가능성을 평가한다. 간편법만으로는 현장지반의 다양한 조건을 반영하기 어렵기 때문에 중요구조물 및 간편법을 통한 액상화 평가 결과 안전율 1.0부근의 결과가 도출될 경우 현장시료를 활용한 실내실험을 수행하여 그 결과를 보완하는 방법도 행해진다. 하지만, 2020년까지 국내에는 액상화평가를 위한 객관화된 표준 실내실험방법이 존재하지 않아 실험을 수행하는 기관에 따라 각자가 신뢰하는 문헌의 내용을 중심으로 실험이 진행되어 실험수행기관에 따라 실험결과가 큰 차이를 나타내는 등 실내실험결과의 신뢰성에 많은 의문이 제기되어왔다.

이 연구에서는 액상화 평가를 위해 가장 널리 활용되는 반복삼축압축실험을 대상으로 국내외 문헌 및 기준을 조사하고 실내시험 표준(안)을 마련하였으며, 국내환경에 적합하도록 기술적 내용을 검토한 후 이를 바탕으로 KS표준으로 등록하였다(KS F 2498, Fig. 1).

흙의 액상화 저항강도를 평가하기 위한 실내실험 방법으로 ‘반복 삼축 강도 시험’에 대한 KS 표준이 제정되었다. 본 표준은 기본물성치에 관한 국내 기준과 더불어 미국 및 일본 등의 반복 삼축 강도 시험법을 인용하였으며, 국내 지진발생 형태와 규모에 적합한 실험방법을 제시하고자 하였다. 하나의 일관된 기준을 제시하고자 실험 장비 및 결과지표들을 나타내는 용어와 이에 대한 정의를 확립하였으며, 실험장비에 대한 상세한 제원과 실험준비과정을 구체적으로 설명하였다. 특히 실험결과에 큰 영향을 주는 공시체 제작과정 상에 불교란시료, 교란시료 및 동결시료를 구분하여 준비과정을 상세하게 제시하였으며, 특히 교란시료의 경우 다짐법과 자유낙하법 두 가지의 시료 조성 방법을 제시하였다.

공시체의 설치, 포화, 압밀, 반복제하 등의 실험과정 전반에 대하여 주의해야 할 부분등에 관하여 상세하게



Fig. 1. Standardization of liquefaction assessment test

* 한국건설기술연구원, 수석연구원 (E-mail: jongkwan@kict.re.kr)

** 한국건설기술연구원, 박사후연구원 (E-mail: seokhyung@kict.re.kr)

*** 한국건설기술연구원, 수석연구원 (E-mail: kahyunpark@kict.re.kr)

****정회원한국건설기술연구원, 연구위원 (E-mail: jimmyhan@kict.re.kr)

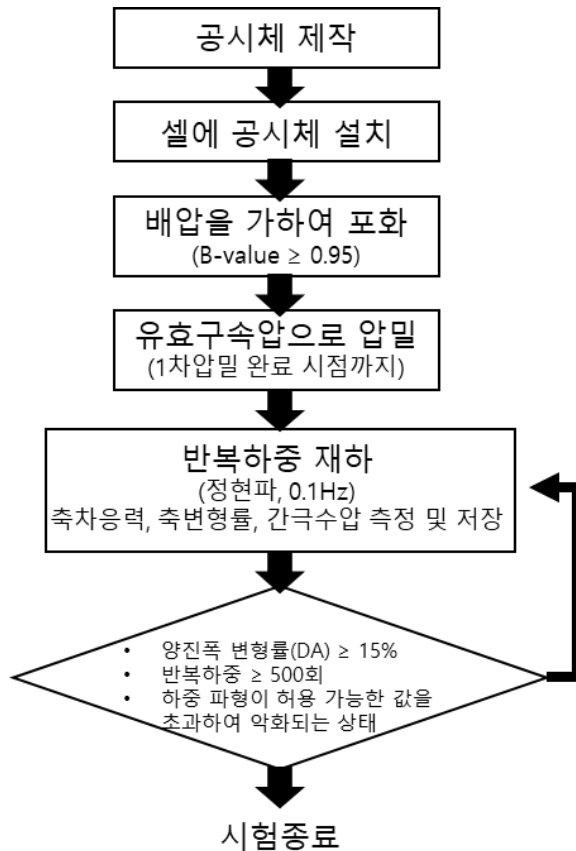


Fig. 2. Flow chart of cyclic triaxial test

화 저항강도는 재하주파수에 거의 영향을 받지 않는다는 점과 시험장비의 성능 등을 고려했을 때 최대한 천천히 재하 할수록 정확한 결과를 얻을 수 있기 때문에 권장주파수로 0.1Hz를 제시하였다. 반복재하는 양진폭 변형률이 15%를 넘거나 반복재하횟수가 500회를 넘을 경우 및 공시체가 더 이상 형상을 유지하지 못할 경우 종료하도록 제시하였다.

액상화 평가를 위한 반복저항응력비의 산출은 반복응력비를 달리한 최소 3회 이상의 실험을 진행하여 양진폭 축방향 변형률 5%를 기준으로 산정하도록 하였다.

본 연구에서는 표준의 부재로 인해 국내액상화 실내실험에서 발생하고 있는 결과의 차이를 줄이기 위해 흙의 액상화를 평가하는 반복삼축강도시험의 표준화를 수행하였다. 실험방법의 표준화에 따라 실험결과의 편차가 얼마나 줄어드는지에 관해서는 현재 연구를 수행중이며 추후 이에 관해서 발표하도록 할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다.
(과제번호 22SCIP-C151438-04)

참고 문헌

1. Seed, H.B., Idriss, I.M., 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division 97 (SM9), 1249-1273.
2. 일본지반공학회, 2020. 지반재료실험의 방법 및 해설.

작성되었으며, 간극수압계수(B), 압밀 압력비의 범위, 실험 종료 조건 등에 대하여 구체적인 수치를 결정하여 제시하였다. 구체적인 실험 과정과 더불어 도출된 결과의 계산 및 분석방법에 대한 설명을 포함하였으며, 일관된 실험절차와 결과 분석에 따른 신뢰성 확보를 도모하고자 하였다. Fig. 2는 KS표준의 실험과정을 Flow Chart로 표현한 것이다.

먼저 본 표준에서는 실험에 사용하는 공시체의 크기를 70mm로 설정하였다. 일본 실험기준(흙의 반복 비배수 삼축시험방법 JGS 0541-2020[2])을 보면 공시체 직경이 70mm이하일 때는 액상화저항강도의 편차가 커지는 것으로 나타나기 때문이다. 다만, 현재 국내에 도입되어있는 반복삼축실험장비의 제원 및 현장채취시료의 크기 등을 고려했을 때 50mm에 대한 검토가 필요하나, 현 단계에서는 아직 그 결과가 충분하지 않아 제외하였다.

포화유무를 판단하는 간극수압계수(B)의 측정방법을 상세하게 제시하고 포화의 기준을 0.95이상으로 명확하게 제시하였다. 또한, 반복재하시 재하주파수 0.1~2.0Hz를 사용하도록 하였다. 일본 실험기준(JGS 0541)을 보면 0.1~1.0Hz범위 내에서 실험하도록 권장하고 있으며, 기존 연구를 보면 0.1~1.0Hz까지는 주파수에 따른 액상화저항강도의 차이가 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다. 액상

철도제방 액상화 피해 영향인자 도출을 위한 1g 진동대실험

1g Shaking Table Test to derive Damage Influencing Factors on Liquefaction of Railway Embankment

하익수*1)
Ha, Ik-Soo

오이태**
Oh, I-Tae

이원준***
Lee, Won-Jun

유민택****
Yoo, Min-Taek

국내 『내진설계기준 공통적용사항』 및 『내진설계 일반(KDS 17 10 00 : 2018)』 등에 제시된 액상화 평가 내용은 구조물이 위치한 기초지반의 액상화 발생 여부만을 판단한다. 액상화로 인한 구조물 기초지반의 보강 여부는 액상화로 인해 유발되는 개별 구조물의 피해도 평가를 통해 결정되어야 한다. 제방의 액상화 피해도 평가는 기초지반의 액상화 발생 정도 및 피해 정도를 나타낼 수 있는 객관적인 지표들이 불명확하여 구조물의 안정성 여부 및 기초지반의 보강여부를 결정하기가 어렵다. 액상화로 유발되는 기초지반의 침하량을 산정하는 연구(Tokimatsu et al., 1987; Ishihara et al., 1992)와 액상화가능지수(LPI, Liquefaction Potential Index)로부터 기초지반의 액상화로 인한 피해도를 평가하는 연구(Iwasaki et al., 1978)가 수행된 바 있다. 그러나 이러한 연구들에서 제시하고 있는 결과들은 전형적인 1차원 문제에 대한 해만을 제시할 뿐이며, 제방을 포함한 상부 구조물과의 2차원 내지는 3차원적인 상호작용이 고려된 침하량 산정이나 피해도 평가는 불가능하다. 이러한 상황은 1차원 문제들에 비해 실제 문제들의 복잡성뿐만 아니라 정교한 실험자료가 부족한 것에 기인한다. 이러한 측면에서, 제방과 기초지반 간의 2차원적인 상호작용에 의한 침하 거동을 이해하는 데 필요한 실험자료의 획득이 필수적이다. 본 연구에서는 국내·외 문헌조사 결과를 참고하여, 액상화 피해 영향인자를 후보군을 도출하고, 도출된 후보군 지표를 변화시킨 1g 진동대 실험을 수행하여 철도제방의 액상화 피해도와와의 상관관계를 도출하고자 하였다.

본 연구에서는 액상화 피해도 평가 지표 후보군으로 제방높이(H)와 제방 직하부 기초지반의 비액상화층 두께(H_1)를 선정하였다. H는 호남고속철도와 경부고속철도 실단면, 철도설계기준을 참조하여 검토 범위를 설정하였다. H_1 은 기초지반 지표에서부터 하부로 액상화가 발생할 수 없는 조건을 갖은 층까지의 두께를 의미한다. 모형실험에서 H_1 은 지하수위 상부의 중간 조밀도 이상의 모래지반인데, 해당층은 액상화층을 조성한 후, 디워터링을 통한 지하수위의 저하와 이에 따른 지반 밀도의 증가를 통해 구현하였다. 하천제방과 달리 철도제방은 제체 내 액상화가 발생하기 어렵고, 하부지반의 액상화로 인한 측방 흐름(lateral flow)에 반응해서 형상 변화는 있으나 제방 자체의 침하량은 상대적으로 작다. 이러한 점을 감안하여, 본 연구에서는 제방 자체의 침하특성은 가급적 배제하고 기초지반의 액상화로 인한 침하특성 파악에 집중하고자, 대상 제방을 잘 다져진 노상에 축조된 철도제방으로 국한하였다. 모형시험에서 제방은 자갈로 축조하여 자체 침하 및 모세관현상을 최소화하였다. 영향인자 후보군을 변화시켜 총 7 Case의 실험조건에 대해 동일한 지진하중에서의 1g 진동대 실험을 수행하였다. 실험 동안에 기초지반과 제방 상부에 가속도계, 간극수압계, 변위계를 설치하여 응답을 계측하였다. 이러한 시험조건을 1g 진동대 모형시험으로 모사하는 방법과 절차를 상세하게 제시하였으며(Table. 1 참조), 응답 기록을 분석하여 제방 하부 기초지반의 액상화와 측방유동의 정도를 파악하고, H와 H_1 이 제방 정상부의 침하량에 미치는 정성적 또는 상대적 정량적 영향을 분석·제시하였다.

제방높이(H) 변화 실험결과(Fig. 1 (a)와 (b))에서, 제방높이 10cm의 A17 데이터에 가속도 축 왜곡이 보이는데 이는 제방 선단(toe)부의 측방유동 흔적이며, 제방 직하부 간극수압계 P52를 보면 상재압의 영향으로 과

* 정회원·경남대학교 토목공학과, 교수 (E-mail: geotech@kyungnam.ac.kr)

** 정회원·경남대학교 토목공학과, 박사과정 (E-mail: dh2xo12@naver.com)

*** 비회원·경남대학교, 토목공학과, 석사과정 (E-mail: wonjun5389@naver.com)

**** 정회원·한국철도기술연구원, 선임연구원 (E-mail: thezes@krii.re.kr)

잉간극수압비가 감소함을 확인할 수 있다. 그리고 제방 좌측 선단(toe) 하부 간극수압계 P48, 자유장 하부 간극수압계 P57를 보면 제방 하부에서 자유장쪽으로 측방유동의 영향으로 인해 과잉간극수압은 오히려 증가하는 것이 확인된다. 제방이 없는 지반($H=0$)과 높이 10cm인 제방의 침하량 데이터를 비교하면 제방이 없는 경우에 비해 제방 높이 10cm의 경우가 침하량이 2배 크다는 것이 확인된다. 비액상화층(H_1) 변화 실험결과 (Fig. 1 (c)와 (d))에서, 가속도 데이터(A17)를 보면 $H_1=0$ cm일 때는 가속도측 왜곡으로 선단(toe)부의 측방유동 흔적이 보이지만, $H_1=10.5$ cm 결과의 가속도측 왜곡은 미미해 측방유동이 거의 없는 것으로 나타난다. 간극수압계 P57, P48, P52를 비교하면, H_1 의 증가, 측방유동 감소로 인해 기초지반의 액상화, 액상화로 인한 Consolidation settlement가 감소되는 것이 확인되었고, $H_1=10.5$ cm인 경우의 침하량은 $H_1=0$ cm인 경우의 제방 침하량의 약 1/2에 불과함이 확인되었다. 액상화 가능성이 있는 기초지반 위에 제방이 있는 경우, 제방의 침하량(피해도)은 비액상화층의 두께(H_1), 제방 높이(H)에 대한 비액상화층 두께(H_1)의 비(H_1/H)의 영향이 큰 것으로 확인되었다.

Table 1. 1g shaking table test conditions considering the influencing factors on liquefaction.

Affecting Factors	Case number	Experimental conditions	Detailed conditions	
			Prototype	Model
Embankment Height (H)	1	The height of the embankment is adjusted	H= 0m	H= 0cm
	2		H= 2m	H= 5cm
	3	The thickness of the liquefiable layer is fixed (50cm)	H= 4m	H= 10cm
	4		H= 6m	H= 15cm
Non-Liquefied layer thickness (H_1)	5	The height of the embankment (10cm) is fixed(10cm)	$H_1= 1.8$ m	$H_1= 4.5$ cm
	6	The slope is fixed (1:1.8)	$H_1= 4.2$ m	$H_1= 10.5$ cm
	7	The non-liquefiable layer thickness is adjusted	$H_1= 5.4$ m	$H_1= 13.5$ cm

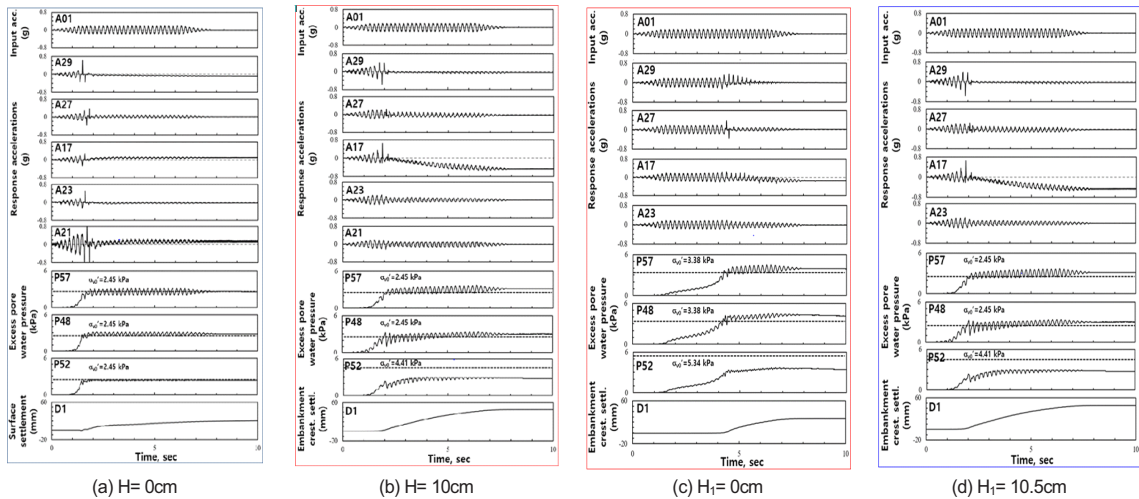


Fig. 1. Time histories of input and response accelerations, excess pore water pressure, and crest settlement

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원(KAIA22SCIP-C155167-04)의 지원으로 수행되었음.

참고 문헌

1. Ishihara, K., & Yoshimine, M. (1992). Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes. *Soils and foundations*, 32(1), 173-188.
2. Iwasaki, T. (1978). A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan. In *Proc. Second Int. Conf. Microzonation Safer Construction Research Application*, 1978 (Vol. 2, pp. 885-896).

액상화 지반에 근입된 교각 말뚝기초의 지진거동

Seismic Behavior of Bridge Pile Foundation in Liquefied Ground

황병윤*1)

Hwang, Byong-Youn

황태훈**

Hwang, Tae-Hun

김성렬***

Kim, Sung-Ryul

지반 액상화는 지진 하중에 의해 느슨한 포화 사질토 지반이 강도와 강성을 잃고 유체처럼 거동하는 현상을 일컫는다. 액상화된 지반은 근입된 기초의 과도한 침하, 회전, 변형 등을 일으킬 수 있으며 이에 따른 상부 구조물의 2차 피해를 일으킬 수 있다. 교량기초가 설치되는 해안 또는 강가 지반은 일반적으로 퇴적에 의해 형성된 느슨한 포화 사질토로 구성되어 액상화 현상에 취약한 것으로 알려져 있다. 특히, 해안 또는 강가 지반은 완만한 경사로 이루어져 액상화된 지반이 한 방향으로 흐르는 측방유동 현상이 발생할 수 있다.

액상화 지반의 측방유동은 교량기초에 심각한 손상을 일으켜왔다. 1964년 일본 Niigata 도로교 붕괴, 1991년 코스타리카 Limon Province 철도교 붕괴 등 액상화 지반의 측방유동에 의해 교량기초에 심각한 손상이 발생한 사례들이 다수 보고된 바 있다. 피해 보고 사례에 나타난 바와 같이 액상화 지반의 측방유동에 의한 교량기초의 피해는 국부적이거나 즉시 복구 가능한 수준에 머물지 않고 기초의 파손 및 교량의 유실과 같은 심각한 수준으로 나타났다.

국내에서도 2016년 9월 경주에서 발생한 규모 5.8의 한반도 최대 규모의 지진에 이어 2017년 11월 포항에서 발생한 규모 5.4의 지진으로 인해 지진에 대한 국민적 불안감이 급격히 증가하였다. 특히, 포항 지진에 의해 포항시 북구 송도동, 흥해읍 망천리, 흥해읍 흥안리 등에서 지반 액상화 현상이 공식적으로 보고되었다. 이와 같은 지진 위험도 증가에 따라 교량기초의 액상화 피해평가 및 설계에 관한 연구 필요성이 강조되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 액상화층 두께 및 지반 경사에 따른 액상화 현상으로 인한 교각 말뚝기초 및 기초 지반의 동적 거동을 평가하기 위해 1-g 진동대 모형실험을 수행하였으며, 실험 결과를 토대로 말뚝기초에 발생한 액상화 피해를 평가하였다.

교각 말뚝기초의 액상화 거동을 평가하기 위하여 대한민국 중부내륙선 이천-문경 구간에 위치한 문경1교의 교각 일부를 원형으로 선정하고 Iai(1989)의 1-g 상사법칙 제 3형태를 적용시켜 축소모형으로 제작하였다 [1]. 모형 말뚝은 재료적 한계로 인해 두께에 대한 상사관계를 적용시키는 것이 불가능하여 횡방향 거동에 지배적인 영향을 미치는 휨강성의 상사관계를 만족시키도록 두께를 조절하였다. 또한, 상부 구조물 하중에 의한 관성력의 영향을 모사하고자 질량 상사관계를 만족시키도록 상부 구조물의 형태를 단순화하여 제작하였다.

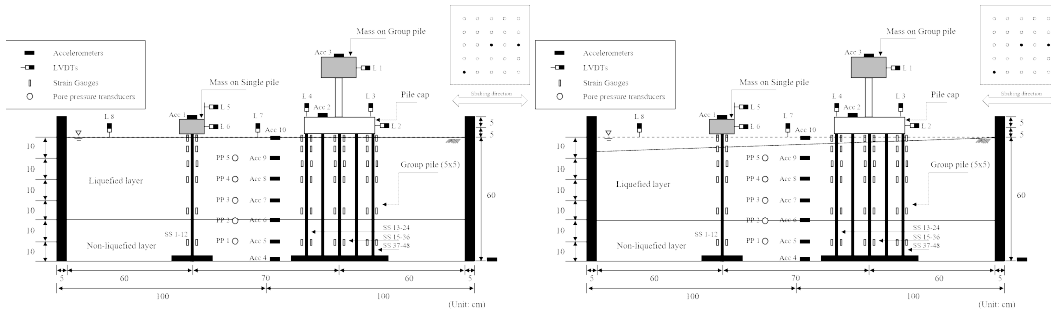
실리카 샌드를 사용하여 모형 지반을 조성하였으며, 액상화층의 경우 수중낙사법을 이용하여 느슨하게 조성하였고 비액상화층의 경우 공기압식 진동래머 장비를 사용하여 목표 상대밀도에 맞게 조성하였다. 경사 지반은 소형 스크래퍼를 사용하여 약 2.6% 정도의 경사도를 갖는 완경사면을 조성하였다.

본 연구에서는 모형 구조물 및 지반의 동적 거동을 평가하기 위하여 가속도계, 간극수압계, 변형률계, LVDT의 총 네 종류의 계측기를 사용하였다. 입력 지진파는 0.15g, 5Hz의 정현파를 사용하였고 액상화 발생을 위하여 8초간 가진하였다. 실험 조건(액상화층 두께, 지반경사 여부)에 따라 총 여섯 번의 실험을 수행하였으며, 각 실험 조건별 모식도를 Fig. 1에 나타내었다.

* 비회원.서울대학교 건설환경공학부, 박사과정 (E-mail: hbyzxx12@snu.ac.kr)

** 비회원.서울대학교 건설환경공학부, 석사과정 (E-mail: taehun95@snu.ac.kr)

*** 정회원.서울대학교 건설환경공학부, 교수 (E-mail: sungryul@snu.ac.kr)



(a) 수평 지반 조건

(b) 완경사 지반 조건

Fig. 1. 1-g 진동대 모형실험 모식도 예시

실험에 사용된 말뚝의 재료적 특성에 따른 균열 및 파괴 휨모멘트를 구한 뒤, 실험시 발생한 최대 휨모멘트와 비교하여 액상화층 두께 및 지반 경사에 따른 교각 말뚝기초의 피해를 평가하였다. Fig. 2는 실험을 통해 발생한 말뚝기초의 최대 휨모멘트 및 파괴 휨모멘트의 비와 전체 지반내 액상화층이 차지하는 비(H_{liq}/H)의 관계곡선이다. $H_{liq}/H \leq 0.5$ 구간에서는 발생 휨모멘트가 파괴 휨강도보다 작게 발생하여 피해가 발생하지 않았으나 $H_{liq}/H > 0.5$ 구간에서는 파괴 휨강도보다 큰 휨모멘트가 발생하면서 말뚝기초에 피해가 발생하였다. Fig. 3은 액상화층 두께가 동일할 때 지반 경사 유무에 따른 발생 휨모멘트 및 파괴 휨모멘트의 비와 H_{liq}/H 의 관계곡선이다. H_{liq}/H 가 0.33인 조건에서 수평 지반의 경우 파괴 휨강도보다 작은 휨모멘트가 발생하여 피해가 발생하지 않았으나 지반 경사로 인해 파괴 휨강도보다 큰 휨모멘트가 발생하였다. 따라서, 액상화 지반에 말뚝기초 시공시 내진안전성을 위해 액상화층 두께 및 지반 경사의 영향을 반드시 고려해야 할 것으로 판단된다.

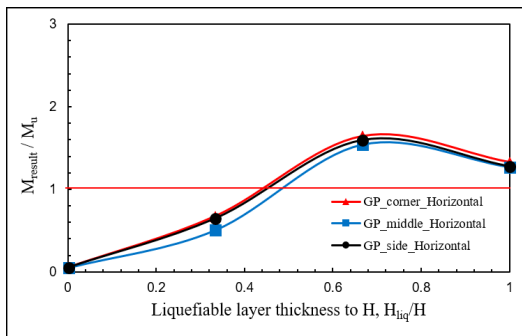


Fig. 2. 액상화층 두께별 말뚝기초의 휨모멘트 기반 피해평가

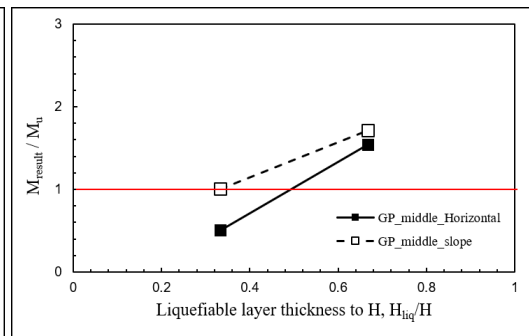


Fig. 3. 지반경사에 따른 말뚝기초의 휨모멘트 기반 피해평가

감사의 글

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원(21SCIP-C155167-03: MT21027)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- Iai, S. (1989), "Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1g Gravitational Field", Soils and Foundations, Vol. 29, No.1, pp. 105-118.

궤도시설물에 대한 액상화 피해평가 지표 도출

Establishment of indicator for Liquefaction-Induced Damage to Railway

유민택*1) 이명재**
Yoo, Mintaek Lee, Myoungjae

본 연구는 국가의 주요 SOC 기반시설 중 하나인 철도 시설의 액화 피해 평가방법을 제시하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해 우리나라의 철도설계 및 유지관리기준을 검토하였으며, 이를 바탕으로 평가 방법을 제안하였다. 액상화 피해에 대한 위험도 평가는 수직요철, 잔류침하, 횡변위 등을 평가하여 무피해등급, 주의등급, 심각등급으로 구분하였다. 액상화로 인한 피해를 평가하기 위해 3가지 단순화된 평가 방법과 유한차분법을 이용한 동적 수치해석 방법이 제안하였으며, 마지막으로 이러한 방법들을 호남고속선 노반에 적용하여 적용성을 검토하였다.

철도시설물의 선로유지관리지침에 따르면 경제성, 내구연한 및 열차운전의 안전을 위한 최적의 관리를 위하여 공용 전 준공 및 목표기준, 공용 후 주의 및 보수기준으로 고저틀림과 방향틀림을 관리하게 된다. 여기서 고저틀림이란 한쪽레일의 레일길이 방향에 대한 레일면의 높이차 (부등침하량)를 의미하며, 방향틀림이란 궤간 측정선에 있어서의 레일길이 방향의 좌우 굴곡차를 의미한다. 이 중 철도시설물의 지진시 액상화 피해평가 지표 도출을 위해서는 표 1의 공용 후 기준을 적용해야 한다. 고저틀림 및 방향 틀림 이외에도 잔류침하량 기준이 국가철도공단 KR C 04020 쌓기편 및 철도설계기준 KDS 47 10 25에 궤도 형식별로 수립되어 있으며, 이를 정리한 내용은 표 2와 같다. 일련의 고저틀림, 방향틀림 및 잔류침하량 기준은 철도 시설물의 기능이 수행될 수 있는 최소한의 기준이며, 내진성능 수준상에서 “기능수행수준”에 해당하게 된다. 즉, 해당 기준 이상의 변형이 발생하면 철도 시설물이 정상적인 기능을 수행할 수 없어지며, 이는 철도 시설물의 기능정지 및 즉시 복구 필요를 의미하게 된다.

표 1 일반철도 및 고속철도 궤도정비기준 (기능수행기준) (선로유지관리지침, 국가철도공단)

구 분		일반철도 [80<V≤120 km/h]		고속철도 [200 km/h 이상]	
		고저틀림	방향틀림	고저틀림	방향틀림
공 용 후	보수 기준	15mm≤ (3개월내 보수)	12mm≤ (2개월내 보수)	Nall≥18	Dall ≥ 16
	주의 기준	10mm≤	9mm≤	10≤Nall<18	12≤Dall< 16

표 2 궤도형식별 철도노반 허용잔류침하량 기준

* 정회원.한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원 (E-mail: thezes03@krri.re.kr)

** 정회원.한국철도기술연구원 철도구조연구실 박사후연구원 (E-mail: myungjae@krri.re.kr)

구 분		KR C-04020 쌓기편 국가철도공단	철도설계기준 KDS 47 10 25 (흙구조물) 국토교통부
공용후	자갈궤도	허용잔류 침하량 100mm	허용잔류 침하량 100mm
	콘크리트 궤도	허용잔류 침하량 30mm 이하 (노반 인수인계후) = 지반침하량 및 궤도구조에서의 침하량 (25mm) + 차하중에 의한 침하량 (5mm) 단, 분지모양으로 잔류침하가 발생될 경우 추가검토를 통해 잔류침하량 60mm 까지 허용가능	허용잔류 침하량 30mm 이하 (노반 인수인계후) = 지반침하량 및 궤도구조에서의 침하량 (25mm) + 차하중에 의한 침하량 (5mm) 단, 분지모양으로 잔류침하가 발생될 경우 추가검토를 통해 잔류침하량 60mm 까지 허용가능

일련의 검토된 기준을 바탕으로 표3과 같이 철도 시설물 액상화 피해평가 지표를 도출할 수 있다.
표 3 철도시설물 액상화 피해평가 지표

액상화 위험도	자갈궤도		콘크리트 궤도	
피해 없음	고저틀림, 방향틀림, 잔류침하량이 모두 “주의” 이하 수준으로 발생		고저틀림, 방향틀림, 잔류침하량이 모두 “주의” 이하 수준으로 발생	
주의 (철도 시설의 기능 정지 및 즉시 복구 필요)	고저틀림	$N_{all} \geq 18$	고저틀림	$N_{all} \geq 18$
	방향틀림	$D_{all} \geq 16$	방향틀림	$D_{all} \geq 16$
	잔류 침하량	100 mm	잔류 침하량	30 mm
심각 (철도시설물의 붕괴)	수평변위 300mm 이상 혹은 성토고 높이 1% 이상 변위 발생		수평변위 300mm 이상 혹은 성토고 높이 1% 이상 변위 발생	

감사의 글

이 연구는 국토교통부 건설기술연구사업(KAIA22SCIP-C155167-04)의 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 선로유지관리 지침, 국가철도공단
2. KR C-04020 쌓기편, 국가철도공단
3. KDS 47 10 25, 국토교통부

현장 및 실내실험을 활용한 포항 액상화 평가

Liquefaction Assessment in Pohang City through In-Situ and Laboratory Tests

조영규*1)
Cho, Youngkyu김기석**
Kim, Kiseog한진태***
Han, Jin-Tae김병민****
Kim, Byungmin

2017년 포항시 흥해읍에서 발생한 리히터 규모(M_L) 5.4 지진은 진앙지를 중심으로 반경 10km 이내 농경지에서 다수의 샌드보일과 주택지역에서 상당한 지반침하를 초래했다. 이 같은 관찰결과들은 지진에 의해 발생한 액상화 현상으로 간주되며, 국내에서 처음으로 발생한 사례이다. 액상화 유발 가능성은 보편적으로 현장실험을 통해 안전율 주상도 계산하여 그 값이 1에 가깝거나 작은 값을 기준으로 임계치를 발견함으로써 평가된다. 대표적인 방법들은 콘관입시험(CPT), 표준관입시험(SPT) 그리고 전단파속도(V_s) 측정들이 존재한다[1,2].

이 연구에서는 현장실험과 실내 물성실험을 통하여 포항 지진 시 관찰된 지표면 흔적들이 지진으로 유발된 액상화 현상임을 확인하고자 한다. 이 평가는 다음의 세 가지 주요점들을 시사한다. 세 종류의 현장실험(SPT, CPT, 그리고 다운홀시험: DH- V_s)을 적용한 평가, 해외의 액상화 사례들을 바탕으로 개발된 간편법을 국내 사례에 적용, 그리고 해외 사례들은 대부분 규모 6이상 지진들에 의한 결과들로 구성되었다는 점들이다. 또한, 세립질 흙(실트 및 점토)에서 액상화 현상이 포항 액상화 사례에서도 관찰되어 체가름 실험(grain size distribution) 및 연경도 실험(soil index)을 통해 평가하였다[3].

Fig. 1은 포항시의 액상화 흔적이 관찰된 지역들에서 수행한 현장실험의 위치(6곳)들을 나타낸다. 각 위치들은 Table 1에 제시된 진앙거리 값을 바탕으로 결정되었다. 액상화에 대한 안전율은 반복저항비(Cyclic Resistance Ratio, CRR)를 반복응력비(Cyclic Shear Stress Ratio, CSR)로 나누어 계산된다. CRR과 CSR은 [1]과 [2]에서 각각 제시한 방법(CRR: 콘 저항치, N치, V_s 와 상관관계식, CSR: 지표면 최대가속도-PGA 및 응력저감계수- r_d)을 적용하였다. CSR 계산의 경우, 액상화가 발생한 인근 부지로부터 예측 가속도 확보가 어렵기 때문에 지반운동예측모델(NGAWest2)을 활용하여 지표면에서의 예측 PGA값들을 적용하였다(Table 1).

Fig. 2는 위치 1에서 수행된 지반조사결과와 액상화 안전율 평가결과를 보여준다. Fig. 2의 a부터 e까지는 각 시험으로부터 예측된 결과를 나타낸다. 시추작업 시 육안으로 분류된 통일 분류법(USCS)의 기호, N치와 콘 저항모두 깊이에 따라 유사한 저항성, 15m 깊이에서 기반암 발견 및 일정한 V_s , 그리고 점토층으로 분류된 10m 층에서 과잉간극수압 발생을 확인 할 수 있다. Fig. 2의 f부터 g까지는 콘 관입시험 결과 분석 및 액상화 평가 결과를 보여준다. 지반지반분류(I_c)는 육안분류 USCS 기호와 유사성을 보여주며, CSR 및 CRR 계산 결과 세 실험방법 모두 15m 깊이 이내 토층에서 안전율이 1보다 작거나 가까운 값을 보여준다. 이는 현장에서 관찰한 샌드보일 현상과 부합하는 결과이다. Fig. 3은 1번 위치의 11m에서 채취한 흙 샘플을 활용하여 실내 물성실험 결과를 보여준다. Fig. 3a는 입도분포 곡선을 보여주며 점선으로 표시된 범위(액상화 발생 가능)를 벗어나는 결과를 보여주지만, Fig. 3b의 소성지수 도표에서 검정색 실선(Zone A)과 점선(Zone B)의 액상화 발생 가능 영역 내의 소성지수 및 액성한계 값들이 측정되었다. 이는 Fig. 2에서 세립토층

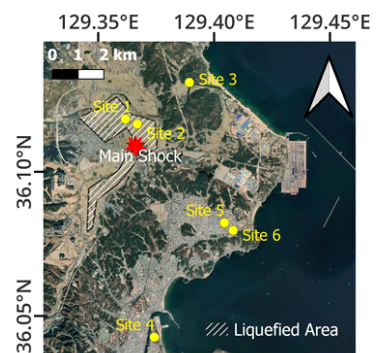


Fig. 1. Map showing the site locations where the in-situ tests were performed in the Pohang city

* 비회원-울산과학기술원(UNIST) 도시환경공학부, 박사후연구원 (E-mail: youngkyu@unist.ac.kr)

** 정회원(주)희송지오테크, 대표이사 (E-mail: kskim@hsgeo.co.kr)

*** 정회원-한국건설기술연구원(KICT), 연구위원 (E-mail: jimmyhan@kict.re.kr)

**** 정회원-울산과학기술원(UNIST) 도시환경공학부, 부교수 (E-mail: byungmin.kim@unist.ac.kr)

(10m ~ 15m)에서 안전율이 1보다 작은 액상화 발생한 결과와 부합한다. 다른 5개의 위치들에서도 유사한 안전율 주상도와 실내실험의 기준에 부합되는 결과들을 얻었다. 이는 해외의 평가 기준이 국내 액상화 사례를 적절히 평가함을 보여준다.

Table 1. Information on the liquefied sites

Site no.	R_{epi} (km)	V_{s30} (m/s)	Predicted PGA (g) at ground surface	Ground deformation
1	1.1	294	0.31	Sand boils
2	0.9	307	0.31	Sand boils
3	3.2	138	0.27	Sand boils
4	7.4	158	0.23	Sand boils
5	4.5	439	0.23	Ground settlements
6	5.0	303	0.24	Ground settlements

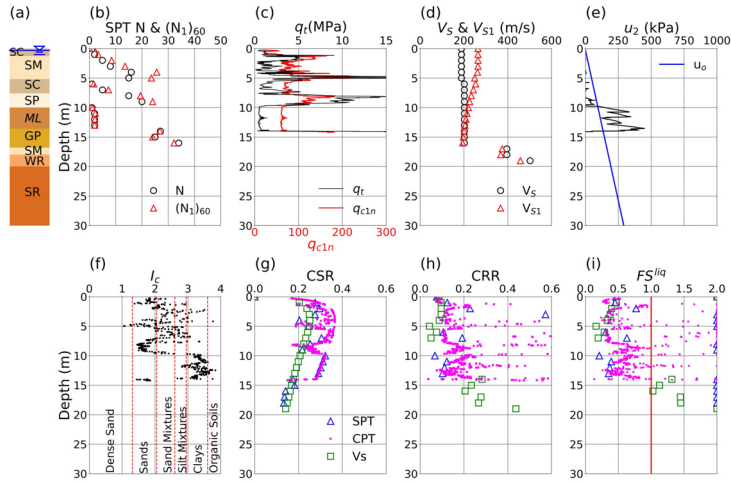


Fig. 2. Results of field measurement and liquefaction triggering assessment at Site 1

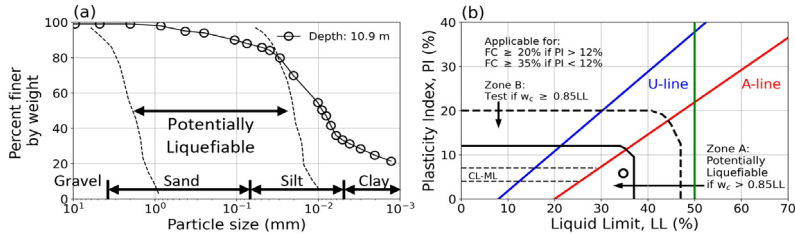


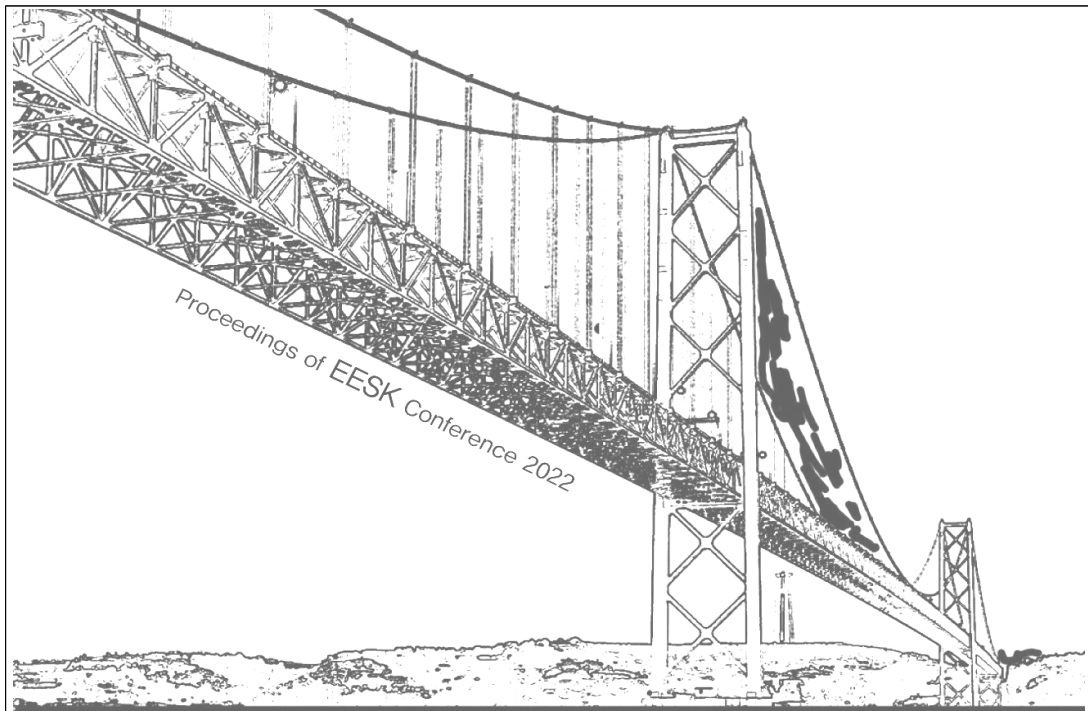
Fig. 3. Laboratory test results: a. grain size distribution and b. plasticity chart at Site 1

감사의 글

이 연구는 국토교통부 건설기술연구(20SCIP-C151438-02) 프로그램의 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Boulanger R., and Idriss I. CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. Report no. UCD/CGM-14/01, Center for Geotechnical Modeling, University of California at Davis. 2014.
2. Andrus R., Stokoe K., and Juang C. Guide for shear-wave-based liquefaction potential evaluation. Earthquake Spectra. 2004;20(2):285-308.
3. Bray J., and Sancio R. Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils. 2006;132(9):1165-1177.



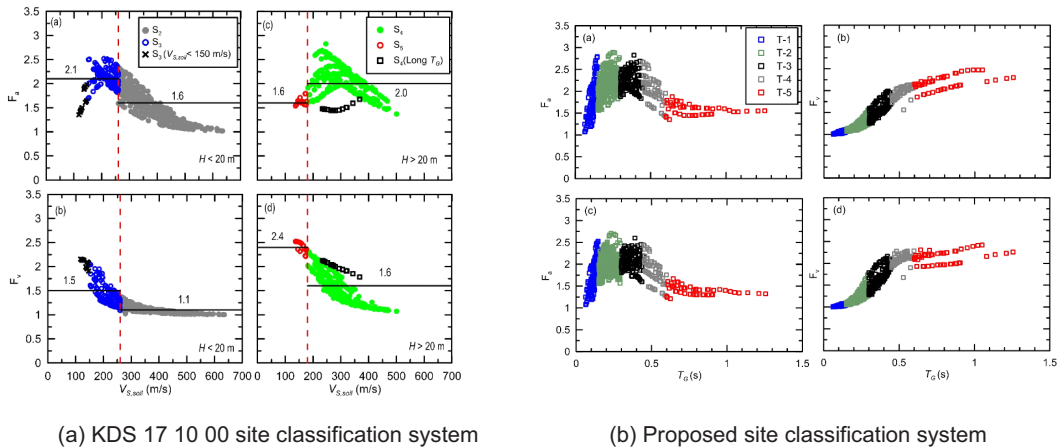
지반운동산정과 지반구조물 지진해석

국내 지반분류체계 및 설계스펙트럼 개선 방법

Revision of Site Classification System and Design Spectrum of Korea

박두희*1)
Park, Duhee이용국**
Lee, Yong-Guk아킵 무하마드***
Aaqib, Muhmmad

국내에서는 기반암 심도(H)와 토층 평균 전단파속도($V_{s,soil}$)에 기초하여 내진설계를 위한 토층을 5종으로 분류한다. $H = 20\text{m}$ 를 기준으로 지반이 S2와 S3 그리고 S4와 S5로 분류되는데 이 방법으로 생성된 표준설계스펙트럼은 지반응답해석의 결과와 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 현 지반분류체계와 설계스펙트럼을 평가하기 위해서 일련의 비선형 지반응답해석을 수행하였다. 기반암까지의 측정 기록이 있는 탄성파로 계측된 전단파속도 주상도만을 사용하였다. 지반의 변이성을 고려하기 위하여 계측 주상도별로 30개의 무작위로 생성된 주상도를 해석에 적용하였다. 총 924개의 주상도와 44,352회의 해석을 수행한 결과로 증폭계수를 제안하였다. 국내에서 일반적으로 사용되는 등가선형해석이 아니라 전단강도 보정이 적용된 비선형 해석을 사용되었다. 전단강도는 전단파속도로부터 등가 SPT N치를 추정하여 산정하였다. 증폭계수 F_a 와 F_v 는 Manandhar et al. (2017)과 Kim et al. (2018)이 사용한 주기범위를 적용하여 산정하였다. 단, 기존 연구에서 F_v 의 경우 평균이 아니라 $+1\sigma$ 를 적용한 반면 본 연구에서는 평균값을 적용하였다. 기존 연구와는 확인 결과 Manandhar et al. (2017)의 F_a 와 F_v 는 큰 차이가 없는 것을 확인하였다. KDS 17 10 00(MOLIT, 2018)의 지반분류 기준을 적용하여 $V_{s,soil}$ 에 대해서 F_a 와 F_v 를 도시한 결과 특히 S4에 많은 부지가 분류되며 이의 분산이 매우 큰 것을 확인하였다(Fig. 1). 반면, S5 등급으로는 극히 소수의 주상도만이 분류되며 큰 의미가 없는 것으로 나타났다. F_a 보다는 F_v 의 분산이 큰 것으로 나타났다. 또한 S2와 S3 그리고 S4와 S5의 $V_{s,soil}$ 에 대한 분포 특성이 유사하여 현 체계는 증폭특성을 기초로 분류된 것이 아니라는 것을 확인할 수 있다. 지반의 증폭 특성에 기초한 분류체계를 찾기 위하여 다양한 방법을 적용해 본 결과, 지반의 고유주기(T_G)가 가장 효과적인 것을 확인하였다(Fig. 1b). T_G 의 함수로 F_a 와 F_v 를 도시한 결과, F_a 는 증가하다가 감소하는 반면, F_v 는 지속적으로 증가하는 것을 확인하였다.

Fig. 1. F_a and F_v calculated for KDS and proposed site classification systems

* 정회원.한양대학교 건설환경공학부, 교수 (E-mail: dpark@hanyang.ac.kr)

** 정회원.한양대학교 건설환경공학부, 박사과정 (E-mail: dwcollector@hanyang.ac.kr)

*** National University of Technology at Islamabad 토목공학과, 조교수 (aqi443@hotmail.com)

이는 장주기 지반에서 F_a 는 감소하고 F_v 는 증가하는 특성을 잘 반영한 것으로 보인다. Table 1에는 제안되는 지반분류체계를 정리하였다. 토층은 T-1부터 T-5까지 총 5가지 등급으로 분류하였다. 각 지반분류별 F_a 와 F_v 는 Fig. 1의 주기범위 중간에서의 값을 적용할 것을 제안한다.

Table 1. Proposed site classification based on site period

Site Class	Ground Type	T_G (s)	Median T_G (s)
R	Rock	< 0.06	-
T-1	Deposits with considerable weathered rock thickness	$0.06 - 0.15$	0.12
T-2	Deposits of dense soils	$0.15 - 0.30$	0.22
T-3	Deposits of medium-dense soils	$0.30 - 0.45$	0.37
T-4	Deposits of medium-dense to loose-medium soils	$0.45 - 0.60$	0.51
T-5	Deposits of loose soil	$0.60 - 1.2$	0.78

위와 같이 지반을 분류하고 계산된 F_a 와 F_v 를 적용하여 설계스펙트럼을 생성하여도 지반응답해석 결과와는 장주기에서 큰 차이가 발생하는 것으로 나타났다(Fig. 2). 이는 단주기 특성이 강하여 중장주기의 성분이 크게 감소하는 국내 부지의 증폭 특성을 국외 기준을 기초로 하는 설계스펙트럼이 모사하지 못하기 때문이다. 따라서 설계스펙트럼의 장주기 부분의 조정이 필요하다고 판단된다.

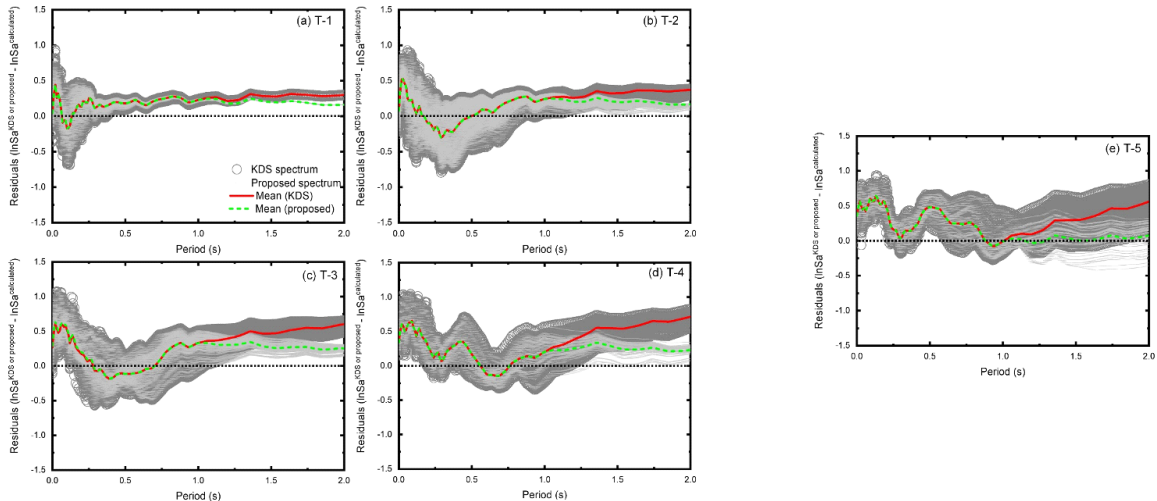


Fig. 2. Residual between design spectra and calculated response spectra for selected site classes

감사의 글

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 21CTAP-C164148-01). 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Kim, D.-S., S.Manandhar, and H.-I. Cho. New site classification system and response spectra in Korean seismic code. Earthquakes and Structures. 2018;15(1):1-8.
2. Manandhar,S., H.-I. Cho, and D.-S. Kim. Site Classification System and Site Coefficients for Shallow Bedrock Sites in Korea. Journal of Earthquake Engineering. 2017;22(7):1259-84
3. MOLIT. Korean Design Standard. KDS 17 10 00. 2018.

지진파의 주파수 성분이 굴착터널의 지진응답에 미치는 영향

The effect of earthquake frequency content on the seismic response of drill-and-blast tunnels

응옌반광*1)
Nguyen, Van-Quang

박두희**
Park, Duhee

Several studies on the effect of earthquake frequency content for different structures, considering soil-structure interaction, such as storage tanks [1] and retaining walls [2]. However, the specific study of the effect of the earthquake frequency content on the seismic response of drill-and-blast tunnels is still limited. In this study, two soil types and twenty earthquake records with different frequency contents are used to evaluate the response of tunnels. The effect of the contact interface between soil-tunnel is also investigated.

The numerical model was developed using FLAC2D program as presented in Fig 1. Two uniform soil profiles with shear wave velocities of 200 and 400 m/s were used in the numerical model. The density and Poisson's ratio of the soil are 1800 kg/m³ and 0.3, respectively. The elastic modulus of the tunnel material is 22.8 MPa. The Sig3 model was used to simulate the nonlinear behavior of the soil, while elastic model was employed for the tunnel. Twenty input ground motions, which were ten motions of low frequency (LF) content and ten motions of high frequency (HF) content were applied at the base of the numerical model. The peak ground acceleration (PGA) of input motions were scale to 0.1 g and 0.6 g. Fig. 2 presents the response spectra of 0.1 g input ground motions.

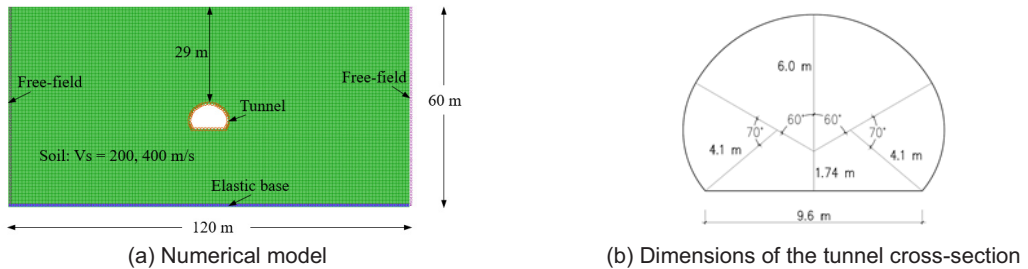


Fig. 1. Layout of (a) numerical model and (b) tunnel cross-section

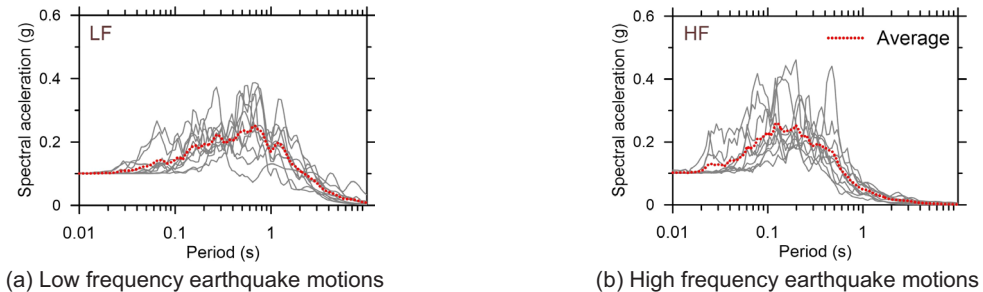


Fig. 2. Resposne spectra of 0.1 g input ground motions

The numerical results are shown in Fig. 3 and Fig. 4. As can be seen from the figure, the

* 정회원.한양대학교 건설환경공학과, 박사후연구원 (E-mail: nguyenvanquang240484@gmail.com)

** 정회원.한양대학교 건설환경공학과, 교수 (E-mail: dpark@hanyang.ac.kr)

earthquake frequency content has a significant effect on the tunnel response. The lower frequency content of earthquake causes a higher tunnel response (i.e. bending moment) compare to that of higher frequency content. However, the effect of soil-tunnel contact seems to be negligible in the case of small PGA. The more intensity of input ground motions, the more pronounced the effect of the earthquake frequency contents and soil-tunnel contact. Furthermore, the response of the tunnel decreases with increasing of the soil stiffness.

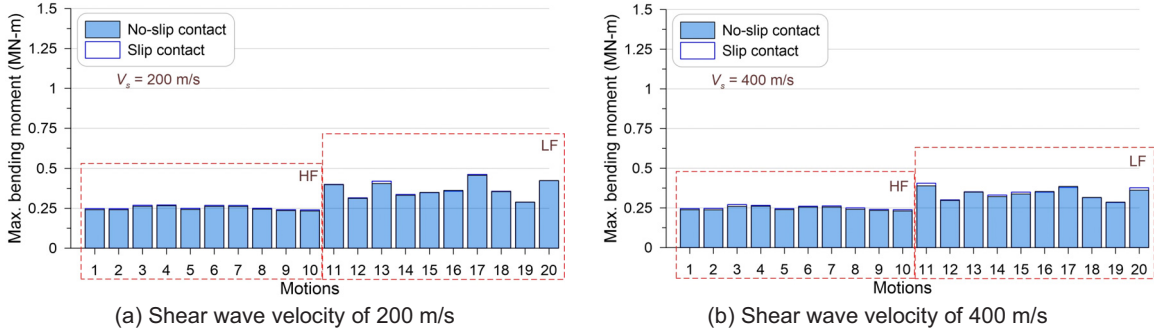


Fig. 3. Tunnel response in the case of 0.1 g input ground motions

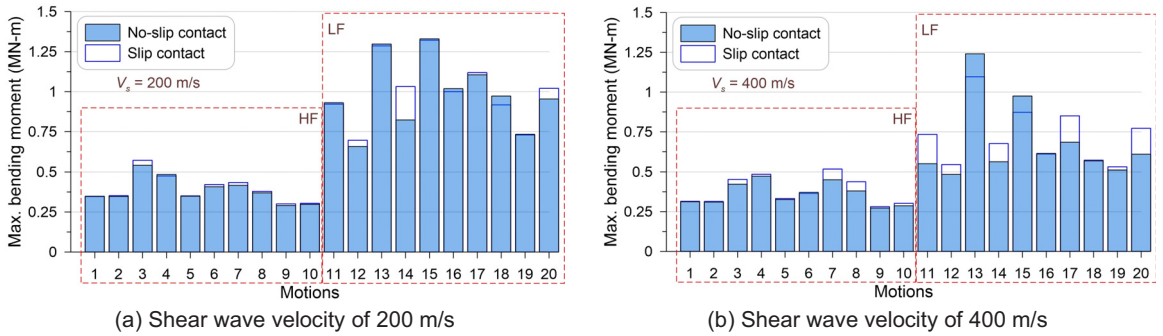


Fig. 4. Tunnel response in the case of 0.6 g input ground motions

감사의 글

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원(과제번호 22CTAP-C164148-02) 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Cakir, T. Evaluation of the effect of earthquake frequency content on seismic behavior of cantilever retaining wall including soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2013;45:96-111.
2. Kianoush, M. and A. Ghaemmaghami. The effect of earthquake frequency content on the seismic behavior of concrete rectangular liquid tanks using the finite element method incorporating soil-structure interaction. *Engineering Structures*. 2011;33(7):2186-2200.

지반공학적 지역특성을 고려한 전단파속도 주상도 추정방법 연구

A methodology for the prediction 1D V_S profiles compatible with geotechnical site-specific trends in South Korea

김한샘*¹⁾ 선창국** 이문교*** 조형익****
 Kim, Han-Saem Sun, Chang-Guk Lee, Moon-Gyo Cho, Hyung-Ik

토사, 암반지반의 전단파속도(V_S) 주상도 및 지진응답 매개변수(V_{S30} 등) 추정은 관심부지의 지반거동과 지진재해가능성 파악, 지진증폭특성 정량화, 지진관측환경 조사 등에 주로 이용된다. V_S 주상도는 측정 및 추정 방법에 따라 탄성파탐사를 이용한 직접 측정과 시추조사, 표준관입시험(SPT)과 콘관입시험 등의 현장시험 물성값으로부터 추정하는 방법, Proxy(지형, 지표 특성)으로부터 간접 추정방법, 상시미동/지진과 계측 데이터로부터 간접 추정방법 등이 있다. 이중 지반특성값(층상, SPT-N값)과 V_S 와의 추계적 상호상관성을 고려한 변환식과 V_S 결측값의 보정방법은 내진설계기준에도 반영되어 있어, 이들 방법론의 제안 및 확실성 검증 연구가 수행되어 왔다[1]. 최근 ASTM(미국시험재료협회) D5549-19는 지반조사 및 지반정수 산정 절차에서 지구통계학적 추정/보간방법의 적용기준을 정립하였으며, 이는 적합한 이점 지구통계모델을 선정하여 지반주상도 상 측정 물성값의 공간적 자기상관성을 고려할 수 있도록 한다. 뿐만 아니라 다수의 다변량 지반특성값을 모두 이용하거나 결측값이 많고 측정/추정 방법 적용이 어려운 경우에는 모수/비모수 추정오차가 발생하므로 기계학습을 이용한 추정방법의 적용성을 시도/검증할 필요가 있다. 본 연구는 지역적 지반특성의 변동성으로 유발되는 기존 경험적 추정방법(Method 1, Fig. 2) 적용의 한계를 극복하는데 그 목적이 있다.

본 연구에서는 국내 시추조사(SPT 포함), 공내 탄성파탐사(다운홀탐사, SPS 검층), 표면파탐사(MASW, SASW 등) 결과를 데이터베이스로 (Fig. 1) 구축하고, 이들 자료의 분포 특성에 따라 정밀도 높은 V_S 주상도 예측을 위한 지역모델과 전국모델을 제안하였다(Fig. 2). 먼저, 동일영역(이격거리 10m 이내로 가정)의 측정/추정

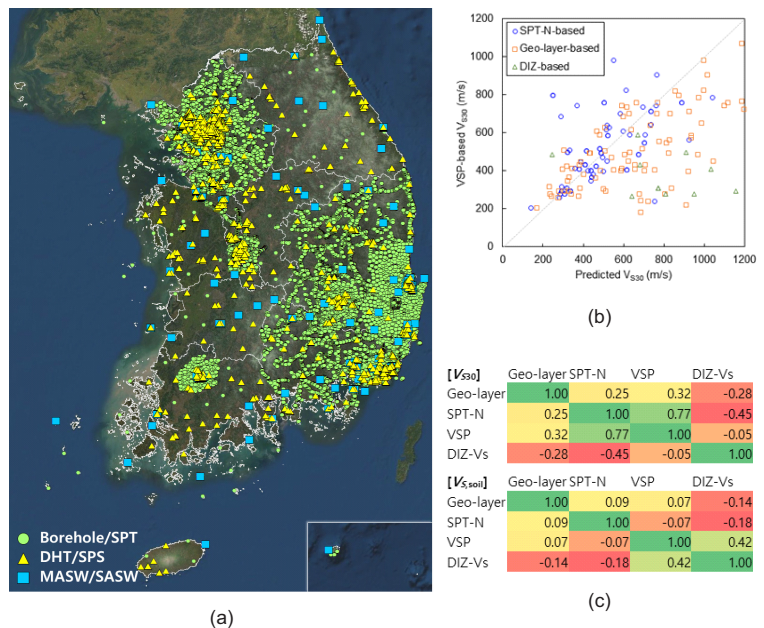


Fig. 1. Archive and V_S -comparability of geotechnical profiles: (a) V_S database within geotechnical investigation in South Korea, (b) comparison between VSP and empirical V_S -log, (c) correlation coefficients for predicting V_{S30} and $V_{S,soil}$ using V_S profiles

* 정회원-한국지질자원연구원 지진연구센터, 선임연구원 (E-mail: adoogen@kigam.re.kr)

** 정회원-한국지질자원연구원 지진연구센터, 책임연구원 (E-mail: pungsun@kigam.re.kr)

*** 정회원-한국지질자원연구원 지진연구센터, 선임연구원 (E-mail: mglee@kigam.re.kr)

**** 정회원-한국지질자원연구원 지진연구센터, 선임연구원 (E-mail: hicho@kigam.re.kr)

(기존 경험식 이용)된 V_S 주상도를 대상으로 방법별 적합성을 고려할 수 있도록 상호상관성과 상관계수를 추정함으로써 이를 추정(Regression) 모델의 가장치로 정의한다. 제안 방법론의 학습을 위해서 전체 데이터베이스를 학습자료로, 동일영역 내 지반 자료를 검증자료로 정의하였다. Case I은 측정/추정된 V_S 주상도가 존재하는 경우, Case II는 시추주상도만 있는 경우, Case III는 미조사 지역으로 분류된다 (Fig. 2(b)). 이들 지역에 적합한 V_S 주상도 추정방법은 기존 통계적인 변환과 결측값 보정방법 (예: 30m 심도범위의 외삽 추정)(Method 1 [2]), 지구통계학적 수평/수직 베리오그램 모델링 및 보간방법(Kriging, Simulation, Direct sampling) (Method 2), AI 기법(ANN, CNN, RNN, LSTM)을 이용한 추정방법 (Method 3, [3])으로 구성된다.

제안 방법론은 V_S 주상도 전체가 없거나 일부 결측된 경우에 적용되며 각 방법을 통해 심도방향으로 V_S 값을 추정하되, 추정값을 학습자료로 이용하여 반복학습이 이뤄질 수 있도록 한다. 각 방법은 검증자료와 상호비교하여 그 표준오차가 작거나 정밀도(예: ROC)가 높은 추정방법을 지역모델로 선정한다. 예컨대, 서울지역에 지역모델을 적용한 결과, AI 기법(ANN)을 이용했을 때 상대적 정밀도가 높았다. 이후 검증/선정된 방법을 전국 모델로 정립하여, 자료가 없는 Case III에 대해서 적용하기로 한다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 “지진활동 추적 및 관측자료 통합관리기술 개발”과제와 대림수업장학문화재단 연구지원 사업으로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Ahdi, S. K., Stewart, J. P., Ancheta, T. D., Kwak, D. Y., & Mitra, D. (2017). Development of VS profile database and proxy-based models for VS 30 prediction in the Pacific Northwest region of North America. Bulletin of the Seismological Society of America, 107(4), 1781-1801.
2. Cho, H. I., Lee, M. G., Sun, C. G., & Kim, H. S. (2021). Evaluation of engineering site conditions in North Gyeongsang Province, South Korea, using a large database of borehole and standard penetration test data. Engineering Geology, 294, 106306.
3. Kim, H. S., Sun, C. G., Lee, M. G., & Cho, H. I. (2021). Multivariate geotechnical zonation of seismic site effects with clustering-blended model for a city area, South Korea. Engineering Geology, 294, 106365.

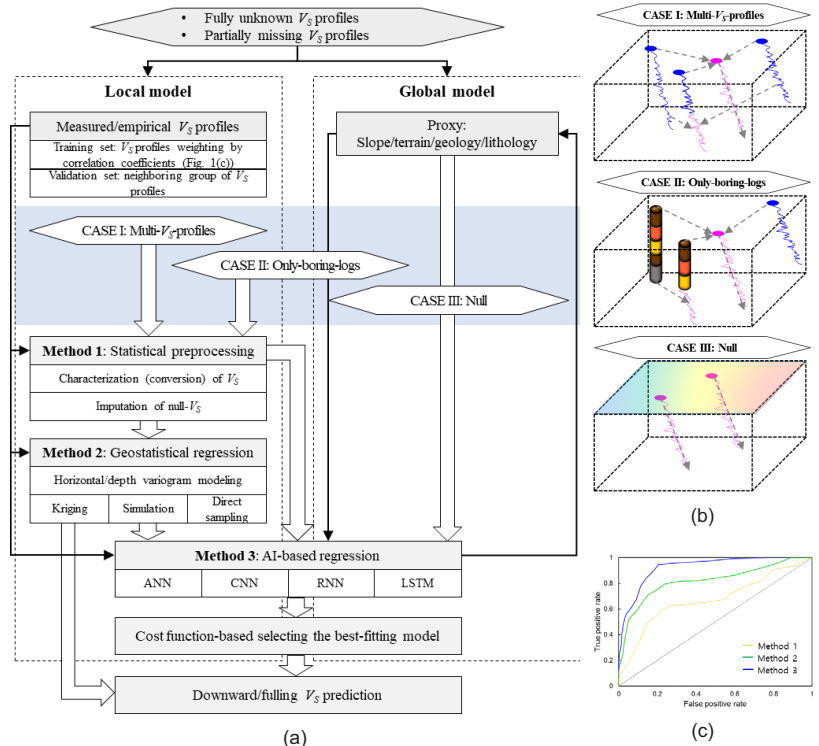


Fig. 2. Predicting 1D VS profile about local and global models: (a) proposed framework, (b) concept of three cases within geotechnical investigation, (c) ROC, resulting in cost-function by applying methods 1, 2, 3

A 3D model for dynamic soil-structure interaction and its application to Sherman Oaks building

Nguyen, Quang-Thien-Buu *)

Kim, Sung Ryul **)

In human history, earthquake event is one of the most ruinous hazards, which causes devastating consequences of large-scale human casualties, property damage. Especially, in the 1999 earthquake (Izmit, Turkey) and the 1964 earthquake (Niigata, Japan), many residential buildings were collapsed and heavily damaged due to the inappropriate consideration of earthquake in building design process. Therefore, the responses of earthquake-subjected buildings should be carefully evaluated and satisfy some criteria in building code. In particular, these responses are strongly influenced by the so-called soil-structure interaction (SSI) between three connected systems: the structure, the foundation, the underlying and surrounding soil. In standard engineering practice, the commonly-named substructure approach is usually carried out to evaluate the effect of SSI on the seismic responses with assumption of linear behavior for both structure and soil, it consists of two separate analyses: inertial and kinematic interactions. However, in the presences of strong earthquakes or important buildings, the nonlinearity of soil and structures should not be neglected, it is worth to instead use a nonlinear numerical approach in the time domain, so-called direct method. The direct method is a 3D Finite Element approach which is adopted to model the entire soil-structure system in a single analysis as showed in Fig 1. In this study, the seismic ground response and the dynamic soil-structure interaction can be carried out in a unique analysis, considering the nonlinearity of soil and structure and the heterogeneity of realistic soil deposit. First, the general terms of soil-foundation-structure interaction and some key factors affecting the building responses will be explained, and then the numerical model used in this study will also explained in detail with a case study by using Opensees FE software. The purpose of this study is to create a model to back-analyse the seismic responses of a case-study building constructed at Shearman Oaks, Los Angeles.

With seismic instrumentation and available earthquake recordings, the seismic data of the Sherman Oaks building was collected from California Strong Motion Instrumentation Program (CSMIP). This building consisting of 13-story, reinforced concrete moment frame structure and two basement levels was shaken strongly by the 1994 Northridge earthquake and less-strongly by others. In the 3D model, the soil domain is modelled using an 8-node hexahedral linear isoparametric element where each node has 4 degrees-of-freedom (3 solid displacements and 1 fluid pressure).

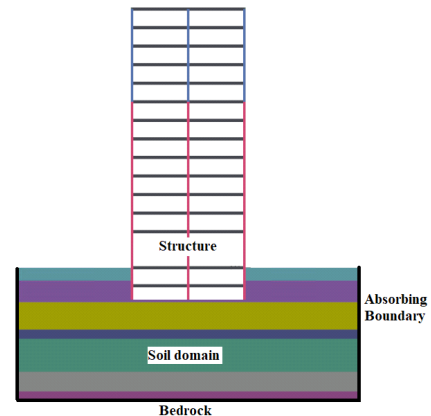


Fig. 1. 3D model of soil-structure interaction

*) PhD Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University (Email: nqtbuuxd@gmail.com)

**) Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University (Email: sungryul@snu.ac.kr)

The pressure dependent constitutive soil model is used to describe the non-linear characteristics and to account for the variation of the initial stiffness with depth, besides the plasticity is formulated based on the multi-yield surface (nested surface) concept. The seismic wave is applied at the bottom bedrock layer, propagating throughout soil domain and the reflected wave can be absorbed by an absorbing boundary condition. The super-structure was modeled using beam elements for columns, beams and piles, shell elements for walls and pile caps with elastic concrete material.

The time histories of acceleration and displacement at different floors of the building were compared to the recorded data from CSMIP. Fig. 2 shows the acceleration and displacement at foundation level of the recorded and predicted results, which shows the satisfactory performance of the numerical model in replicating the observed responses. The promising performance of the proposed direct approach indicates that this method might be used widely in practical applications to overcome some disadvantages of the existing sub-structure approach.

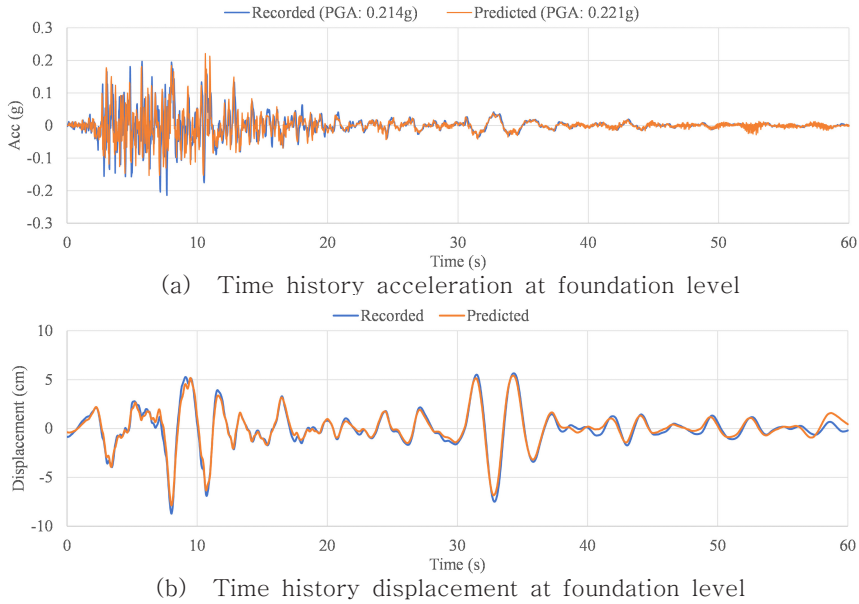


Fig. 2. Comparison between recorded data and predicted results

References:

1. NEHRP Consultants Joint Venture. Soil-Structure Interaction for Building Structures. September, 2012.
2. The University of California. Opensees documentation.
3. Andreas H. Nielsen. Absorbing Boundary Conditions for Seismic Analysis in ABAQUS. ABAQUS Users' Conference, 2006.
4. Nishant Sharma, Kaustubh Dasgupta, Arindam Dey. Natural period of reinforced concrete building frames on pile foundation considering seismic soil-structure interaction effects. Structure, 27 (2020), 1594-1612

중력식 안벽의 내진성능 평가방법 개선에 관한 연구

Improvement of performance verification methods for gravity-type quay walls

이문교*1)

선창국**

김한샘***

조형익****

Lee, Moon-Gyo Sun, Chang-Guk Kim, Han-Saem Cho, Hyung-Ik

항만구조물 중에서 가장 기본적이고 필수적인 중력식 안벽에 대한 내진 2등급 붕괴방지수준의 내진 설계와 내진 안정성 평가 상세 1단계에서는 등가정적해석법이 사용되고 있다. 기존 등가정적해석법은 지진 하중을 하나의 상수 값을 갖는 관성력으로 변환해주는 Mononobe-Okabe 공식을 이용하고 있으며, 지진하중은 수평 지진계수(이하 k_h)값에 결정적으로 좌우된다. 그러므로 적절한 k_h 산정은 등가정적해석에서 가장 중요하다고 할 수 있다 [1]. 최근에는 내진설계 선진국을 중심으로 지진하중에 의한 구조물의 힘의 평형관계 초과 시 구조물의 성능을 예측할 수 있는 k_h 산정법에 대한 연구가 진행되고 있으며, 구조물의 성능 평가항목 중 가장 중요한 항목에 해당하는 변위는 입력 지진파의 주파수 특성에 크게 영향을 받는 것으로 나타나고 있다 [2].

다양한 지진원이 분포해있는 일본은 일찍이 발생 지진의 주파수 특성이 안벽의 수평변위량(이하 D_h)에 미치는 영향에 관한 연구를 수행해 왔으며, 일본항만설계기준 [2]에 목표 성능 D_h 에 상응하는 성능기반수평지진계수 (이하 k_{hk}) 산정방법을 제시하였다. k_{hk} 방법은 설계 지진의 주파수 특성이 D_h 유발에 미치는 영향을 보정하기 위하여 b 필터를 적용하고 있다.

b 필터의 함수 ($a(f)$)는 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} a(f) &= b & 0 < f \leq 1 \\ a(f) &= \frac{b}{1 - \left(\frac{f-1}{1/0.34}\right)^2 + 6.8\left(\frac{f-1}{1/0.34}\right)i} & 1 \leq f \\ b &= 1.05\frac{H}{H_R} - 0.88\frac{T_b}{T_{bR}} + 0.96\frac{T_u}{T_{uR}} - 0.23 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, H 는 안벽 높이(m), H_R 은 기준 벽 높이 (15 m), T_b 는 뒤퇴출 지표면의 초기 고유주기(s), T_{bR} 은 뒤퇴출 지표면의 기준 초기 고유주기(0.8 s), T_u 는 안벽의 기초 지반의 초기 고유주기(s), T_{uR} 은 안벽의 기초 지반의 기준 초기 고유주기(0.4 s), i 는 허수단위이다.

제안된 b 필터를 적용한 k_{hk} 방법은 실지진 피해기록 및 동적원심모형실험 결과와의 비교를 통해 D_h 예측에 대한 정확성이 평가되었다 [1]. 그 결과 입력지진의 저주파 성분에 대한 보정의 정확도가 낮아 식 (1)의 b 값에 대한 개선의 필요성을 확인하였다. 이에 Lee et al. [1]은 k_{hk} 방법 검증에 사용한 동적원심모형실험 결과를 이용하여 다중선형회귀분석을 수행하였고, 개선된 b 값 산정식 (식 (2, 3))을 도출하였다.

$$b_1 = 0.13\frac{H}{H_R} + 0.37\frac{T_b}{T_{bR}} - 0.06\frac{T_u}{T_{uR}} + 0.24 \quad (2)$$

* 정회원-한국지질자원연구원 지진연구센터, 선임연구원 (E-mail: mglee@kigam.re.kr)

** 정회원-한국지질자원연구원 지진연구센터, 책임연구원 (E-mail: pungsun@kigam.re.kr)

*** 정회원-한국지질자원연구원 지진연구센터, 선임연구원 (E-mail: adoogen@kigam.re.kr)

**** 정회원-한국지질자원연구원 지진연구센터, 선임연구원 (E-mail: hicho@kigam.re.kr)

$$b_2 = 0.18 \frac{H}{H_R} + 0.26 \frac{T_b}{T_{bR}} + 0.25 \quad (3)$$

도출된 식은 실제 지진으로 인해 피해를 입은 중력식 안벽의 피해 정보와 지진 계측 기록을 이용하여 D_h 예측 정확도 향상 여부가 검증되었다. 검증에 사용된 피해 정보 목록은 Table 1에 정리하였고, 실제 지진으로 인해 계측된 D_h 값과 식 (1, 2, 3)을 적용하여 구한 D_h 값들 간의 차이 (relative difference in percentage, RD)를 Fig. 1에 도시하였다.

Table 1. Details of the eight datasets used in quantitative evaluations [1]

No.	Earthquake name	Year	Mw	Station	Port name	H (m)	T _b (s)	T _u (s)	T _p * (s)	Average measured D _h (m)
1	Pohang	2017	5.4	ORPHT	Youngil Bay	15.6	0.237	0.052	0.68	0.05
2	Tokachi-Oki	1968	8.2	muroran-S	Muroran	10.6	0.857	0.597	0.59	0.122
3	Tohoku-Pacific Ocean	2011	9.0	onahamaji-G	Onahama	15.7	0.374	0	0.39	0.225
4	Sanriku-Haruka-Oki	1994	7.7	hachinoheji-S	Hachinohe	17.6	0.311	0	0.23	0.072
5	Kushiro-Oki	1993	7.8	kushiro-G	Kushiro	6.5	0.226	0.071	0.88	0.1
6	Hokkaido-Toho-Oki	1994	8.3	hanasaki-F	Nemuro	4.3	0.378	0.295	0.24	0.054
7	Hokkaido-Toho-Oki	1994	8.3	hanasaki-F	Nemuro	6.9	0.167	0.007	0.19	0.119
8	Hokkaido-Toho-Oki	1994	8.3	hanasaki-F	Nemuro	7.5	0.113	0	0.24	0.06

* Predominant period

검증 결과 개선된 b 값 산정 식 (식 2, 3)이 모든 Case에서 기존 식 (식 1)에 비해 D_h 값을 잘 예측하는 것을 알 수 있었다.

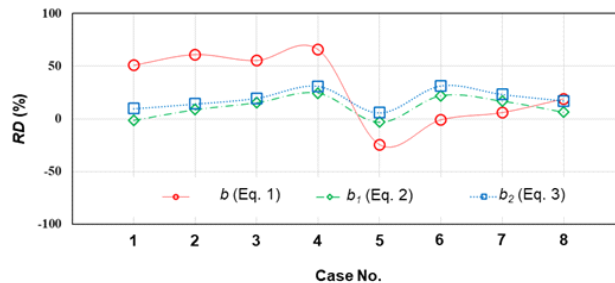


Fig. 1. Relative difference in percentage between the D_h values calculated with the different b values (Eqs.1,2, and3) and the measured D_h values for all cases [1]

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 “지진활동 추적 및 관측자료 통합관리기술 개발”과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Lee, M. G., Ha, J. G., Cho, H. I., Sun, C. G., & Kim, D. S. (2021). Improved performance-based seismic coefficient for gravity-type quay walls based on centrifuge test results. *Acta Geotechnica*, 16(4), 1187-1204.
2. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT) (2007). Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan. Japan Port and Harbour Association, Tokyo (in Japanese)

수직방향 지진입력에 대한 지중구조물의 지진응답해석을 위한 응답변위법

Response Displacement Method for Seismic Response Analysis of Underground Structures Subjected to Vertical Earthquake Input

양대승*1) 임재성** 김재민***
 Yang, Dae-Seung Lim, Jae-Sung Kim, Jae-Min

국내 내진설계기준에서 지중구조물의 내진설계는 등가정적해석법의 응답변위법(Response Displacement Method, RDM)을 표준해석법으로 사용하고 있으며, 수평 지반운동으로 인한 영향만을 설계에 고려하고 있다 [1]. 하지만, 선행 연구를 통해 수직 지반운동으로 인한 영향이 무시할 수 없을 만큼 크며, 이러한 영향을 지중구조물의 내진설계에 고려하기 위한 추가적인 연구가 필요하다고 사료되었다[2].

이 연구에서는 수직방향 지진입력의 영향을 고려한 응답변위법을 제시하였다. 또한, 예제 해석을 통해 적용성을 평가하였다. 수직 지진입력의 영향을 고려한 응답변위법의 지반모델은 현행 유한요소법을 이용하여 산정하였다. 수직방향 지진에 의한 지진 하중은 지반변위 하중, 관성력 하중 및 주면운동 하중으로 등가 변환한 후, 각 하중을 Fig. 1과 같이 적용하였다. 이를 위한 자유장응답을 산정하기 위해 입력지진파로 국내 암반 지반에 대한 설계응답스펙트럼에 부합하는 인공지진파를 수평방향(PGA=0.22g)의 0.77배인 Fig. 2를 기반암 노두에 입력하였다. 이는 전단파에 대한 일차원 파동전달이론을 Table 1과 같이 입력 변수만을 수정하여 압축파에 대한 지반의 변위, 가속도 및 변형률을 구하였다.

제안한 응답변위법의 적용성을 평가하기 위해 Fig. 3과 같은 지중구조물 예제에 대해 SAP2000 프로그램을 이용한 구조해석을 수행하였으며, 참조해로 진동수영역 해석 프로그램인 KIESSI-3D를 이용한 수직방향 지진 입력에 대한 동적 SSI(Soil-Structure Interaction) 해석결과를 적용하였다[3]. 이때, 구조물의 부재력 출력 위치 및 지반조건을 Fig. 3에 나타내었다. 또한, 매설깊이에 따른 부재력의 영향을 확인하기 위해 예제 I, II의 매설깊이별로 해석을 수행하였다[4].

해석 결과, 수직방향 지진입력에 대한 응답변위법의 해석 결과를 동적 SSI 해석 결과에 대한 부재력비(RDM/SSI)로 Table 2에 나타내었다. 예제 I의 경우 1.51~4.45, 예제 II의 경우 1.13~3.24, 예제 III의 경우 1.17~3.48, 예제 IV의 경우 2.20~4.33의 분포를 보였으며, 매설깊이가 깊어질수록 부재력비가 감소하였다. 이는 매설깊이가 얇은 지중구조물에서 SSI에 의한 효과가 커질 수 있다는 일반적인 예상과 일치하였다. 하지만, 예제 III, IV와 같은 4층 이상의 복잡한 구조물에서는 추가적인 연구 및 사례 분석이 필요할 것으로 사료된다.

이 연구에서 제안한 수직방향 지진입력에 대한 응답변위법은 본선 박스 구조물, 지하철 2층 정거장 구조물과 같은 간단한 형태를 가진 지중구조물에 대해서는 적용이 가능할 것으로 판단된다.

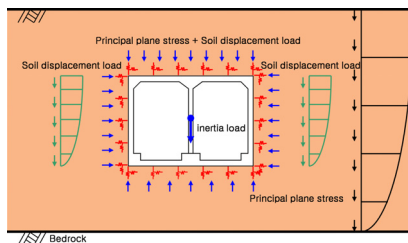


Fig. 1. Concept diagram of vertical earthquake input RDM

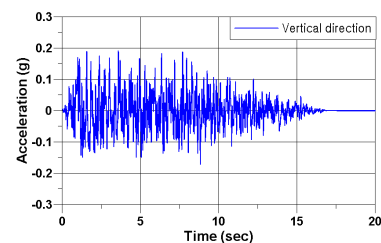


Fig. 2. Vertical input motion (PGA=0.17g)

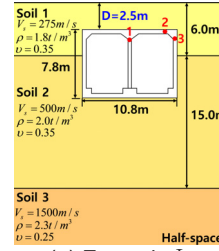
* 정회원.전남대학교 건축토목공학과, 연구원, 공학석사 (E-mail: yds9307@naver.com)

** 정회원.전남대학교 건축토목공학과, 박사과정, 공학석사 (E-mail: gkskwotjd@naver.com)

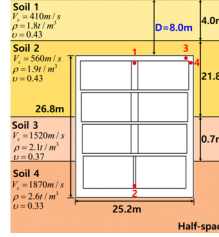
*** 정회원.전남대학교 토목공학과 교수, 공학박사 (E-mail: jm4kim@jnu.ac.kr)

Table 1. Comparison of one-dimensional wave propagation theory according to input direction

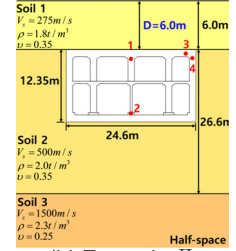
Physical quantity, equation, relation	Horizontal (x-dir)	Vertical (z-dir)
Displacement	$u_x(z, t)$	$u_z(z, t)$
Strain	$\gamma_{xz} = \frac{\partial u_x}{\partial z}$	$\varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}$
Acoustic wave propagation speed	$V_S = \sqrt{G/\rho}$	$V_P = \sqrt{M/\rho}$
Stress-strain relationship	$\tau_{xz} = G\gamma_{xz}$ $= \rho V_S^2 \gamma_{xz}$	$\sigma_z = M\varepsilon_z = \rho V_P^2 \varepsilon_z$ $\sigma_x = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_z$
Wave equation	$V_S^2 \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} = \ddot{u}_x$	$V_P^2 \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} = \ddot{u}_z$



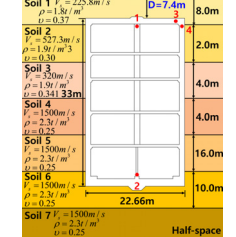
(a) Example I



(c) Example III



(b) Example II



(d) Example IV

Fig. 3. Soil conditions and output sections

Table 2. Member force ratio in each example(P:Axial force, V:shear force, M:Moment)

(a) Example I			(b) Example II			(c) Example III			(d) Example IV		
Case (depth, D)	Section, member force	RDM/SSI	Case (depth, D)	Section, member force	RDM/SSI	Case (depth, D)	Section, member force	RDM/SSI	Case (depth, D)	Section, member force	RDM/SSI
I -1 (2.5m)	1-P	3.89	II-1 (6m)	1-P	2.31	III (8m)	1-P	1.40	IV (7.4m)	1-P	2.20
	2-V	4.45		2-P	2.92		2-P	3.48		2-P	4.33
	2-M	3.97		3-V	3.05		3-V	1.17		3-V	2.43
I -2 (5.5m)	1-P	2.24	II-2 (13.1m)	3-M	3.24		3-M	1.28		3-M	2.58
	2-V	2.51		1-P	1.84	III (8m)	1-P	1.40	IV (7.4m)	1-P	2.20
	2-M	2.33		2-P	2.30		2-P	3.48		2-P	4.33
I -3 (9.6m)	1-P	1.79	II-3 (20.25m)	3-V	1.50		3-V	1.17		3-V	2.43
	2-V	1.76		3-M	1.84		3-M	1.28		3-M	2.58
	2-M	1.76		1-P	1.70	III (8m)	1-P	1.40		3-M	2.58
I -4 (13.2m)	1-P	1.78		2-P	2.06		2-P	3.48		1-P	2.20
	2-V	1.51		3-V	1.13		3-V	1.17		2-P	4.33
	2-M	1.53		3-M	1.34		3-M	1.28		3-V	2.43

참고 문헌

1. Xu Z., Du X., Xu C., Jiang J. and Han R. Simplified Equivalent Static Methods for Seismic Analysis of Shallow Buried Rectangular Underground Structures. Journal of the Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009;121:1-11.
2. Yang D. S., Lim J. S. and Kim J. M. A Case Study on the Characteristics of the Seismic Response of Underground Structures Subjected to Vertical Earthquake Input. Proceedings of KSCE 2021 Convention, 2021;545-546.
3. Kim J. M. Development of World-Best Fundamental Technologies for Nonlinear Fluid Structure Soil Interaction Analysis by Developing p-version Dynamic Infinite Elements and Performing Shaking Table Tests. Report of Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, 2016;No. 14CTAP-C077514-01.
4. Yang D. S. A Case Study on the Characteristics of the Seismic Response of Underground Structures Subjected to Vertical Earthquake Input. Ms.C. Thesis, Department of Architecture and Civil Eng., Chonnam National University, 2022.02.

응답진도법을 사용한 지중 도시철도구조물 지진응답의 3차원 효과 분석

Assessment of 3D Effects in Seismic Response of Underground Urban Railroad Structures by the Response Acceleration Method

김기배*1)
Kim, Gi-Bae

임재성**
Lim, Jae-Sung

김재민***
Kim, Jae-Min

지중구조물은 현대에 들어서면서 건설의 비중이 증가하고 있다. 특히, 도시철도구조물은 연간 20억 명 이상이 이용하는 매우 중요한 구조물 중에 하나이다. 이러한 지중구조물의 지진응답해석을 위해서는 정밀한 3차원 해석이 필요하지만, 해석모델이 방대해짐에 따라 시간 제약 및 해석 비용의 과다로 인해 지중구조물의 3차원 해석은 많은 제한조건이 발생하였다. 이에 대한 대안으로 등가정적해석방법인 응답진도법이 제안되었다. 응답진도법은 근역지반을 모형화하고 등가의 정적인 하중을 입력지진으로 적용하는 해석 방법이다. 이 방법은 선행연구를 통해 합리성이 검증되었다[1].

이 연구에서는 도시철도구조물의 3차원 문제에 대한 응답진도법의 합리성을 평가하였고 구조물에 발생하는 응답의 3차원 효과를 분석하였다. 이를 위한, 참조해로는 진동수영역 동적 지반-구조물 상호작용 (Soil-Structure Interaction, SSI) 해석이 가능한 KIESSI-3D 프로그램[2,3]을 사용하였다. 입력지진 운동은 도시철도내진설계기준의 내진 1등급 기준에 따라 Fig. 1과 같은 인공지진파로 작성하였으며, 이를 기반암노두에 x방향으로 입력하였다. 또한, 응답진도법의 수평방향 지반모델링범위로서 x축에 대한 근역지반의 길이는 구조물 폭의 4배, y축에 대한 근역지반의 길이는 구조물 길이의 1.5배 이상, 할증계수는 1.2를 적용하였다 [1]. 이 때, 응답진도법은 ABAQUS 프로그램[4]을 이용하여 구현하였다. 수치해석 예제로는 기 건설되어 운영 중인 안양역, 인덕원역, 서울역을 선정하였다[5].

Fig. 2의 안양역은 터널정거장을 주변으로 안양정거장, 본선터널, 환기구, 안양 지하상가 등의 구조물이 인접해 있다. 안양역의 지반조건은 매립층, 퇴적층, 풍화토, 풍화암, 연암, 경암 순서로 구성되어있다. 터널정거장은 연암층 내에 위치하고 있으며, 2층으로 구성된 말굽형상으로 폭 25.9m, 높이 17.6m, 연장 144.0m이다. Fig. 3의 인덕원역은 112정거장을 주변으로 터널정거장, 본선터널, 환기구, 연결통로, 영통역의 구조물이 인접해 있다. 인덕원역의 지반조건은 매립층, 퇴적층, 풍화토(N<50), 풍화토(N>50), 풍화암, 연암, 경암 순서로 구성되어 있다. 112정거장은 퇴적층부터 연암층에 걸쳐 위치하고 있으며, 5층으로 구성된 박스형상으로 폭 22.7m, 높이 33.0m, 연장 79.4m이다. Fig. 4의 서울역은 터널정거장을 주변으로 서울역 대합실, 연결통로가 인접해 있다. 터널정거장은 2층으로 구성된 말굽형상으로 폭 30.7m, 높이 20.1m, 연장 181.0m이다.

Fig. 5와 같이 응력이 집중되는 부재에서 휨모멘트에 대한 응답분포를 확인한 결과, 응답진도법의 응답은 동적 SSI 해석의 응답과 유사한 3차원 거동을 보이는 것으로 확인된다. 최대응답의 차이를 비교한 결과, 안양역에서 응답진도법의 응답이 1%, 서울역에서 응답진도법의 응답이 6% 정도의 큰 결과를 보였다. 하지만, 인덕원역에서는 87%~114%의 범위로 응답진도법의 응답이 동적 SSI 해석의 응답에 비해 13% 낮은 결과도 보였다. 한편, 해석속도 측면에서는 응답진도법의 해석 시간이 동적 SSI 해석보다 약 72~81배 빠른 결과를 보였다. 이를 통해, 도시철도구조물의 정밀한 지진응답해석을 위해 3차원 문제에 대한 응답진도법을 적용하는 것이 합리적인 방법임을 확인할 수 있었다.

* 정희원(주)세니즈코퍼레이션, 공학석사 (E-mail: kibae2@naver.com)

** 정희원-전남대학교 일반대학원 건축토목공학과, 박사과정, 공학석사 (E-mail: gkskwotjd@naver.com)

*** 정희원-전남대학교 토목공학과 교수, 공학박사 (E-mail: jm4kim@jnu.ac.kr)

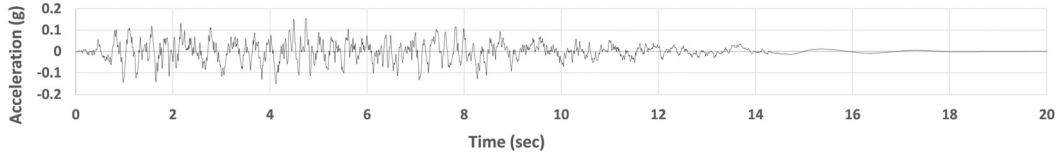


Fig. 1. Time history of input acceleration at rock outcrop (PGA=0.154g)

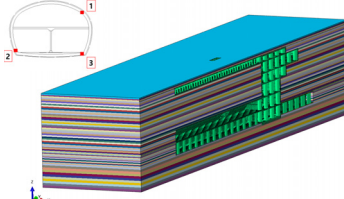


Fig. 2. Section shape and FEM of anyang station

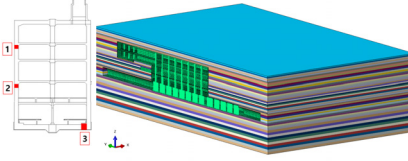


Fig. 3. Section shape and FEM of indeokwon station

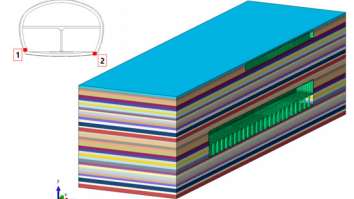
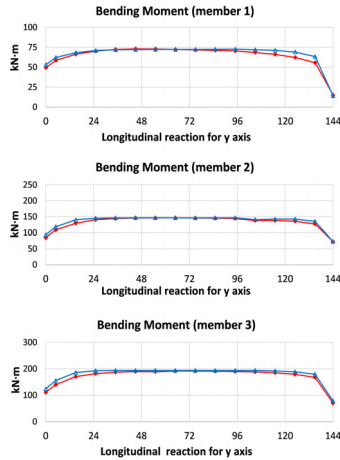
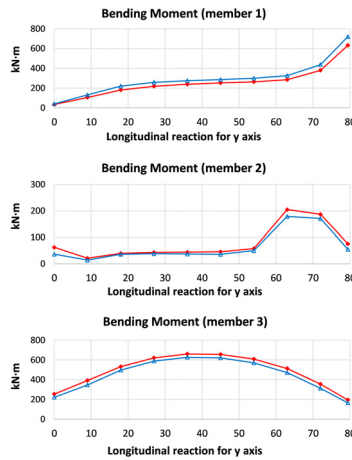


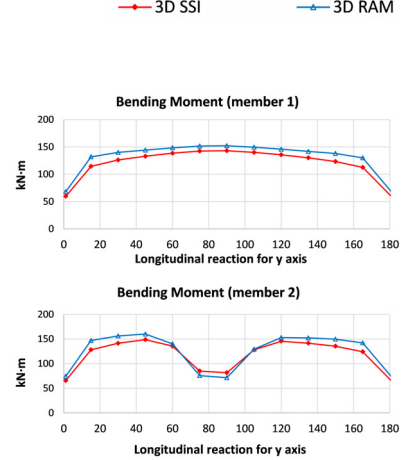
Fig. 4. Section shape and FEM of seoul station



(a) Anyang station



(b) Indeokwon station



(c) Seoul station

Fig. 5. Response distribution for bending moment

참고 문헌

1. Kim, J. M. and Kim, J. W. Ground Response Seismic Coefficient Method for Earthquake Analysis of Underground Structure. Proceedings of the Spring Conference of the Korean Society of Earthquake Engineering, 2010;179-182.
2. Seo, C. G. and Kim, J. M. Large-Scale 3D SSI Analysis using KIESSI-3D Program. Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, 2012;25(3):77-83.
3. Kim J. M. Development of World-Best Fundamental Technologies for Nonlinear Fluid Structure Soil Interaction Analysis by Developing p-version Dynamic Infinite Elements and Performing Sloshing Shaking Table Tests. Report of Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, 2016;No. 14CTAP-C077514-01.
4. Dassault Systems. ABAQUS 6.14 Analysis User's Guide. 2014.
5. Kim, G. B. Case Study of 3D Seismic Response Analysis of Urban Railroad Structures. Ms.C. Thesis, Department of Architure and Civil Eng., Chonnam National University, 2022. 02.

제주 지역 MEMS 설치 구조물의 고유주기 산정

김민영*	장동일**	유병호***	곽동엽****1)
Kim, Minyoung	Jang, Dongil	Yoo, Byeongho	Kwak, Dongyup

2021년 12월 14일 17시 19분 14초 제주 서귀포시 서남서쪽 41km 해역에서 규모 4.9의 지진이 발생하였다. 기존 제주도 지역에 존재한 지진관측소 총 8곳과 150개의 보조 지진관측망인 MEMS 센서에서 지진동이 관측되었다. MEMS 센서는 기존의 건물 내에 설치되어 있어, 지진관측소의 관측환경과 다르게 건물의 응답에 영향을 받는다. 따라서, 지표면 기준 진도를 추정하기 위해서는 MEMS 센서 설치 위치에서 예견되는 건물의 응답을 파악해야 한다. 그 일환으로, 본 연구에서는 상시미동과 제주 지진 기록을 활용하여 제주도 지역 건물의 고유주기를 추정하고자 한다. 연구의 방법으로 제주도 지진의 진앙거리 50km 이내인 MEMS 센서 설치 장소 13곳을 Fig. 1과 같이 선정하고 상시미동 조사를 통해 고유주기를 측정하였으며, 건물 높이와의 상관관계를 분석하였다. 또한 제주 지진 기록을 분석하여 고유주기를 추정하였다. 상시미동 조사 대상 건물은 MEMS 센서가 설치된 13곳의 건물로, 현장 조사와 수집된 건축물 대장 정보를 통해 건물의 높이 및 층수를 정리하였다. Table 1은 대상 건물의 높이와 구조물 유형, 연면적에 대한 정보를 나타낸다.



Fig. 1. The research site

건물의 고유주기 측정은 3축 고성능 속도계 2대와 3축 지오폰(라즈베리파이) 2대의 장비를 사용하여 건물 최상층 또는 상층 및 지상층의 상시미동 비교로 실시하였다. MEMS 센서 설치 층의 응답 또한 파악하기 위해 실제 MEMS 센서가 설치된 장소에 고성능 속도계와 지오폰을 한 대씩 설치하였으며, 최상층에 지오폰 1대, 지표면에 고성능 속도계 1대를 설치하여 각각의 상시미동 응답을 비교하였다.

Figure 2는 MEMS 센서가 설치된 대상 건물 중 하나인 JSP0G 장소의 Fourier 스펙트럼을 나타낸다. 지표면과 1층의 응답의 경우 1 Hz 이후에 피크 스펙트럼이 보이지 않으나, 건물 옥상의 스펙트럼의 경우 약 8-9 Hz에서 수평축(x와 y)이 피크를 보이는 것을 알 수 있다. 모든 장소에서 1 Hz 미만에서 큰 스펙트럼을 확인할 수 있는데, 이는 파도가 직접적으로 해안선에 부딪히는 진동이 영향을 미치는 것으로 파도의 주기와 같은 주기에서 큰 미동이 나타났다고 파악할 수 있다(조범준, 신동훈, 조봉곤, 박순천, 황의홍, 2009). 이처럼 항만 근처에 존재하는 JSP0G, JSP0Q, JSP05의 경우 1 Hz 미만에서 큰 스펙트럼을 유사하게 확인할 수 있으며, 내륙으로 갈수록 큰 스펙트럼의 범위가 고주파수로 변화한다. 따라서, Fig. 2의 1 Hz미만의 스펙트럼은 건물의 영향이라기보다 지표의 미동으로 인한 크기라 볼 수 있다. 이러한 지표 미동의 영향을 고려하여 JSP0G의 구조물 고유주기를 8 Hz로 결정하였다. 1층에서의 스펙트럼 응답(Fig. 2c)은 지표면의 스펙트럼 응답(Fig. 2b)과 유사하여 건물의 응답이 1층에서는 미미한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 Table 1에 나열된 대상 건물에서 측정한 상시미동을 분석하여 각 건물의 고유주기를 추정하고, MEMS 센서에서 기록한 제주 지진의 진동으로부터 추정한 고유주기와 비교할 예정이다. 이때, 주변 환경

* 비회원 한양대학교 건설환경시스템공학과 석사과정 (E-mail: m21zzang@hanyang.ac.kr)

** 정회원 한양대학교 건설환경시스템공학과 박사과정 (E-mail: dijang94@hanyang.ac.kr)

*** 정회원 한양대학교 건설환경시스템공학과 석사과정 (E-mail: qudgh9714@hanyang.ac.kr)

****1) 정회원 한양대학교 ERICA 공학대학 건설환경공학과 조교수 (E-mail: dkwak@hanyang.ac.kr)

적 요소(해안, 센서 설치위치, 건물 내 진동요소)를 고려하여 고유주기 산정에 신뢰성을 높이고자 한다. 이러한 과정은 MEMS 센서 설치 건물의 고유주기 추정에 이용할 수 있으며, 추후 MEMS 기록으로부터 건물 응답을 제거하는데 활용할 수 있을 것이다.

Table 1. The building information with the MEMS sensor installed

코드명	단말기 번호	진앙거리	지점	총 층수	층(센서)	높이(m)	구조물 유형	연면적(m ²)
GOS2M	01231322085	24.12	고산리지판측소	1	1	4.5	철근콘크리트구조	930.47
JSP0G	01232971346	16.64	모슬포출장소	1	1	3.2	조적식(벽돌)구조	No Data
JSP0Q	01232973169	17.54	모슬포우체국	2	1	9.3	철근콘크리트구조	659.5
SGP2M	01231322216	36.93	서귀포지판측소	1	1	3.6	콘크리트구조	No Data
JSP1K	01232972420	37.73	서귀포 소방서	4	2	18.6	철근콘크리트구조	3814.19
JSP1L	01232972607	37.73	서귀포 소방서	4	2	18.6	철근콘크리트구조	3814.19
JSP06	01227587946	31.41	중문집중국	2	1	9.1	철근콘크리트구조	141.11
JSP07	01227587880	39.86	SKT 기지국	2	1	8.8	철근콘크리트구조	301.39
JSP01	01227723476	42.25	선경오피스텔	14	12	35	철근콘크리트구조	20898.5
JSP05	01227587378	18.26	SKT 기지국	2	1	8.8	철근콘크리트구조	205.96
JSP1C	01232972910	24.28	안덕119센터	5	1	14.85	철근콘크리트구조	832.41
JSP03	01231300022	46.93	SKT 기지국	4	1	12.5	철근콘크리트구조	291.79
JSP0R	01232973008	46.84	서귀포 효동동우체국	3	1	7.59	철근콘크리트구조	353.79
JSP0B	01231316348	41.83	PS&M제주서귀포점	4	1	15	철근콘크리트구조	515.71

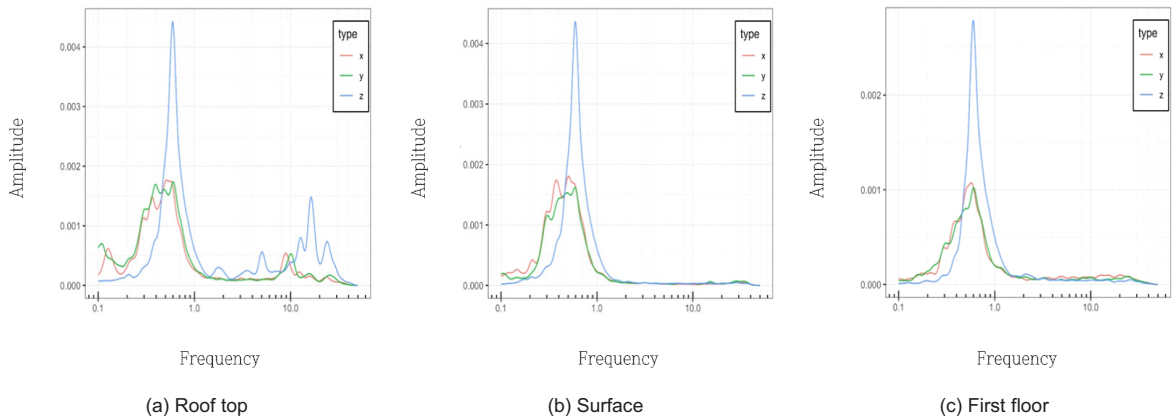


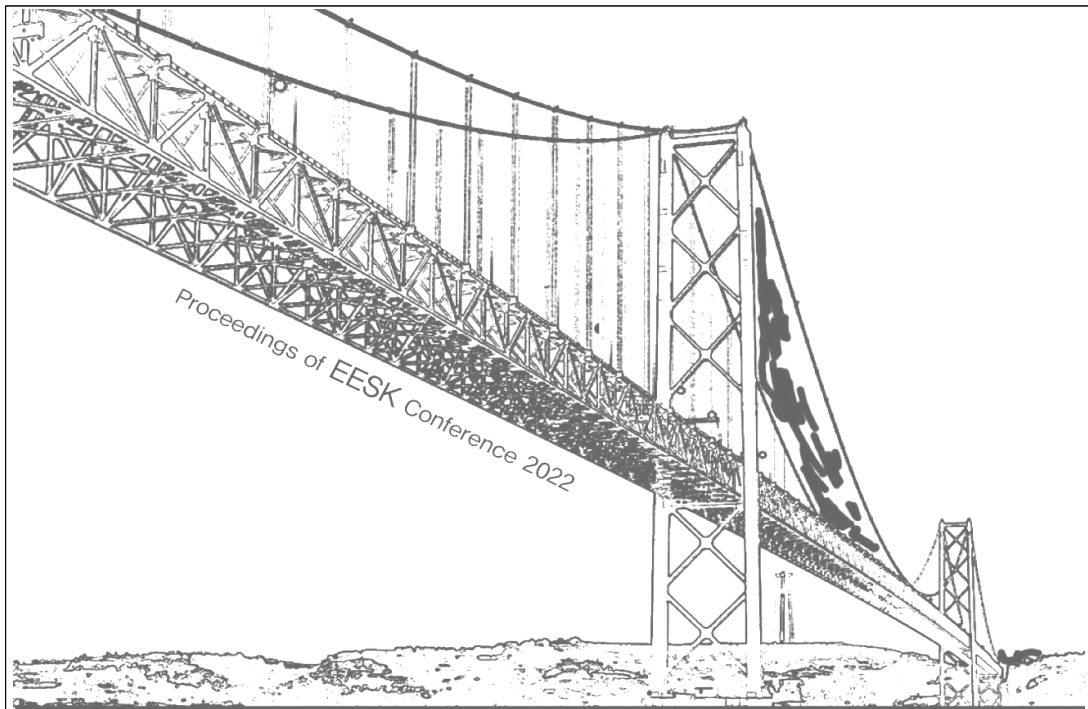
Fig. 2. JSP0G Location Site Amplification

감사의 글

이 연구는 기상청의 「지진·지진해일·화산 감시 및 예측기술 개발(NTIS: 1365003423)」 과제의 일환으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 조범준, 신동훈, 조봉근, 박순천, 황의홍. "기상청 광대역 관측소 표준 배경잡음 모델 개발." 지질학회지 45.2 (2009): 127-141.



사회기반시설물의 지진안전성 향상을 위한 최신 연구 현황

KIGAM 지진관측자료 공유 시범 서비스 공개

A Pilot Service for KIGAM Seismic Records Web Sharing

조형익*1) 이문교** 김영채*** 김인호**** 제일영*****
 Cho, Hyung-Ik Lee, Moon-Gyo Kim, Youngchai Kim, Inho Che, Il-Young

한국지질자원연구원(KIGAM) 지진연구센터에서는 향후 ‘지진전문연구정보 공공 서비스 체계’ 구축의 일환으로 ‘지진관측자료 공유 서비스’를 우선 구축하였다. ‘지진전문연구정보 공공 서비스 체계’란, 국내 발생 지진에 대한 기본정보 외에도 산·학·연 현장에서 실질적으로 활용될 수 있는 지진관측, 지진연구 기반의 다양한 결과물을 지진전문연구정보로 정의하고, 공공이 손쉽게 접근할 수 있는 웹을 통해 서비스하는 체계를 말한다. KIGAM은 정부출연연구기관으로서 기본적인 지진정보(발생시간, 위치, 규모)와는 차별화된 지진학술정보와 전문연구정보를 국토지질 공공기술/정보로의 활용성 극대화를 위해 향후 해당 체계를 통해 제공하고자 한다.

‘지진전문연구정보 공공 서비스 체계’의 공식 구축 이전, 국내 발생 지진에 대한 지반운동 데이터베이스(Ground motion database)를 목표로 ‘지진관측자료 공유 서비스’를 시범적으로 공개하였다. KIGAM 지진관측망(KGNET)에서 생산되는 지진관측자료의 수요자 제공을 위한 웹 서비스 플랫폼을 구축하였으며, 태평양지진공학연구센터(PEER) 등 국외 유사 플랫폼 벤치마킹에 기초하고 실무 활용성 증대를 목적으로 설계하였다. Fig. 1의 상부는 시범 웹 서비스 메인 페이지(data.kigam.re.kr/quake)이며, 배경 이미지는 KIGAM 지리산종합지진관측소(JRB) 전경사진을 사용하였다. Fig. 1의 하부는 시범 웹 서비스의 메뉴 구조이다.

지진관측자료의 효과적 활용을 위해서는 관측 환경 관련 정보가 충분히 제공될 필요가 있다. ‘관측소 정보’ 메뉴에서는 KGNET 61개소의 상세정보가 제공되는데 관측개시일, 설치 위경도, 고도, 설치유형(지표형, 시추형, 지표/시추형), 계측기/기록계 종류, 지반분류 등을 포함한다. 지반조사 미수행 관측소도 존재하는데 향후 조사 수행에 따라 결과를 게시할 예정이다. ‘메타데이터’는 가공되지 않은 지진관측 원시자료(miniSEED 형태 등)를 분석하는데 필요한 계측기/기록계의 계기응답정보를 StationXML, datalessSEED, RESP file의 형태로 제공한다.

‘지진관측자료’의 검색/다운로드 메뉴에서는 ‘이벤트파형자료’, ‘연속파형자료’와 ‘이벤트 상세검색’ 서비스를 제공한다. ‘이벤트파형자료’는 기상청 국내 지진목록을 활용하여 KGNET에서 관측된 이벤트파형 원시자료 전체를 지진 이벤트 단위 묶음으로 제공하며, 지진 규모, 발생 기간, 진



Fig. 1. Main web page design and structure of service menu

* 정회원-한국지질자원연구원 지진연구센터, 선임연구원 (E-mail: hicho@kigam.re.kr)

** 정회원-한국지질자원연구원 지진연구센터, 선임연구원 (E-mail: mglee@kigam.re.kr)

*** 한국지질자원연구원 지진연구센터, 선임기술원 (E-mail: yckim1224@kigam.re.kr)

**** 한국지질자원연구원 지진연구센터, 책임기술원 (E-mail: ihkim@kigam.re.kr)

***** 한국지질자원연구원 지진연구센터, 책임연구원 (E-mail: che10@kigam.re.kr)

양 위치로 자료의 선별 조회가 가능하다. 규모 2.5 이상 지진 이벤트의 가속도, 속도 각 20 sps, 100 sps 관측기록이 제공된다. ‘이벤트파형자료’에서 제공되는 관측기록은 연속파형 원시자료에서 동일 시간대로 일괄 추출된 원시관측기록으로 관측소 위치에 따른 진앙거리는 고려하지 않고 300초 구간으로 일괄 추출되어 miniSEED 형식으로 제공된다. ‘연속파형자료’는 임의시간 구간에 대한 연속(파형)자료를 제공하는 기능으로 대상 관측소 및 채널, 자료 시간을 설정하여 miniSEED, SAC 및 ASCII (GeoCSV) 형식으로 관측자료를 내려 받을 수 있다. 관측소에 따른 채널, 자료시간을 고려한 가용률 미리보기 기능을 제공한다. ‘이벤트 상세검색’ 메뉴는 이벤트파형 원시자료 및 가공자료의 검색 및 다운로드 기능이다. 앞서 ‘이벤트파형자료’ 메뉴에서 제공되는 ‘이벤트파형 원시자료’와 달리 정규화 Arias intensity 개념을 활용하여 지반운동 에너지가 집중된 시간대를 자동으로 추출하여 전처리되는 ‘이벤트파형 가공자료’와 전처리되지 않은 ‘이벤트파형 원시자료’가 제공된다. 규모 3.0 이상 지진 이벤트에 대한 진앙거리 500 km 이내 관측소 단위 관측기록의 상세검색이 가능하다(Fig 2). 가공자료의 count값은 물리값으로 변환하여 GeoCSV 혹은 miniSEED 형태로 서비스된다. 원시자료는 miniSEED로만 제공되고 count값의 물리값 변환은 적용하지 않는다.

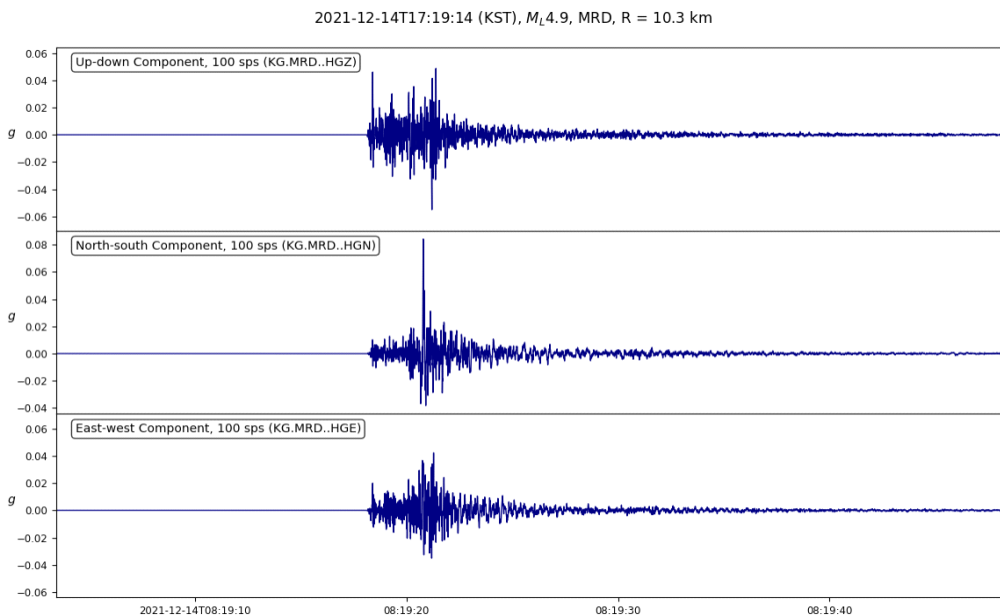


Fig. 2. A preview of the three-component seismic records at KIGAM MRD station (epicentral distance 10.3 km) of the Jeju earthquake ($M_L = 4.9$) on December 14, 2021.

누구나 서비스를 이용할 수 있으나, 지진관측자료 등의 다운로드에는 KIGAM 지오빅데이터오픈플랫폼 (data.kigam.re.kr/)에 회원등록한 이용자에 한해 권한을 부여한다. 이는 자료의 부적절한 사용 배제, 향후 사용자 그룹의 특성 분석에 기초한 자료 기획, 업데이트 등에 활용하기 위함이다. 시범 서비스에는 2016년 이후 지진관측자료를 제공하며, 다운로드 요청 시 활용 목적(연구, 실무, 교육, 기타)에 대한 설문을 요구한다. 누적된 활용 목적 설문 기록은 서비스 개선에 활용될 예정이다.

향후 FDSN (International Federation of Digital Seismograph Networks) Web Services 오픈을 계획 중이다. FDSN에서 정의한 HTTP(S) 기반의 OpenAPI 서비스로, 파이썬의 Obspy 등 잘 알려진 라이브러리 사용 시 수월하게 자료를 다운로드 받을 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 “지진활동 추적 및 관측자료 통합관리기술 개발”과제의 일환으로 수행되었습니다.

사회기반시설 네트워크의 지진 복원력 평가 및 네트워크 구성 요소의 상대적 중요도 지표 제시

Evaluation of Earthquake Resilience of Infrastructure Networks and Relative Importance Measure of Network Components

권영준*1)
Kwon, Youngjun

송준호**
Song, Junho

최근 급격한 인구 증가와 도시로 집중되는 인구의 수요로 인해 전력망, 수송망, 상하수도망과 같은 주요 사회기반시설이 복잡해지고 있다. 또한, 가속화되는 기후 변화는 중추 시스템이 외부 자연재난에 대해 더욱 취약하게 만든다. 이에 기반시설이 외부 재난에 대응할 수 있는 총체적인 능력을 일컫는 재난 복원력(Disaster Resilience) 개념이 다양한 관점에서 개발되고 있으며, 재난으로 발생하는 리스크에 대응하기 위한 전략의 근거로 발전하고 있다[1].

일반적인 사회기반시설 네트워크와 같은 복잡 시스템의 경우 개별 구조 요소의 불확실성을 기반으로 다수의 구조 요소를 포함하는 시스템 신뢰성 평가가 이루어진다. 이때, 합리적인 재난 복원력 평가는 재난 자체와 이로 인한 구성성분 상태의 불확실성을 확률론적으로 고려하고 구성성분-시스템의 관계를 통합적으로 고려하여 목표 복원력 확보를 위한 의사결정에 기준을 제공할 수 있어야 한다[2]. 구성 요소 중요도 척도(Component Importance Measure, CIM)는 시스템 성능에 대해 구성 요소의 상대적 기여도를 정량화한 것으로, 네트워크의 재해 복원력을 극대화하기 위한 보수·보강 의사결정 전략을 수립할 때 주요한 기준이 된다[3].

본 연구에서는 신뢰성 지수(Reliability index, β)와 여유성 지수(Redundancy index, π)기반의 재난 복원력 평가 방법론을 사회기반시설 네트워크에 적용 검증한 뒤, 네트워크의 보수·보강 의사결정 시 합리적인 근거가 되는 구성 요소 중요도 지표를 제시하고자 한다. Fig. 1의 교량, 터널, 사면, 옹벽으로 구성된 포항의 대규모 기반시설 네트워크에 대해 실제 2017년 발생했던 규모 5.4 지진을 가정하여 지진 복원력을 평가한다. 시스템 성능을 주요 노드 간의 연결로 설정하여 최대지반가속도에 대한 지면 운동 예측방정식을 도입하였으며, 각 구성 요소 응답을 로그 정규 분포로 가정하여 지진 취약도 해석을 수행하였다.

재난에 의한 구성 요소 파괴 단계와 이로 인한 시스템 파괴의 단계를 구분하여 재난 복원력을 평가하기 위해 초기 k 개의 구성 요소가 파괴되는 조합 중 i 번째 조합 F_i^k 에 대한 신뢰성 지수와 여유성 지수를 다음 식 (1)과 (2)로 제한한다.

$$\beta_i^k = -\Phi^{-1}(P(F_i^k|H)) \quad (1)$$

$$\pi_i^k = -\Phi^{-1}(P(E_{sys}|F_i^k, H)) \quad (2)$$

여기서, Φ^{-1} 은 정규 역 누적 분포 함수이고, H 와 E_{sys} 는 각각 재난 사건과 최종 시스템 파괴 사건을 나타낸다.

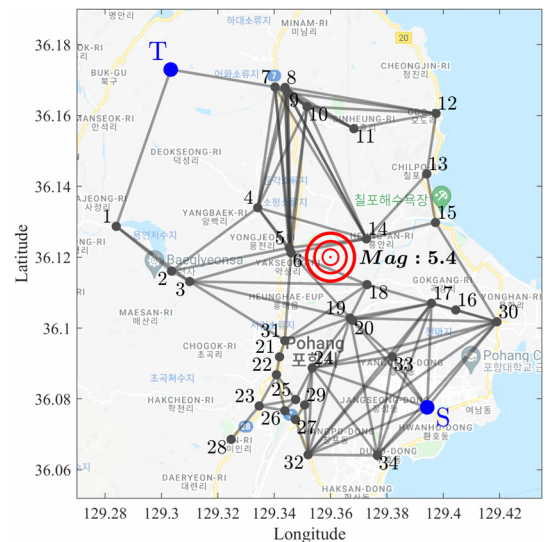


Fig. 1. Topology of Pohang infrastructure network

* 서울대학교 건설환경공학부, 석박통합과정 (E-mail: yjkweon@snu.ac.kr)

** 정회원·서울대학교 건설환경공학부, 교수 (E-mail: junhosong@snu.ac.kr)

Fig. 2는 포항 기반시설 네트워크의 초기 구성 요소 파괴 조합에 대한 (π_i^k, β_i^k) 산점도에 재난 발생 빈도에 따른 시스템 파괴 확률 등고선을 함께 표기한 β - π 다이어그램이다. 포항 네트워크는 동일한 초기 구성 요소가 파괴 개수 k 에 대해 신뢰성 지수가 증가할수록 여유성 지수는 감소하는 추세를 보이며, 비교적 넓은 영역에 분포하는 신뢰성 지수가 시스템 성능에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

β - π 다이어그램을 통해 목표 재난 복원력을 만족하지 않는 주요 F_i^k 를 식별한 뒤, 해당 F_i^k 만을 기반으로 구성 요소 중요도 척도를 산정하였다. 재난 복원력은 다수의 구성 요소 조합 단위로 평가하지만, 이후 보수·보강 의사결정은 개별 구성 요소 단위로 수행하기 때문에 CIM 산정 시 F_i^k 에 속한 각 구성 요소의 기여도에 따라 다이어그램의 등고선 값을 적절히 분배해야 한다. 기여도는 시뮬레이션을 통해 F_i^k 의 개별 구성 요소 파괴로 유발되는 시스템 파괴 확률의 변화율로

설정하고, 이를 F_i^k 의 등고선 값에 곱하여 해당 구성 요소의 CIM에 누적한다. Fig. 3에는 대표 재난 발생 빈도에 따라 e 번째 구성 요소의 CIM을 정규화하여 k 마다 나타내었다. 결과적으로 지진 발생 빈도에 따라 식별되는 주요 초기 파괴 조합이 달라져 CIM의 양상이 달라짐을 확인하였다.

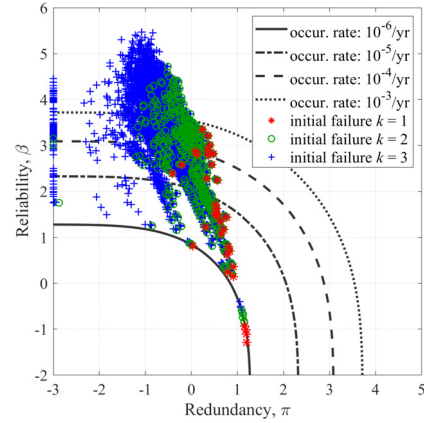
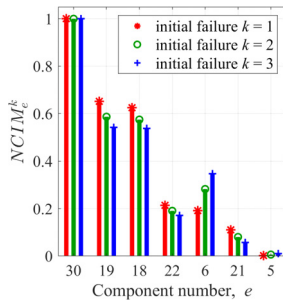
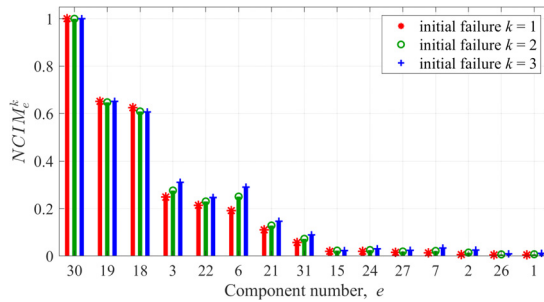


Fig. 2. β - π diagram of Pohang network



(a) Occurrence rate ($2 \times 10^{-6}/\text{yr}$)



(b) Occurrence rate ($2 \times 10^{-4}/\text{yr}$)

Fig. 3. Proposed component importance measures in Pohang infrastructure network

본 연구에서는 사회기반시설 네트워크에 대한 재난 복원력 평가 방법론을 포항 네트워크에 적용함으로써 타당한 결과를 보여주는 것을 확인하였다. 지진 복원력 평가의 결과를 바탕으로 시스템 파괴의 인과성을 고려한 구성 요소 중요도 지표를 제안하였으며, 시스템의 재난 복원력 유지 및 향상을 위한 추후 보수·보강 의사결정에 도움이 될 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., ... & Von Winterfeldt, D. (2003). A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake spectra*, 19(4), 733-752.
2. Lim, S., Kim, T., & Song, J. (2022). System-reliability-based disaster resilience analysis: Framework and applications to structural systems. *Structural Safety*, 96, 102202.U.S.
3. Nguyen, K. A., Do, P., & Grall, A. (2014). Condition-based maintenance for multi-component systems using importance measure and predictive information. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 1(4), 228-245.

수요자 관점을 고려한 전략적 평가 기준 개발 연구: 지진조기경보 사례

A study on the Strategic Assessment Model considering the Perspective of Public Service: Earthquake Early Warning systems

조성흠*
Cho, Seongheum

안재광**1)
Ahn, Jae-Kwang

황의홍***
Hwang, Eui-Hong

박순천****
Park, Sun-Cheon

공공서비스로 제공되는 재해 경보는 국민의 생명 및 재산피해와 직결되므로 신뢰도가 중요하지만 조기경보 시스템에서 신뢰도는 확보는 쉽지 않은 실정이다. 다양한 조기경보시스템에서 경보의 판단 결정인자는 많아질 수록 정확도가 올라가지만 신속성이 낮아질 수밖에 없는 구조이다. 이때 지진과 같이 짧은 시간 동안 큰 피해를 야기시키는 재해의 경우 경보 시간은 인명 및 재산 피해와 직결되기에 신속성은 필수이다. 그렇다면, 우리는 정확도가 떨어지지만 신속성을 보유한 공공서비스를 과연 얼마나 신뢰하고 수용할 수 있을지 고민해 볼 필요가 있다.

지진조기경보의 경우 정확도는 사용되는 관측소의 수가 증가할수록 규모와 위치에 대한 정확도가 향상되지만 다수의 관측소가 P파를 감지하는 시간까지 걸리는 시간까지 경보를 내보낼 수 없기에 신속성은 떨어진다. 결국 신속성이 떨어지는 경보 시스템은 인명 및 재산 피해에 실효성이 없다. 그렇다고 피해 저감의 측면만을 고려한 조기경보시스템을 채용한다면, 경보 오류(ex. 오경보, 미경보 등)와 함께 발생하는 공공서비스의 신뢰도 문제에 직면할 것이다. 현재 지진조기경보 기술 중 1개의 관측소만으로 사용하는 경보시스템이 개발되어 있지만 경보오류에 대한 문제점으로 공공서비스로 확장된 사례는 전무하다. 따라서, 정부에서 제공하는 공공 서비스인 지진조기경보 시스템은 개발 단계부터 신속성, 정확도, 수요자의 요구사항 등의 다양한 관점의 고민이 필요하다. 이때 무엇보다도 공공서비스의 오류는 쉽게 용인될 수 없다는 점을 반드시 인지해야 한다.

본 연구에서는 특정한 기준 없이 미경보 및 오경보 횟수, 분석 오차 수준을 비교하여 경보 시스템의 성능을 상대적으로 평가하는[1] 문제점을 개선하고자 지진조기경보의 신속성과 정확도에 수요자의 관점을 반영할 수 있는 평가 방법을 개발하였다.

관점을 고려하기 위해 사회과학적 접근을 시도하였고, 이때 설문조사와 AHP(Analytic Hierarchy Process)를 활용하여 지진조기경보의 성능을 판단하는 새로운 평가 절차를 제시하였다. 기상청 지진조기경보 관련 실무자 및 개발자를 대상으로 설문조사를 수행하여 관점을 고려한 평가 기준을 정립하였고, AHP를 통해 각 기준의 우선순위를 정량화하여 지진조기경보시스템의 분석 성능을 나타내는 평가 모델을 제시하였다. 평가 모델은 미경보 제어, 오경보 제어, 규모 정확도, 위치 정확도를 의미하는 4가지 요소와 해당 요소의 중요도를 반영하는 가중치로 반영되어 있다. 각 요소의 정의는 Table 1에 정리하였다. 평가 모델에 적용된 가중치 w_1 과 w_2 , 최대 허용 오차는 설문조사 결과를 기준으로 설정된 값이며, 각 요소별 가중치는 AHP 분석을 통해 도출되었다.

제안된 평가 모델의 검토를 위해 실제 지진조기경보 분석 시스템에 대한 성능 평가를 수행하였다. 평가 대상 시스템은 ElarmS 알고리즘의 가속도 진폭 점검 모듈(이하 AC 모듈)과 진폭 변화량 점검 모듈(이하 RP 모듈) 설정에 따라 5가지로 구성하였으며, 과거 한반도에서 발생한 58개 지진의 분석 결과에 대한 성능평가 점수를 산출하였다. 이때 재현성에 의한 오차를 고려하여 동일한 시뮬레이션을 20회 반복 수행하였고, 성능평가 20회 점수를 통계적으로 제시하였다.

* 기상청 지진화산연구과, 연구원

** 정회원, 기상청 지진화산연구과, 기상연구소 (E-mail: propjk@korea.kr)

*** 기상청 지진화산연구과, 기상연구소

**** 정회원, 기상청 지진화산연구과 과장

Table 1. Definition of four evaluation factors and methods

평가요소	미경보 제어(A)	오경보 제어(B)	규모 정확도(C)	위치 정확도(D)
평가산식	$A = \frac{\sum_{n=1}^N (s_{1_n} \times w_{1_n} \times w_{2_n})}{\sum_{n=1}^N (1 \times w_{1_n} \times w_{2_n})}$ $s_1 = \begin{cases} 0 & \text{missed} \\ 1 & \text{not missed} \end{cases}$ w_1 = 지진 규모별 가중치 w_2 = 지진 발생 위치별 가중치 N = 전체 이벤트 수	$B = \frac{\sum_{n=1}^N (s_{2_n} \times w_{1_n} \times w_{2_n})}{\sum_{n=1}^N (1 \times w_{1_n} \times w_{2_n})}$ $s_2 = \begin{cases} 0 & \text{false} \\ 1 & \text{not false} \end{cases}$ w_1 = 지진 규모별 가중치 w_2 = 지진 발생 위치별 가중치 N = 전체 이벤트 수	$C = \frac{\sum_{n=1}^m (s_{3_n} \times w_{1_n} \times w_{2_n})}{\sum_{n=1}^m (1 \times w_{1_n} \times w_{2_n})}$ $s_3 = 1 - \frac{ \text{분석 규모 오차} }{\text{최대 허용 오차}}$ w_1 = 지진 규모별 가중치 w_2 = 지진 발생 위치별 가중치 $m = N - (\text{미경보 및 오경보 수})$	$D = \frac{\sum_{n=1}^m (s_{4_n} \times w_{1_n} \times w_{2_n})}{\sum_{n=1}^m (1 \times w_{1_n} \times w_{2_n})}$ $s_4 = 1 - \frac{ \text{분석 위치 오차} }{\text{최대 허용 오차}}$ w_1 = 지진 규모별 가중치 w_2 = 지진 발생 위치별 가중치 $m = N - (\text{미경보 및 오경보 수})$
가중치	$\alpha = 0.208$	$\beta = 0.501$	$\gamma = 0.134$	$\delta = 0.157$
평가식	$\text{score} = \alpha \cdot A + \beta \cdot B + \gamma \cdot C + \delta \cdot D$			

Fig. 1은 알고리즘 1에 대한 20회 성능 평가 결과 나타내며, 분석에 사용된 관측소 수(nS)가 각각 4, 8, 14를 만족하는 시점에서의 평가점수를 보여준다. 관측소 수가 증가할수록 평가점수가 높아지고 점수 편차가 줄어드는 것을 확인할 수 있는데, 이는 관측소 수가 증가함에 따라 조기경보의 분석 정확도와 안정성이 증가하는 경향을 반영하는 것으로 해석된다. Fig. 2는 5개 알고리즘의 성능 평가 점수를 비교한 그림으로 RP 모듈을 사용하지 않은 알고리즘 1, 2의 점수가 알고리즘 3, 4, 5에 비해 더 높게 나타났으며, AC 모듈의 환경 설정 차이로 인해 알고리즘 1, 2의 점수 편차가 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 RP 모듈 사용이 국내 조기경보 분석에는 적합하지 않으며, AC 모듈의 설정에 따라 분석 안정성 및 기대 성능이 달라질 수 있음을 알 수 있다. 제안된 평가 모델은 경보 정확도 향상에 의한 점수 상승 경향을 잘 반영하고 있으며, 향후 지진조기경보의 성능 점진 지표로 활용될 수 있다고 기대된다.

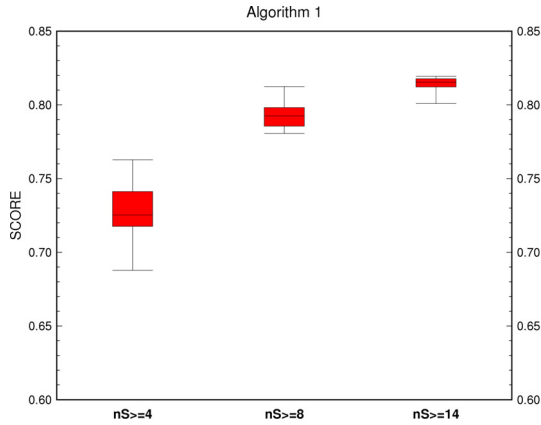


Fig. 1. Box and whisker plot for evaluation scores of algorithm 1

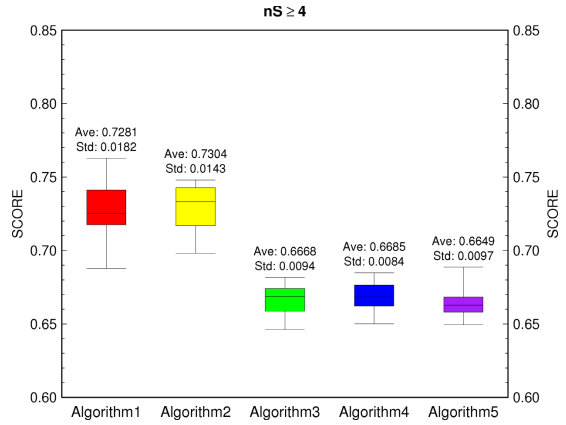


Fig. 2. Box and whisker plot for evaluation scores of five algorithms

감사의 글

본 연구는 지진·지진해일·화산감시 및 예측기술 개발 과제(과제번호: 135002988)의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Chung A. I., Henson I., and Allen R. M. Optimizing Earthquake Early Warning Performance: ElarmS-3. Seismological Research Letters. 2019;90:727-743.

산업시설 구조설계기준 제정(안) 마련을 위한 검증 연구 결과

-내진설계기준을 중심으로-

The Results of Validation Study for Developing Structural Design Standard of Industrial Facilities -Focus on Seismic Design Standard-

이진형*¹⁾ 김익현** 홍기증***
Lee, Jin-Hyeong Kim, Ick-Hyun Hong, Ki-Jeung

1. 서론

산업시설은 여러 가지 목적에 따라 건설되므로 그 종류가 다양하고 육상, 지하 혹은 해상에 건설되기도 한다. 이는 크게 발전시설, 화학시설, 환경시설 및 기타 플랜트로 구분할 수 있다. 이러한 산업시설들은 대부분 국가기반시설로 분류된다. 지진 시 산업시설에 피해가 발생하면 국가 경제기반에 직접적으로 심각한 피해를 발생시킬 수 있으므로 다른 시설에 비해 더 높은 수준의 내진설계가 요구된다[1]. 지진·화산재해대책법에서는 제14조(내진설계기준의 설정)에서 31종 시설물에 대해 내진설계기준을 정하도록 규정하고 관계법령에 의거하여 내진설계기준을 제정 및 운영 중이다. 그러나 이들 시설물의 경우 국토부, 산자부, 환경부 등 다수의 중앙부처(관리주체)가 따로 관리하고 있어, 이들 시설물의 구조안전성과 운전지속성 확보를 위한 일관된 관리체계를 확립하기 어려운 실정이다[2].

2. 연구 동향 및 필요성

국내 원자력발전소의 설계는 기본적으로 Table 1의 전력산업기술기준(Korea Electric Power Industry Code, KEPIC)을 따라 설계하게 되어있고, 중요 시설의 경우 그 특성에 맞게 추가적인 요건을 준수하여 설계한다.

Table 1. The design standards & codes applied to NPP

구조물 형식	구조물 종류	국내 설계기준	해외 참조표준
콘크리트 구조물	격납건물	KEPIC-SNB	ASME Sec.III, Div.2
	내진범주 I 급	KEPIC-SNC	ACI 349
	비내진범주	KEPIC-SGB	ACI 318
강 구조물	격납건물	KEPIC-MN	ASME Sec.III, Div.1
	내진범주 I 급	KEPIC-SND	AISC N690
	비내진범주	KEPIC-SGE	AISC 360
		KEPIC-SGF	AISC 341
배관	내진범주 I 급	KEPIC-MN	ASME Sec.III, Div.1

반면, 산업시설은 관리주체가 다양하여 관련 법제도 및 기준을 일관되게 정비하지 못하고 있다. 2000년 이전의 국내 화력발전소의 내진설계는 미국 UBC(Uniform Building Code)와 ASCE 7(American Society of Civil Engineers)을 참조하였다. UBC는 1997년을 끝으로 2018년 IBC(International Building Code)로 발전하였다. UBC, IBC 및 ASCE 7을 참조하여 2005년 제정된 건축구조설계기준(KBC)은 기본적으로 일반 건물을 설계하기 위해 만들어진 기준이다. 이를 산업시설 내진설계에 그대로 적용하는 경우 시설물의 특성을 고려한 내진성능목표를 설정할 수 없게 된다. 중요 산업시설은 인명안전은 물론 기능유지 또는 즉시복구의 성능목표가 요구되는 경우가 있다[1]. 따라서 중요 산업시설에 대해 각 시설물의 특성을 고려한 내진성능목표를 설정하고 이를 위한 설계기준을 제시하고자 한다.

3. 연구결과

지진으로부터 산업시설의 운전성을 보장하고 인명피해와 재산피해를 최소화하는 것을 목표로 하여 산업시설

* 정회원-대한전기협회 KEPIC본부 원자력팀, 대리

국민대학교 건설시스템공학부, 박사과정 (E-mail: jhlee@kepic.org)

** 정회원-울산대학교 건설환경공학부, 교수 (E-mail: ickhyun@ulsan.ac.kr)

*** 정회원-국민대학교 건설시스템공학부, 교수 (E-mail: kjhong@kookmin.ac.kr)

내진설계기준을 제정한다. 여기서 운전성이란, 산업시설이 건설 목적에 따라 부여된 본래의 기능을 발휘하면서 작동을 유지하는 성능을 의미한다.

3.1 내진등급

단위산업시설은 여러 개의 구성요소로 이뤄지며, 구성요소는 시스템 또는 단위요소가 될 수 있다. 여기서, 단위산업시설은 내진설계 대상이 되는 가장 큰 단위의 시스템; 시스템은 특정 목적을 달성하기 위해 유기적으로 연계된 구성요소의 집합체; 단위요소는 계층화된 시스템의 구성요소 중 최하위 단계의 구성요소를 의미한다.

단위산업시설의 시스템 중요도는 지진피해로 인한 인명과 재산 피해의 규모에 따라 일반시설 중요시설 및 핵심시설로 구분한다. 또한, 단위요소가 상위시스템의 운전성에 미치는 영향에 따라 단위요소의 계통중요도를 주계통, 부계통, 보조계통으로 구분한다. 이렇게 정의한 단위산업시설의 시스템중요도와 단위요소의 계통중요도를 고려하여 단위요소의 내진등급을 Table 2와 같이 구분한다.

Table 2. Seismic category				
중요도		단위산업시설의 시스템중요도		
		핵심시설	중요시설	일반시설
단위요소 계통중요도	주계통	내진특A등급	내진특등급	내진등급
	부계통	내진특등급	내진등급	내진등급
	보조계통	비내진대상		

3.2 내진성능수준 및 목표

지진 시 단위요소에 요구되는 내진성능수준은 기능수행수준, 즉시복구수준, 장기복구수준 및 붕괴방지수준으로 분류한다. 이때, 내진성능수준별 단위요소의 설계거동단계는 시설물의 거동특성을 고려하여 설정한다. 단위요소의 내진성능목표는 내진등급에 따른 설계지진 작용 시 요구되는 내진성능수준으로 설정한다. 심각지진에 대해서는 기능수행수준을 만족하고, 극한지진에 대해서는 기능수행, 즉시복구, 장기복구 또는 붕괴방지 수준으로 운전성을 확보하도록 Table 3-1과 3-2와 같이 내진성능목표를 설정한다. 여기서, 심각지진은 평균재현주기 50년, 100년, 200년으로 설계수명 내 발생확률이 비교적 크지만 지반운동 세기가 작은 지진을 말한다. 극한지진은 평균재현주기 500년, 1,000년, 2,400년, 4,800년으로 설계수명 내 발생확률이 매우 작지만 지반운동 세기가 큰 지진을 말한다.

Table 3-1. The goal of seismic performance

성능수준 재현주기		극한지진에 대해 붕괴방지수준으로 운전성 확보하는 경우			
		기능수행	즉시복구	장기복구	붕괴방지
심각지진	50년	내진등급			
	100년	내진등급			
	200년	내진특등급			
극한지진	500년				내진등급
	1,000년				내진등급
	2,400년				내진특등급
	4,800년				내진특등급

Table 3-2. The goal of seismic performance

성능수준 재현주기		극한지진에 대해 기능수행수준으로 운전성 확보하는 경우			
		기능수행	즉시복구	장기복구	붕괴방지
심각지진	50년	내진등급			
	100년	내진등급			
	200년	내진특등급			
극한지진	500년	내진등급			
	1,000년	내진등급			
	2,400년	내진특등급			
	4,800년	내진특등급			

4. 결론

본 연구에서는 기반산업시설의 상시 및 지진 시 구조안전성과 운전성을 확보하기 위한 구조 및 내진 설계기준에 대한 공통기준과 시설물 유형별로 7종(사일로, 저장탱크, 배관, 압력용기, 수용구조물, 타워 및 굴뚝)에 대해 각각의 구조 및 내진 설계기준을 제안하고, 설비의 구조설계기준과 내진검증기준을 제안한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의(과제번호 22RMPP-C163162-02) 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 홍기증, 조성국. 중요 산업시설의 내진설계 현황 및 개선방향. 67(6). PP.26-33. 2019.
2. 대한토목학회. 산업시설 구조기준 제정(안) 마련을 위한 검증 연구. 2021.

Unscented Kalman Filter를 사용한 층상 반무한 지반의 물성치 추정 기법

Estimation of the Properties of a Layered Half-space Using the Unscented Kalman Filter

이진호*1)

Nguyen Van Hieu**

이세혁***

Lee, Jin Ho

Nguyen Van Hieu

Lee, Se-Hyeok

The inverse analysis is important for various fields of science and engineering. Whereas the forward analysis aims to calculate expected outputs of a system from given inputs, the inverse analysis tries to identify the system and/or inputs from observed outputs. One of the important inverse problems in the area of civil engineering is the system identification (SI) to extract true physical parameters of a structure based on indirect measurements via a sensor network on the structure. Because of measurement noise, inadequate model parameters, and simplified approximations of numerical solutions, an ill-posed problem is always encountered in the inverse analysis. It means that the solution of inverse analysis is inherently non-unique and non-stable.

Many studies in the past solved an inverse problem by minimizing an objective function that quantifies the discrepancies between estimations from a numerical model and actual measurements. In most cases, the objective function Π is defined by the Euclidean square norm of an error function vector $\mathbf{f}$ as:

$$\Pi = \frac{1}{2} \left\| \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{U}^e, \mathbf{U}^m) \right\|^2 + \frac{1}{2} \lambda^2 \left\| \mathbf{x} - \mathbf{x}_0 \right\|^2 \quad \text{subject to } \mathbf{R}(\mathbf{x}) \leq 0 \quad (1)$$

where $\mathbf{x}$, $\mathbf{U}^e$, $\mathbf{U}^m$, $\mathbf{x}_0$, λ , and $\mathbf{R}(\mathbf{x})$ are the estimated parameters, estimated responses, measured responses, prior information of the parameters, regularization factor, and the constraints on the structural parameters, respectively. Basically, $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{U}^e, \mathbf{U}^m)$ can be defined to quantify the misfit of the responses as $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{U}^e, \mathbf{U}^m) = \mathbf{U}^e(\mathbf{x}) - \mathbf{U}^m$.

The optimized solution for Eqs. (1) or (2) can be obtained through the frequentist approach. The maximum likelihood estimation (MLE) technique has been one of the widely considered methodologies for the approach. Because the parameters to be estimated are assumed fixed in the technique, the MLE method does not provide the posterior distribution of the estimated parameters.

Apart from the frequentist approach, a Bayesian approach can be employed to optimize Eq. (1). The Bayesian inference is a statistical method that uses Bayes' theorem to update the posterior distribution of the estimated parameters as the evidence or the observation becomes available. Given the prior distribution and the likelihood of parameters $\mathbf{x}$ to be estimated, the posterior conditional distribution of the estimated parameters given the observation $\mathbf{Y}$ can be computed as

* 정회원,부경대학교 해양공학과, 부교수 (E-mail: jholee0218@pknu.ac.kr)

** 부경대학교 해양공학과, 박사과정 (E-mail: nvhl0chelsea@gmail.com)

*** 한국건설기술연구원 구조연구본부, 전임연구원 (E-mail: sehyeoklee@kict.re.kr)

$$p(\mathbf{x}|\mathbf{y}) = \frac{p(\mathbf{y}|\mathbf{x})p(\mathbf{x})}{\int p(\mathbf{y}|\mathbf{x})p(\mathbf{x})d\mathbf{x}} \quad (2)$$

Another methodology for Bayesian inference is the Bayesian filtering algorithm that also has been received great interest in many research areas in the past decades, especially for SI of the dynamic structure. A solution to an inverse problem in a layered half-space will be presented in this paper to estimate material properties of a layered half-space (Fig. 1). The thin-layer method (TLM) is employed for the application in order to solve the forward problem in a layered medium. This paper applies the UKF algorithm to estimate the material properties of a layered half-space. The algorithm is demonstrated with various examples in layered half-space (Fig. 2).

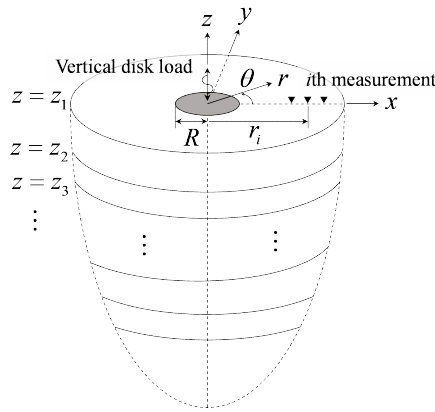


Fig. 1. Layered half-space subjected to a harmonic vertical disk load on its surface

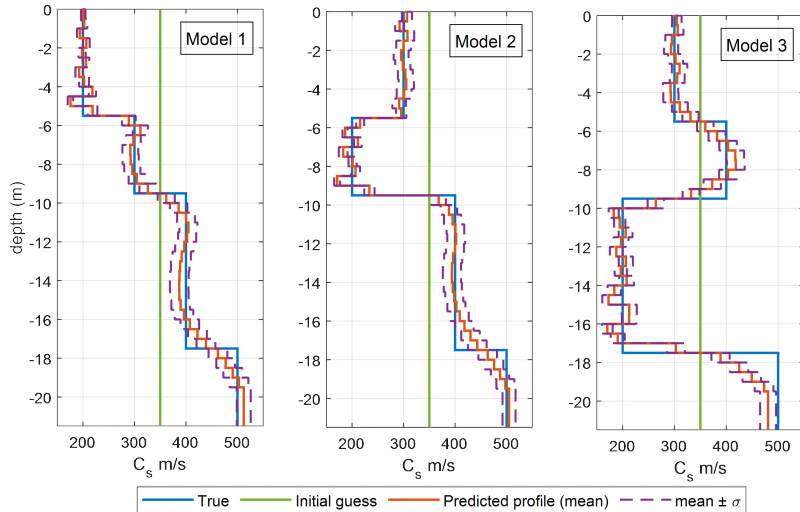


Fig. 2. Estimated profiles for example layered half-space

감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2020R1I1A3068424)

지진에 의한 구조물의 진동 데이터로부터 물성치를 추정하기 위한 Extended Kalman Filter

Extended Kalman Filter to Estimate the Properties of a Structure from Its Vibration Due to Earthquake

이진호*1) Nguyen Van Hieu**
Lee, Jin Ho Nguyen Van Hieu

Over the past few decades, structural health monitoring (SHM) has been attracted significant attention. The main topic in SHM is system identification (SI) which requires the appropriate data analysis technique to identify structural parameters from input-output or output data only. Given an initial Finite Element (FE) model, the structural parameters are updated and the discrepancies between estimated and measured data are minimized iteratively.

Generally, SI can be characterized as deterministic and probabilistic approaches. The inverse analysis by probabilistic approach is necessary to account for the presence of uncertainties of the parameters to be estimated. In the probabilistic method, the state and response of the FE model are assumed to have some probability distributions. Then, the posterior distributions of the estimated parameters are updated by Bayes' theorem.

The Kalman filter (KF) was first established in 1960 for discrete linear systems and extended to continuous linear system. KF has been applied in various engineering fields. It is the optimal algorithm in Bayesian inference with normal distributions. The only limitation of KF is the restriction to linear problems, which is very rare for complex engineering inverse analysis such as SI problems. To overcome this disadvantage, the extended Kalman filter (EKF) was proposed by approximating a nonlinear process with a linearized one.

Various techniques have been proposed to improve the performance of EKF. The iterated EKF (IEKF) and constrained EKF (CEKF) are two examples of the improved EKF. The original algorithm of IEKF was developed based on the Newton-Raphson method. It was modified so that the state is iteratively updated in each local iteration. On the other hand, CEKF improves the EKF method with prior information taken into consideration. Both IEKF and CEKF algorithms efficiently improve the accuracy and the rate of convergence compared with the traditional EKF.

In this study, we proposed the a hybrid method, iterated constrained EKF (ICEKF) that integrates the two algorithms. The proposed algorithm will be verified by various examples

감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2020R1I1A3068424)

* 정회원.부경대학교 해양공학과, 부교수 (E-mail: jholee0218@pknu.ac.kr)

** 부경대학교 해양공학과, 박사과정 (E-mail: nvh10chelsea@gmail.com)

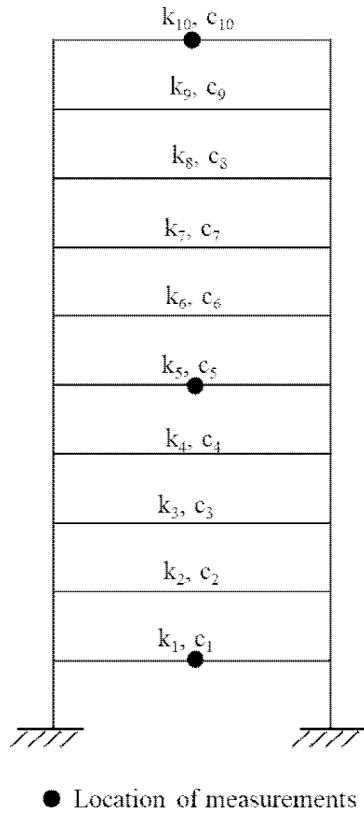


Fig. 1. 10-story frame structure

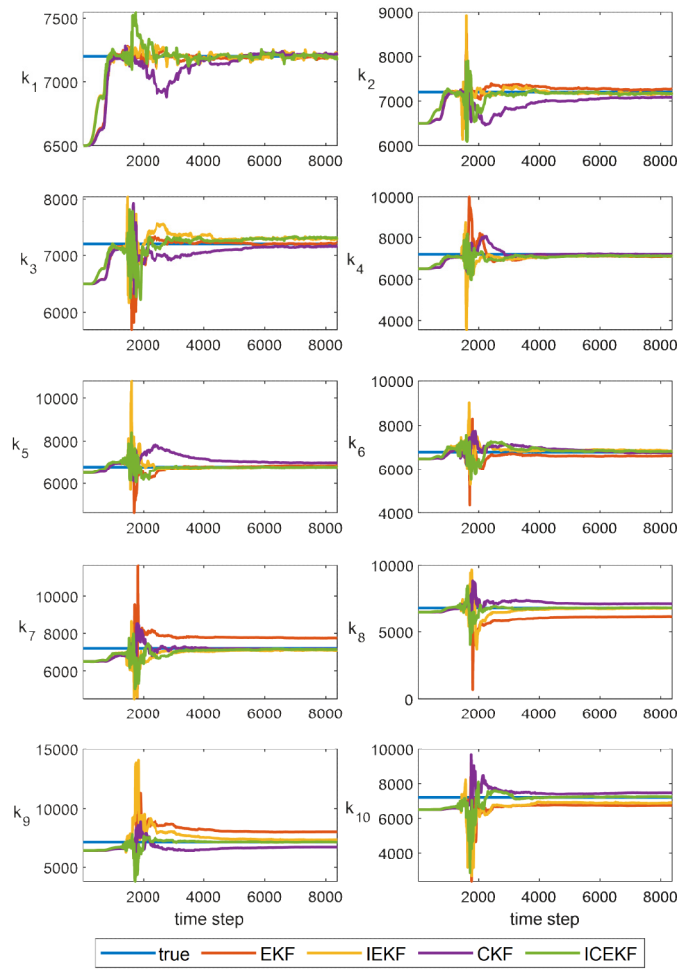


Fig. 2. Prediction of stiffness

머신러닝을 이용한 철골모멘트골조의 확률적 지진요구모델 도출

Derivation of Seismic Probabilistic Seismic Demand Model of Steel Moment Frame using machine learning

장학중*1)
Chang, HakJong김준희**
Kim, Junhee최인섭***
Choi, Insub

철골모멘트골조는 지진하중을 저항하기 위한 가장 널리 사용되는 횡력저항구조시스템이다. 최근 도심지의 건축물이 고층화되고, 공사기간을 단축하고, 건설 CO2 발생량을 줄이기 위해 철골모멘트골조가 많이 사용되고 있다. 철골 모멘트골조의 지진 취약도 및 손상상태를 평가하기 위해서는 지진반응계수(Engineering Demand Parameter)와 지진동의 세기(Intensity Measure)의 관계를 도출하는 것이 필요하다. 취약도 곡선은 구조물 또는 구조물의 지진반응계수가 주어진 지반운동의 세기에 대해 특정 수준의 손상에 도달할 가능성을 제공한다. 지진취약도곡선을 도출하기 위한 연구는 1980년대부터 수행되었으며, 지반운동에 대하여 구조물의 거동을 평가하기 위해서 많은 연구가 진행되어 왔다.

구조물에 대한 해석기술이 발전하면서 비선형동적해석에 대한 연구가 활발하게 진행되었다. 비선형 정적해석과 통계적인 방법을 통한 구조물의 취약도 곡선 도출방법이 개발되었다. 증분동적해석(incremental dynamic analysis, IDA)는 지진의 강도를 증가시키며 구조물의 응답을 관찰하여 특정 재현주기를 가지는 지진의 최대 지반가속도 또는 구조물의 고유주기에서의 스펙트럴 가속도에서의 동적응답을 예측할 수 있다[1]. 그러나 증분동적해석은 모두 적게는 수십번 많게는 수백번의 비선형 동적해석이 필요하기 때문에 해석시간이 오래 소모된다. 또한 구조물의 모델링을 위해서 재료비선형 모델, 파괴모드, 강도 강성저하 등 복잡한 고려사항들이 존재한다. 비선형동적해석을 이용하여 도출하는 취약도 곡선은 정확하지만, 시간이 많이 소모되기 때문에, 되어 다수의 건축물을 대상으로하는 도시레벨의 내진성능평가에 적용하기에는 한계점이 존재한다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해, 철골모멘트 골조의 모델링 및 비선형 해석 없이 설계변수를 통해 머신러닝을 이용하여 지진 취약도 곡선을 도출하려고 한다.

ANN based PSDM을 개발하기 위한 methodology는 5가지로 구성된다. (1) 철골 특수모멘트 골조에 대한 시뮬레이션 모델을 제작한다. 본 연구에서는 AISC 360-16 (AISC, 2016)을 만족하는 540개의 철골특수모멘트 골조를 모델링하였다[2]. (2) 240개의 지반운동기록을 수집하였다. (3) 540개 철골모멘트골조를 240개의 지반운동기록으로 비선형동적해석을 129,600회 수행하였다. (4) 540개 철골특수모멘트 골조 각각의 비선형동적 해석결과를 통해 얻어진 중간변위비와 응답스펙트럼 가속도의 PSDM 모델을 추출하고, 회귀계수를 데이터베이스화 하였다. (5) 구조물의 설계변수와 1,2,3차 고유주기를 입력데이터, 회귀변수 3개를 출력데이터로 선정하여 ANN based PSDM을 훈련하였다.

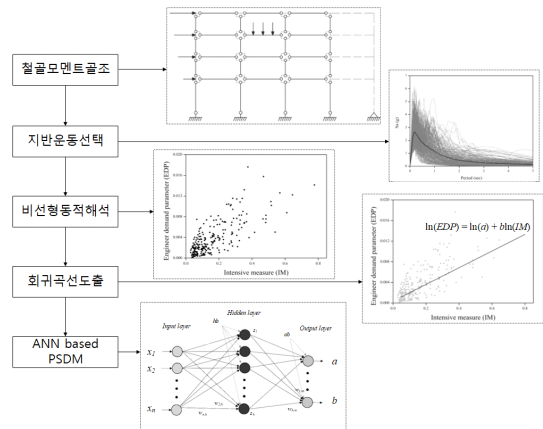


Fig. 1. Overview of methodology for ANN based PSDM

* 정회원.연세대학교 건축공학과, 박사과정 (E-mail: hakjong@yonsei.ac.kr)

** 정회원.연세대학교 건축공학과, 부교수 (E-mail: junhkim@yonsei.ac.kr)

*** 연세대학교 건축공학과, 연구교수 (E-mail: Insub@yonsei.ac.kr)

Table 1. Prediction accuracy of ANN based probabilistic seismic demand model

Parameter	ANN based probabilistic seismic demand model			
	Dataset			
	Training	Validation	Testing	Entire
R	0.9731	0.9529	0.9622	0.9681
MSE (%)	1.633	2.713	2.408	2.251

ANN based PSDM의 성능을 평가하기 위하여 540개의 데이터에서 378개 (전체데이터의 70%)를 훈련데이터로, 81개 (전체데이터의 15%)를 검증데이터로, 81개 (전체데이터의 15%)를 테스트 데이터로 사용하였다. 평균제곱오차(mean square error)와 R 값(Regression R-value), 2가지 방법을 통해 개발된 ANN based PSDM의 성능을 평가하였다. ANN based PSDM 모델 훈련결과는 Table 1과 같이, R 값은 훈련, 유효, 테스트, 전체데이터에서 각각 0.9731, 0.9529, 0.9622, and 0.9681이다. 평균제곱오차는훈련, 유효, 테스트, 전체데이터에서 1.633%, 2.713%, 2.4808%, 2.251%이다. ANN based PSDM 모델은 R value가 0.9681이상이고 MSE가 평균 2.25%로 으로 높은 예측정확도를 보여주었다.

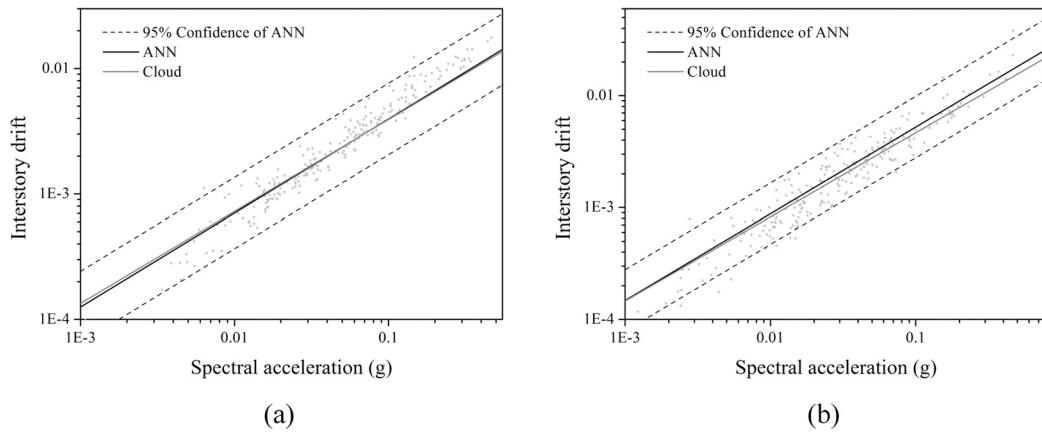


Fig. 2. Probabilistic seismic demand model derived from ANN model ; (a) 8 story SMF, (b) 19 story SMF

8층, 19층 철골모멘트 골조의 설계변수와 1,2,3차 고유주기와 ANN based PSDM을 활용하여, 두 구조물의 회귀상수를 도출하였다. Fig 2은 회귀상수로 도출한 PSDM, β 를 이용하여 구한 PSDM의 95% 신뢰구간, 그리고 240개의 지진파를 이용하여 비선형 동적해석 후 기존방법을 이용하여 도출한 PSDM이다. ANN based PSDM과 기존방법으로 도출한 PSDM이 8층, 19층 구조물에 대하여 일치하였다. 8층 SMF에서 ANN based PSDM의 95% 신뢰구간 계산된 회귀함수의 범주에 240개의 데이터 중 236개(98.3%)가 포함되어 ANN based PSDM이 높은 신뢰성을 갖는 것을 확인할 수 있다. 19층 SMF의 경우, ANN based PSDM의 95% 신뢰구간으로 계산된 회귀함수의 범주에 240개 데이터 중 228개(95%)가 포함되어, ANN based PSDM의 회귀함수가 높은 신뢰도가 있는 것으로 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다. (과제번호: NRF-2021R1A2C2007064)

참고 문헌

1. Vamvatsikos, D., & Allin Cornell, C. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(3), 491–514. <https://doi.org/10.1002/EQE.141>
2. Guan, X., Burton, H., & Shokrabadi, M. (2021). A database of seismic designs, nonlinear models, and seismic responses for steel moment-resisting frame buildings. *Earthquake Spectra*, 37(2), 1199–1222. <https://doi.org/10.1177/8755293020971209>

MACHINE LEARNING FOR RAPID SEISMIC DAMAGE-STATE PREDICTION OF STEEL MOMENT FRAMES

Hoang D. Nguyen*¹⁾

Myoungsu Shin**

1. Introduction

Machine learning (ML) has emerged as a promising tool for dealing with various problems in civil and structural engineering [1]. Compared to conventional approaches, the ML model can rapidly estimate the considered output variables for complex problems. For instance, they are capable of assessing the seismic damage states of building structures subjected to earthquakes. The conventional procedure requires complicated numerical models to fully observe the nonlinear behavior of structures. Thus, the ML model may reduce the computational cost of the conventional method. Furthermore, ML models can account for the sophisticated relationship between the input and output variables in high dimensions. These advantages have induced the large applications of ML models in civil and structural engineering.

Earthquakes are one of the disasters causing significant societal and financial losses. Damage state assessment of the ability to use buildings after an earthquake is an essential task because buildings cannot be used as usual until their damage state is determined. It is observed that the ability to use buildings must be detailed based on their safety damage states. The seismic damage state assessment task requires a significant amount of time depending on the number of buildings located in a city, which leads to increased economic losses for the people and companies out of business after earthquakes.

This study aims to propose a predictive model developed by ML for rapidly predicting seismic damage states of steel moment frames. For this purpose, two well-known ML models have been examined. Nonlinear time history analyses of 468 steel moment frames adopted from Guan et al. [2] subjected to 240 earthquake ground motions were performed to generate the dataset for ML models. The damage states of steel frames are determined based on the pushover analysis. Finally, the highest accuracy model is suggested for the seismic damage states of steel frames based on the performance of two ML models.

2. Machine Learning Models

In this study, two ML models were considered to develop the predictive model for predicting the seismic damage states of steel moment frames: random forest (RF) and extreme gradient boosting (XGBoost). RF model [3] is the combination of the bagging method with the random input variable selection technique. In the first step, a total of trees are generated from the training dataset. In each tree, a decision tree is constructed based on the selected input variables. Finally, the output is estimated by averaging the outputs from decision trees. XGBoost model [4] is a decision-tree-based ensemble ML algorithm. A typical XGBoost model includes an iterative procedure to optimize the objective function. In this process, the parameters in the next step are updated based on the residual from the previous step. The objective function in the XGBoost model is constructed by adding the regularization term to the loss function. The regularization term can control the complexity of the predictive model. Thus, the overfitting problem can be avoided.

3. Dataset Generation

Nonlinear time history analyses of 468 steel moment frames subjected to 240 ground motions were conducted using OpenSees numerical models, which resulted in 112,320 data points for the training and testing of the ML models. According to ACT-20 [5], the damage states of steel frames are categorized into three colors – green, yellow, and red – representing three conditions: inspected, restricted use, and unsafe, respectively.

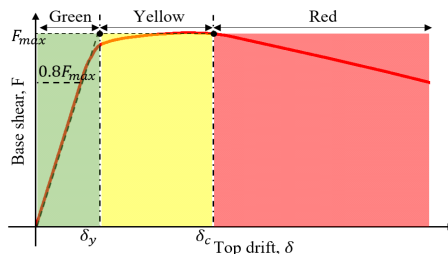


Fig. 1. Identification of structure damage states

In this study, the roof drift (i.e., ratio of the maximum top displacement to total height of the structure) obtained from the pushover curve was used to determine the damage states of steel frames.

* Postdoctoral Researcher, Department of Urban and Environmental Engineering, UNIST (Email: nguyenhoangk712@unist.ac.kr)

** Professor, Department of Urban and Environmental Engineering, UNIST (Email: msshin@unist.ac.kr)

Fig. 1 presents the procedure for determining the roof drift at the boundaries between damage states. Based on the descriptions in ATC-20 [5], the green tag is described as “no restriction on use or occupancy.” The behavior of steel frames was assumed to be in the linear range, and thus the drift at the yield point (δ_y) is considered to distinguish between the green and yellow regions. The red tag is defined as “the structure poses an obvious safety hazard”, and so the behavior of the steel frames is assumed to be in the degradation range. Thus, the roof drift (δ_c) corresponding to the maximum base shear (F_{max}) was used to separate the yellow and red regions.

For the input variables of the dataset, the spectral accelerations at 1–5 s in steps of 1 s were considered as representing the ground motions. A structure’s first three actual natural periods (T_1 , T_2 , and T_3) were used to represent the characteristics of steel frames.

4. Results and Discussions

The entire dataset (i.e., 112,320 data points) was divided randomly into training and testing datasets. The training dataset (70% entire dataset) was used to develop the predictive model. Meanwhile, the testing dataset (30% entire dataset) was used to evaluate the performance of the ML models. This procedure can minimize the overfitting problem. To evaluate and compare the performance of the two predictive models, a confusion matrix [6] was used. Three parameters, including accuracy, precision, and recall, were used to evaluate the performance of the ML models. The accuracy parameter used to measure global performance is the ratio of correctly classified cases to the total number of cases. Meanwhile, recall and precision measure the performance of ML models regarding individual damage state prediction.

Fig. 2 presents the performance of the two ML models in the testing dataset. It can be seen that the value of accuracy parameter of RF model (0.98) is higher than that of XGBoost model (0.97). In precision and recall parameters, there is no ML model that can surpass the remaining model for all individual damage state predictions. However, the RF model generally shows greater values in most cases (except the recall value in yellow tag). In addition, considering safety, the RF model produces good performance in the red tag prediction (i.e., the critical case). Overall, the RF model is proposed for the rapid prediction of the damage states of steel moment frames in this study.

		Predicted class			
		Green	Yellow	Red	Recall
Actual class	Green	30818	263	109	0.99
	Yellow	87	1009	158	0.8
	Red	20	122	1110	0.89
	Precision	1	0.72	0.81	0.98
		Accuracy			

(a) RF

		Predicted class			
		Green	Yellow	Red	Recall
Actual class	Green	30531	503	156	0.98
	Yellow	46	1055	153	0.84
	Red	9	115	1128	0.89
	Precision	1	0.63	0.78	0.97
		Accuracy			

(b) XGBoost

Fig. 2. Performance of ML models in the testing dataset

5. Conclusions

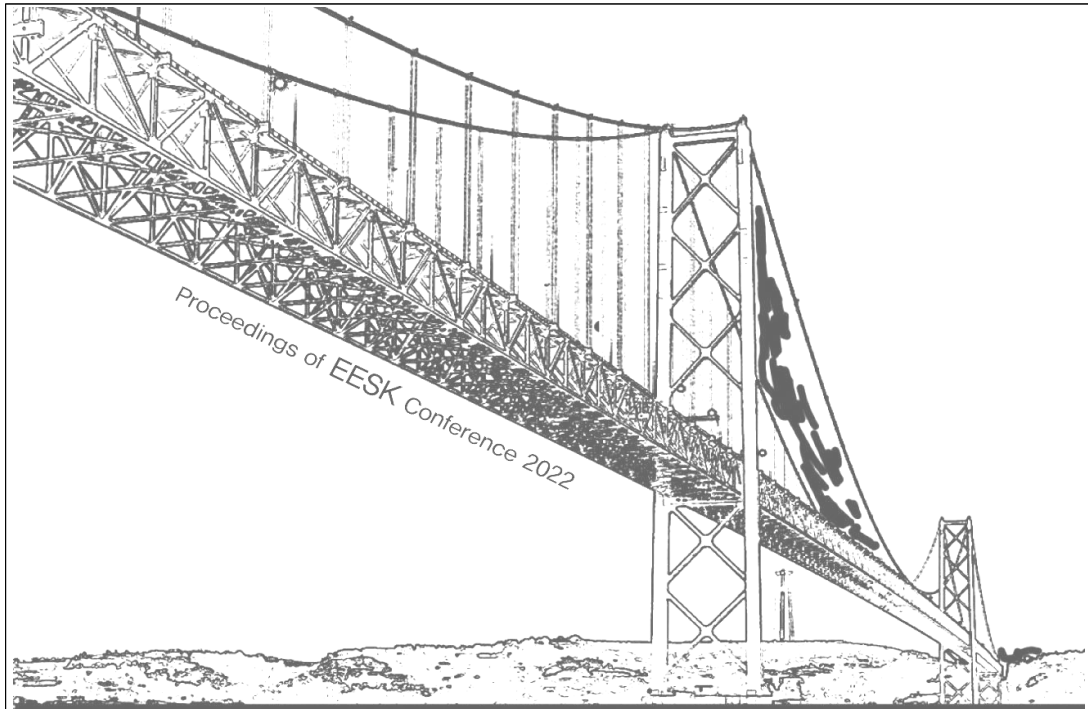
The development of RF and XGBoost models for rapidly predicting the seismic damage states of steel moment frames yields the conclusions that none could present the highest values for all parameters associated with prediction accuracy. However, the RF model is suggested for use in predicting the damage states of steel moment frames because it achieved the greater values on most of the prediction accuracy parameters, particularly in the prediction of the most serious damage state (i.e., red tag).

Acknowledgment

This work was supported by the A.I. Innovation Project Fund (Grand No. 1.210089) of UNIST (Ulsan National Institute of Science & Technology).

References

- [1] Nguyen HD, Dao ND, Shin M. Prediction of seismic drift responses of planar steel moment frames using artificial neural network and extreme gradient boosting. Eng Struct 2021;242:112518. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112518>.
- [2] Guan M, EERI X, Burton M, EERI H, Shokrabadi M. A database of seismic designs, nonlinear models, and seismic responses for steel moment-resisting frame buildings. Earthq Spectra 2020. <https://doi.org/10.1177/8755293020971209>.
- [3] Breiman L. Random forests. Mach Learn 2001. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
- [4] Chen T, Guestrin C. XGBoost: A scalable tree boosting system. Proc. ACM SIGKDD Int. Conf. Knowl. Discov. Data Min., 2016. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>.
- [5] Rojahn C. Procedures for post-earthquake safety evaluation of buildings. ATC-20 Tech Report, Appl Technol Counc (ATC), Redw City, CA 1989.
- [6] Hastie T, Tibshirani R, Friedman J. Elements of Statistical Learning 2nd ed. 2009. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>.



건축물 지진거동 및 성능 평가

수치해석을 통한 지면에 고정된 캐비닛의 지진응답특성 분석

Numerical Analysis on Seismic Response of Cabinets Anchored to the Ground

김성용*1)
Kim, Sung-Yong이철호**
Lee, Cheol-Ho전수찬***
Jun, Su-Chan배창준***
Bae, Chang Jun

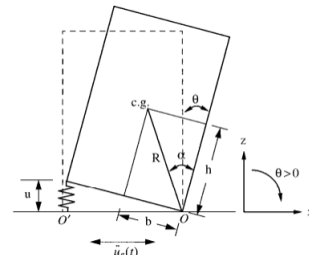
최근 국내외에서 발생한 지진으로 인해 구조물 내 비구조요소의 피해사례가 다수 보고되면서, 비구조재의 내진성능에 대한 관심이 지속적으로 커지고 있다. 이 중 배전반과 분전반 등이 포함되는 전기캐비닛은 시설물의 제어 및 통신 등의 기능유지와 밀접하게 연계되어있는 만큼 전기캐비닛의 내진성능을 평가하고 이를 강화하기 위한 연구는 지속적으로 수행되어 왔다. 캐비닛의 내진성능과 관련된 학술적 연구는 Housner의 지진에 대한 역추형 구조물의 강제거동에 관한 연구(Housner, 1963)를 필두로 캐비닛의 록킹 거동(Rocking motion)에 따른 캐비닛의 응답특성에 초점을 맞추어 왔으며, 특히 다양한 펄스 형태의 지반가진에 대한 응답특성을 주로 다루었다. 하지만 상대적으로 넓은 진동수대역에 걸쳐 진동에너지에 갖는 지반가속도와는 달리, 건축물이라는 일종의 필터를 통해 특정 진동수대역에서의 응답을 증폭하는 구조물의 증가속도와 같은 협대역의 조화가진에 대한 연구는 그다지 많지 않다. 한편 앵커를 활용하여 캐비닛을 지면에 고정하는 방안은 캐비닛뿐만 아니라 비구조재의 지진피해경감을 위해 현장에서 널리 적용되고 있는 방안이며, 여러 관련 기술문헌에서 내진성능향상을 위해 수립된 보강방식을 제안하고 있다(Fig. 1a 참조). 하지만 지면에 앵커를 통해 고정된 캐비닛의 지진에 대한 응답특성은 그다지 많지 않다(Makris and Zhang, 2001). 본 연구에서는 앵커의 강성과 강도가 반영된 강제 캐비닛에 대한 해석모형으로부터, 협대역 가진을 받는 캐비닛의 응답거동을 분석하였다. Fig. 1b는 각 가장자리에 모든 구속 장치의 강성이 합산된 복원요소가 위치한 캐비닛의 개념도를 도시한 것이며, 본래 지배방정식의 선형화를 통해 다음의 해당 시스템에 대한 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{\theta} = -p^2 \cos \alpha \left[(\beta \cos \alpha - 1)\theta + \frac{\ddot{u}_g}{g}(1 + |\theta| \tan \alpha) + \operatorname{sgn} \theta \tan \alpha \right] \quad (1)$$

여기서 $p = \sqrt{mgR/I_o}$ 는 록킹 거동에 대한 고유진동수로, I_o 는 피벗포인트(Fig. 1b의 O점)로 한 관성모멘트, m 은 캐비닛의 질량, g 는 중력가속도, R 은 캐비닛의 질량중심으로부터 피벗포인트까지의 거리, α 는 캐비닛의 형상을 정의하는 각도이고, $\beta = \omega_n^2/(R/g)$ 는 팔길이로부터 산정된 역추의 진동수에 대한 고정부의 강성으로부터 산정된 고유진동수의 비이며, 이 때 $\omega_n = (K/m)^{1/2}$ 은 강성으로부터 단순 질량을 바탕으로 산정된 한쪽 단부의 들림거동에 대한 고유진동수이고, $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 은 부호함수이다.



(a) Detail of cabinet base anchorage (FEMA E-74, 2012)



(b) Schematic of anchored block in rocking motion (Makris and Zhang, 2001)

Fig. 1. Overturning damage of electrical cabinets and schematic of anchored block in rocking motion

* 정회원.창원대학교 건축공학과, 조교수 (E-mail: sungyong.kim@changwon.ac.kr)

** 정회원.서울대학교 건축학부, 교수 (E-mail: ceholee@snu.ac.kr)

*** 서울대학교 건축학부, 박사과정

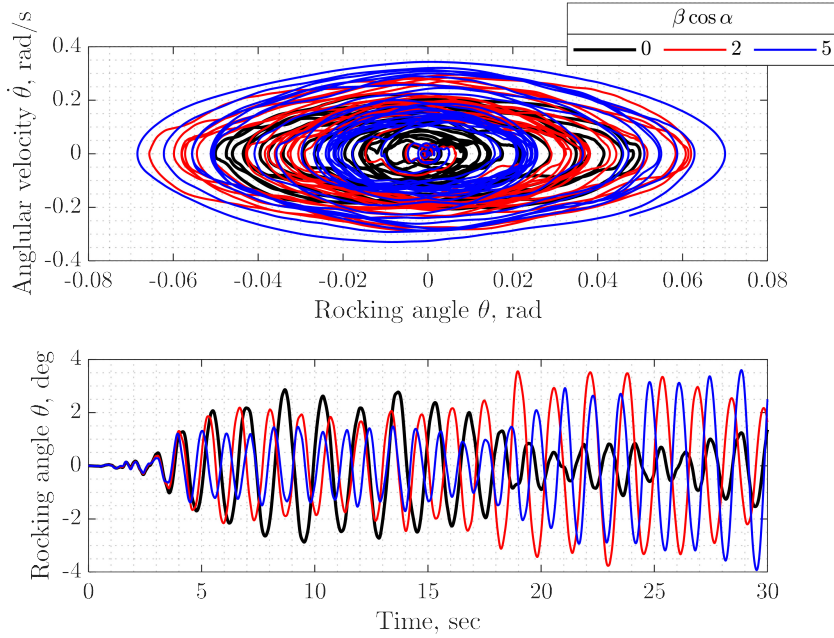


Fig. 2. Phase trajectories and time histories of simulated cabinets

본 연구에서는 Makris and Zhang (2001)에 요약된, PG&E(Pacific Gas and Electric co.)의 전기캐비넷 중 한 개를 임의로 택하였으며($p = 1.5259$ rad/s, $\alpha = 0.3218$ rad), 지면으로의 복원강성을 변수로 하여 시간이력 해석을 수행하였다. 지진파는 「방송통신설비의 내진 시험방법」에 제시된, 통상적으로 통신설비의 내진성능검증에 사용되는 요구응답스펙트럼으로부터 생성하였다. Fig. 2는 $\beta/\cos\alpha$ 가 각각 0, 2와 5인 경우의 시간이력을 각각 상태공간과 시간축에 대해서 도시한 것으로, 이때 $\beta/\cos\alpha$ 가 0인 경우는 캐비넷 하단부에 강성이 없는 단순한 록킹 거동만 나타나는 경우이다. 이에 따르면, 수직방향의 강성이 없는 경우와 비교했을 때 약간의 강성이 있는 경우, 단순한 록킹 거동뿐만 아니라 강성이 유발하는 복원력에 따른 진동성분이 구조물의 고유진동수를 높여, 공진에 따른 응답폭이 나타난 것으로 판단된다. 다만, 본 연구에서는 록킹 거동의 특성 중 하나인 피벗포인트의 급작스런 이동 인한 에너지 저감을 고려하지 않았으며, 이를 위한 추가연구가 현재 진행 중이다.

감사의 글

이 연구는 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2021R1F1A1064283)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. FEMA. Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage: A Practical Guide. 2012, FEMA.
2. Housner GW. The Behavior of Inverted Pendulum Structures During Earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America. 1963 Feb 1;53(2):403-417.
3. Makris N, Zhang J. Rocking Response of Anchored Blocks under Pulse-Type Motions. Journal of Engineering Mechanics. 2001 May 1;127(5):484-493.

현실적인 경계조건을 갖는 파일-슬래브 직접 접합부의 내진성능

Seismic Performance of Pile-Wharf Direct Connection with Realistic Boundary Condition

이득행*1)

Lee, Deuckhang

제임스 라파브**

LaFave, James

컨테이너 항만은 세계 경제의 중추를 담당하는 중요한 사회기반시설이다. 이는 상품 및 에너지 등의 수출입을 위한 시작 및 종착점으로 활용되고 있으며, 세계적으로 수백만 명의 근로자를 고용하고 지역 및 글로벌 경제의 중심이라 할 수 있다. 그러나 그림 1에서 볼 수 있듯이 미국의 많은 컨테이너 항구는 불행히도 강진지역에 위치하고 있는 실정이다. 따라서 항만구조물은 붕괴방지뿐만 아니라 대규모 지진 발생 후 사용성능을 유지하는 것이 중요하다. 그림 2에 나타난 것과 같이, 미국의 컨테이너 항만구조물에서 가장 일반적으로 사용되는 구조 시스템은 현장타설 철근콘크리트(RC) 데크슬래브를 프리캐스트 프리스트레스 콘크리트(PC) 파일에 직접 모멘트 연결하는 방식이다. 일반적으로 파일기초는 기반암에 직접 지지하거나 충분한 마찰저항을 통해 필요한 요구강도를 만족하는 수준까지 PC 파일의 선단을 지반저면으로 설치한다. 이 때 데크슬래브의 마감선과 파일의 상면레벨이 잘 일치되지 않기 때문에 마감 표고 위로 연장된 PC 말뚝을 절단한 후에 슬래브를 시공한다.

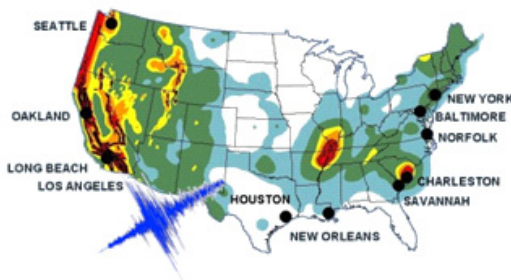


Fig. 1. Top 10 United States container ports on seismic hazard map

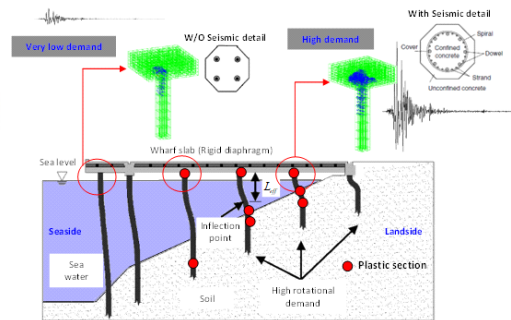


Fig. 2. Typical pile support structure subjected to seismic loading

그림 3은 몇 가지 전형적인 파일-데크 슬래브 직접 연결상세를 보여주고 있다. 일반적인 유형의 파일-데크 슬래브 접합부의 강도, 연성 및 파괴거동을 잘 이해하기 위하여 많은 실험 및 해석적 연구들이 수행되었다. 특히, 워싱턴 대학에서는 지난 수십 년 동안 많은 실험적 노력을 기울였으며, 이들의 연구에 따르면 프리캐스트 T형 장부철근(T-headed dowel bar)을 활용한 접합방식이 높은 시공성과 구조성능을 제공할 수 있는 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 이 연구에서는 그림 4에 나타난 것과 같이, 실규모의 프리캐스트 프리스트레스 콘크리트(PC) 파일 접합부에 대한 실험을 수행하였으며, 다양한 수준의 지반운동을 받는 전형적인 항만구조물의 비선형 동적해석결과를 바탕으로 3개의 지진하중이력을 선택하였고, 실험체는 강도와 연성 모두에서 우수한 내진성능을 보여주었다. 실험결과는 PC 파일 접합부의 내진거동은 강체 메커니즘에 크게 좌우되며, 데크슬

* 정회원-충북대학교 건축공학과, 부교수 (E-mail: dk@cbnu.ac.kr)

** 일리노이주립대학교 토목환경공학과, 교수 (E-mail: jlafave@illinois.edu)

래브와 파일 접합부 부근의 압괴에 의한 콘크리트 손상이 강성 저하의 주요원인인 것으로 확인되었다. 또한, 이 연구에서는 컨테이너 항만 구조물에서 파일-슬래브 접합부의 효율적인 보강방법으로 단면확대공법을 제시하였으며, 보강된 실험체는 보강이전에 비하여 더욱 높은 강성과 강도를 보여주었으나, 변형능력(연성)은 프리캐스트 파일에 누적된 손상으로 인해 제한될 수 있음을 확인하였다.

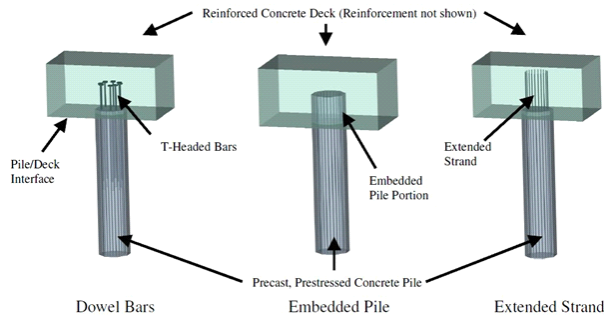


Fig. 3. Typical PC pile-wharf connections

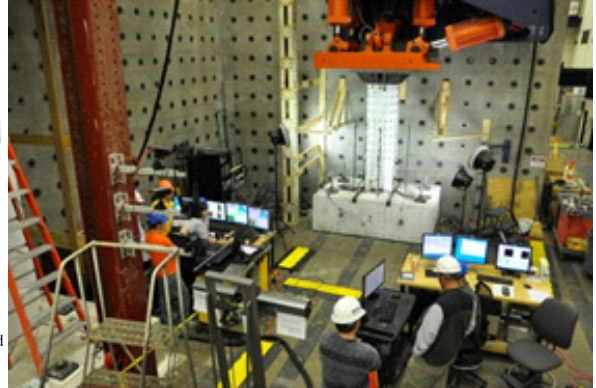


Fig. 4. MUST-SIM Facility in UIUC

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020R1F1A1048422).

참고 문헌

1. Foltz, R., LaFave, J. M., and Lee, D. H., "Seismic Performance of A Structural Concrete Pile-Wharf Connection Before and After Retrofit," *Structures*, Vol. 38, No. 1, pp. 874-894, 2022.

700 MPa 철근의 벽체 최소 철근비 검증

Minimum Wall Reinforcement ratio of 700 MPa Reinforcement

김성현*1)

Kim, Sung-Hyun

박홍근**

Park, Hong-Gun

고층아파트 및 원전 구조물의 벽체 설계에서는 지진에 의하여 작용하는 큰 휨 모멘트와 전단력에 대한 성능을 확보하기 위하여 상당히 많은 양의 철근이 요구된다. 요구 철근량의 증가는 철근 밀집에 의한 품질 저해, 시공성 악화, 인건비 증가등을 발생시켜 경제성을 크게 감소시킬 수 있다. 따라서 이러한 문제 해결을 위해 고강도 철근을 벽체에 적용하기 위한 연구가 지속적으로 이루어져 왔다[1-3]. 특히, Kim and Park[4]은 700 MPa 철근을 적용한 벽체의 구조성능을 실험적으로 검증하였다. 실험 결과에 따르면, 700 MPa 철근을 사용한 벽체는 일반강도 (400 MPa) 철근을 사용한 벽체와 비교하여 강도, 변형능력, 에너지 소산, 균열폭 등의 측면에서 동등하거나 조금 작은 성능을 나타냈다.

한편 700 MPa 철근을 사용하는 경우 400 MPa 철근대비 40% 철근량을 감소시킬 수 있다. 그러나, 철근비가 지나치게 낮은 경우, 균열폭 증가로 인해 전단강도 저하가 발생하고 변형능력이 제한될 수 있으며, 사용성이 저해될 수 있다. 따라서, 현행 KDS 14 20 콘크리트 구조설계기준에서는 벽체의 최소철근비를 Table 1과 같이 규정하고 있다. 실제 설계에서는 많은 경우 전단철근이 최소철근비에 의해 결정되기 때문에, 700 MPa 철근에 대한 적절한 최소철근비를 검증하는 것이 요구된다.

본 연구에서는 700 MPa 철근의 적절한 벽체 최소철근비를 검증하기 위하여 반복주기하중 가력 실험이 수행되었다. 실험 변수로서, 파괴모드(휨 항복, 전단파괴 모드), 항복강도, 철근비가 고려되었다. 특히, 철근비에 대하여 현행 설계 기준에 따른 0.25 % 철근비와, 700 MPa 철근의 항복강도에 따라 등가로 감소시킨 0.14 % 철근비를 비교하였다. 또한, 400 MPa 철근이 적용된 기존 건물 벽체를 700 MPa 철근을 사용하여 전단보강한 벽체의 구조 성능이 검증되었다. 실험 결과를 바탕으로 낮은 철근비가 700 MPa 철근을 사용한 벽체의 강도, 변형능력, 파괴모드에 미치는 영향을 규명하였다. 또한 700 MPa 철근에 대하여 최소철근비를 감소시킬 수 있는지 여부를 조사하였다.

Table 1 Minimum reinforcement ratio of KDS 14 20 for walls

Provision	Shear demand V_u	Diameter	Bar yield strength f_y , MPa	Vertical reinforcement		Horizontal reinforcement	
				Ratio $\rho_{v,min}$, %	Spacing s_v , mm	Ratio $\rho_{h,min}$, %	Spacing s_h , mm
KDS 14 20 72 벽체 설계 기준	$\leq \frac{1}{2} \phi V_c$	$\leq D16$	≥ 400	0.12	$\min(3h, 450)$	$0.20 \times \frac{400}{f_y} \geq 0.16$	$\min(3h, 450)$
		기타 이형철근		0.15		0.25	
KDS 14 20 22 전단 및 비틀림 기준	$> \frac{1}{2} \phi V_c$	-	> 400	$\rho_{h,min} + 0.5(2.5 - \frac{h_w}{l_w})(\rho_h - \rho_{h,min})$	$\min(l_w/3, 3h, 450)$	$0.25 \times \frac{400}{f_y} \geq 0.20$	$\min(l_w/5, 3h, 450)$
			≤ 400			0.25	

* 정회원·서울대학교 건설환경종합연구소, 연수연구원 (E-mail: jangson@snu.ac.kr)

** 정회원·서울대학교 건축학과, 교수 (E-mail: parkhg@snu.ac.kr)

Fig. 1은 실험 결과에 따른 실험체의 하중-변위 포락 곡선을 비교한 것이다. 휨 항복 모드 실험체에서는 700 MPa 철근의 항복강도를 고려하여 현행 기준의 최소전단철근비 0.25 %보다 낮은 0.14 % 전단철근비를 사용하였다. 낮은 전단철근비를 사용하였음에도 실험 강도는 공칭항복강도보다 크게 나타났다. 그러나, 공칭 휨 강도가 균열 강도의 1.88배인 실험체에서 수직철근의 조기 인장 파단이 발생하였으며, 연성능력과 에너지 소산량이 감소하였다.

전단 파괴모드 실험체에서는 모두 대각인장 파괴가 발생하였다. 0.14 % 전단 철근비를 사용하였음에도 700 MPa 전단 철근의 항복이 발생하였다. 그러나 철근비 감소로인하여 균열폭이 증가하고 강도비가 감소하였다. 감소하였다. ($V_{test}/V_n = 1.07 \sim 1.18$: 700 MPa 사용 벽체 vs $V_{test}/V_n = 1.28 \sim 1.35$ 400 MPa 사용 벽체).

700 MPa 철근을 사용하여 전단 보강된 혼합 벽체의 실험 강도는 공칭 전단 강도에 도달하였다. 700 MPa 철근으로 보강되었음에도 불구하고 400 MPa 철근의 항복에 의하여 강도가 제한되었다. 그러나 700 MPa 철근의 보강량이 증가한 경우, 최대 강도도 증가하였다.

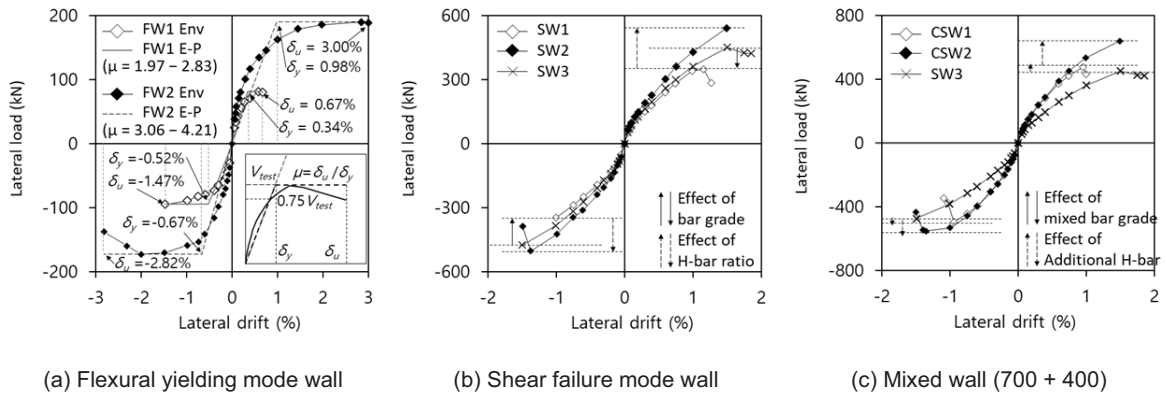


Fig. 1. Comparisons of test results

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부가 지원하는 “사회 안전 확보를 위한 700 MPa급 철근 활용 내진용 철근콘크리트 개발”(연구과제번호: No. 10063488)과, 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(연구과제번호 : No. 2021R1A4A3030117). 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Park H-G, Baek J-W, Lee J-H, Shin H-M, “Cyclic Loading Tests for Shear Strength of Low-Rise Reinforced Concrete Walls with Grade 550 MPa Bars,” *ACI Structural Journal*, V. 112, No. 3. 2015.
2. Baek J-W, Park H-G, Shin H-M, Yim S-J, “Cyclic Loading Tests for Reinforced Concrete Walls (Aspect Ratio 2.0) with Grade 550 MPa (80 ksi) Shear Reinforcing Bars,” *ACI Structural Journal*, V. 114, No. 3. 2017.
3. Baek J-W, Park H-G, Lee J-H, Bang C-J, “Cyclic Loading Test for Walls of Aspect Ratio 1.0 and 0.5 with Grade 550 MPa Shear Reinforcing Bars,” *ACI Structural Journal*, V. 114, No. 4. 2017.
4. Kim S-H, and Park H-G, “Shear Strength of Reinforced Concrete Wall with 700 MPa Shear Reinforcement,” *ACI Structural Journal*, V. 1183, No. 2. 2021.

조적허리벽이 있는 RC기둥의 단주효과

Short Column Effects of RC Columns with Partial-Height Masonry Infill

엄태성*1)
Eom, Tae Sung

한광희**
Han, Kwang Hee

이상현***
Lee, Sang Hyun

포항지진 피해사례에서 확인된 것처럼 기존 학교건물은 다음과 같은 이유로 RC기둥의 단주효과 및 전단파괴에 취약하다. 첫째, 기둥 주변에는 창호 설치를 위하여 조적벽을 1 m 내외의 높이까지 쌓은 허리벽(partial-height masonry infill)이 존재하는 경우가 많다. 조적허리벽은 기둥 전단경간을 줄여 전단력을 증가시킨다. 둘째, 내진설계규정이 법제화되기 이전에 건설된 학교건물에서는 통상적으로 RC기둥 횡철근이 비내진상세로 시공되었다. 횡철근의 간격은 $0.5d$ (d = 단면 유효깊이)보다 큰 기둥단면의 최소치수(h_{min}) 간격으로 시공되었다. 셋째, 주철근을 둘러싼 후프는 135° 내진갈고리(seismic hook)가 아닌 90° 갈고리로 폐합되었으며, 코너철근 사이에 배치된 중간철근(intermediate bar)은 대부분 띠철근(crosstie)에 의해 횡지지되지 않았다. 이러한 비내진상세를 갖는 기존 RC기둥은 전단파괴에 취약하고 휨항복을 하더라도 변형능력이 제한적이다. 조적허리벽을 포함한 RC기둥의 단주효과를 분석하고 이를 고려하기 위한 비선형 모델링 방법을 논하였다.

조적허리벽이 있는 기둥의 파괴양상을 Fig. 1에 나타냈고, 이때 기둥의 모멘트 및 전단력 분포는 Fig. 2에 나타냈다. Fig. 2에서 조적벽 상단($h_m = 900$ mm)에 허리벽에 의한 반력(R_{ml})이 집중된 것으로 가정하였고, 조적허리벽의 역지지(backstay effect)에 의한 하단 수평반력(R_{bl})은 기둥 바닥에 집중된 것으로 가정하였다. 기둥이 휨항복에 도달할 때, 조적허리벽에 의한 기둥 단주효과는 다음과 같이 평가할 수 있다.

- 실험 결과, 기둥 주철근은 조적허리벽 높이뿐만 아니라 기둥 바닥에서 항복변형률에 도달하였다. 이는 조적허리벽이 설치된 기둥 하부에서 콘크리트 휨균열이 크게 발생하였고(Fig. 1 (a) 참조) 휨항복에 도달하였음을 가리킨다.
- Fig. 1(a)에서 보듯이 기둥 상부와 하부의 균열방향이 서로 다르다. 즉, 기둥 하부에서는 균열 경사각이 횡하중 방향과 반대로 발생하였다. 이는 조적허리벽의 영향으로 인해 기둥의 모멘트 및 전단력 분포가 근사적으로 Fig. 2(b)와 같았음을 보여준다.

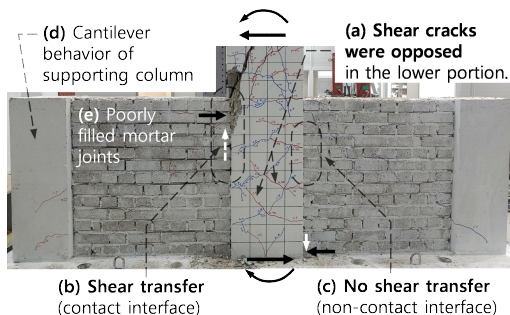


Fig. 1 Failure modes of RC column with partial height masonry infills

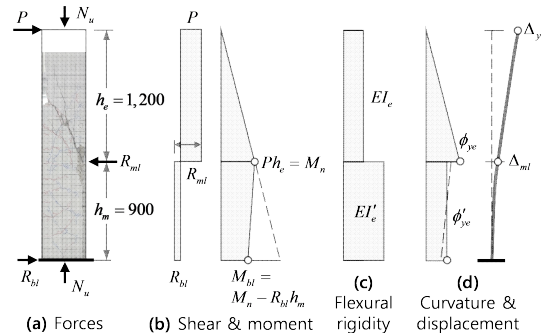


Fig. 2 Curvature and displacement at flexural yielding in column with partial height masonry infills

* 정회원·단국대학교 건축공학과, 교수 (E-mail: eomts@dankook.ac.kr)

** 단국대학교 건축공학과 석사과정, (E-mail: wjfqhkyd@naver.com)

*** 정회원·단국대학교 건축공학과, 교수 (E-mail: lshyun00@dankook.ac.kr)

- ASCE/SEI 41-17에 따르면 균열을 고려한 기둥 유효강성(EI_e)을 비균열강성($E_c I_g$)의 30% ~ 70% 수준이다. Fig. 1 및 Fig. 2에서 보듯이 조적허리벽이 있는 기둥의 유효강성은 조적허리벽 상부 및 하부가 서로 다르다. 조적허리벽 상부는 비균열강성의 약 30%수준이고, 조적허리벽 하부는 기둥과의 접촉에 의한 상호작용으로 유효강성이 비균열강성의 약 70%수준까지 증가하였다.

Fig. 3은 위의 분석 결과를 바탕으로 제안된 조적허리벽이 있는 RC기둥의 모델링 방법을 보여준다. Fig. 4는 제안된 모델링 방법으로 해석한 결과를 보여주는데, 제안된 모델링 방법은 조적허리벽에 의한 기둥 단주효과를 정확히 고려하는 것으로 나타났다.

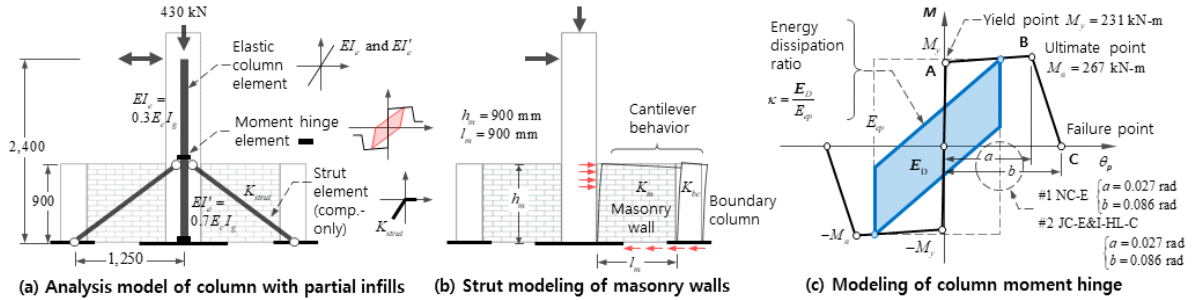


Fig. 3 Nonlinear modeling of RC column with partial-height masonry infill

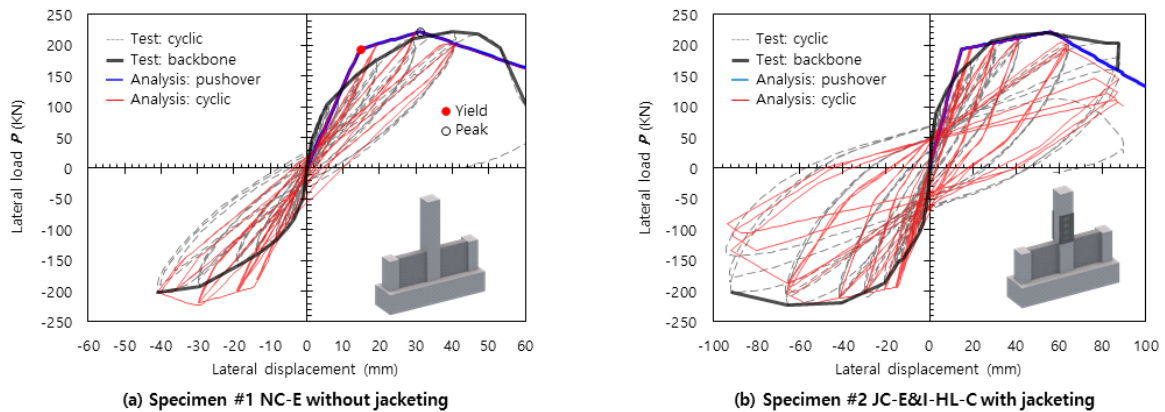


Fig. 4 Comparison of test and analysis results

감사의 글

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF-2018R1A6A1A070258 and NRF-2019R1F1A1059248).

참고 문헌

1. AIK (2016), Korean Building Code and commentary, KBC 2016, Architectural Institute of Korea, Seoul, 1201 pgs.
2. AIK (2021), Guidelines for Performance Based Seismic Design of RC Buildings, Architectural Institute of Korea, Seoul.
3. ASCE 41 (2017). Seismic Rehabilitation of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-17), American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 416 pgs.

파이버요소 모델링 기법을 이용한 구조해석 프로그램 별 철근콘크리트 벽식 구조물의 비선형 해석결과 비교

Comparison of Non-linear Analysis Results of Concrete Shear Wall Buildings depending on Structural Analysis Softwares using Fiber Element Modeling Method

전민준*1) 이상현** 엄태성*** 남승현**** 이지은*****
Jeon, Min-Jun Lee, Sang-Hyun Eom, Tae-Sung Nam, Soong-Hyun Lee, Ji-Eun

본 연구에서는 우리나라에서 주로 사용되는 두 가지 상용구조해석 프로그램(Program-M and P)의 파이버요소 모델링 기능을 동일한 구조물에 적용하여 비선형 정적·동적 해석결과를 비교·분석하였고, 프로그램 별로 비선형 해석 결과의 차이가 발생하는 원인에 대해 연구하였다. 본 연구에 사용된 구조물은 크게 5층 구조물(Fig. 1(a))과 20층 판상형 구조물(Fig. 1(b))로 나뉘며, 5층 구조물은 이형벽체 효과를 비교하기 위해 일자형 및 H형으로 구분함과 동시에 대칭성 여부로 총 4가지 유형을 검토하였다.

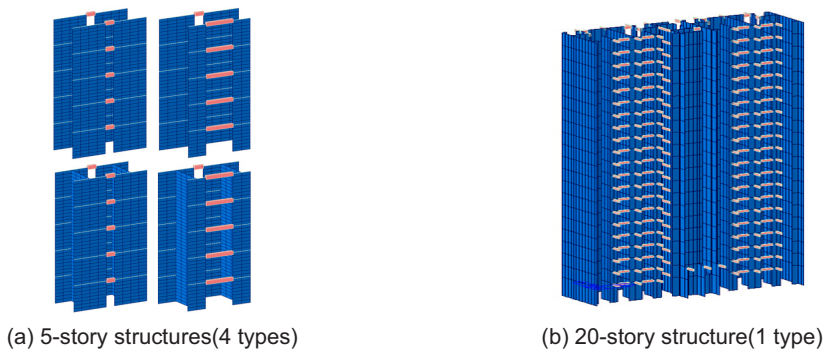


Fig. 1. Target structures in this study

파이버요소 모델링에 사용된 콘크리트와 철근 재료모델은 현행 건축물 내진설계 기준(KDS 41 17 00)에 따라 Fig. 2(a)와 같이 적용하였다. 또한 벽체 콘크리트 파이버 요소는 1m 당 4등분하여 Fig. 2(b)와 같이 모델링 하였다. 보 요소는 양단에 동일한 골격곡선(Skeleton curve)을 갖는 집중소성힌지로 모델링 하였다.

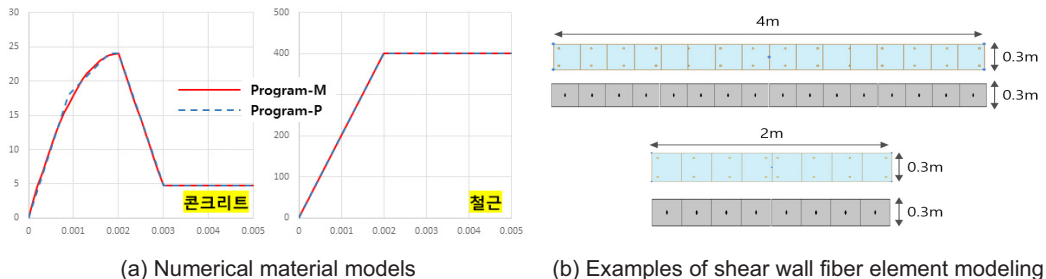
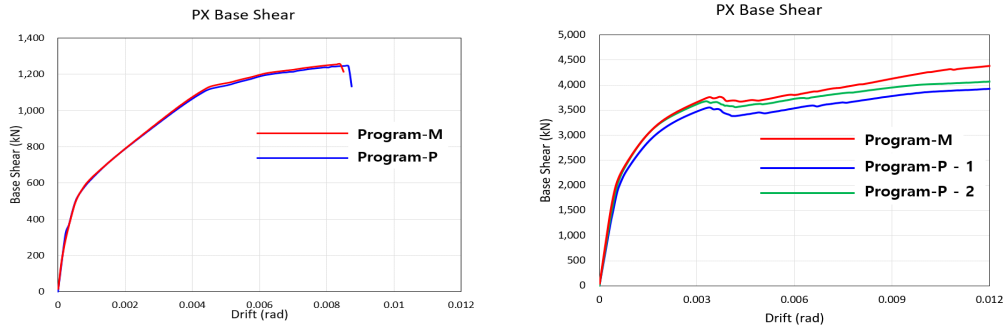


Fig. 2. Fiber element modeling method used in this study

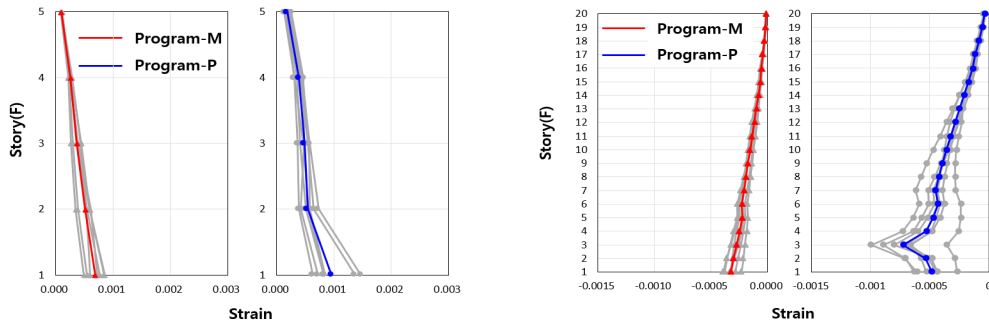
* 단국대학교 건축공학과, 박사과정 (E-mail: melody9170@naver.com)
** 정회원·단국대학교 건축공학과, 교수 (E-mail: lshyun00@dankook.ac.kr)
*** 정회원·단국대학교 건축공학과, 교수 (E-mail: eomts@dankook.ac.kr)
**** 정회원(주)한울구조안전기술사사무소, 성능기반설계본부 이사 (E-mail: namsh@hwgj.co.kr)
***** 정회원(주)한울구조안전기술사사무소, 성능기반설계본부 차장 (E-mail: ljeun@hwgj.co.kr)

대상 구조물에 대한 비선형 정적해석 결과, 상대적으로 단순한 5층 구조물에서는 두 프로그램이 대체로 유사한 해석결과를 도출하였으나 실제 건축물 스케일의 복잡한 구조물(20층 구조물)은 콘크리트 재료모델의 초기 강성, 벽체와 연결보 접합부 강성, 축력 고려 방법 등에 따라 큰 차이가 발생하였다(Fig. 3(a)~(b) 참조).

비선형 동적해석을 수행하는 경우에는 재료모델의 강성 변화에 따라 구조물의 고유주기가 변화한다. 특히 콘크리트 재료모델의 초기거동 형태(포물선형 or 삼선형)에 따라 동적 해석 결과에 상당한 차이를 보임을 확인하였다. 포물선 형태의 콘크리트 재료모델을 사용하는 경우에는 동일한 지반을 가정하여 스케일링된 여러 개의 지진파에 대해 작은 편차를 보이며 비교적 안정적인 해석결과를 도출하는 반면, 항복 이후 급격한 강성 변화가 발생하는 삼선형 재료모델의 경우 지진파에 따라 해석결과에 큰 편차를 야기하며 경우에 따라 특정한 지진파에 의해 발산한 데이터로 인해 해석결과의 평균값이 크게 오염되기도 하였다(Fig. 3(c)~(d) 참조).



(a) Non-linear static analysis results - 5 story structure (b) Non-linear static analysis results - 20 story structure



(c) Non-linear dynamic analysis results - Maximum strain of concrete fiber element in 5 story structure (d) Non-linear dynamic analysis results - Maximum strain of concrete fiber element in 20 story structure

Fig. 3. Comparison of non-linear analysis results

결과적으로 두 프로그램은 동일한 구조물에 대한 비선형 해석 결과에서 차이를 보이는데 이는 프로그램 별로 지원하는 재료모델 및 파이버요소 모델링 방법, 데이터 취득 방법, 축력 고려 방법, 엔지니어가 알 수 없는 프로그램 내부 해석 알고리즘의 상이함 등의 이유로 수치적으로 완벽하게 동일한 강성 매트릭스를 갖는 구조물을 구현하는데 한계가 있기 때문인 것으로 보이며 해석 결과는 두 프로그램 모두 적합하다고 판단된다. 다만, 두 프로그램의 해석결과를 비교하기 위해서는 각 프로그램의 차이를 정확히 인지하여야 할 것으로 사료되며, 추후 파이버요소 모델링 기법의 적합성을 입증할 수 있도록 별도의 절차가 마련된다면 사용자의 혼란을 감소시키는데 도움이 될 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 대학중점연구소지원사업(NRF-2018R1A6A1A07025819)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

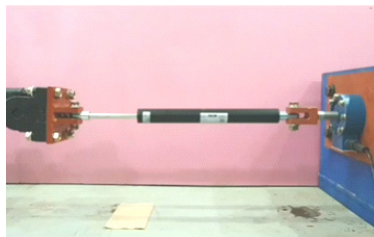
1. Korean Design Standard(KDS) 41 17 00, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2018.
2. Non-linear Analysis Model for Performance-Based Seismic Design of Reinforced Concrete Structure. Architectural Institute of Korea and Korea Concrete Institute, 2021.
3. Analysis Reference for midas Gen, MIDAS Information Technology Co., Ltd.
4. Perform-3D User Guide Version 4, Computers & Structures INC., 2006

내진보강용 동조질량감쇠기의 성능 시험

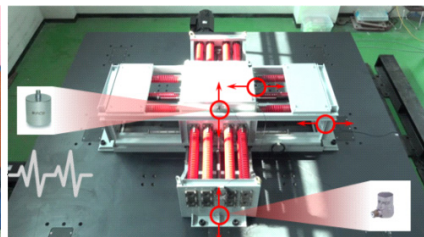
Performance Verification of Tuned Mass Damper for Seismic Rehabilitation

이용훈* 이상현**1)
Lee, Yonghun Lee, Sang-Hyun

동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper, 이하 TMD)의 성능은 질량과 스트로크, 고유진동수, 감쇠 특성으로 결정된다. 질량이나 스트로크와 달리 고유진동수와 감쇠특성의 경우 동적영역에서 결정되기 때문에 TMD의 성능을 파악하기 위하여 동적실험을 통해 동특성을 식별하는 것이 중요하다. 하지만 기존의 TMD의 제원과 달리 내진보강을 위한 TMD의 경우 약 10%의 매우 큰 감쇠비가 적용되고, 지진에 취약한 중저층 건축물을 제어할 경우 스프링 강성이 매우 커지기 때문에 기존의 성능 시험 방법으로는 TMD의 동적특성을 식별해내기 어렵다. 본 연구에서는 진동대를 이용하여 내진보강을 위한 TMD의 성능시험을 수행하였고 비선형 마찰모델을 적용하여 감쇠성능을 식별하였다.



(a) Viscous damper(HB-40-300)



(b) Dynamic test of 2-axis TMD

Fig. 1. Structural Model of STMD with Variable Friction

Table 1. Specification of TMD

2-axis TMD		
Direction	X	Y
Mass(ton)	1.55	2.20
Target frequency(Hz)	1.49	1.89
Stiffness(kN/m)	135.85	310.25
Stroke(mm)	170	170
Viscous damper		
Stroke(mm)	300	
Life cycle(m)	10,000	
Temperature(°C)	-20~+80	
Max. Force(N)	10,000	

본 시험의 대상은 2방향의 TMD로 위 그림1과 표1은 대상 TMD와 TMD에 적용된 점성감쇠장치의 모습과 제원을 나타낸다. 점성감쇠장치는 감쇠단계를 조절할 수 있는 나사가 적용되어 있고, 본 시험에서는 감쇠장치가 없을 때(Undamped)와 설치된 경우(Damped)에 대하여 Up-chirp, 사인파 가진시험을 통해 고유진동수와 진동수 응답특성을 확인하였다.

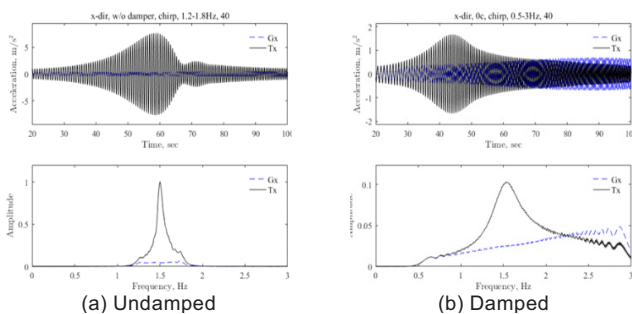


Fig. 2. Acceleration response of TMD by Up-chirp in X-dir.

Table 2. Natural frequency according to damping level of viscous damper

Dir.	Case	Freq.(Hz)
X	Undamped	1.51
	Damped	1.53
	Target	1.49
Y	Undamped	1.85
	Damped	1.87
	Target	1.89

* 정회원·단국대학교 건축공학과, 박사수료 (E-mail: lyn3040@naver.com)

** 정회원·단국대학교 건축공학과, 교수 (E-mail: lshyun00@dankook.ac.kr)

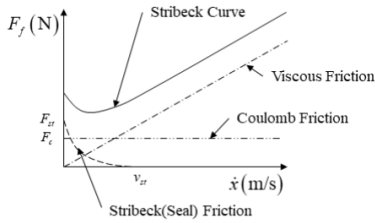


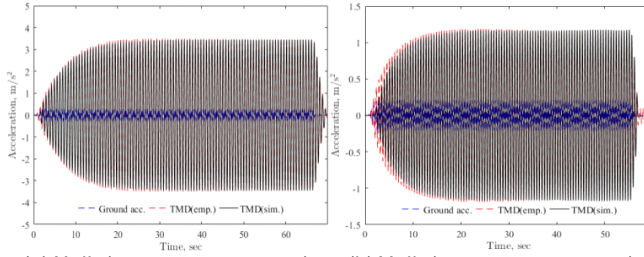
Fig. 3. Non-linear friction model

$$m_d \ddot{x}_d + c_d \dot{x}_d + k_d x_d = F_{ex} + F_c^* + F_{st}^* \quad (1a)$$

$$F_c^* = -F_c \frac{\dot{x}_d}{|\dot{x}_d|}, \quad F_{st}^* = -\sqrt{2e} F_{st} e^{-\left(\frac{\dot{x}_d}{v_{st}}\right)^2} \frac{\dot{x}_d}{v_{st}} \frac{\dot{x}_d}{|\dot{x}_d|} \quad (1b)$$

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) \quad (2a)$$

$$z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix}_{n \times 1}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & I_{n \times n} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}_{n \times 1} \quad (2b)$$



(a) X-dir. ($F_c=0.22\text{kN}$, $\xi_d=0.014$) (b) Y-dir. ($F_c=0.29\text{kN}$, $\xi_d=0.018$)

Fig. 4. Comparison of measurement and simulation for undamped device (under $F_{st}=10\text{N}$, $v_{st}=0.2\text{m/s}$)

Table 3. Comparison of damping ratios determined by Simulation and Half-power bandwidth(HPB)

Dir.	Mass (ton)	f_n (Hz)	Case	Simulation		HPB
				F_c (kN)	ξ_d (%)	ξ_d (%)
X	1.55	1.51	Undamped	0.22	1.4	2.5
			Damped		6.0	6.6
Y	2.20	1.92	Undamped	0.29	1.8	2.6
			Damped		3.4	6.5

일반적인 운동방정식에서 수학적으로 모델링된 감쇠는 속도에 비례하는 점성감쇠력을 나타내지만, 실제 물체의 경우 표면의 윤활상태와 가공상태 등에 따라 복잡한 마찰력이 작용하게 된다. 그림 3은 마찰력의 비선형성을 고려하여 실제와 유사한 거동을 나타내기 위해 제안된 Stribeck Curve 모델이며, 모델에는 정지상태부터 작용하여 점점 작아지는 쥘마찰(F_{st}^*)과 시간에 무관하게 일정한 쿨롱마찰(F_c^*), 시간에 비례하는 점성마찰($c_d \dot{x}_d$)이 수학적으로 모델링되었다. 식(1a)은 비선형 마찰모델이 적용된 TMD의 운동방정식을 나타내며, 식(1b)에는 각각의 마찰력에 대한 식이 정리되어있다. 해석에는 식(2a-2b)와 같이 상태-공간방정식을 이용하여 외력에 대한 TMD의 거동을 시뮬레이션하도록하였다.

그림4는 식별된 TMD의 마찰파라미터와 선형점성감쇠비를 적용하여 시뮬레이션한 응답을 계측결과와 겹쳐 나타낸 그림이다. 이때 결정된 마찰력을 적용한 모델로부터 감쇠비를 바꾸어가며 감쇠장치가 설치되었을 때 선형점성감쇠비를 추정하였고, 이 감쇠비와 Half-power Bandwidth(HPB)법으로 결정된 감쇠비를 표3에 정리하였다. 마찰력을 적용한 점성감쇠비가 HPB보다 작게 나오는 이유는, 에너지 소산이 점성감쇠력 뿐만아니라 쿨롱마찰력에 의해서도 이루어졌기 때문에 점성감쇠력의 비율이 낮아졌기 때문으로 판단된다. 또한, HPB의 경우 주파수별 응답을 매우 정밀하게 구하지 않을 경우 추정된 감쇠비에 대한 신뢰도가 떨어질 수 있다는 단점이 있다.

감사의 글

이 논문은 한국연구재단 대학중점연구소지원사업(NRF-2018R1A6A1A07025819)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

참고 문헌

1. F. Sadek, B. Mohraz, A. W. Taylor, R. M. Chung, 'A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Volume 26, 1997, pp.617-635

휨거동을 하는 U형 합성보의 모멘트-회전각 관계

Moment-rotation relationships of U-shaped composite beams under flexural behavior

황현종*1)

Hwang, Hyeon-Jong

시공성 및 경제성 향상을 위하여 최근 U형 합성보가 널리 사용되고 있다(Fig. 1). U형 합성보는 U형의 얇은 강재와 내부채움 콘크리트, 콘크리트 슬래브, 전단연결재로 구성된다. 이 중 U형 강재는 정모멘트 작용시 인장재로 거동하여 휨강도를 효과적으로 증가시키며, 시공현장에서 거푸집으로 활용되어 콘크리트 타설을 위한 현장작업을 최소화시키는 효과도 있다. 내부채움 콘크리트는 U형 합성보의 휨강성을 증가시키고 U형 강재의 국부좌굴을 지연시켜 변형능력을 증가시키는 효과가 있다. 콘크리트 슬래브는 정모멘트 작용시 압축기여를 통해 휨강도를 증가시킨다. 전단연결재는 U형 강재와 콘크리트의 합성작용을 구현시키며 통상 U형 단면 내부 및 상부 플랜지에 설치한다.

U형 합성보의 구조성능 평가를 위하여 국내외에서 다양한 실험연구가 진행되었다. 기존 실험결과에 따르면, U형 합성보의 내진성능은 보-기둥 접합부 및 U형 합성보 단면의 상세에 크게 영향받는 것으로 나타났다. 특히, U형 합성보는 주로 정모멘트시 강재와 슬래브 콘크리트 접합면의 분리, 반복하중시 U형 강재의 좌굴 및 파단으로 파괴되었다. 구조물의 성능기반설계를 위해 FEMA 356[1] 및 ASCE/SEI 41-17[2]에서는 철근콘크리트 및 강구조의 각 부재별 소성변형능력을 제시하고 있다. 그러나 합성부재에 대해서는 비선형 해석을 위한 하중-변위관계가 제시되어 있지 않아, U형 합성보의 구조성능이 실험적으로 충분히 입증되었음에도 불구하고 해석 및 설계에 있어 실무적 어려움이 있다. 따라서 성능기반설계를 위한 비선형 해석을 수행하기 위해서는 U형 합성보의 변형능력 정의 및 이에 따른 소성힌지모델이 필요하다.

본 연구에서는 휨거동을 기반으로 U형 합성보의 비선형 수치해석을 위한 소성힌지모델을 제안하고 모멘트-회전각 관계를 정의하였다. 제안 모델은 기존 실험결과와 비교하여 검증하였으며, 변수연구를 통해 주요 설계 변수와 변형능력의 관계를 평가하였다.

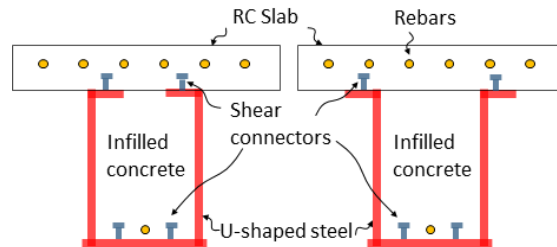
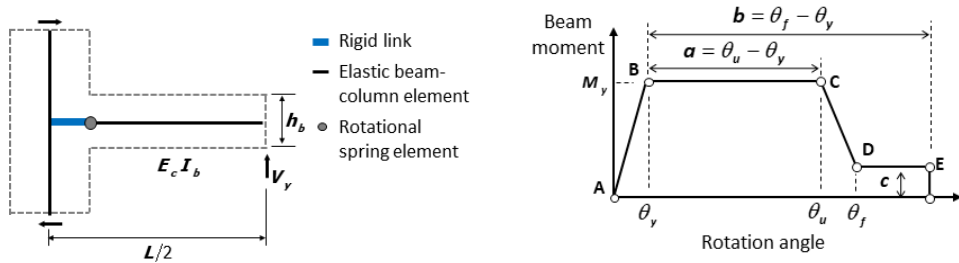


Fig. 1. Sectional configuration of U-shaped composite beams

Fig. 2(a)는 U형 합성보의 소성힌지모델을 나타낸다. U형 합성보는 탄성 보 요소(Elastic beam element)와 단부의 회전 스프링 요소(Rotational spring element)로 구성된다. 여기서 탄성 보 요소는 U형 합성보의 탄성 변형을 모사하며, 회전 스프링 요소는 휨항복 이후 압축대 파괴메커니즘에 기반하여 U형 합성보의 소성변형을 모사한다. U형 합성보와 기둥은 강재로 연결(Rigid Link)하였다. Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이, 회전 스프

* 정회원·건국대학교 건축학과, 부교수 (E-mail: hwanghj@konkuk.ac.kr)

링 요소의 모멘트-회전각 관계는 FEMA 356[1] 또는 ASCE/SEI 41-17[2]에 기반하여 근사화할 수 있다. 그림에서 점 A~B는 항복 이전의 탄성변형구간으로써 탄성 보 요소의 휨변형에 의해 결정된다. a 는 강도저감이 발생하기 전의 소성변형(즉, 점 B~C 구간), b 는 파괴시 극한변형, c 는 잔류강도를 나타낸다. 각 성능점의 정의는 실험에서 확인된 U형 합성보의 파괴모드에 기반하였다. U형 합성보는 휨항복 이후 정모멘트시 슬래브 콘크리트 압괴 또는 U형 강재 파단에 의해 휨강도가 감소하며, 부모멘트시 슬래브 철근 파단 및 U형 강재 좌굴에 의해 휨강도가 감소한다. 이러한 실험결과를 바탕으로 강도저감을 고려할 수 있는 소성힌지모델을 제안하였다[3].



(a) Plastic hinge model for U-shaped composite beams (b) Envelope curve for rotational spring element

Fig. 2. Moment-rotation model for U-shaped composite beams

Fig. 3은 실험결과와 예측결과를 비교하여 보여준다. 제안된 모델은 U형 합성보를 적용한 보-기둥 접합부의 거동을 비교적 정확하게 예측하는 것으로 나타났다. 이는 제안된 모델이 다양한 파괴메커니즘을 이론적으로 고려하여 U형 합성보의 소성변형을 합리적으로 평가하기 때문이다.

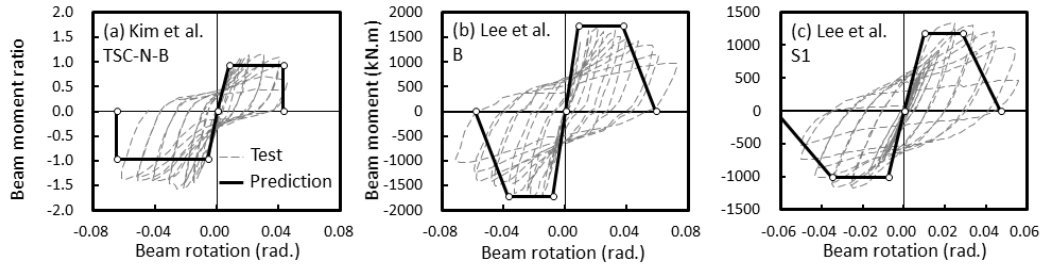


Fig. 3. Comparison of test results with predictions

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020R1F1A1076322). 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. FEMA 356. Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Federal Emergency Management Agency, 2000.
2. ASCE 41. Seismic Rehabilitation of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-17), American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2017, 416.
3. 황현중, 박홍근, 김창수. U형 합성보의 성능기반 설계를 위한 소성힌지모델. 대한건축학회논문집. 2021; 37(11):301-308.

절곡앵글을 사용한 매입형 합성기둥의 내진성능평가

Seismic Capacity of Concrete-Encased Composite Columns using Cold Formed Steel Angles

김철구*1)

이상현**

김형섭***

Kim, Chul-goo

Lee, Sang-hyun

Kim, Hyoung Seop

선조립 합성기둥은 RC(Reinforced Concrete) 및 SRC(Steel Reinforced Concrete) 기둥과 달리 모든 강재 및 철근을 공장에서 선조립하여 Fig. 1과 같이 현장에서 조립하여 사용하는 기둥이다. 선조립 합성기둥은 공장 선제작 후 현장에서 일체화시키는 PC(Precast Concrete) 부재와 비슷하지만 콘크리트를 현장에서 타설하기 때문에 양중 무게가 상대적으로 적게 나가고 양중 장비 부담이 적은 장점이 있다. 선조립 합성기둥은 Fig. 1과 같이 냉간 성형된 절곡 앵글이 기둥 단면 최외각에 위치하여 단면성능을 극대화시켜 SRC 기둥에 비해 동일 강재량 대비 높은 휨강도 발휘가 가능하다. 본 연구에서는 이러한 절곡 앵글을 사용한 선조립 합성기둥과 SRC 기둥의 반복가력 실험을 통해 선조립 합성기둥의 내진성능에 대해 평가하였다.

현행 합성부재의 설계기준(KDS 41 31 00)에 따르면, 매입형 합성기둥의 P-M 상관도 작성시 휨강도는 소성응력분포법 또는 변형률적합법에 따라 결정하고, 압축강도는 길이 영향을 고려하여 계산한다. H형강이 중앙에 위치한 SRC 기둥은 중립축에서 강재/철근까지의 거리가 상대적으로 가깝기 때문에 절곡 앵글이 단면 최외각에 위치한 선조립 합성기둥보다 낮은 휨성능을 발휘한다. 본 연구에서는 변형률적합법에 따라 기둥의 휨성능을 평가하였다.

기둥 실험체는 Fig. 2와 같이 단면 500 mm × 500 mm, 가력점과 기초 상단까지 거리는 2000 mm, 전단경간비는 4.0으로 실제 구조물에 적용되는 복곡률 기둥 길이를 고려하여 계획하였다. H-R0.5h30 실험체는 150×150×8×12 H형강($\rho_s = 1.84\%$)을 사용한 실험체로, 4-D19 철근을 모서리에 배치하고 135도 갈고리 후프(D13)를 250 mm 간격으로 배근하였다. LL-0.5h30 실험체는 80×40×6 립앵글($\rho_s = 1.87\%$)을 사용한 실험체로, H형강과 강재비를 비슷하게 계획하였으나 주근은 사용하지 않아 전체 강재/철근비는 H-R0.5h30보다 낮게 설계되었다. 두 실험체의 축력비는 30%로 계획하여 인장축 강재/철근의 항복과 콘크리트 압괴가 동시에 발생(균형파괴점, balanced failure)하도록 계획하였다.

기둥에 압축력이 작용하는 상태에서 반복가력하기 위하여 1000 tonf 오일잭을 기둥 상부에 설치하여 일정한 축력을 작용시켰고 200 tonf 엑츄에이터로 횡하중 반복가력하였다. 하중 프로토콜은 ACI 374.1[1]에 따라 변위비 0.25%부터 시작하여 매 step 마다 3번씩 반복가력하였다.

콘크리트 강도는 29.8~31.2 MPa, 강재 항복강도는 420 MPa(6T), 450 MPa(8T), 401 MPa(12T), D19 주근 항복강도는 582 MPa이었다. 전단철근으로 사용된 D13 철근의 항복강도는 493 MPa이었다.

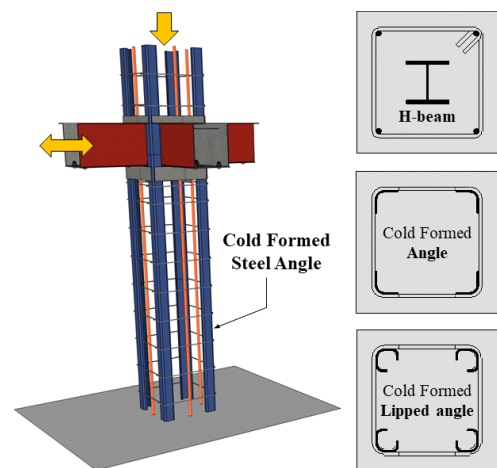


Fig. 1. Concrete-encased composite columns

* 정희원, 이화여자대학교 건축도시시스템공학전공, 조교수 (E-mail: kimcg@ewha.ac.kr)

** 정희원, 단국대학교 건축학과, 교수 (E-mail: lshyun00@dankook.ac.kr)

*** CGS플랜, 대표 (E-mail: hskim@cgsplan.com)

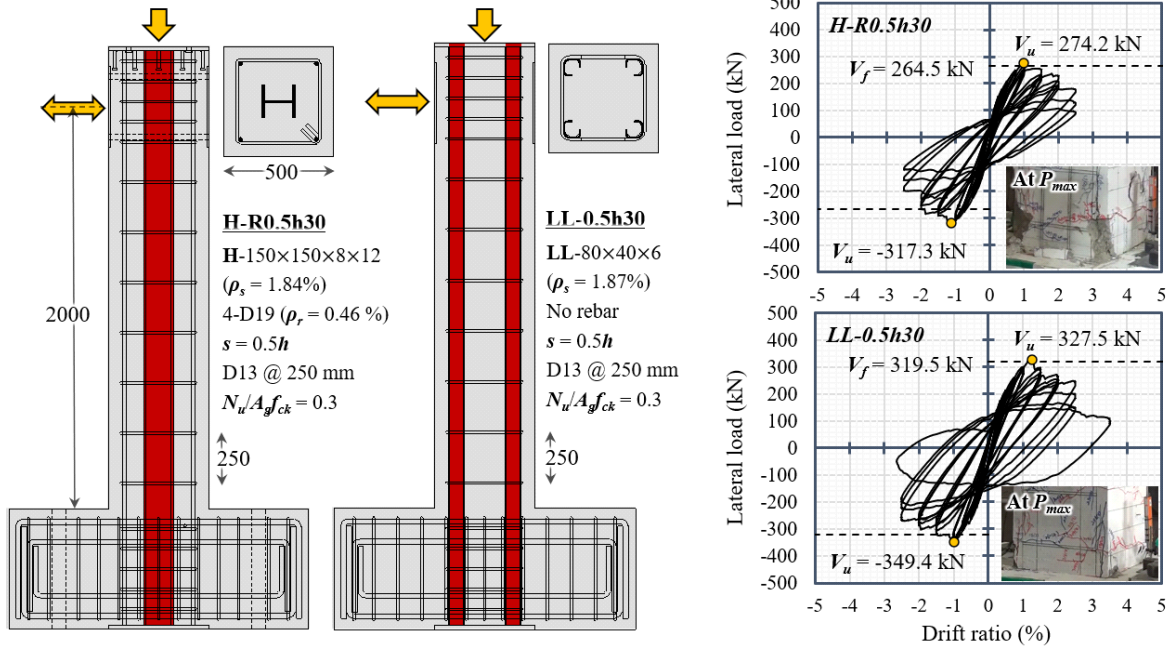


Fig. 2. Load and displacement relations of concrete-encased composite columns

실험체에 작용하는 횡하중과 횡변위비 관계는 Fig. 2에 나타났다. 실험결과는 굽은 실선으로 표시하였고, 최대하중은 원형 표식으로 나타났다. 현행 설계기준에 따른 공칭모멘트 강도 M_n 에 해당하는 횡하중 V_f 는 수평 점선으로 표시하였다. 두 실험체 모두 압축대 콘크리트 압괴가 발생하면서 최대하중에 도달하였고, 콘크리트 피복이 탈락하면서 하중이 서서히 감소하였다. 최대강도 V_u 는 현행기준의 휨항복 강도 V_f 이상이었지만, 최대변형(최대하중의 80 % 지점)은 변위비 2.0 ~ 2.3 %로 낮은 변형능력을 보였다. 이는 축력비 30 % 압축력에 의해 강재/철근이 인장항복 이후 콘크리트 압괴가 동시에 발생하면서 휨압축파괴가 발생하였기 때문이다.

선조립 합성기둥인 LL-0.5h30은 SRC 기둥인 H-R0.5h30보다 강재/철근비가 낮게 설계되었지만 상대적으로 높은 최대강도를 보였으며, 변형능력과 에너지소산능력도 더 우수하였다. 이는 강재단면이 단면 최외각에 위치하여 휨에 효율적으로 저항하였고, 압축대에 위치한 립앵글이 콘크리트 피복 탈락 이후에도 압축력 전달에 기여하여 하중 감소가 상대적으로 천천히 발생하였다. 또한, H-R0.5h30 실험체는 피복 탈락 이후 모서리 주근에서 좌굴이 발생하였으나, LL-0.5h30 실험체는 립앵글 끝단인 립(lip)이 심부 콘크리트에 정착되어 피복 탈락 이후에도 우수한 좌굴 저항성능을 보였다.

매입형 합성기둥인 SRC 기둥과 선조립 합성기둥의 내진성능평가 결과, RC 기둥과 같이 변형률 적합법에 의한 P-M 상관도로 계산한 예상강도가 실험결과를 잘 평가하였다. 선조립 합성기둥과 같이 강재를 단면 최외각에 위치하는 경우 우수한 휨성능과 비탄성변형능력 그리고 에너지소산능력을 발휘하였다.

감사의 글

본 연구는 (주)씨지스플랜의 연구지원과 2020년도 한국연구재단의 지원(2020R1F1A1049971)을 받아 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. ACI Committee 374, "Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary (ACI 374.1-0.5)." American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2005, pp. 1-9.

국내 철근콘크리트 구조벽체 내진설계 현황 및 문제점

Current Status and Problems of Seismic Design of Reinforced Concrete Structural Walls In Korea

강수민*1)

Kang, Su-Min

철근콘크리트 구조벽체는 고층건축물의 주요한 횡력저항요소이다. 고층건축물의 특성상, 엘리베이터, 기계전기 배관 등의 수직적 이동경로가 필수적이며 이에 따라 철근콘크리트 구조벽체를 상기 이동경로에 배치하여 건축계획적인 목적을 달성할 뿐만아니라 효율적인 횡력저항시스템을 구축하는 것이 일반적인 고층건축물 구조계획으로 자리잡고 있다고 할 수 있다. 뿐만 아니라 국내에서는 공동주택 건설에 있어 건축계획적, 시공적, 경제적인 이유로 철근콘크리트 벽식구조시스템을 채택하며 이 경우, 대부분의 횡력을 철근콘크리트 구조벽체가 지지하게 된다. 이처럼 철근콘크리트 구조벽체는 고층건축물의 횡력저항을 위해서 중요한 역할을 하며, 특히 내진성능확보에 있어 매우 중요하다고 할 수 있다.

현재, 실무에서 철근콘크리트 구조벽체의 강도설계는 일반적인 철근콘크리트 휨-압축재의 이론에 따라서 수행되며 이에 대한 검증은 여러 가지 실험과 실무적 적용을 통해 이루어졌다고 할 수 있다. 하지만 현재 철근콘크리트 구조벽체 내진설계, 특히 변형성능과 전단 설계에 있어, 다음과 같은 사항에 대하여 보다 충분한 검토, 검증 그리고 개선이 요구된다고 할 수 있다.

1) RC 벽체의 소성힌지 구간에서의 압축연단 변형성능에 대한 논의

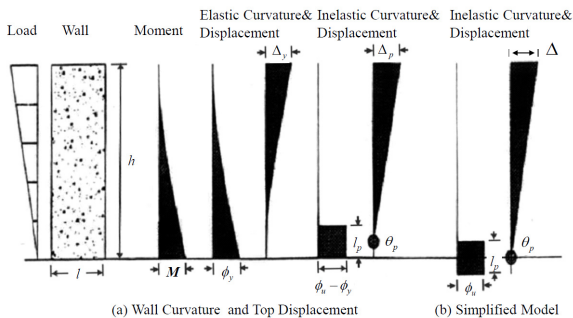


Fig. 1. Behavior of RC Wall Under Earthquake[1]

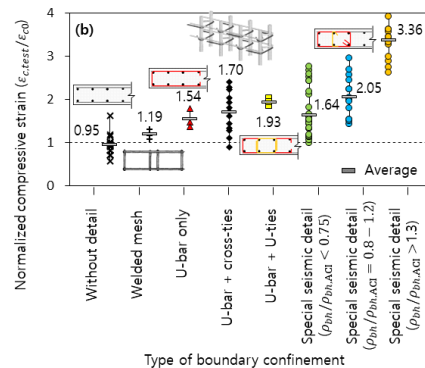


Fig. 2. Ultimate Compressive Strain of RC Wall Under Earthquake[2]

건축물의 내진설계에 있어 구조부재 또는 구조시스템의 변형성능은 내진성능을 결정하는 중요한 요소라고 할 수 있다. 철근콘크리트 구조벽체의 변형성능은 Fig. 1과 같이 벽체하부 소성힌지 구간에서의 변형성능 특히 압축연단의 변형성능에 의해 결정된다고 할 수 있다. 이와 같은 개념을 기반으로, 현재 설계기준에서는 철근콘크리트 구조벽체의 변형성능이 벽체하부 소성힌지에 위치한 콘크리트의 압축변형률이 별도의 횡보강없이 0.003까지 유지된다고 가정한다. 이러한 가정을 근간으로 압축단부 경계요소 설치여부의 판단식 ($c \geq l_w / [600(\delta_u / h_w)]$), 경계요소 수평설치길이($c - 0.1l_w$) 등을 제시하였다. 하지만, 최근 다양한 벽체 내진성능 실험연구들[2]에 의하면, 벽체는 비교적 큰 압축대를 지니고 있고, 소성힌지 구간이 상대적으로 크기 때문에 압축연단의 국부적인 손상이 전체 압축거동을 지배하기 때문에 벽체하부 소성힌지 콘크리트의 압축변형률이 0.002 정도까지만 유지된다고 알려지고 있다. 특히 최근에는 RC 구조벽체 하부에 재하되는 축력이 과거에는 단위면적당 압축강도의 15% 이내였지만($P \leq 0.15A_g f_{ck}$), 고층 건축물에 사용되는 벽체에는 단위면적당 압축강도가 벽체 압축강도의 20~30%에 해당하는 고축력을 재하받는 경우가 상당히 많이 발생하고 있기 때문에($P > 0.2A_g f_{ck}$)[3] 압축단부에서 변형성능은 보다 취약적일 수 있다. 따라서 현 설계기준에서 제시하는 RC 벽체의 연성설계는 성능확보에 어려움이 있을 수 있다. 뿐만 아니라 최근 국내 설계기준에서는 RC 벽체의 변형능력을 확보하기 위한 횡보강상세에 있어 시공성 확보를 위해 U형타이를 허용하는 방향으로 개정되었으나 ACI 318-19 기준[4]에서는 실험결과에 근거하여 변형성능확보를 위해 오히려 횡보강 상세를 강화하는 방향으로

* 정회원·충남대학교 건축학부, 부교수 (E-mail: kangsm@ssu.ac.kr)

설계기준이 개정되었다. 따라서 국내설계기준의 유효성을 면밀하게 검토할 필요가 있다고 할 수 있다.

2) RC 벽체의 전단력 산정에 대한 논의 : 전단력 증폭현상 및 전단강성모델

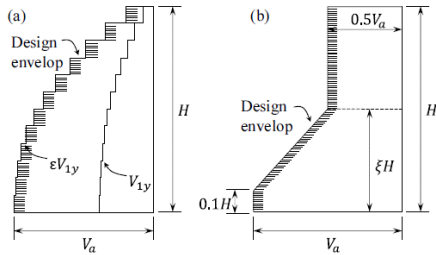


Fig. 3. Shear Force Distribution Model for RC Wall

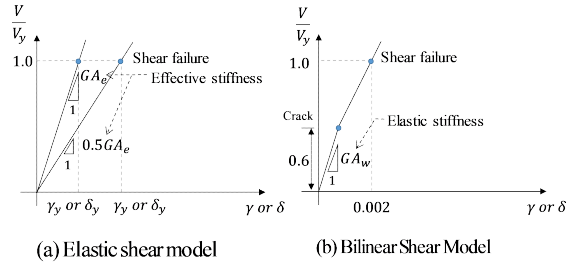


Fig. 4. Shear Stiffness Model for RC Wall

최근 국내에서 수행되고 있는 성능기반 내진설계에 있어 기존 탄성설계로 구조설계된 RC 벽체의 전단성능부족이 자주 보고되고 있다. 유럽의 경우[5]에는 고차모드에 의한 전단력 증폭현상을 탄성설계에서 Fig. 3과 같이 반영하고 있으며 ACI 318-19[4]에서도 이러한 전단력 증폭현상을 반영하여 탄성설계를 수행하도록 하고 있다. 따라서 국내에서도 전단력 증폭현상을 반영한 RC 벽체설계를 고려해야 할 것이다. 또한 성능기반 내진설계에 있어 RC벽체의 합리적 전단력 산출을 위한 전단강성모델에 활발한 논의가 이루어지고 있는데(Fig. 4 참조), 이에 대한 추가적인 연구가 필요한 실정이라고 할 수 있다.

3) 이형벽체 설계에 대한 논의

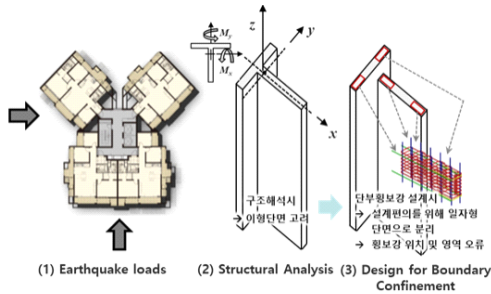


Fig. 5. RC Wall Design for Deformed Section

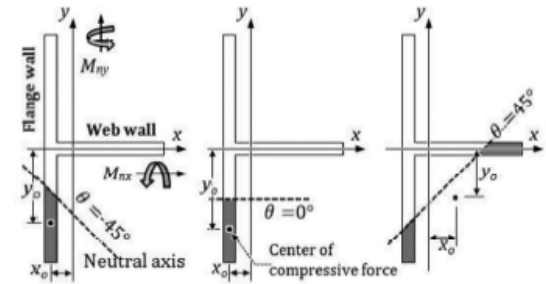


Fig. 6. Behavior of RC Wall with Deformed Section

국내에서는 설계의 편의를 위하여 Fig. 5와 같이 이형벽체를 일자형벽체로 분리하여 구조설계를 실시한다. 이러한 경우 과도한 휨철근 배근으로 비경제적인 설계결과를 도출한다고 할 수 있다. 뿐만 아니라 이러한 분리설계를 통해 벽체단부의 횡보강영역을 산출할 경우, Fig. 6과 같은 벽체단면의 이형성을 고려하지 못하기 때문에 변형성능 확보를 위한 단부횡보강영역 설계가 합리적이지 못하다. 이에 강진발생시, RC 구조벽체를 사용하는 고층 건축물의 내진성능저하가 심히 우려되는 상황이라고 할 수 있다.

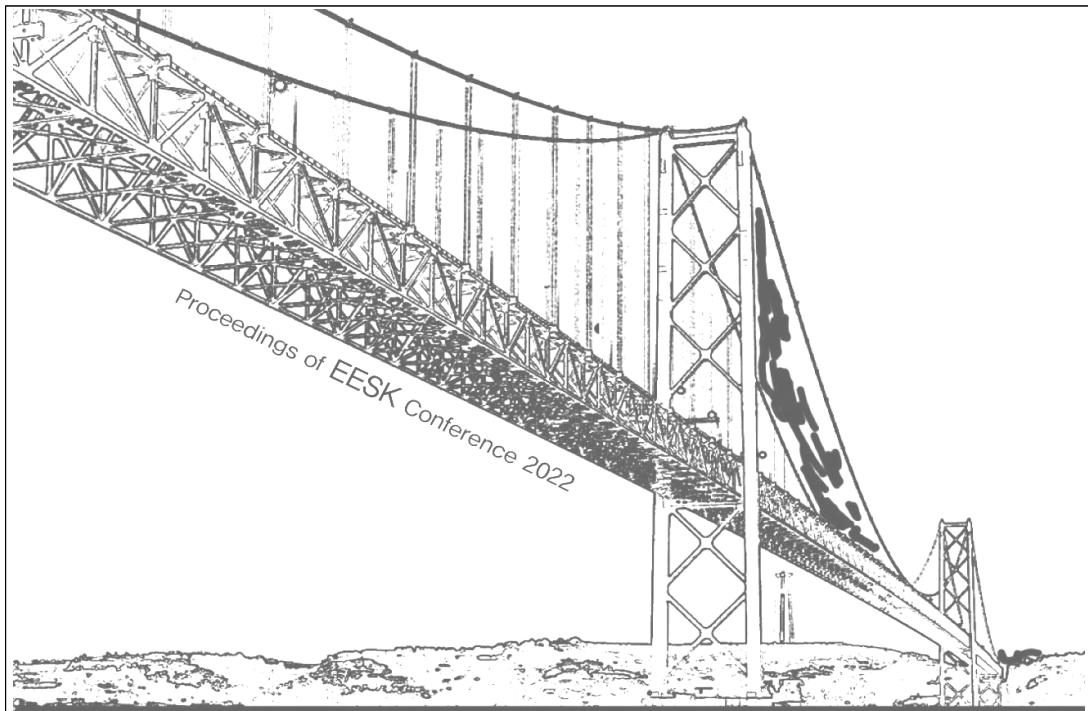
따라서 국내 RC 구조벽체 내진설계에 있어 앞에서 언급한 3가지 문제에 대한 합리적인 이론연구, 해결방안 및 기준개정이 시급하게 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단의 중견연구자지원사업 연구비 지원(NRF-2021R1A2C1012314)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Paulay, T. and Priestley, M. J. N., "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings," Wiley Interscience, 1992..
2. S.-H. Kim, E.-K. Lee, S.-M. Kang, H.-G. Park, J.-H. Park, "Effect of Boundary Confinement on Ductility of RC Walls, Engineering Structures", Engineering Structures, 230, 2021.
3. 전성하, 박지훈, "비선형 동적해석에 의해 내진설계된 철근콘크리트 보통전단벽의 지진취약도", 한국지진공학회 논문집, 23권 3호, 2019년 5월.
4. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-19), American Concrete Institute, Detroit, MI,p.573, 2019.
5. CEN (2004) Eurocode 8-Earthquake Resistant Design of Structures, Beglium, 2004.



내진 성능 및 손상 평가

자립형 프리캐스트 콘크리트 기둥 접합부의 내진 성능 연구

A Study on Seismic Performance of Self-supporting Precast Concrete Column

강현구*1)

Kang, Thomas H.-K.

안성룡**

Ahn, Seong Ryong

성한석***

Sung, Han Suk

프리캐스트 콘크리트(Precast Concrete; PC) 구조는 모듈화된 부재를 공장에서 선제작하여 현장으로 운반 후 조립하는 공법으로, 환경의 영향을 받지 않으며 고품질 대량생산이 가능한 공법이다. 최근에는 플랜트, 물류창고 뿐만 아니라 지식산업센터, 공동주택 등에도 적용이 확대되며 탈현장화(Off-Site Construction; OSC)를 주도하고 있다. 하지만 PC의 특성상 모든 구조부재를 일체로 제작할 수 없어 비일체식 구조체라 할 수 있으며 접합부가 지진하중에 상대적으로 취약하다는 한계가 있다. 접합부를 현장타설하는 Half PC가 적용되고 있으며, 이를 보완하기 위한 철근 이음 스플라이스 슬리브는 내부의 무수축 모르타르의 양생까지 가설 지지대인 브레이스의 여러 층에 걸친 설치가 동반되며 후속 공정과 간섭을 일으킨다. 이러한 요인들은 공기단축 및 공비절감이라는 PC구조의 효과를 저하시킨다.

본 연구에서는 체결 즉시 저항성능을 발현하는 자립형 PC 기둥 접합부를 개발하여 기둥-기초 접합부에 적용하였다. 부재의 안전성 및 내진성능을 검증하고자 Fig. 1과 같이 반복횡가력 실험 구조실험을 수행하였다. 실험체는 다양한 기둥 치수에 대한 적용성을 위해 600×600 및 800×800mm의 기둥 부재로 설정하였다. 모서리부의 D32 주철근에 대하여 고정 너트의 체결을 완료한 후, 별도의 가설 지지대 없이 스플라이스 슬리브 내부 및 접합부 틈새에 그라우트를 충전하여 시공을 완료하였다. 가력 계획은 ACI 374.2R-13의 프로토콜을 사용하였다.



Fig. 1. Cyclic loading test

* 정회원·서울대학교 건축학과, 교수 (E-mail: tkang@snu.ac.kr)

** 서울대학교 건축학과, 박사과정 (E-mail: goodasr@snu.ac.kr)

*** 서울대학교 건축학과, 박사과정 (E-mail: hansuk0801@snu.ac.kr)

실험 결과는 Table 1에 요약되어 있다. 자립형 시스템을 적용한 기둥의 휨강도는 슬리브의 모르타르가 양생된 후, 기둥의 전체 주철근에 의해 산출한 설계강도 이상의 결과를 보였다. 내진성능을 평가하기 위해 ACI 374.1-05의 허용 기준을 참고하였다. 해당 기준은 다음과 같다. 1) 층간변위비 3.5% 이상의 가력단계의 최종 사이클에서 최대하중의 75% 이상의 내력을 확보해야 한다; 2) 층간변위비 4.0%에서 에너지소산능력의 면적비가 0.125보다 작지 않아야 한다; 3) 층간변위비 4.0% 가력단계에서 원점 부근 강성이 초기 강성의 1/20 이상을 나타내야 한다. 자립형 기둥 실험체는 Fig. 2와 같이 세 가지의 기준을 모두 만족하였다.

Table 1. Result of experiments

Specimen	Maximum load [kN]	Displacement [mm]	Drift ratio at $0.75F_{max}$ [%]	Maximum moment [kN · m]	Design moment [kN · m]
S1	475.68	78.7	4.9	1284.3	1071.0
S2	843.26	102.7	4.7	2276.8	1988.5

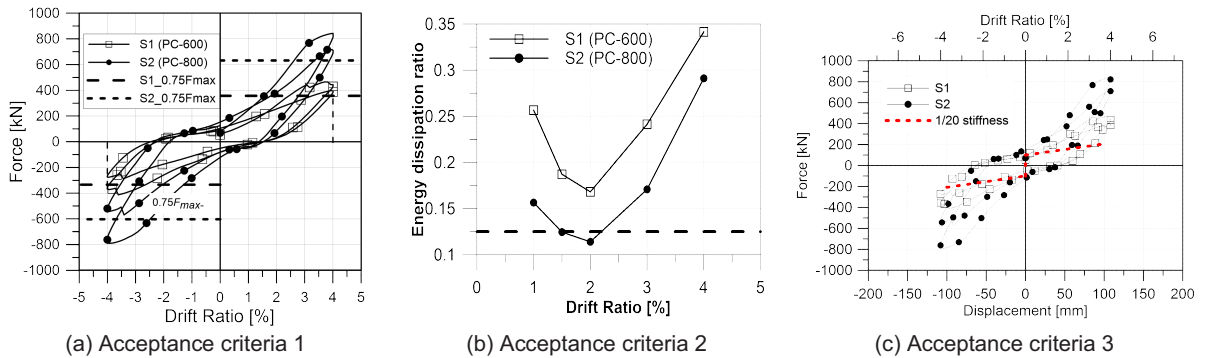


Fig.2. Seismic performance criteria of ACI 374.1-05

감사의 글

이 연구는 한국연구재단(NRF-2021R1A5A1032433)의 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. America Concrete Institute (ACI), "Guide for Testing Reinforced Concrete Structural Elements Under Slowly Applied Simulated Seismic Loads (ACI 374.2R-13)," ACI Committee 374, 2013.
2. America Concrete Institute (ACI), "Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary (ACI 374.1-05)," ACI Committee 374, 2014.

철골 보통모멘트골조의 지진손실평가와 풍하중의 영향 분석

Seismic loss estimation for steel ordinary moment frames and analysis of effect of wind load

김태오*1)
Kim, Taео

한상환**
Han, Sang Whan

국내 건축설계기준의 모델기준인 ASCE/SEI 7[1]에서는 구조물의 설계를 수행하는데 있어 재실자의 안전에 영향을 미칠 수 있는 다양한 하중을 고려하여 설계를 수행하도록 요구하고 있다. 지진하중과 풍하중은 횡력의 형태로 구조물에 영향을 미치는 대표적인 하중으로써, 직접적으로 지진력저항시스템의 설계 단면에 큰 영향을 미친다. 특히, 구조물의 높이가 높거나 풍하중의 영향을 받는 면적이 크거나, 지진하중의 크기가 작은 중약진 지역의 경우에는 풍하중에 따라 설계 단면이 결정될 수 있다. 서로 다른 설계 메커니즘으로 인한 설계 단면의 증가는 구조물의 내진성능에 있어 오히려 부정적인 영향을 미칠 수 있으며, Han 등은 집중적인 손상을 야기하여 오히려 붕괴성능이 감소할 수 있음을 보고한 바 있다[2].

이 연구에서는 지진손실평가를 이용한 구조물의 내진성능에 풍하중이 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이를 위하여 대상 구조물로서 18층 철골 보통모멘트골조를 선정하고, 풍하중의 고려 유무에 따른 대상 구조물의 설계를 수행하였다. 대상 구조물은 강기둥-약보와 같은 연성을 확보하기 위한 상세 규정을 적용받지 않으며, 동시에 고층 구조물을 사용함에 따라 풍하중에 의한 영향을 명확하게 분석할 수 있을 것으로 판단하여 선정하였다.

대상 구조물을 설계하기 위한 설계 조건은 NIST GCR 10-917-8[3]에 제시된 조건을 사용하였으며, 내진 설계기준은 ASCE/SEI 7[1]에 따라 정의하였다. 설계에 고려한 풍하중은 ASCE/SEI 7[1]에 따라 가장 넓은 지역의 기본풍속인 48 m/s를 적용하였다. 지진하중은 등가정적해석법을 이용하여 산정하였으며, 내진설계범주 C의 범위 내에서 가장 높은 지반가속도를 갖는 것으로 가정하여 설계를 수행하였다. Table 1에는 풍하중을 고려하지 않은 대상 구조물 (S-18)과 고려한 대상 구조물 (SW-18)의 설계 단면을 요약하여 나타내었다. 비선형 동적 해석을 수행하기 위하여 Han 등[3]의 연구에 제시된 바와 같이 대상 구조물의 수치 모델을 구축하였다. 또한, 지진손실평가를 수행하기 위한 절차는 FEMA P58[4]에 제시된 방법론을 사용하였다.

Table 1. Design result of S-15 and SW-15

Story	S-18			SW-18		
	Ext. Column / Dp. (mm)	Int. Column / Dp. (mm)	Beam	Ext. Column / Dp. (mm)	Int. Column / Dp. (mm)	Beam
1/2	W36X441 / 0.0	W24X192 / 0.0	W27X94	W36X529 / 0.0	W24X229 / 0.0	W30X116
3/4	W36X361 / 0.0	W24X162 / 4.8	W27X94	W36X361 / 0.0	W24X207 / 4.8	W30X116
5/6	W36X302 / 0.0	W24X162 / 6.4	W27X94	W36X302 / 0.0	W24X192 / 6.4	W30X116
7/8	W24X279 / 0.0	W24X146 / 6.4	W27X94	W24X279 / 0.0	W24X162 / 6.8	W30X108
9/10	W24X207 / 0.0	W24X131 / 6.4	W27X94	W24X207 / 0.0	W24X146 / 6.0	W27X94
11/12	W24X146 / 0.0	W24X117 / 6.4	W27X84	W24X146 / 0.0	W24X117 / 6.4	W27X84
13/14	W24X104 / 0.0	W24X94 / 4.8	W24X76	W24X104 / 0.0	W24X94 / 4.8	W24X76
15/16	W24X68 / 0.0	W24X68 / 3.2	W21X55	W24X68 / 0.0	W24X68 / 3.2	W21X55
17/18	W24X55 / 0.0	W24X55 / 0.0	W16X40	W24X55 / 0.0	W24X55 / 0.0	W16X40

* 정회원.한양대학교 건축공학부, 박사 (E-mail: tokim27@gmail.com)

** 정회원.한양대학교 건축공학과, 교수 (E-mail: swan82@gmail.com)

Fig. 1은 지반운동 집단에 대하여 발생한 재해수준별 층간변위각의 중간값과 이로 인한 지진손실을 보여주고 있다. Fig. 1a에 보이는 바와 같이 횡 변형은 주로 상부층에 집중적으로 발생하는 것으로 평가되었다. 이는 지반운동의 고차 모드에 의한 영향 및 저층에서의 상대적으로 높은 횡 강성에 기반한 결과로 관측되었다. 특히 철골 모멘트골조의 경우 좌굴을 방지하기 위하여 특별지진하중이 야기하는 축력에 저항할 수 있는 기둥 단면을 요구하고 있다. 이로 인하여 구조물 상하부의 횡 강성 불균형이 발생하며, 상대적으로 강성이 낮은 상층에 횡 변위가 크게 발생하는 것으로 판단된다. 또한, 그림에 보이는 바와 같이 풍하중을 고려한 경우 (SW-18) 이러한 강성의 불균형이 증가하여 오히려 구조물 상부에 발생하는 최대 횡 변위각을 모든 재해수준에서 최소 33% 이상 증가시키는 것으로 평가되었다.

Fig. 1b는 각 재해수준에 해당하는 지반운동 집단에 의하여 발생하는 지진 손실을 나타낸 것이다. 비선형 동적해석을 바탕으로 평가한 층간변위각 결과에서 예측할 수 있듯, 풍하중을 고려한 경우 (SW-18) 모든 재해수준에서 각 구조 및 비구조 요소의 수리비용 뿐 아니라 철거 및 붕괴에 의하여 발생하는 재건축 비용 또한 상대적으로 크게 발생하는 것으로 예측되었다. 이는 구조물의 상부에 집중되는 횡 변위가 구조 (STR) 및 횡 변위 기반 비구조 요소 (NSTR-D)에 대한 지진 손실을 증가시키며, 동시에 집중된 횡 변위가 손상 및 변위의 증가를 가중시켜 철거 (Demolition) 및 붕괴 (Collapse)에 의한 지진 손실을 크게 증가시키는 것으로 평가되었다. 각각의 재해수준에서 SW-18 구조물은 S-18 구조물 대비 최소 55% 이상 지진 손실이 증가하는 것으로 평가되었다.

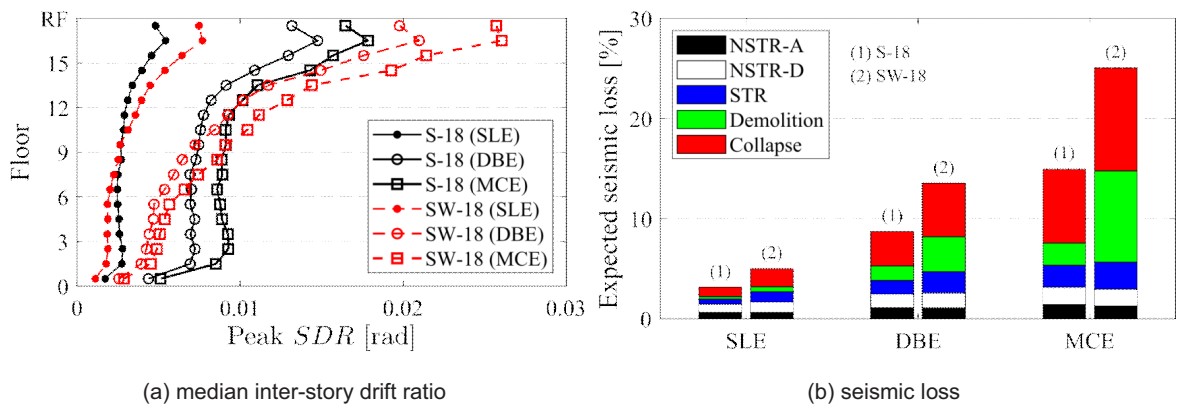


Fig. 2. Maximum relative displacement at top of the containment building(soil shear-wave velocity 200m/sec)

감사의 글

이 연구는 한국연구재단 및 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원 (NRF-2021R1A6A3A01087444, 21CTAP-C152179-03)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. ASCE. (2017). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*. ASCE/SEI 7, Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
2. Han, S. W., Kim, T. O., & Baek, S. J. (2018). Seismic performance evaluation of steel ordinary moment frames. *Earthquake Spectra*, 34(1), 55-76.
3. NIST. (2010). *Evaluation of the FEMA P695 methodology for quantification of building seismic performance factors*. NIST GCR 10-917-8, Redwood, CA: National Institute of Standards and Technology.
4. FEMA. (2018). *Seismic performance assessment of buildings*. FEMA P58-1. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency

노후한 RC 기둥의 파괴모드에 따른 변환 능력 평가

Drift Capacity of Old RC Columns according to Failure Mode

구수현*1)

한상환**

Koo, Soo Hyun

Han, Sang Whan

1970년대 이전 지어진 비연성 RC 골조는 중력하중만을 고려하여 설계된 건물로 현행 내진설계 기준에 맞지 않는 철근상세를 지니고 있으며 특히 기둥 부재가 가장 취약한 거동을 보인다. 다수의 선행 연구에 따르면 내진 설계가 이루어지지 않은 기둥 부재의 경우 짧은 겹침이음길이와 횡보강격 간격으로 인해 내진 성능이 취약하다고 보고하였다. 또한, 이러한 취약한 RC 기둥은 주로 전단파괴에 매우 취약한 것으로 알려져 있다. 따라서, 취약한 RC 기둥부재의 파괴 특성을 명확하게 파악하여 내진 성능을 적절히 평가하는 것이 매우 중요하다. 하지만, 수집된 실험체에서 제시하고 있는 파괴 거동은 기준이 명확하게 명시되어 있지 않다는 점을 고려하여 본 연구에서는 일관된 정의를 위해 ASCE 41 (2013)을 따라 파괴 거동을 분류하였다.

지진하중의 작용에 따른 RC 기둥 부재의 파괴 거동은 크게 전단파괴, 휨-전단파괴, 휨파괴로 이루어져 있다. 전단파괴는 휨항복 이전 파괴가 일어나는 현상으로 기둥의 파괴 중 가장 취약적인 거동을 보인다. 휨-전단파괴는 휨항복 이후 소성힌지 영역에서 누적된 콘크리트의 손상으로 인하여 발생하는 파괴 거동으로서, 제한된 연성 거동을 보인다. 휨파괴는 파괴 거동 중 우수한 연성거동의 파괴이다. 이러한 파괴 거동은 ASCE 41 (2013)에 제시된 바와 같이 V_p/V_n (휨강도에 대응하는 전단력/전단강도)에 따라 정량적으로 분류할 수 있다. ASCE 41-13에 따르면 V_p/V_n 이 0.6 이하일 경우 휨파괴에 해당하며, V_p/V_n 이 1.0을 초과할 경우 전단파괴에 해당한다. 휨파괴와 전단파괴 사이의 V_p/V_n 값은 휨-전단파괴를 의미한다.

1994년 미국 노스리지 지진 이후 성능 기반 내진설계(Performance-Based earthquake engineering)가 도입되어 주어진 지진력에 대해 건물이 저항할 수 있도록 구조부재를 설계하는 ASCE 7이나 건축구조기준과 같은 기존 설계방법과는 달리, 성능기반 내진설계는 지어진 지진력에 대해 건물의 손상이 지정된 성능 목표(Performance objective)를 넘지 않아야 한다. 따라서, 성능기반 설계를 활용하기 위해서는 다양한 세기의 지진력을 겪은 구조부재에서 발생한 손상정도를 예측할 수 있도록 명확한 손상 수준의 정의가 필요하다.

본 연구에서는 반복하중으로 인한 기둥의 손상상태의 정의를 위해 다음과 같은 3가지 손상수준(Damage state, DS)을 결정하였다. (1) DS_1 : 심각한 균열 (기둥의 항복), (2) DS_2 : 내력저하 직전 (최대내력 도달), (3) DS_3 : 강도 손실 (파괴). 특정 손상수준을 정의함에 있어 일관성을 유지하기 위하여 모든 손상수준은 실험체의 이상화된 뼈대곡선(Idealized backbone curve)로부터 결정하였다. 이상화된 뼈대곡선은 Section 7.4.3.2.4의 ASCE 41 (2017)에서 제시한 방법에 따라 작성되었다.

앞서 정의한 개별 손상상태 별 변위비를 기둥 단면과 재료 물성치를 변수로 예측할 수 있는 경험식을 회귀분석(regression analysis)을 통해 제안하였다. 회귀 분석 방법으로 사용된 단계적 회귀분석(Stepwise regression)은 종속변수에 영향을 미치는 변수와 영향을 미치지 않는 변수를 구분하여 영향력 있는 독립변수만을 나타내어 이를 통해 최적의 경험식을 제안할 수 있다. 개별 손상 수준별 변위비에 대한 경험식은 취약한 기둥의 파괴 거동인 휨-전단파괴, 전단파괴에 따라 각각 18개, 20개의 데이터를 사용하여 제안하였다. 휨-전단파괴가 일어난 기둥 부재의 변위비에 대한 경험식은 식(1)-식(3)과 같다. 그림 2는 식(1)-식(3)의 정확도를

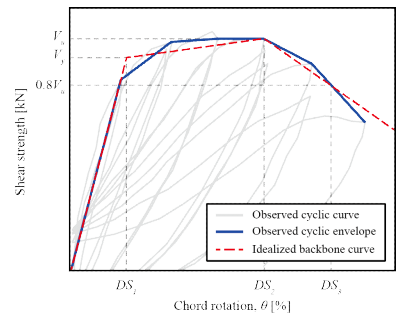


그림 1 기둥부재 손상수준(DS)정의

* 정회원.한양대학교 건축공학과, 석박사통합과정 (E-mail: rntngus@hanyang.ac.kr)

** 정회원.한양대학교 건축공학과, 교수 (E-mail: swan@hanyang.ac.kr)

평가한 것이다.

$$\theta_{DS1} = 0.25(L_n/h)^{0.19}(a/d)^{-0.42}(f_{yt}/f_c)^{0.20}(\nu)^{-0.61}(V_p/V_n)^{-0.85} \quad (1)$$

$$\theta_{DS2} = 0.14(L_n/h)^{0.18}(s/d)^{-0.41}(f_{yt}/f_c)^{0.56}(\nu)^{-0.60}(V_p/V_n)^{-0.28} \quad (2)$$

$$\theta_{DS3} = 0.17(L_n/h)^{0.99}(a/d)^{-0.23}(s/d)^{-0.57}(\rho_l)^{-0.20}(\nu)^{-0.51}(V_p/V_n)^{0.23} \quad (3)$$

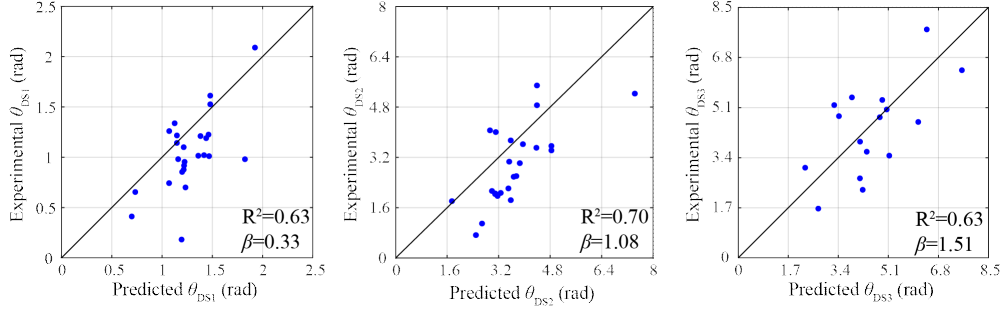


그림 2 휨-전단파괴 발생한 실험체의 경험식의 정확도 평가

전단파괴가 일어난 기둥 부재의 변위비에 대한 경험식은 식(4)-식(6)과 같다. 그림 3은 식(4)-(6)의 정확도를 평가한 것이다.

$$\theta_{DS1} = 5.00(L_n/h)^{0.21}(a/d)^{-0.89}(\rho_t)^{0.44}(f_{yt}/f_c)^{0.40}(\nu)^{-0.29} \quad (4)$$

$$\theta_{DS2} = 5.00(L_n/h)^{0.57}(\rho_l)^{-0.58}(\rho_t)^{0.26}(f_{yt}/f_c)^{-0.96}(V_p/V_n)^{-0.56} \quad (5)$$

$$\theta_{DS3} = 0.37(L_n/h)^{1.35}(a/d)^{-1.49}(s/d)^{0.64}(\rho_l)^{-1.23}(\rho_t)^{0.63}(f_{yt}/f_c)^{0.37} \quad (6)$$

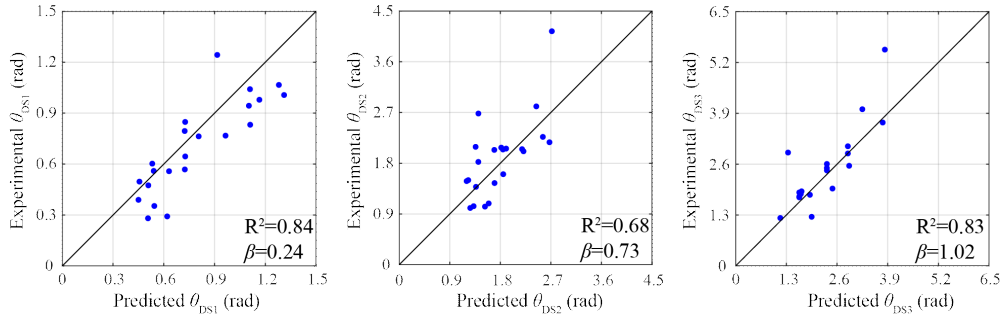


그림 3 전단파괴 발생한 실험체의 경험식의 정확도 평가

감사의 글

이 연구는 한국연구재단 (NRF-2020R1A2C2010548)지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. ASCE, (2013)Seismic Evaluation and Retrofit Rehabilitation of Existing Buildings, ASCE 41-13, American Society of Civil Engineers. Reston, VA
2. Setzler, E.J., Sezen, H. (2008). Model for the lateral behavior of reinforced concrete columns including shear deformation. Earthquake Spectra, 24(2), 493-511.
3. Sezen, H., Moehle, J.P. (2004). Shear strength model for lightly reinforced concrete columns. Journal of Structural Engineering, 130(11), 1692-1703.
4. ASCE, (2017)Seismic Evaluation and Retrofit Rehabilitation of Existing Buildings, ASCE 41-17, American Society of Civil Engineers. Reston, VA

Investigation of performance of 3D printing sandwich structure by experimental-analytical and DIC analysis

팜버안코아*1)

Pham, Vo Anh Khoa

송민아**

Song, Minah

이기학***

Lee, Kihak

Silica sand is a popular material with silicon dioxide SiO₂ is a main chemical composition and used widely in industrial and commercial application [1, 2]. In this study, the influence of silica sand on the various sandwich structure is evaluated for UHPC panel production purpose and used for building under static and seismic effect. The sandwich structures were design with different core types, including solid core, diamond core, honeycomb core, pyramid core, round O core, different thickness and different relative density is investigated by experiment, simulation analysis and digital image correlation DIC analysis.

The geometric feature of core design is determined by Equation (1) in which the thickness depends on the relatives density, length as well as the angle of structural elements. the thickness was chosen by calculating for diamond core as shown in Fig. 1 and apply for the other core types. The 3D printing sandwich structure were built with 5 core types and various relative density of 0.5, 0.7, 0.9 were designed as Fig. 1. The chosen unit cell is 20mm and thicknesses are 3.54, 4.95 and 6.36mm. The cylindrical specimens with height and diameter of 50mm were used for compressive test of sand mold specimens as shown in Fig. 2 while Digital image Correlation DIC system was set up to evaluate and compare the performance in Fig. 3.

Equation (1):

$$\rho^* = \frac{\rho_c}{\rho_s} = \frac{t}{L \times \sin \theta \times \cos \theta} \quad (1)$$



Fig. 1. Core types of sandwich structure

where: ρ is relative density, ρ_c is density of core, ρ_s is density of structure, L is length of inclined cell, t is cell thickness and θ is angle between the vertical and inclined cell.

The average compressive strength of 3 specimens were used to evaluated the behavior of silica sand mold with different core designs. Fig. 4 shows the effect of core design and relative density ratio to the compressive response. The specimens with thickness Of 6.36mm show the significant difference. Besides, the strengths are range from 0.09 to 6.15 MPa with the greatest strength of solid specimen – 6.15 MPa. Comparing with solid core, the compressive strength of the other cores are equal to 1–18%. The value increase with the intention round O core < honeycomb core < diamond core < pyramid core < solid core.

* 세종대학교 건축공학과, 박사후연구원 (E-mail: khoapham@sejong.ac.kr)

** 세종대학교 건축공학과, 석사연구원 (E-mail: minah0913@sejong.ac.kr)

*** 세종대학교 건축공학과, 교수 (E-mail: kihaklee@sejong.ac.kr)



Fig. 2. Experiment

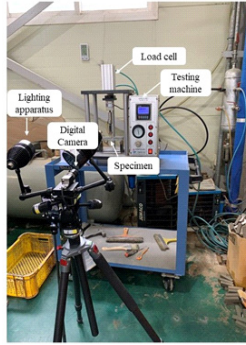


Fig. 3. Digital image correlation

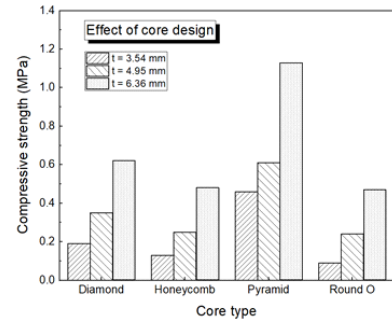


Fig. 4. Effect of core design and density ratio

Fig. 5 illustrates the comparison of simulation analysis by Ansys and Digital Image Correlation DIC analysis. Images obtained from digital camera were analyzed by specific tools to get the displacements by the time in X and Y direction from 0.097 to 0.773mm. On the other hand, the FEM modeling shows the behaviors of specimens under loading and compared with DIC analysis with 0.060–0.769mm. The differences in two methodology are acceptable with almost difference under 20% and shows a good agreement. The safety factor obtained in simulation analysis also indicated that the sand mold structure is safe under applied loading.

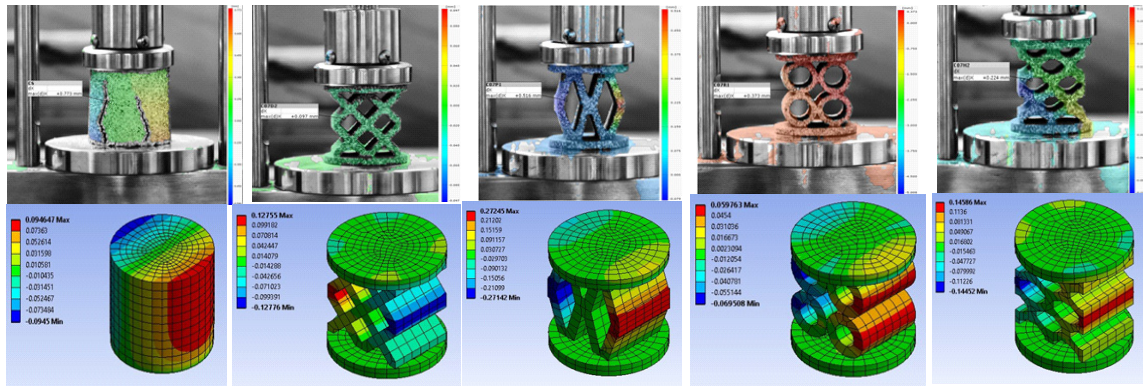


Fig. 5. Digital image correlation DIC and simulation analysis

감사의 글

이 연구는 본 연구는 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(21TBIP-C161326-01)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Rippmann M. et al. Design, fabrication and testing of discrete 3D sand-printed floor prototypes. *Materials Today Communication*, 2016:254-259.
2. Ciccarelli D. et al.. Buckling behavior of 3D printed composites isogrid structures. *Procedia CIRP* 99. 2021:375-380.

얕은 기초가 있는 다자유도 구조물의 지진응답의 제한

Limitations of Earthquake Responses of MDOF Structure with Shallow Foundation

김동관*
Kim, Dong Kwan김진우**
Kim, Jin Woo박희철***
Park, Hee cheol

지반-구조물 상호작용(Soil-Structure Interaction; SSI)이 구조물의 지진 응답에 상당한 영향을 미친다. FEMA 274에서는 지반-구조물 상호작용에 대한 영향을 다루기 위해 유연한 기초 모드 절차를 제안했다. 또한 FEMA 440은 연결 토양과 기초 감쇠의 운동학적 상호작용을 고려하는 절차를 개발했다.

김동관 등의 연구에서는 다양한 형식의 단자유도 구조물에 대한 지반-구조물 상호작용을 조사하기 위하여 원심모형실험을 수행하였다. 그 결과 단자유도 구조물의 최대 지진 횡하중은 기초의 최대 모멘트 용량에 의해 제한되었다[1]. 그러나 이러한 결과는 단자유도 구조물에 기반한다. 실제 건축물은 다자유도 구조물에 가까우므로 다자유도 구조물에 대한 지진응답 제한에 대한 실험적 연구가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 지반-구조물 상호작용에 의한 얕은 기초를 포함하는 다자유도 구조물의 지진응답 제한을 조사하기 위하여 2가지 다자유도 모델에 대한 원심모형실험을 수행하였으며, 원심모형실험을 통해 계측된 실험결과와 고정단 모델의 차이를 분석하기 위하여 고정단 모델에 대한 탄성 시간이력해석이 수행되었다. Fig. 1은 고차모드에 대한 지반-구조물 상호작용의 영향을 평가하기 위한 장주기 구조물과 단주기 구조물을 나타내며, 이들의 제원은 Table 1과 같다. 고정단 모델에 대한 입력지진파는 Fig. 2와 같이 원심모형실험에서 자유장 표면에서 계측한 가속도 데이터를 사용하였다. 고정단 모델에 사용된 감쇠비는 실험을 통해 산정한 실제 실험체의 감쇠비 1.78%, 3.01%를 각각 사용하였다. 사용된 고정단 모델의 진동주기 및 질량참여율은 Table 2와 같다.

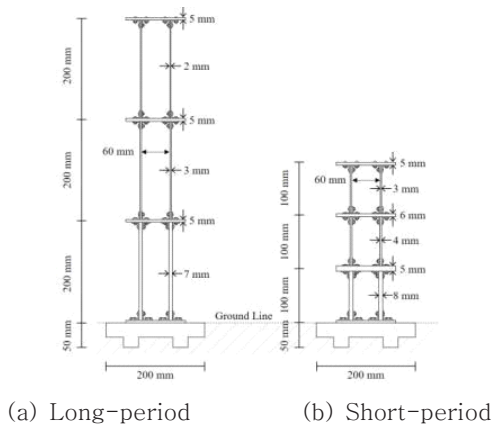


Fig. 1. The test specimens

Table 1. Experimental structural variables

Structure	Long-period MDOF Structure			Short-period MDOF Structure		
Material	Steel (F _y = 235 MPa)					
Total Weight (N)	1.74			1.68		
Mass of Foundation (kg)	2.82			2.82		
	1F	2F	3F	1F	2F	3F
Mass of plates	0.235	0.235	0.235	0.470	0.282	0.235
Effective mass, <i>m_g</i> , (kg)	0.603	0.360	0.266	0.258	0.352	0.673
	1 st	2 nd	3 rd	1 st	2 nd	3 rd
Natural frequency (Hz)	26.3	52.6	100	90.9	200	250
Natural period (sec)	0.038	0.019	0.010	0.011	0.005	0.004
<i>T_n</i> * in 40gc** (sec)	1.52	0.76	0.40	0.44	0.20	0.16
Damping ratio(%)	1.78			3.01		
q/q _c ***	0.311			0.307		

Natural period of prototype*: ..., Centrifugal acceleration (g)**: ...

Ratio of vertical bearing stress to bearing capacity of foundation***

* 정회원.청주대학교 건축공학과, 조교수 (E-mail: dkkim17@cju.ac.kr)

** 정회원.청주대학교 건축공학과, 박사과정 (E-mail: wlsdn0907@naver.com)

*** 비회원.청주대학교 건축공학과, 석사과정 (E-mail: heecheol0306@naver.com)

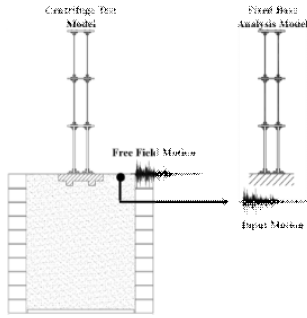


Fig. 2. Input seismic wave of fixed base model

Fig. 3은 원심모형실험에서 측정한 응답가속도와 고정단 모델의 탄성시간이력해석 결과에서의 응답가속도 비교를 나타낸다. Fig. 3(a)와 같이 장주기 구조물의 경우 응답가속도가 원심모형실험에서 고정단 모델에 비해 감소된 것으로 나타났다. 또한 상부층으로 갈수록 감소폭은 증가하였다. Fig 3(b)와 같이 단주기 구조물의 경우 장주기 구조물에 비하여 응답가속도의 감소폭은 크지 않았으나 전체적으로 감소하는 것으로 나타났다.

Table 2. Eigenvalue analysis of fixed base model

Structure	Eigenvalue			
	Mode No	Period (s)	Frequency (Hz)	Mass(%)
Long-Period Superstructure	1	1.587	0.630	50.71
	2	0.755	1.324	17.00
	3	0.399	2.507	32.29
Short-Period Superstructure	1	0.440	2.275	58.09
	2	0.224	4.470	28.49
	3	0.126	7.922	13.41

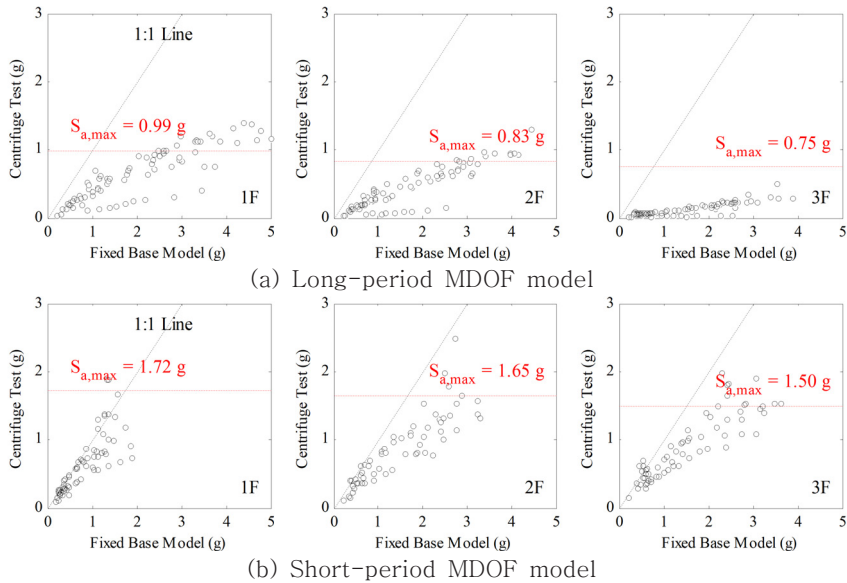


Fig. 3. Comparison of response acceleration between centrifuge test and fixed base model

상부구조물 응답가속도의 제한적인 분포를 분석하기 위하여 기초의 최대 모멘트 내력력에 따른 상부구조물의 최대 응답가속도를 분석한 결과 예측한 상부구조물의 최대 응답 가속도는 실험결과와 유사하게 나타나는 것으로 확인되었다. 따라서 기초의 지진력에 따른 다자유도 구조물의 응답은 지반의 최대 지진응력에 따른 기초의 최대 모멘트 내력에 따라 제한되는 것으로 분석되었다.

감사의 글

이 연구는 청주대학교 연구장학 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Kim DK, Park HG, Kim DS, Lee H. Nonlinear system identification on shallow foundation using Extended Kalman Filter, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020;128: 105857

조적채움벽 골조의 면내 방향 파괴모드 예측에 관한 연구

Prediction of Failure Modes for Masonry Infilled Walls subjected to In-plane Loading

김민재*1)
Kim, Min-Jae유은종**
Yu, Eun-Jong

조적채움벽골조에서 조적채움벽의 수평저항성능은 벽체의 파괴모드에 따라 예상되는 강도에 큰 차이가 있어 정확한 강도 산정을 위해서는 파괴모드에 대한 예측이 필요하다. Fig. 1은 조적채움벽의 여러 파괴모드에 대하여 서로 다른 강도식을 제시한 연구자들의 식을 다수의 조적채움벽골조 실험체들에 대하여 비교한 것이다. 연구에 사용된 조적채움벽골조 실험체 데이터베이스는 국내와 해외에서 진행된 조적채움벽골조 실험 문헌들을 수집한 것으로 총 65개의 실험체로 구성되었다. 조적채움벽의 여러 파괴모드를 고려하여 각 파괴모드에 적합한 강도식을 제시한 경우 해당하는 파괴모드는 계산 결과 중 최솟값을 선택하는 것이 일반적이다. Fig. 1에서 좌측의 가로줄눈미끄러짐 파괴(BJS)를 가정한 계산 결과들은 중앙과 우측의 대각인장 파괴(DT), 단부압괴 파괴(CC)를 가정한 경우보다 낮은 결과를 보여 최솟값을 조적채움벽의 파괴모드로 채택하는 경우 실제 파괴모드와 관계없이 BJS가 선택되게 된다는 것을 확인할 수 있다. 이 경우 실제 파괴모드가 BJS가 아닌 경우 강도 예측이 정확하지 않을 수밖에 없으며 정확한 강도 계산을 위해서는 강도 산정 이전에 조적채움벽을 먼저 예측한 후 파괴모드에 적합한 강도식을 이용하는 것이 필요하다.

조적채움벽골조의 파괴모드는 연구자마다 약간의 차이는 있으나 대표적으로 가로줄눈미끄러짐 파괴, 대각인장 파괴, 단부압괴 파괴, 골조 파괴(FF) 등의 4가지 파괴모드를 고려한다. 여기서 골조가 조적채움벽보다 상대적으로 약한 강도를 지녀 골조의 파괴가 선행되는 FF의 경우 조적채움벽의 영향이 미미하며 조적채움벽이 높은 강도를 지녀 조적채움벽의 모서리 부분이 파괴되는 CC의 경우 골조의 이른 전단파괴가 확실시되기 때문에 조적채움벽 파괴모드의 예측 실효성이 낮다. 골조와 조적채움벽의 강도가 현저하게 차이가 나지 않는 경우에는 BJS와 DT가 주로 나타나며 기존에 제안된 조적채움벽 강도식에서도 두 파괴모드에 따른 강도를 예측하도록 하는 경우가 가장 빈번하다[1].

조적채움벽의 파괴모드는 조적채움벽 자체의 특성뿐만 아니라 골조와의 관계에 따라서도 달라진다. 따라서 조적채움벽의 파괴모드를 예측하기 위해서는 조적채움벽과 골조의 재료, 단면 특성 등을 모두 고려해야 한다. Fig. 2에서는 각 특성의 영향을 파악하기 위하여 각 특성에 따른 파괴모드의 분포를 분석하였으며 정확한 분석을

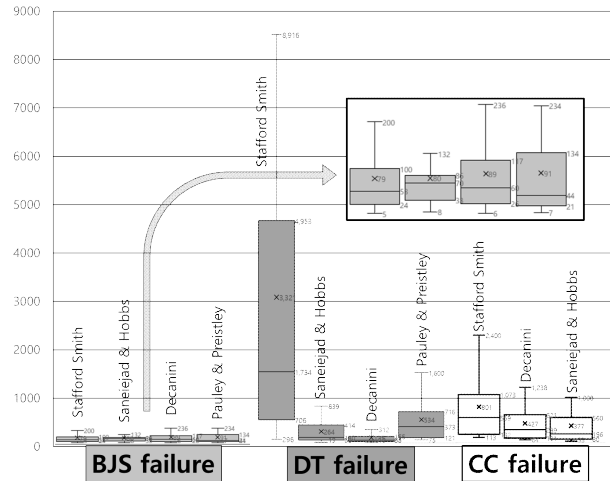


Fig. 1. Comparison of strength equations according to failure modes.

위하여 데이터베이스를 구성하는 실험체 중 조적채움벽의 파괴모드가 명확히 구별되는 22개의 실험체를 비교 대상으로 하였다. Fig. 2 (a), (b), (c)는 조적채움벽의 형상비(H_m/L_m), 조적조 압축강도(f'_m), 압축강도의 제곱

* 정회원.한양대학교 건축공학부, 박사 (E-mail: mjgoon@hanyang.ac.kr)

** 정회원.한양대학교 건축공학부, 교수 (E-mail: eunjongyu@hanyang.ac.kr)

근($\sqrt{f'_m}$)에 따른 파괴모드의 분포를 나타낸 것이다. 각 변수에 따라 파괴모드가 나뉘는 경향을 보이기도 했으나 완전히 구분되지는 않았다. ASCE 41-17에서 조적채움벽의 강도와 주변 기둥의 강도의 비를 β 로 표현하여 β 와 형상비에 따라 조적채움벽의 변형능력을 제시하였다. Fig. 2 (d)를 보면 β 가 작을수록 DT가 일어나는 경향을 보이긴 하였으나 앞서의 다른 특성들과 마찬가지로 명확히 구분되지는 않았다.

조적채움벽의 파괴모드를 예측하기 위해서는 조적채움벽과 골조의 강도비, 강성비나 조적채움벽의 형상비 등의 여러 변수를 모두 고려할 수 있는 하나의 예측변수가 필요하며 Eq. (1)의 β'' 과 같이 조적채움벽과 골조의 강도비인 β 와 조적채움벽의 형상비, 그리고 골조와 조적채움벽의 강성비를 조합하여 변수를 선언하였다. 여기서, V_m 은 조적채움벽의 BJS 강도, V_{col} 은 골조 기둥의 전단강도이다. BJS는 골조가 없는 조적조에 수평력이 작용할 때 벽체 전체가 회전하는 Rocking을 제외하고 가장 빈번하게 발생하는 파괴모드이며 조적채움벽골조의 거동에 대한 정보가 없는 상태에서 조적채움벽의 파괴모드를 예측하기에 적합한 것으로 판단하였다. Fig. 2 (e)와 같이 β'' 에 대한 비교 결과 BJS와 DT가 명확히 구분되었으며 그 경계는 β'' 가 8 인근에서 나타났다. 따라서 β'' 을 산정한 후 8 이상인 경우 BJS, 8 미만인 경우는 DT가 나타날 것으로 판단할 수 있다.

$$\beta'' = \frac{V_{col}}{V_m} \left(\frac{H_m}{L_m} \right) \left(\frac{E_c}{E_m} \right) \quad (1)$$

수집한 조적채움벽골조 실험체 전체에 대하여 β'' 을 이용하는 본 연구의 예측 방법을 적용하고 기존의 방법과 비교하였다. Stafford Smith, Decanini, Saneinejad & Hobbs 등과 같이 조적채움벽의 각 파괴모드에 대하여 기존에 제시된 강도식을 이용하여 전체 65개 실험체에 대하여 파괴모드를 예측한 결과 각각 39%, 47%, 37%에 해당하는 경우만이 실제 실험 결과와 파괴모드가 일치하였기 때문에 최솟값을 선택하여 파괴모드를 결정하는 기존의 방법은 정확한 파괴모드 예측이 어려움을 알 수 있다. 그러나 본 연구에서 제안한 파괴모드 예측 방법은 92%의 정확도로 대부분의 경우에 예측한 파괴모드가 실제 파괴모드와 일치하였다. 따라서 본 연구의 파괴모드 예측법을 이용하면 실제 나타날 조적채움벽의 파괴모드를 예측할 수 있으며 각 파괴모드에 적합한 강도식을 이용하여 강도를 산정할 수 있어 기존의 조적채움벽 강도 예측의 정확도를 향상할 수 있을 것으로 판단된다.

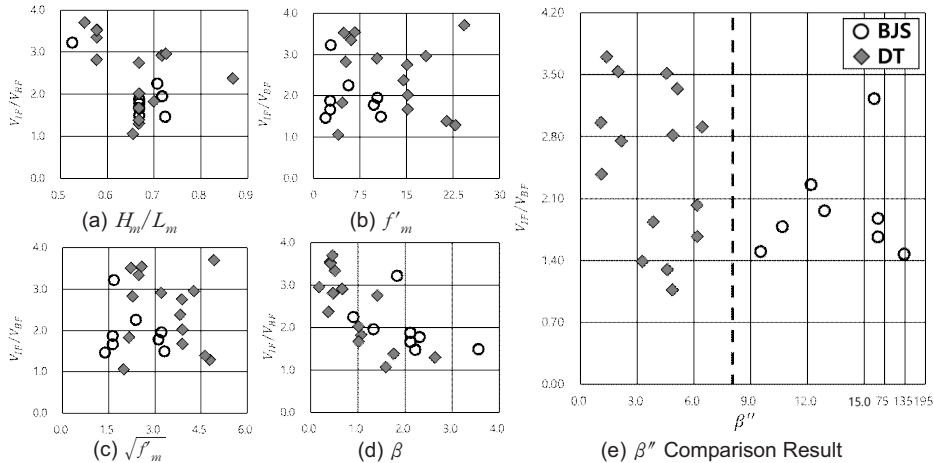


Fig. 2. Variable comparison by failure modes.

참고 문헌

1. Crisafulli, F.J. (1997). Seismic behaviour of reinforced concrete structures with masonry infills. Doctor of Philosophy. University of Canterbury.

지진과 주기 특성에 따른 지진피해 사례

Effect of Earthquake Frequency Content on Structural Damage
Observed from Seismic Reconnaissance

김유석*1)

Kim, Yousok

지진 발생지역에서 관찰되는 구조물의 손상 정도는 지진동 특성(최대 가속도 및 속도, 탁월 주기, 지진 규모, 진원 거리/깊이, 지속시간 등)에 따라 각기 다른 양상을 나타내고 있으며, 이는 세계 각국에서 발생한 지진 피해 사례를 통해서 확인되고 있다. 2016년 9월에 발생한 경주 지진(M_L 5.8, 최대 진도 (MMI) VII)은 단주기 성분이 탁월한 지진동 특성을 나타내고 있으며 우리나라 관측 이래 최대 규모를 기록한 지진임에도 불구하고 비교적 심각한 인명 피해 및 재산피해는 발생하지 않았다 (부상자 23명, 재산 피해 1,115건).

한편, 전 국토가 강진지역에 해당하는 일본에서는 1995년 효고현 남부 지진 발생 이후에 시작된 지진 관측망(K-NET, KiK-net, Hi-net, JMA 등)의 정비 사업으로 진원 근방의 지진동 관측 및 이를 이용하여 산출되는 지진 규모와 계측 진도(JMA)를 지진 발생 직후에 발신하고 있으며 지진동 계측 센서 시스템이 구축된 건물로부터 지진 시 건물의 응답이 계측되고 있다. 그러나 지진의 규모 및 진도와 상반되는 구조물의 지진 시 거동 또는 피해 사례가 보고되고 있으며, 이에 대한 원인 중의 하나로 지진동의 탁월 주기 성분과의 상관관계를 들 수 있다.

본 논문에서는 일본에서 2007년과 2008년에 각각 발생한 2건의 지진(Table 1)을 대상으로 해당 지역 구조물의 피해 조사, 여진 계측 및 구조해석 결과를 통해서 구조물의 지진 피해 정도와 지진동 탁월 주기와와의 관계를 검토하였다. Fig.1에는 대상 지진동의 가속도 응답 스펙트럼과 함께 막대한 인명 및 재산피해를 초래한 1995년 효고현 남부 지진 시 계측된 지진동(Kobe, JMA)의 응답 스펙트럼을 비교하고 있다. 또한, Table 2에는 대상 지진동이 기록된 관측소의 정보를 제시하고 있다. 2007년 지진동은 탁월 주기가 2초보다 긴 장주기 영역에 위치하며, 이와는 반대로 2008년 지진동은 0.1초와 0.15초 사이의 단주기 영역에서 관찰되고 있어 이들 2개 지진동의 탁월 주기는 2초 이상의 차이를 나타내고 있다.

Table 1. Outline of earthquake

	Occurrence	Prefecture	Magnitude	Intensity (JMA)	Depth (km)	Casualty
The Niigataken Chuetsu-Oki Earthquake in 2007**	2007.07	Niigataken	6.8	6+*	17	15
The Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008***	2008.06	Iwateken	7.2	6+*	7.8	17

* 일본 기상청(JMA)의 진도계급은 총 10단계로 구분되며 '6+'는 2번째로 강한 진도

** 일본 기상청 공식 명칭: 新潟県中越沖地震, The Niigataken Chuetsu-Oki Earthquake in 2007

*** 일본 기상청 공식 명칭: 岩手・宮城内陸地震, The Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008

장주기 성분(2초 이상)이 탁월한 지진동 특성(2007 Kashiwazaki, NS, K-NET, Fig.1)을 나타내는 2007년 지진의 발생 지역(최대 진도 6강)에서 철근콘크리트 초, 중, 고등학교 건물들(6층 이하)을 대상으로 피해 조사를 수행한 결과, 모두 경미한 손상(일본의 피해도 판정 기준[1]: 소파)을 나타내었으나 진앙으로부터 남서쪽으로 약 18km에 위치한 쓰레기 처리 시설('가시와자키 크린센터')의 철근콘크리트조 굴뚝이 파손되는 큰 구조적 손상이 발생하였다(Fig. 2). 해당 구조물은 일본의 현행 구조설계 지침[2]에 따라서 설계되었으며 정방형

* 정회원-홍익대학교 건축공학부, 부교수 (E-mail: yskim1220@hongik.ac.kr)

박스 형태(각 변 4.6m)의 단면으로 벽 두께 및 배근량은 상부로 갈수록 감소시켜 설계되었다(구조물 높이:58m). 입수된 구조도면을 참고로 해석 모델을 구축하였으며 이를 통한 고유치 해석 결과 및 구조설계 지침[2]에 제시된 고유주기 약산 식의 계산 결과 1차 모드에서 각각 1.02초와 1.09초의 비교적 긴 주기가 산출되었다. 대상 구조물은 지면으로부터 약 17m의 부위가 파손, 절단되어 약 6m 정도 강하하였다(Fig. 2). 파손된 벽체의 높이 방향 위치(17m 부근)는 배근 상세가 이열 배근에서 일열 배근으로 바뀌는 위치에 해당하는 것을 구조도면을 통해서 확인하였다.

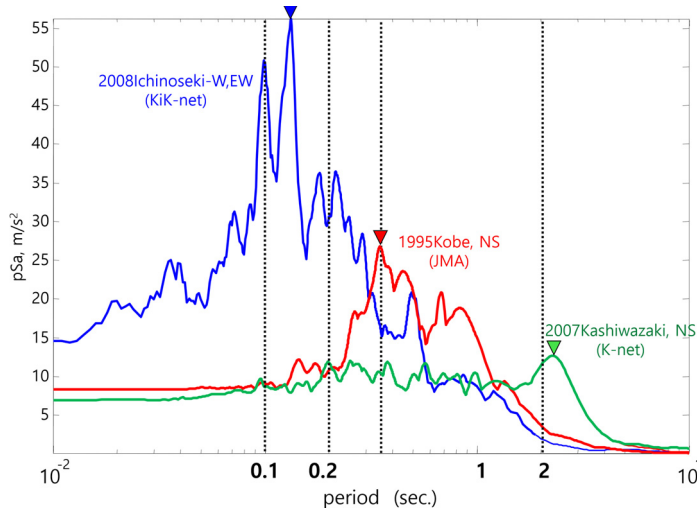


Fig. 1. Acceleration response spectrum

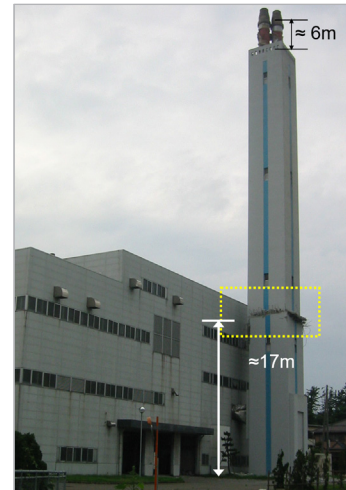


Fig. 2. Damaged stack during 2007 earthquake

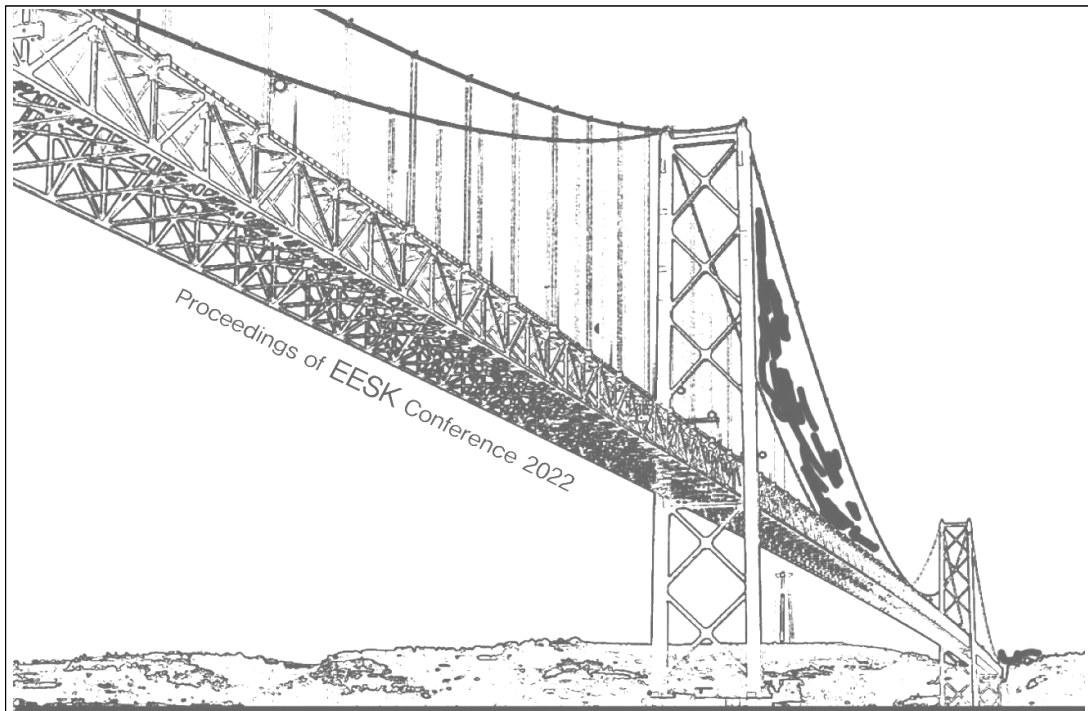
Table 2. Outline of strong motion

Year	Observation station	Seismograph networks	Direction	Earthquake
2007	Kashiwazaki	KiK-net	EW	The Niigataken Chuetsu-Oki Earthquake in 2007
2008	Ichinoseki-W	K-NET	NS	The Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008

한편, 단주기 성분(0.1초~0.15초)이 탁월한 지진동 특성을 나타내는 2008년 지진의 최대 진도 또한 6강으로 진도 지표 자체로는 큰 구조적 피해가 예상되었으나 피해 조사 결과, 경미한 손상(일본의 피해도 판정 기준[1]: 소파)만이 관찰되었다. 해당 지역에 있는 3층 RC조 중박도형의 초등학교 건물(장변:51m, 단변:16.5m, 진앙으로부터 8km 위치)을 대상으로 피해 조사 및 여진 계측을 수행하였다. 대상 교사는 1970년대 설계 기준이 적용된 건물로서 계측된 여진 기록을 이용하여 주기를 산출한 결과, 수평 단변 방향 0.16초, 수평 장변 방향 0.24초, 수직 방향 0.08초임을 확인하였다. 또한, 입수된 구조도면에 따른 고유치 해석 결과를 통해서도 시스템 동정 결과와 유사한 주기가 산출되었으며 장변 및 단변 방향의 밀면 전단력 계수는 각각 약 0.8과 1.7로 산출되었다. 2008년 지진동(2008 Ichinoseki-W. EW, KiK-net, Fig.1)의 탁월 주기가 0.1~0.15초 사이에 위치하므로 대상 건물의 단변 방향 주기(0.16초)와 매우 근사한 값을 나타내고 있으나 피해 조사 결과에서는 이 건물 역시 매우 경미한 손상 정도를 나타내었다. 본 건물의 경우, 일본 학교 건물의 전형적인 구조 형식으로 단변 방향에는 다수의 철근콘크리트 전단벽이 배치되어 있어서 매우 높은 강도(밀면 전단력 계수 1.7)를 보유하고 있는 것이 경미한 손상 원인 중의 하나로 사료된다.

참고 문헌

1. 일본건축방재협회, 震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針, 2001
2. 일본건축학회, 煙突構造設計指針, 2007.



건축물 구조요소와 비구조요소의 내진성능

진동대 실험을 통한 바닥고정형 비구조요소 앵글형 정착부의 내진성능 평가

Shake-table seismic performance evaluation of base angle to mount nonstructural components on floor

배창준*1) 이철호** 전수찬*** 오나윤****
 Bae, Chang Jun Lee, Cheol-Ho Jun, Su-Chan Oh, Nayoon

지진 내습 시 건물 내 비구조요소는 지반운동에 직접 영향을 받는 것이 아닌 건물의 동특성에 따라 증폭된 바닥운동에 영향을 받게 되고, 여기에 비구조요소 자체의 동특성에 따라 한 번 더 증폭된 지진력이 작용하게 되며, 특히 비구조요소의 고유주기가 건물의 고유주기와의 공진대역에 속할 경우, 심각한 지진력 증폭이 발생할 수 있다. 그러나 특정 진동수대역에서의 응답만을 증폭시키는 구조물 바닥가속도의 협대역 특성으로 인해 약간의 연성능력을 갖는 비탄성거동을 통해서도 이러한 협대역 증폭을 두드러지게 감소시킬 수 있다[1]. 이러한 현상을 근거로 미국에서 수행된 ATC-120 프로젝트에서는 비구조요소와 지지구조물 사이의 하중경로 상에서 약간의 연성능력을 제공하는 비구조요소의 연성설계방식을 제안하였다. 통신 및 기계 장비 등 자체적으로 혹은 랙 프레임을 통해 건물 바닥에 캔틸레버형으로 고정되는 바닥고정형 비구조요소에 대해서는 L-형강의 앵글과 같은 고정철물을 통해 비구조요소를 바닥에 고정하고, 이 고정철물이 일종의 희생양(ductile fuse)으로 작용할 수 있도록 설계하여 비구조요소에 작용하는 응답을 저감시키도록 한다[2]. 지진동이 가지는 불확실성 및 비구조요소의 설계지진력은 지진동특성, 구조물과 비구조요소의 동특성 등 많은 요인에 영향을 받는 복잡계 문제임을 비추어볼 때 설계지진력을 정확하게 예측하기보다 이러한 연성 설계로 우회하는 방식이 타당하다고 판단된다. 하지만 L-형강의 앵글형 정착부가 제공하는 연성능력 및 이력거동에 대해 명확하게 규명된 바가 없다. 따라서, 본 연구에서는 앵글형 정착부의 내진성능평가를 수행하기 위한 진동대 실험을 수행하였다.

본 연구에서는 강재랙의 기하학적 특성, 설치조건(바닥과의 간격(l_{gap}), 앵글을 바닥에 고정시키는 길이(l_b))를 변수로 진동대실험을 수행하였으며, 지진파는

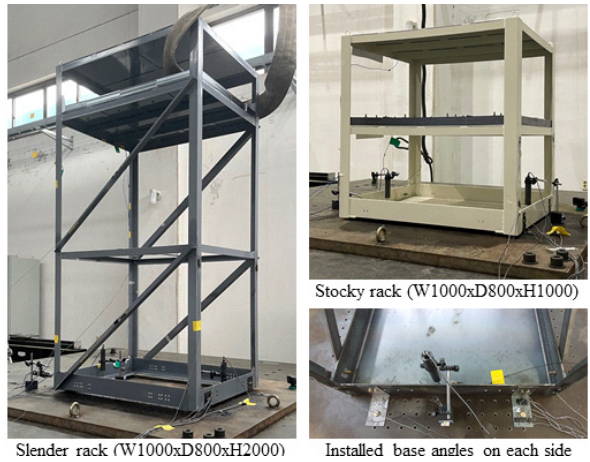


Fig. 1. Steel rack specimens and test setup

Table 1. Summary of test specimen information

Specimen	Weight (kN)	Angle size (H x B x t x L)	l_{gap} (mm)	l_g (mm)	l_r (mm)
Stocky- $l_{gap}15$ - l_b25 -2T-L45	4.16	100 x 120 x 2 x 70	15	25	60
Slender- $l_{gap}20$ - l_b75 -2T-L70	4.0	100 x 120 x 2 x 70	20	75	60
Slender- $l_{gap}20$ - l_b75 -2T-L70	4.0	100 x 120 x 2 x 70	0	75	60

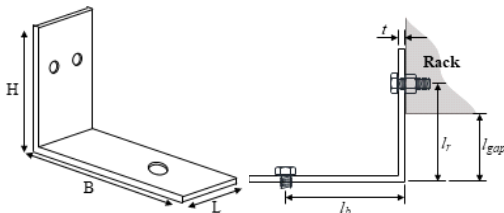


Fig. 2. Configurations of base angle

* 정회원-서울대학교 건축학과, 박사과정 (E-mail: changjun0125@snu.ac.kr)

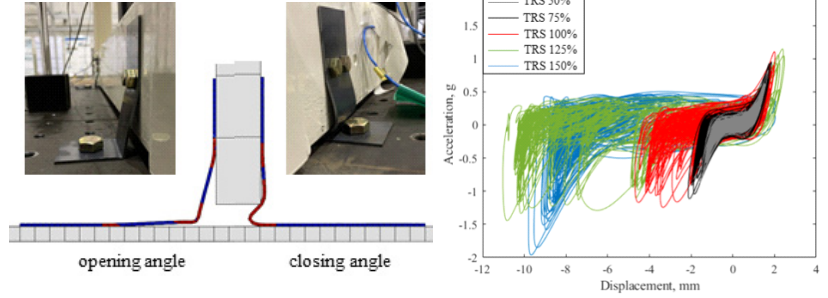
** 정회원-서울대학교 건축학과, 교수 (E-mail: ceholee@snu.ac.kr)

*** 서울대학교 건축학과, 박사과정 (E-mail: corora90@snu.ac.kr)

**** 레라컨설팅스트럭처럴엔지니어스코리아(유), 사원 (E-mail: nayoon.oh@lera.com)

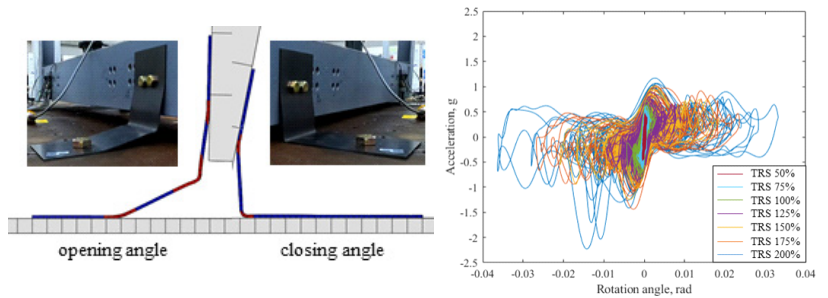
비구조요소의 대표적 내진실험 프로토콜인 ICC-ES-AC156의 요구응답스펙트럼에 따라 인공지진파를 생성하여 수행하였다. 실험은 1축 가진 실험으로 수행하였으며, 정착부 앵글은 가진방향과 평행하게 배치하였다(Fig. 1). 실험에 사용된 강재랙과 실험 전경은 Fig. 1에 나타내었으며, 실험체에 대한 정보는 Fig. 2 및 Table 1에 요약하였다.

실험 결과, 강재랙의 세장비 및 정착부의 설계조건에 따라 강재랙의 거동 및 앵글형 정착부의 파괴모드가 다르게 나타났다. 강재랙의 세장비 및 l_b 가 짧고, l_{gap} 이 존재하는 경우 강재랙의 병진운동에 의해 앵글 한쪽이 면외방향으로 눌리는 파괴모드가 관측되었다(Fig. 3a). 이 경우 이력거동에서 핀칭거동이 확인되었으며, 항복 이후 눌린 쪽으로만 연성거동이 나타나는 비대칭 이력



(a) Translational distortion failure (b) Hysteresis behavior

Fig. 3. Observed failure and hysteresis behavior for translation motion (Stocky- $l_{gap}15-l_b25-2T-L45$)



(a) Uplift failure

(b) Hysteresis behavior

Fig. 4. Observed failure and hysteresis behavior for rotation motion (Slender- $l_{gap}20-l_b75-2T-L70$)

거동이 나타났다(Fig. 3b). 이러한 핀칭거동은 앵글이 볼트접합을 통해 강재랙 및 바닥과의 정착이 이루어져 나타나는 것으로 보이며, 선행연구들에서 보고되었던 증폭저감은 대부분 이상적인 bi-linear이력모델을 통해 이루어졌기 때문에 추후 핀칭거동 및 한쪽으로만 항복이 발생하는 비대칭거동이 가속도 증폭에 미치는 영향을 분석이 필요하다고 판단된다. 강재랙의 세장비가 크고, l_b 가 긴 경우 l_{gap} 의 존재와는 무관하게 전도모멘트가 유발하는 인장력을 이기지 못하고 과도한 수직변위가 발생하는 파괴모드가 관측되었다(Fig. 4b). 이력거동은 계측된 수직변위를 각도로 환산하여 Fig. 4b에 나타내었으며, 대칭이력거동을 보였다. 피크점 이후 음의 기울기를 가지는 거동이 나타났는데, 이는 강재랙의 회전운동 시 강재랙에 작용하는 중력이 복원력으로 작용하기 때문이다. 또한, 앵글의 항복 이후 급격한 피크가 나타나기도 했는데 이는 바닥과의 충격 때문에 발생한 것으로 보이며, 이러한 현상에 의해 발생할 수 있는 가속도 증폭에 대해서도 추가적인 논의가 필요해 보인다.

감사의 글

이 연구는 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (No. 2022R1A2C2009834). 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Kazantzi AK, Vamvatsikos D, Miranda E. Evaluation of Seismic Acceleration Demands on Building Nonstructural Elements. Journal of Structural Engineering. 2020 Jul;146(7):04020118.
2. ATC. Recommendations for Improved Seismic Performance of Nonstructural Components. Gaithersburg (MD): NIST(US); 2018. Report NIST GCR 18-917-43.

실대형 2층 철골구조물 진동대 실험을 통한 비구조요소 설계지진력 평가

Evaluation of Seismic Demand on Nonstructural Elements Based on Shake Table Testing of Full-Scale 2-Story Steel Moment Frame

전수찬*1)
Jun, Su-Chan

이철호**
Lee, Cheol-Ho

배창준***
Bae, Chang-Jun

최근 국내외 지진에서 발생한 비구조요소의 피해사례는 건축물의 내진성능확보에 있어 비구조요소 내진설계의 중요성을 명백하게 보여주었다. 비구조요소는 일반적으로 2중 증폭된 지반가속도의 영향을 받으며, 이 증폭은 일차적으로 구조물의 동적거동에 의해 발생하며, 이때 생성된 바닥운동은 마지막으로 비구조요소의 고유주기와 감응하면서 추가로 증폭하게 된다. 최근 새로 도입된 ASCE 7-22 [1]에서는 그동안 지나치게 간략화되어 과도하게 평가되었던 비구조요소 설계가속도를 좀 더 합리적으로 산정할 수 있는 설계법을 제시하였다. 특히, 구조물의 주기를 고려한 바닥운동의 증폭 산정법, 구조물과 비구조요소의 비선형성을 고려한 설계법을 도입함으로써 상당히 진보된 비구조요소 설계방법을 제시하였다. 하지만 ASCE 7-22의 비구조요소 설계법은 많은 부분 이상화된 수치해석결과를 바탕으로 제안되었으며 주요 설계계수는 여전히 엔지니어링 판단이 포함되어있기 때문에 실증적인 실험을 통해 ASCE 7-22 비구조요소 설계지진력에 대한 평가가 수행될 필요가 있다. 본 연구에서 진행하는 실대형 2층 구조물을 활용한 비구조요소 진동대 실험은 5개의 대학기관 10개 이상의 참여기업으로 구성된 연구프로젝트의 일환으로 수행되었으며 총 10 종류의 비구조요소를 설치하여 진행하였다 (Fig. 1). 실험은 비구조요소 내진성능실험에 대표적으로 사용되는 ICC-AC 156에 따라 생성된 인공지진파를 통해 진행하였다. 본 연구에서는 구조물의 응답 및 지붕층에 설치된 바닥고정 비구조요소의 응답을 통해 비구조요소에 작용한 설계지진력을 평가하였다.

Fig. 2는 구조물이 탄성일 때 측정한 각 층에서의 바닥가속도의 증폭정도를 보여주고 있다. 실험프레임의 탄성상태에서는 (30% RRS), 저층 구조물에서 일반적으로 볼 수 있는 선형에 가까운 층응답가속도 분포를 보이며, 구조물의 비선형성의 증가로 인해 각 층의 PFA가 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 실험프레임의 연성도

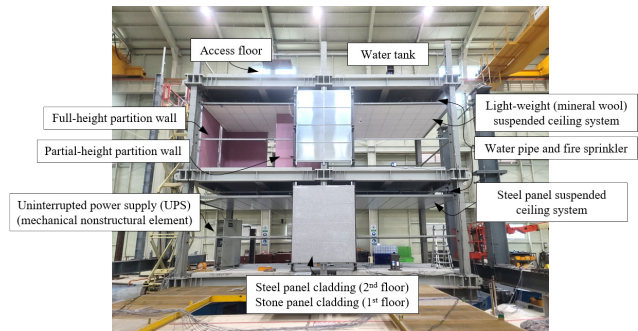


Fig. 1. Overview of full-scale 2-story steel frame mounted on an array of two shake tables with various nonstructural elements

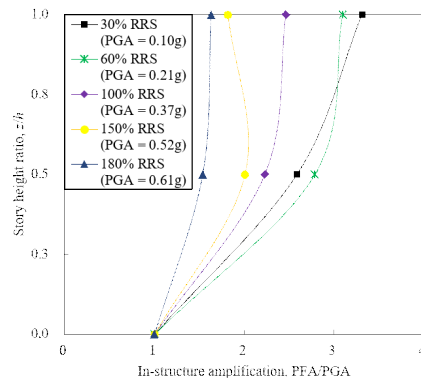


Fig. 2. Decreasing peak floor acceleration due to structural nonlinearity

* 서울대학교 건축학과, 박사과정 (E-mail: cororra90@snu.ac.kr)

** 서울대학교 건축학과, 교수 (E-mail: ceholee@snu.ac.kr)

*** 서울대학교 건축학과, 박사과정 (E-mail: changjun0125@snu.ac.kr)

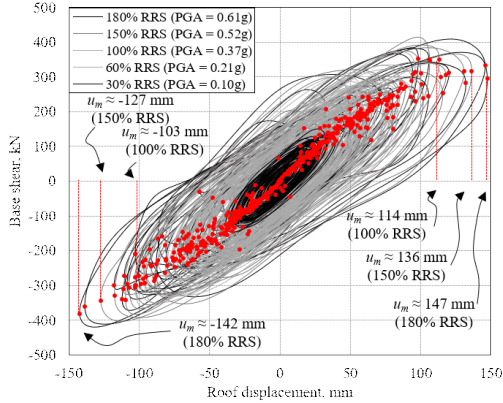


Fig. 3. Test frame hysteretic responses for measuring yield and maximum roof displacements

(μ)와 층응답가속도 감소와의 관계를 평가하기 위해 실험 프레임의 항복변위와 각 실험단계에서 발현된 최대변위를 실험프레임의 이력거동으로부터 평가하였다 (Fig. 3). 계측 기록의 모든 피크점을 도시한 결과 (Fig.3 붉은 마크)에서 볼 수 있듯이 실험프레임은 60% RRS 단계에서 항복하기 시작하였으며 발현된 최대연성도는 $\mu=2.94$ 로 나타났다. Fig. 4는 각 실험단계에서 계측된 구조물 연성도와 층응답감소를 도시한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 층응답가속도의 감소는 지붕층에서 두드러지게 발생하였으며, ASCE 7-22는 최상층에서의 층응답가속도 감소는 전반적으로 잘 예측하는 것으로 확인되었으나 1층에서의 층응답가속도 감소는 대체적으로 과도하게 평가하는 것으로 확인되었다.

Fig. 5는 지붕층에 설치된 바닥고정 비구조요소 (이중마루에 설치된 랙)의 이력거동을 보여주고 있다. 실험체는 이중마루의 느슨한 부재 간 접합부 상세로 인해 두드러지는 핀칭거동을 하는 것으로 확인되었으며 최종적으로는 이중마루의 항복으로 인해 실험체가 파괴되었다. Fig. 6은 비구조요소의 연성도와 비구조요소 가속도 감소의 관계를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 실험체의 비선형거동에 의한 가속도 감소는 전반적으로 ASCE 7-22의 예측보다 적게 나타났으며, 이는 실험체의 핀칭거동에 의해 저하된 에너지소산능력의 영향으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축 연구개발사업의 연구비 지원(21AUDP-C146352-04)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. ASCE/SEI, 7-22. Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. American Society of Civil Engineering, VA, USA; 2022.

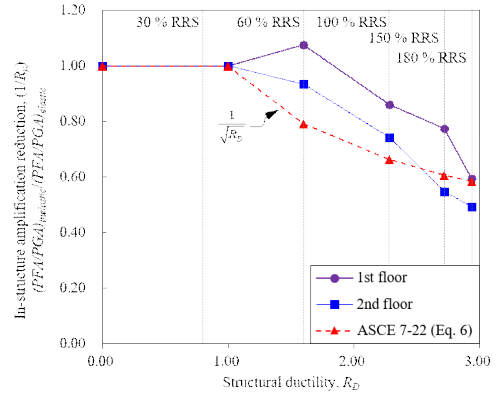


Fig. 4. Comparison of measured and ASCE 7-22 peak floor acceleration reduction depending on structural ductility level

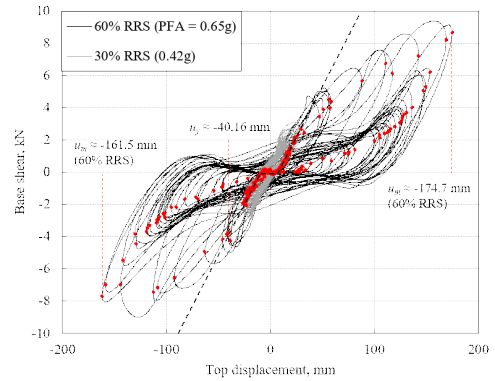


Fig. 5. Pinching hysteretic response of access floor-mounted steel rack specimen

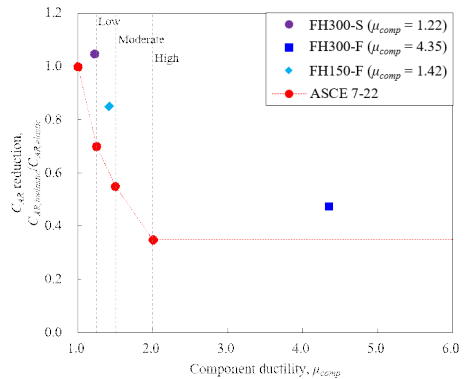


Fig. 6. Relationship between component ductility and peak component acceleration reduction

전산도구를 활용한 음압격리병동 비구조요소의 내진설계

Seismic Design of Non-structural Components in Negative Pressure Isolation Wards using Computational Tool

추유림*1)
Chu, Yurim

김태진**
Kim, Taejin

국내외의 여러 지진 피해 사례를 통해 건축물의 성능수준에 영향을 미치는 것은 비단 구조요소의 안정성에만 국한되는 것이 아니라 지진 발생 전후 비구조요소의 상태와도 밀접하게 관련되어 있음이 알려졌다. 특히 건축물이란면 반드시 갖춰져야 하는 기본적인 비구조요소도 있지만 건축물의 용도에 따라 선택적으로 설치되어야 하는 특수한 요소들도 존재하기 때문에 비구조요소는 건축물에 부여된 고유의 목적을 유지하기 위한 핵심 요소라 할 수 있다. 이와 더불어 해당 요소 자체 또는 지지부가 손상되면서 발생할 수 있는 전도·낙하·탈락 및 각종 사고는 인명피해를 야기할 위험이 있다. 이러한 이유로 비구조요소에 요구되는 성능과 내진설계의 필요성에 대한 인식이 높아지면서 2018년 11월 9일 고시를 통해 비구조요소가 내진설계대상임을 명확히 하고 이에 대한 내진설계가 본격화되었다. 대한건축학회[1, 2]에 따르면 비구조요소의 내진설계는 주로 실제 건축물에 사용될 자재가 확정되는 시공단계에서 수행한다(Fig. 1). 따라서 비구조요소 시공상세도를 현장에서 제공 받은 후 내진설계 업무를 시작하게 된다. 구조설계 실무자는 시공자가 제공한 상세도의 적정여부를 확인하고 보강이 필요한 경우 보강안을 제시한다. 물론 시공현장의 진행상황에 따라 다르지만 대부분은 특정 비구조요소의 시공을 앞둔 상황에 해당 요소의 구체적인 상세가 결정되기 때문에 사실상 비구조요소의 내진설계를 위해 주어지는 시간이 매우 충분하다고 말하기는 어렵다.

한편, 전세계적으로 감염병 중증 환자가 급증하면서 많은 나라에서 병상 부족 문제를 겪었다. 이에 따라 중세가 심각한 중증 환자들에게 보다 적극적인 의료서비스를 제공하고 감염원의 확산을 막기 위해 충분한 환경과 의료장비를 갖춘 전담병동 마련이 요구되었다. 이와 같이 긴급한 상황에서는 빠른 의료서비스 제공을 위해서 전체적인 설계 절차를 신속하게 완료하는 것이 불가피하다. 의료시설은 그 기능을 발휘하기 위해 많은 비구조요소를 포함하고 있으며 이에 대한 손상은 곧 의료기능의 마비로 이어져 인명피해를 유발할 수 있으므로 이에 대한 내진설계는 필수적이다. 앞서 언급한 일반적인 비구조요소 내진설계 절차와 감염병 대유행과 같은 긴급 상황에서 요구되는 설계의 신속함을 고려하면 다소 시간이 부족할 가능성이 높다. 따라서 인적과실을 최소화하면서 제한된 시간 내에 여러 조건 및 상세에 대한 검토가 용이하도록 비구조요소 내진설계 전산도구를 마련할 필요가 있다.

이러한 배경으로 본 연구에서는 감염병 중증 환자를 대상으로 하는 음압격리병동의 건축 비구조요소 내진설계 전산도구를 개발하였다. 기계·전기 비구조요소 자체에 대한 설계는 관련 전문가에 의해 수행되므로 고려하지 않았다. 또한 본 연구에서 개발한 전

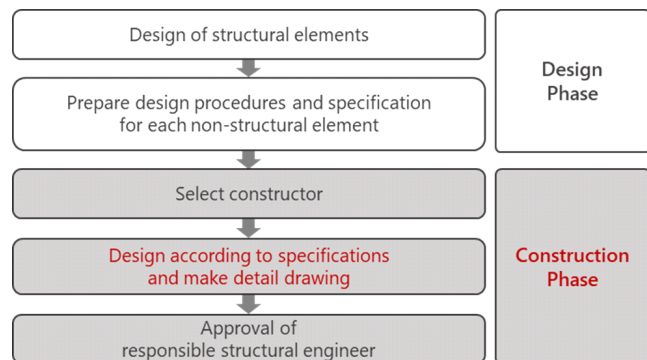


Fig. 1. Non-structural element design procedure [1]

* 정회원·티아이구조기술사사무소, 팀장 (E-mail: chuyurim92@naver.com)

** 정회원·티아이구조기술사사무소, 대표 (E-mail: taejin@tiststructure.com)

산도구는 음압격리병동을 이루는 여러 건축 비구조요소 중에서 경량칸막이벽을 대상으로 하였으며 그 이유는 다음과 같다. 일반적으로 경량칸막이벽은 중량칸막이벽이나 기타 비구조요소에 비해 그 중요성이 비교적 낮은 것으로 인식되지만 우선 경량칸막이벽의 전도는 위치에 따라 피난동선에 방해가 될 가능성이 높다. 뿐만 아니라 음압격리병동의 공기흐름을 의도한 방향으로 유도하고 음압구역과 비음압구역을 명확하게 구획하며 감염원 확산 방지, 음압격리병실의 음압 유지를 위해 각 실을 구분하고 있는 경량칸막이벽은 미세한 손상도 방지되어야 하기 때문이다.

Fig. 2에는 본 연구를 통해 개발된 경량칸막이벽 내진설계 전산도구의 일부를 나타내었다. 해당 도구는 입력 영역, 하중 산정 영역, 해석결과 출력 영역, 검토 결과 출력 영역으로 구성되어있다. 입력 영역에서는 검토하고자 하는 경량칸막이벽의 시공상세도에 따라 벽체의 형상과 설치위치 및 스티드(STUD), 런너(RUNNER), 그리고 석고보드에 대한 정보(사이즈, 강도)를 입력한다. 하중 산정 영역에서는 고정하중 및 지진하중 산정을 위한 정보를 입력한다. 활하중은 필요에 따라 적용한다. 이를 바탕으로 전산도구 내부에서 경량칸막이벽의 구성요소(스티드, 런너, 석고보드 등) 각각에 작용하는 소요강도와 각 구성요소별 축력, 전단력, 휨에 대한 설계강도를 계산하고 그 결과는 해석결과 출력 영역과 검토 결과 출력 영역에서 확인할 수 있다. 각 구성요소의 소요강도 및 설계강도는 일반적인 구조해석 이론과 냉간성형강 구조설계기준[3]을 따라 산정하였다.

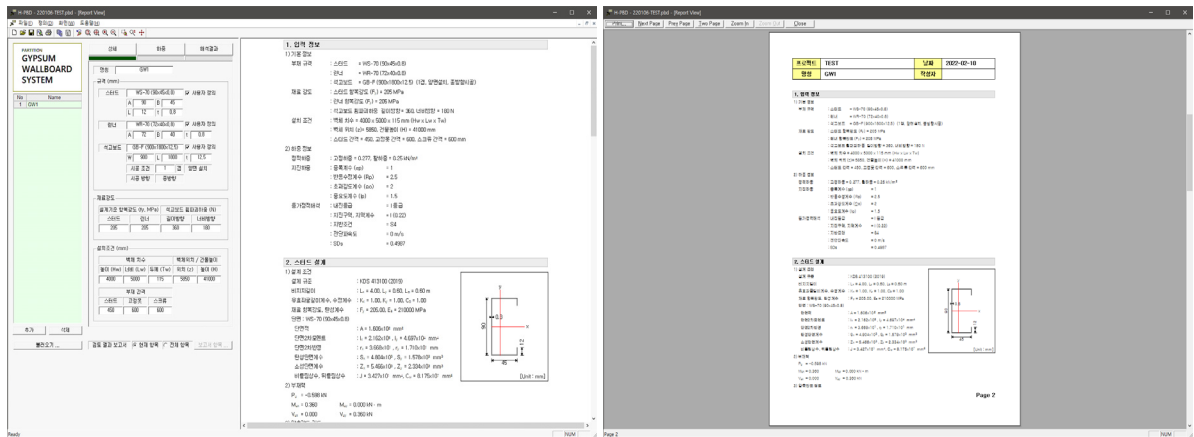


Fig. 2. Computational tool of gypsum wallboard system

감사의 글

이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 과학기술인재진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2021-브릿지-03)

참고 문헌

1. KDS 41 17 00. Seismic Building Design Code. Korea Construction Standards Center. c2019.
2. Architectural Institute of Korea. Non-structural Element Seismic Design Examples according to the Seismic Building Design Code. AIK: 2019.
3. Architectural Institute of Korea. Design Specification for Cold-Formed Steel Section, AIK:1998.

단일 스테드 경량칸막이벽의 지진 손상

Seismic Damages on Cold-Formed Steel Partition Walls

신동현*

김형준**1)

Shin, Dong-Hyeon

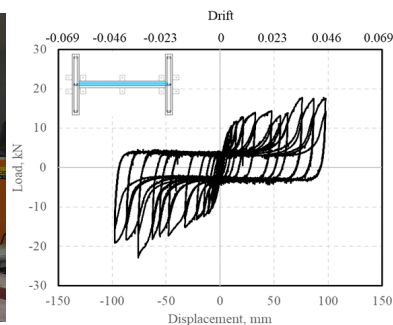
Kim, Hyung-Joon

건축 비구조요소 중 하나인 칸막이벽은 건축물 내부 골조 사이에 설치되어 공간을 구획하는 용도로 사용된다. 칸막이벽은 일반적으로 건축물에 작용하는 외부 하중에 저항하도록 설계되지 않으며, 지진으로 인해 칸막이벽에 발생하는 손상 및 파괴는 지진 이후 건축물의 기능수행과 관련한 2차 피해를 유발할 수 있다 [1]. 또한 지진으로 인한 칸막이벽의 전도는 피난 경로를 방해하며, 칸막이벽과 연결되는 기계 또는 전기설비의 손상을 유발하여 건축물의 기능이 마비될 수 있다. 경량칸막이벽은 내부 골조에 사용되는 경량 철골과 외부 마감재로 사용되는 석고보드로 구성된 비구조벽체로서 시공이 편리하고 내화 및 차음 성능이 확보된 기성품으로 제작된다. 경량칸막이벽의 경량 철골 골조는 상·하부 슬라브와 접합되는 수평체인 러너(Runner)와 러너 사이에 수직적으로 설치되는 스테드(Stud)로 구성된다. 러너와 스테드의 일반적인 두께는 0.8 mm이고, ‘C’ 단면형상을 가지며 스테드와 석고보드는 용도에 따라 다양한 조합으로 시공된다 [2].

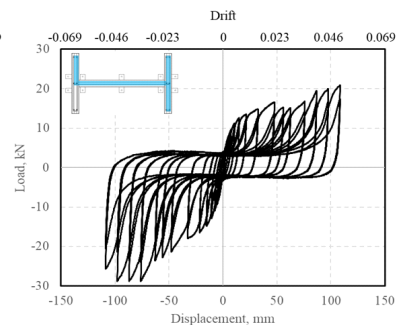
본 연구에서는 경량 칸막이벽체의 지진손상 원인을 규명하고 층간변위에 대한 벽체의 거동특성을 분석하기 위하여 실험적 연구를 수행하였다. 경량 칸막이벽에 대한 유사정적 실험을 수행하였으며 면내 방향 거동을 평가하기 위한 실험체 1 (Specimen 1)과 접합부 거동을 평가하기 위한 실험체 2 (Specimen 2)를 계획하였다. 실험체 1은 Fig 1.에서 보는 바와 같이 면내방향 변형을 하는 일자형 벽체이며, 실험체 2는 일자형 벽체 좌·우측 양단에 면외방향 변형을 하는 벽체가 연결되어 T자형 접합부를 구성하는 상세이다. 모든 실험체는 내화 시간 1시간을 만족할 수 있도록 스테드의 양면에 12.5 mm 두께의 내화석고보드가 2겹으로 부착되며, 스테드는 450 mm 간격으로 배치되는 상세를 가진다. 건설현장에서 보편적으로 활용되는 상세인 단일 스테드 시스템으로 시공하였으며, 여기서 사용된 스테드는 두께 0.8 mm, 폭 50 mm, 높이 45 mm의 규격을 가지고 러너는 두께 0.8 mm, 폭 52 mm, 높이 45 mm이다. 슬라브에 러너를 설치할 때에는 고정못이 사용되었으며 600 mm 간격으로 배치하였다. 석고보드를 스테드에 설치하기 위하여 나사못이 사용되었으며, 바탕 석고보드에 600 mm간격으로 그리고 마감 석고보드에 300 mm 간격으로 배치하였다. 이때 나사못은 석고보드의 가장자리에서 최소 10 mm가 떨어진 위치에 설치하였다. 실험체의 가력 프로토콜은 구조요소 및 비구조요소의 변위



(a) Installation of test specimens



(b) Specimen 1



(c) Specimen 2

Fig. 1. Experimental set-up and load-displacement relations of test specimens

* 정회원·서울시립대학교 건축학부, 박사후연구원 (E-mail: donghyeon_shin@uos.ac.kr)

** 정회원·서울시립대학교 건축학부, 교수 (E-mail: hyungjoonkim@uos.ac.kr)

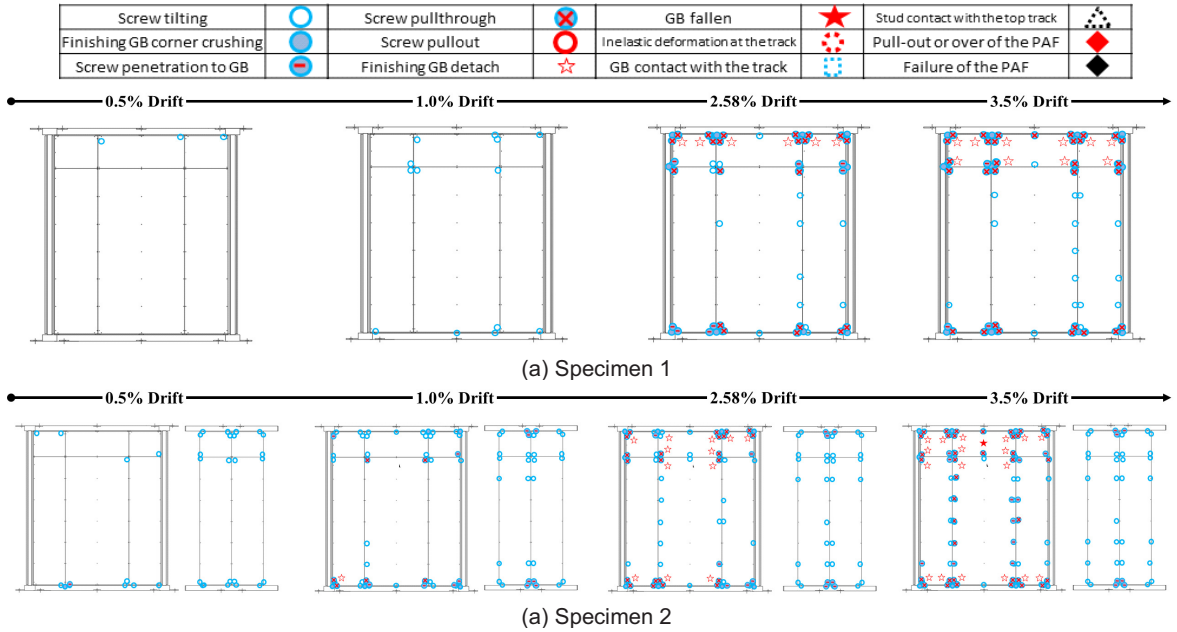


Fig. 2. Summary of seismic damages observed at test specimens

제어형 시험방법에 대해 기술하고 있는 FEMA 461[3]에 따라 수립하였다. 유사정적 실험을 수행하기 위하여 1000 kN 용량의 가력기를 가력부속골조와 반력벽에 설치한 후 가력하였으며, 경량 칸막이벽 자체의 순수한 횡방향 거동을 파악하기 위하여 가력부속골조의 보 및 기둥 부재는 힌지를 사용하여 횡력에 저항하지 않도록 계획하였다.

Fig. 1에서는 실험체의 하중-변위 관계를 나타내고 있으며, Fig. 2에서는 가력변위비에 따른 실험체의 손상 상태를 정리하고 있다. 가력 초기 두 실험체는 유사한 하중-변위 관계를 나타내었으나, 실험체 2에서 면내방향 거동을 하는 일자형 벽체와 면외방향 거동을 하는 벽체간의 상호작용이 발생하기 시작하는 2.5% 변위비부터는 그래프 곡선의 차이가 발생하였다. 스티드에 부착된 석고보드에 나사못 이외의 구속이 없는 실험체 1과 달리 실험체 2에서는 석고보드의 모서리가 면외방향 벽체에 맞게 되면 석고보드와 스티드 사이에 추가적인 전단력이 작용하여 나사못 접합부의 손상을 가속화시켰다. 두 실험체의 손상상태를 비교하면, 실험체 2는 실험체 1에 비하여 석고보드 코너부 파괴, 탈락 등의 손상 상태가 가력 프로토콜의 이른 시점에서 발생하였으며, 이들은 한 벽체와 다른 벽체가 맞는 부분에 집중되었다. 가력 변위비가 2.89%에 도달하면 실험체 2의 나사못 주변부의 누적된 손상으로 인하여 석고보드가 나사못을 지지하기 어려운 수준이 되며, 이 상태에서 가력 변위비가 3.5%까지 증가하게 되면 석고보드의 탈락이 관찰되었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축 연구개발사업의 연구비 지원(21AUDP-C146352-04)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. FEMA. NEHRRP Recommended Seismic Provisions: Design Examples, FEMA P751, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., U.S.A. 2012.
2. D.H. Shin and H.J. Kim. Shake table test program of cold-formed steel in-plane partition walls, Structures, 2021; 30: 503-517.
3. FEMA. Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components, FEMA 461, Federal Emergency Management Agency, Redwood City, California, 2007.

반복하중을 받는 강판패널의 거동

Behaviors of Steel Panels subjected to Cyclic Loadings

신동현* 김형준**1)
Shin, Dong-Hyeon Kim, Hyung-Joon

강판전단벽 (Steel plate shear wall)의 주기능은 충전단력과 횡하중에 저항하는 것으로 일반적으로 경계 기둥과 보 그리고 이들 사이에 삽입되는 강판패널로 구성된다. 강판전단벽은 일반적으로 강판패널에 스티프너를 보강한 보강 강판전단벽 (Stiffened steel plate shear wall)[1]과 스티프너를 보강하지 않은 무보강 강판전단벽 (Unstiffened steel plate shear wall)[2]으로 구분된다. 전자는 스티프너 보강을 통하여 좌굴강도를 증가시키도록 고안되었으나 과도한 보강은 용접 등의 현장작업 문제로 인하여 제작비 상승의 요인이 되며, 무보강 강판전단벽은 인장력장 거동 (Tension field action)에 의한 좌굴 후 강도 (Post-buckling strength)를 주요한 횡력 저항 매커니즘으로 활용한다[3]. 이와 같은 무보강 강판전단벽의 좌굴 후 거동은 강판패널과 기둥 및 보 부재와의 접합 상세에 따라 달라지며, 이는 현장에서의 시공성과 밀접한 관련이 있으므로 보다 면밀한 분석이 요구된다.

본 연구에서는 경계조건에 따른 강판패널의 거동을 분석하기 위하여 반복가력 실험을 수행하였다. 강판패널의 연성거동을 향상시키기 위한 목적으로 본 연구에서는 저항복강인 HSA80을 실험체 제작에 활용하였다. HSA80의 인장시편 실험결과 확인된 항복강도는 80MPa, 인장강도는 280MPa, 연신율은 66.5%이다. 강판패널 상·하부 2면을 보 부재에 고정된 경우와 상·하 및 좌·우 4면을 보 및 기둥 부재에 고정된 경우에 대하여 실험체를 구성하였다. 보 및 기둥부재 사이에 삽입되는 강판패널의 두께는 6mm이며, 실험동 가력기 (Actuator)의 용량을 고려하여 폭 1500 mm, 높이 1500 mm로 실험체의 규격을 결정하였다. 강판을 보-기둥에 연결하기 위하여 고정단이 형성되는 부분에 Γ 형강을 사용하였다. 강판과 Γ 형강은 용접결합하였고, Γ 형강의 예기치 않은 변형을 제어하고자 적절한 위치에 스티프너로 보강하였다. 실험체 설치가 용이하도록 Γ 형강과 보-기둥부재는 볼트접합하였다. 강판패널의 상부가 고정된 보 부재에 횡방향 변위를 가력하였으며, 실험체에 육안으로 식별가능한 손상이 발생하거나 강도가 최대강도의 85%이상 저감된 시점까지 가력을 지속하였다.

Fig. 1에서는 각 실험체의 하중-변위비 관계를 나타내고 있으며, Fig. 2에서는 강판패널 면내에 부착된 스트레인 게이지로 측정된 주응력의 분포를 가력변위비의 증가에 따라 정리하고 있다. 그림에는 강판패널의 좌

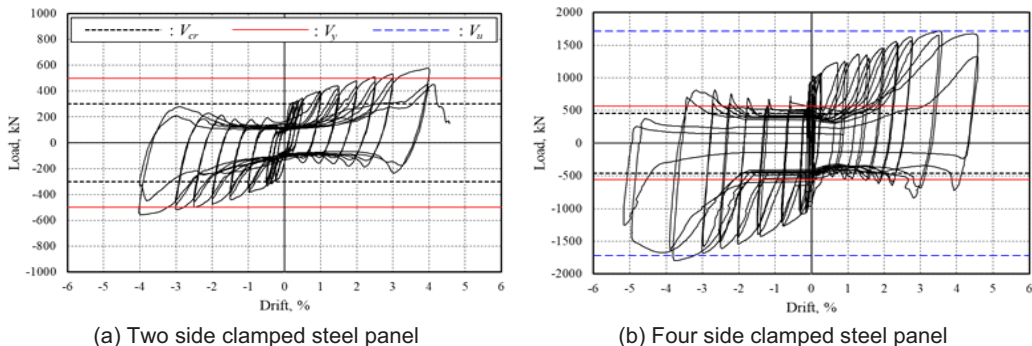
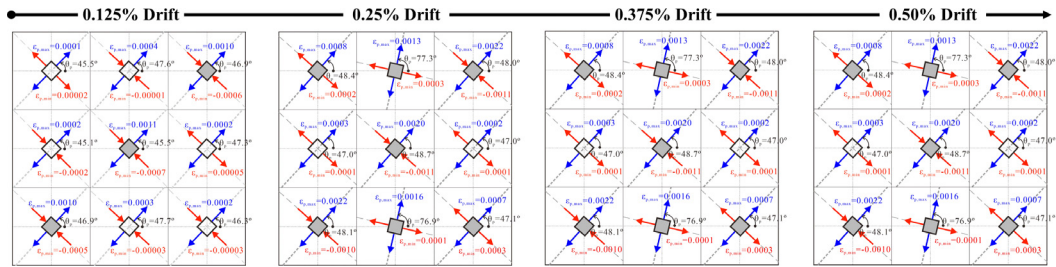


Fig. 1. Load-drift ratio relations of steel panels

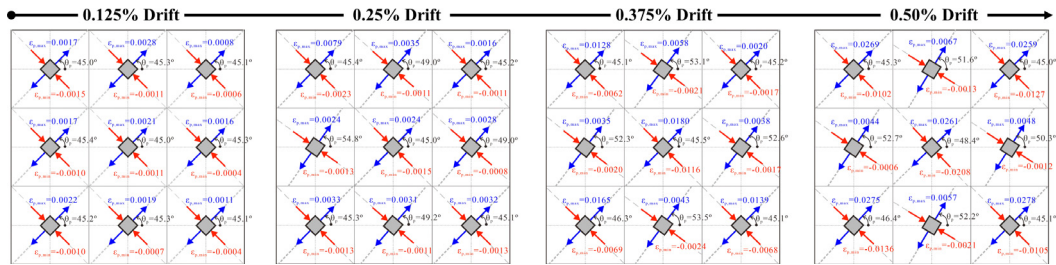
* 정회원·서울시립대학교 건축학부, 박사후연구원 (E-mail: donghyeon_shin@uos.ac.kr)

** 정회원·서울시립대학교 건축학부, 교수 (E-mail: hyungjoonkim@uos.ac.kr)

$\epsilon_{p,max}$: maximum principal strain	$\rightarrow$: direction of the maximum principal strain	θ_p : angle of the maximum principal strain
$\epsilon_{p,min}$: minimum principal strain	$\rightarrow$: direction of the minimum principal strain	$\square$: rosette measured $\epsilon_{p,max}$ exceeding the yield strain



(a) Two side clamped steel panel



(b) Four side clamped steel panel

Fig. 2. Principal stresses acting on the steel panels during different loading stages

굴강도, V_{cr} 와 설계기준에서 제시하는 설계식에 의한 항복하중, V_y 및 최대하중, V_u 를 함께 표기하였다 [4],[5]. 실험체에 대하여 경계조건이 2면 고정에서 4면 고정으로 변경되면, 항복하중 및 최대하중이 180% 이상 증가하였으며 이때 실험최대하중은 이론식으로 계산한 인장하중에 상응하는 값이 확보되었다. 반면 2면이 고정된 실험체는 실험최대하중이 이론식으로 계산한 항복하중 수준으로 나타났다. Fig. 2의 주응력장 분포에서 보는 바와 같이 2면이 고정된 강판패널에서 가력 초기에 대각방향 요소에서 항복이상의 변형률이 관찰되고 가력변위가 증가함에 따라 보 부재와 접합된 강판패널의 상·하부에서 항복이 관찰되는 것과 비교하여 4면이 고정된 강판패널에서는 가력초기부터 강판패널의 전체 면내에서 항복이 관찰되었으며, 주응력의 각도 또한 45도에 가깝게 확인되었다. 즉 강판패널의 경계조건에 따라 2면 고정 시에 강판패널의 대각방향으로 형성되는 인장스트럿(tension strut)이 4면 고정 시에는 복수로 형성되며, 이와 같은 차이는 강판패널의 좌굴 후 거동을 극대화하는데 기여하였다.

감사의 글

이 논문은 2021년도 서울시립대학교 교내학술연구비에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

1. T.M. Robert and S. Sabouri-Ghomi. Hysteretic characteristics of unstiffened perforated steel plate shear panels, Thin-Walled Structures, 1992; 14:139-151.
2. A. Asteneh-Asl. Seismic behavior and design of steel shear walls, Steel TIPS Report, Structural Steel Educational Council, CA, July, 2000.
3. V. Caccese, M. Elgaaly, R. Chen. Experimental study of thin steel plate shear walls under cyclic load, Journal of Structural Engineering, 1993; 119:573-587.
4. AISC. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, 2016.
5. CSA. Limit States Design of Steel Structures for Buildings, Canadian Standard Association, 2018.

에너지소산과 자가복원 기능이 복합된 내진보강장치 성능실험

Experiment of a seismic energy dissipation system with self centering capability

모하메드 마숨
Masoum, M. Gharagoz

진승호**
Jun, Seungho

모하메드 누르엘딘***
Nureldin, Mohamed

김진구***1)
Kim, Jinkoo

국내 건물의 노후화가 빠르게 진행되고 있으며, 최근 2층 이상 건물과 모든 주택이 내진설계 대상으로 지정됨에 따라 현재 비내진 건축물의 비율은 전체 건축물의 90% 이상으로, 지진에 대한 안전성을 확보하기 위해서는 노후 건물에 대한 내진 보강이 필요한 상태이다.

본 연구에서는 강재프레임에 마찰댐퍼와 스프링이 결합된 새로운 내진보강장치를 개발한다. 강성보강, 에너지소산, 자가복귀 성능이 복합된 고효율 내진보강시스템으로, 기존 구조물에 설치되는 케미컬 앵커의 개수를 줄여 기존 구조물의 손상을 최소화하고 인건비/재료비 절감 및 공기단축이 가능하다.

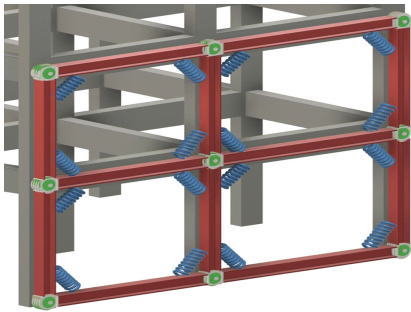


Fig. 1 내진보강장치 설치형상

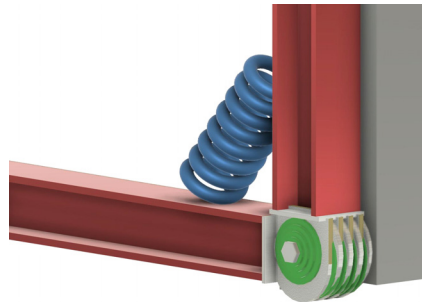


Fig. 2 보강장치 상세

제안된 보강장치는 강재 골조의 모서리에 지진에너지 소산을 위한 회전형 마찰댐퍼와 복원력을 위한 스프링이 설치된 형태로, 내진성능이 부족한 기존 건물의 프레임 내부에 설치하거나 외부에 접합하여 설치한다 (그림 1, 그림 2). 마찰댐퍼는 매우 큰 초기 강성을 가지고 있으나 항복 후 원 상태로 복귀가 불가능하며, 스프링은 복원력을 부가할 수 있으나 에너지 소산 성능이 없다. 마찰댐퍼와 복원스프링이 병렬로 연결된 경우 반복 하중이 작용할 때 에너지소산과 자가복원 (self-centering) 특성을 나타내는 깃발형상 (flag type) 이력거동을 나타낸다 (그림 3). 일반적인 감쇠장치와 비교하여 동일한 크기의 지진 에너지를 소산하면서 잔류변위를 줄일 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 제안된 보강장치의 내진보강 성능을 검증하기 위하여 모서리에 회전형 마찰댐퍼 및 스프링이 설치된 부분구조에 대한 변위제어 정적 반복가력실험을 수행하였다 (그림 4). 실험 결과는 그림 5에 나타나 있으며, 에너지소산과 복원력이 결합된 보강장치에 보편적으로 나타나는 깃발형태의 이력거동을 보이는 것을 알 수 있다. 실험결과를 해석적으로 모사하기 위하여 SAP 2000을 사용하여 부분구조의 비선형 모델을 개발하였으며, 실험 결과를 매우 정확하게 표현할 수 있는 것으로 나타났다.

* 성균관대학교 건설환경공학부, 박사과정 (E-mail: mmqaragoz@gmail.com)

** 성균관대학교 건설환경공학부, 박사과정 (Email: seungho7650@gmail.com)

*** 성균관대학교 건설환경공학부, 조교수 (E-mail: m.nour20@gmail.com)

***정회원, 성균관대학교 건설환경공학부, 교수, 교신저자 (E-mail: jkim12@skku.edu)

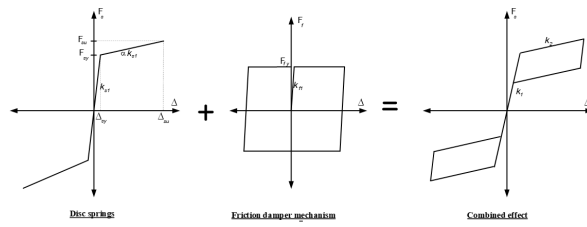


Fig. 3 제안된 장치의 이력거동

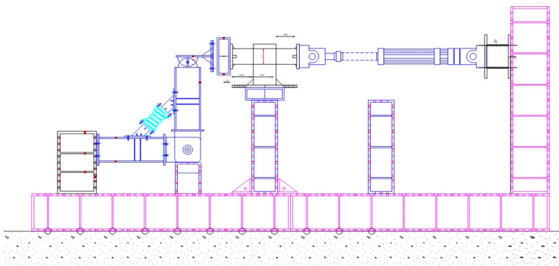


Fig. 4 Test setup for the seismic retrofit system subassembly

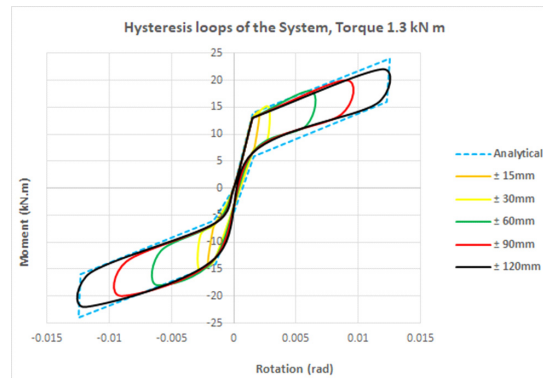


Fig. 5 Hysteresis curves of the test specimen

감사의 글

This research was carried out by research funding (task number 21CTAP-C164102-01) of the Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Land Transport Technology Promotion Research Project.

지진하중을 받는 유리구조의 내진설계

Seismic Design for Glass Structures under Earthquake

김남희*1)

Kim, Namhee

홍성걸**

Hong, Sung-Gul

최근 들어서 유리의 이용은 기존 비구조 요소로 간주되던 상황을 크게 벗어나서 구조 요소뿐만 아니라 구조 시스템으로 확대되고 있다. 2019년 뉴욕 5번가에 위치한 ‘Apple Cube’는 단적인 사례를 보여주고 있다. 이에 유리구조 설계를 위해서 재료 및 구조적 거동에 대한 연구가 점차 증가하고, 또한 유리구조에 대한 설계기준이 마련되고 있는 상황이다. 이 연구에서는 지진하중을 받는 유리구조의 거동과 국내외 내진설계기준을 살펴보고자 한다. 이는 국내 실정에 적합한 유리구조 설계기준을 마련하는데 도움이 되리라 기대한다.



a. 1994 Northridge earthquake



b. 2011 Christchurch earthquake (spider glazing system)

Fig. 1. Examples of earthquake damage to glass facade systems

커튼월이나 상점 앞면에 사용되던 유리구조판은 주로 유리판의 주변 골조가 응력 지지역할을 감당하여 유리판 자체는 비구조로 접근할 수 있지만, 최근 들어 골조 없이 거미발의 볼트 접합부의 지지를 이용하여 유리가 직접적으로 하중을 받는 경우가 점차 증가하고 있다. 기존 지진피해를 입은 유리구조 사례들을 살펴보면 주변 골조의 지지를 받는 유리판의 경우 (Fig. 1a), 층간변위가 유리창의 면내거동에 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한, 비교적 유연한 구조시스템의 경우에 피해가 컸고 피해정도는 접착제

sealant의 탄력성과 상관관계가 컸다. 더 나아가 유리창 면적이 크거나 불규칙한 배열인 경우 피해를 더욱 악화시켰다. 유리구조에 발생하는 지진하중은 구조시스템의 내진거동과 층가속도 및 유리창의 위치와 높이에 영향을 받으며, 구조적 변형은 지지구조시스템이 수용할 수 있는 층간변위에 의해서 제한을 받는다. 이에, 유리구조의 내진설계를 위해서는 층간변위의 규정이 매우 중요하다. Table 1은 국내의 건축물 설계기준에서 제시하고 있는 층간변위들을 정리한 것으로 국가별로 상이하다. 실제 다층 구조물인 경우 층간변위의 발생이 일정하지 않으며, 고차모드의 영향을 받아서 최대 층간변위가 중간층에서 발생할 수 있다. 뉴질랜드의 경우 건물의 높이에 따라서 층간변위를 구분해서 사용한다. 그런데 ASCE와 KDS 기준에서는 건축물의 내진등급에 따

Table 1. Interstory drift ratio in different code provisions

Code	Max. drift ratio
KDS 41 1700	0.010 Rank special
	0.015 Rank I
	0.020 Rank II
ASCE/SEI 7-10 Nonstructural elements	0.025 Occupancy category I, II
	0.020 Occupancy category III
	0.015 Occupancy category IV
EC8 (Damage limitation state)	0.0050 Brittle nonstructural elements
	0.0075 Ductile nonstructural elements
New Zealand	0.02 h<15m
	0.015 h>30m
Canada	0.02
Japan	0.005-0.0083

* 정회원·서울대학교 건축학과, 객원교수 (E-mail: namheek@snu.ac.kr)

** 정회원·서울대학교 건축학과, 교수 (E-mail: sglhong@snu.ac.kr)

라서 제시하고 있는 점은 구조적 거동이라기보다는 구조물의 피해 심각성을 우선적으로 고려한 것이다. 또한, EC8에서는 비구조요소의 유연성에 따라서 달리 구분하고 있다.

국내 유리구조에 대한 내진설계규정은 커튼월, 상점 앞면, 칸막이벽에 끼워진 유리판의 탈락을 막기 위해서 식(1)의 상대변위 요구조건을 만족하도록 하고 있다.

$$\Delta_{fallout} \geq 1.25 D_{pI} \quad (1)$$

$$D_{pI} = D_p I_E \quad (2)$$

여기서, $\Delta_{fallout}$ 는 유리구조의 변위능력으로 이는 비구조요소가 수용해야 할 요구변위 D_{pI} 나 13mm보다는 커야 한다. D_{pI} 는 지진에 의한 상대변위 D_p 와 중요도계수 I_E 를 고려해서 결정한다. 유리판이 주변 골조에 의해서 지지를 받는 경우 횡하중을 받는 유리구조의 면내 거동에 의한 횡변위 능력 δ_r 은 Fig. 2에서와 같이 강체의 수평이동과 회전으로 구분하여 식(3)과 같이 표현할 수 있다. 유리구조의 하중-변위의 관계식은 Fig. 2의 (d)에서와 같이 수평변위 이후 회전하면서 대각선의 하중경로로 저항하고 있음을 알 수 있다. 식(3)에 의하면 유리판과 지지골조와의 간격과 유리판의 형상비가 횡변위 저항능력에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

$$\delta_r = 2c \left(1 + \frac{h}{b} \right) \quad (3)$$

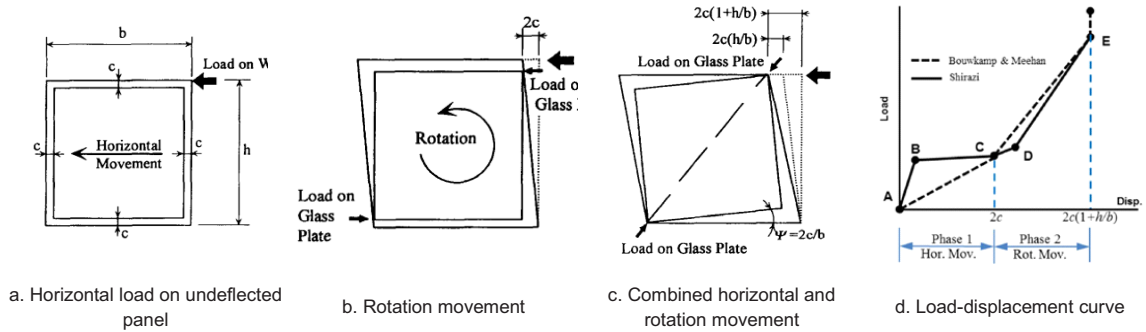


Fig. 2. Movement of glass plate within window frame [1]

지진하중을 받는 유리구조의 면외거동은 풍하중에 의한 휨응력을 견디는 정도라면 충분히 감당할 수 있을 것으로 간주한다고 볼 수 있다. 그러나 실제로 상점의 전면유리창의 피해 사례에서는 면외거동이 나타나고 있어서 충분한 연구가 필요한 것 같다. 한편, 골조 없이 거미발의 볼트 집합부의 지지를 받는 형식의 경우(Fig. 1b)에는 볼트 집합부에 응력 집중현상도 중요함을 알 수 있다. Fig.3은 거미발의 지지를 받는 유리구조의 횡변위 거동으로, 상대적 결속력에 따라서 내진성능을 향상시킬 수 있는 다양한 방안들이 제시되고 있다.

참고 문헌

- Haluk Sucuoglu and C.V. Girija Vallabhan. Behavior of window glass panels during earthquakes, Engineering Structures Vol. 19 No. 8
- Sivanerupans S, Wilson J.L, Gad E.F and Lam NTK, In-plane drift capacity of point fixed glass facade systems, Australian Earthquake Engr. Society 2010 Conference

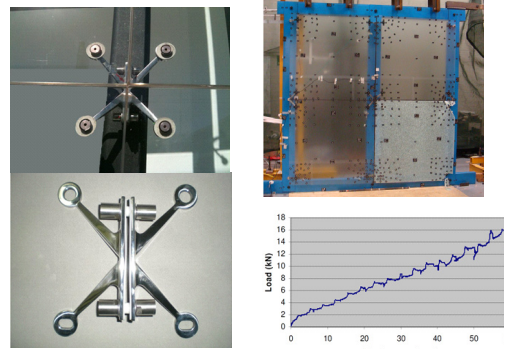
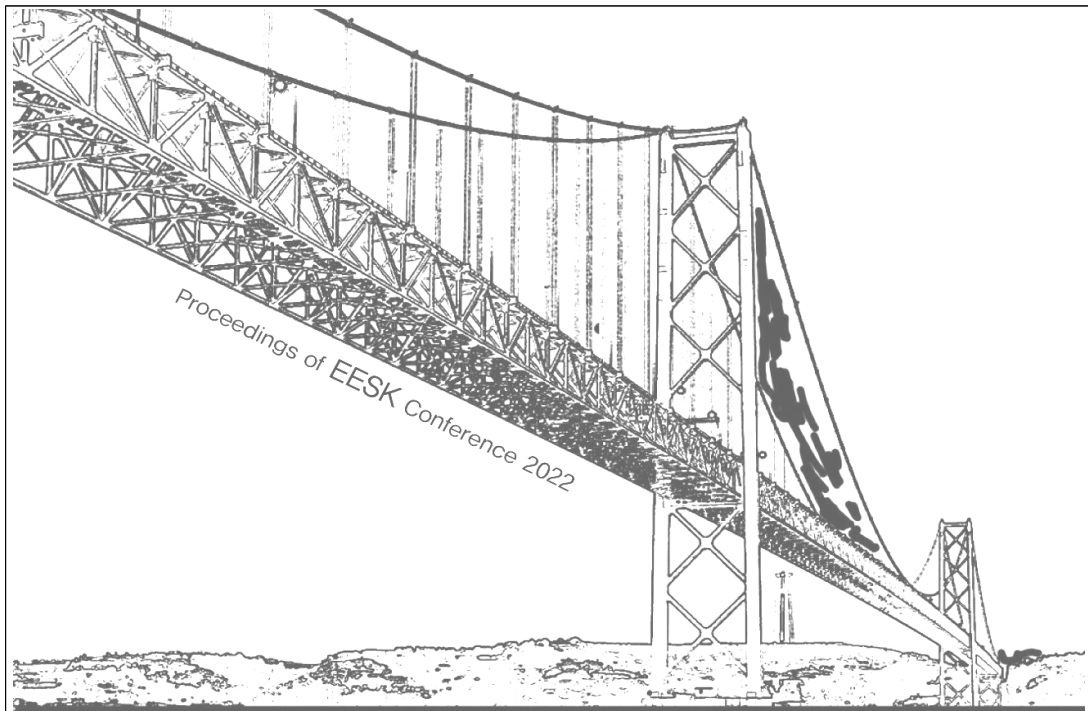


Fig. 3. Drift capacity of spider glass systems [2]



토목구조물의 내진설계

손상지수를 이용한 열화된 철근콘크리트 교량의 내진성능평가

Seismic Performance Assessment of Deteriorated RC Bridges Using a Damage Index

김태훈*1)

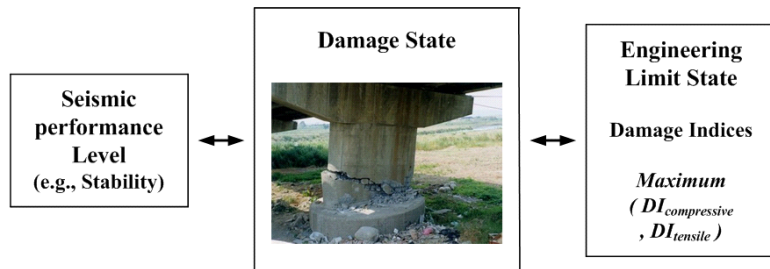
Kim, Tae-Hoon

김기현**

Kim, Ki-Hyun

이 연구에서는 기존의 지진손상 평가법[1],[2]을 확장하여 Fig. 1과 같이 성능수준과 함께 비교하여 나타냄으로써 열화된 철근콘크리트 교량의 내진성능 평가가 가능하도록 하였다. 완전기능 수준은 손상이 거의 발생하지 않아 보수가 요구되지 않으며 기능수행 수준은 경미한 손상이 발생하여 보수가 필요한 상태이다. 그리고 붕괴방지 수준은 심각한 손상이 발생하여 부분 또는 전체적인 보수 및 보강이 필요한 상태를 의미한다.

Seismic performance level	Service	Repair	Damage	
			State	Index
Fully operational	Fully service	Limited epoxy injection	Hairline cracks	≤ 0.1
Delayed operational	Limited service	Epoxy injection, Concrete patching	Open cracks, Concrete spalling	≤ 0.4
Stability	Not useable	Replacement of damaged section	Bar buckling/Fracture, Core crushing	≤ 0.75



Material	Type of failure	Failure criterion (ε_{cu} or ε_{tu})	Damage index ($DI_{compressive}$ or $DI_{tensile}$)
Concrete	Compressive and shear	$0.004 + \frac{1.4 \rho_s f_{yh} \varepsilon_{sm}}{f_{cc}}$	$1 - \Phi_{\varepsilon} \left(\frac{2\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{cs}}{2\varepsilon_{cu}} \right)^2$
Steel	Tensile	0.10	$1.20 \left(\frac{\varepsilon_{ts}}{2\Phi_r \varepsilon_{tu}} \right)^{0.67}$

Fig. 1. Seismic performance assessment using a damage index

* 정회원.한국철도기술연구원 첨단케도토목본부, 선임연구원 (E-mail: thkim@krii.re.kr)

** 한국철도기술연구원 첨단케도토목본부, 선임연구원 (E-mail: kimkh738@krii.re.kr)

해석대상 교량인 2경간 연속 철근콘크리트 T형 라멘교는 Fig. 2와 같고, CASE-1은 교각의 종방향 철근비를 1.61%로 하고 횡방향 심부구속철근비를 0.60%로 한 교량이며, CASE-2는 교각의 종방향 철근비는 그대로 두되 횡방향 심부구속철근비를 0.40%로 한 교량이며, CASE-3은 교각의 횡방향 심부구속철근비는 그대로 두되 종방향 철근비를 0.81%로 한 교량이다.

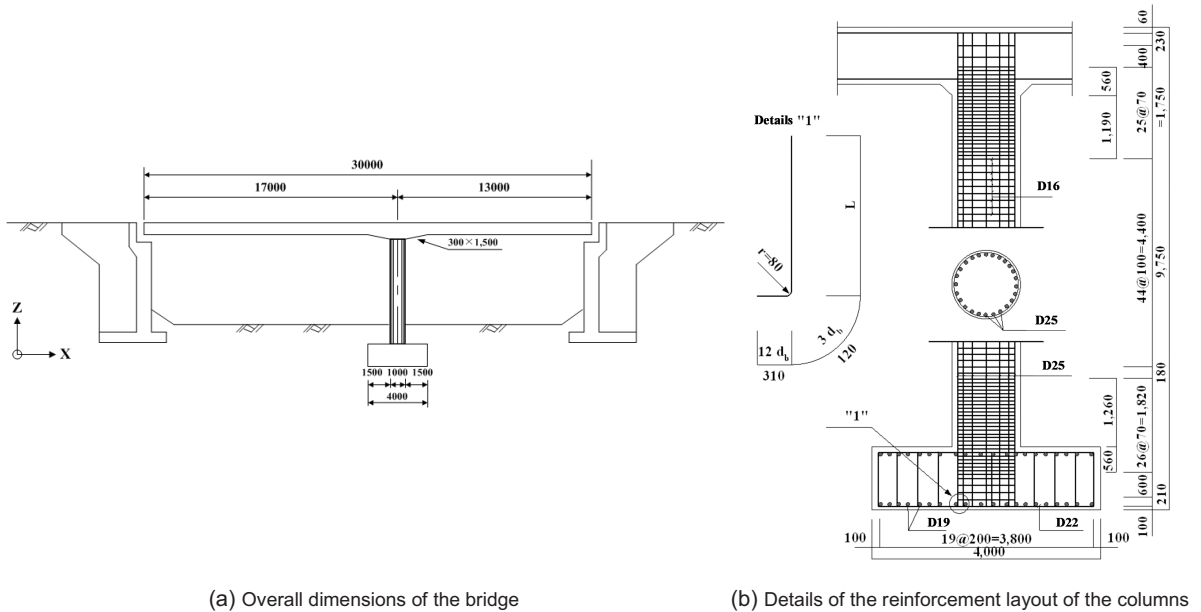


Fig. 2. Two-span simply-supported reinforced concrete bridge (Unit: mm)

열화된 철근콘크리트 교량을 해석적으로 모사하기 위하여 CASE-1, CASE-2, 그리고 CASE-3의 경우에 대해서 각각 36%의 철근 단면적이 부식된 것으로 고려하여 비선형 지진해석을 수행하였다.

일련의 해석결과로부터 이 연구에서 제안하고 있는 방법은 열화된 철근콘크리트 교량의 지진응답을 적절히 평가하고 있으며, 개발된 열화를 고려한 수정된 손상지수를 이용함으로써 해석적 방법에 의한 내진성능평가가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업(PSC 거더 크리프 과대소음 제어 핵심기술개발, PK2203A2)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Kim TH, Kim YJ, Kang HT, Shin HM. Performance assessment of reinforced concrete bridge columns using a damage index. Canadian Journal of Civil Engineering, 2007;34(7):843-855.
2. Kim TH. Analytical seismic performance assessment of hollow reinforced-concrete bridge columns. Magazine of Concrete Research, 2019; 71(14):719-733.

다지점 지진입력과 지반-구조물 상호작용을 고려한 교량의 지진응답해석

Seismic Response Analysis of Bridge Considering Multi-Support Seismic Input and Soil-Structure Interaction

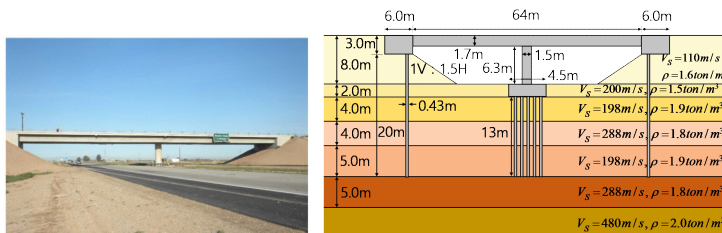
임재성*1)
Lim, Jae-Sung김재민**
Kim, Jae-Min

일반적으로 교량의 지진응답해석을 수행하는 경우, 모든 지지점의 입력지진운동이 동일하다고 가정하여 동적해석을 수행하게 된다. 지지점 사이의 거리가 200m 이상 떨어진 장대교량의 경우에는 각 지지점의 지반운동을 다르게 입력하여 동적해석을 수행해야 할 필요가 있으며, 200m 미만의 지간을 가진 교량의 경우에도 지지점 사이의 부등입력이 교각의 연성량과 같은 비선형 지진응답에 큰 영향을 미칠 수 있다는 연구 결과가 발표되었다[1]. 특히, 교량구조물의 지진응답해석을 수행하는 경우 공간적 비상관성에 의해 구조물의 응답이 증폭 및 감소된다는 결과가 제시되었다[2].

이 연구에서는 공간적 비상관성을 고려하기 위하여 교량의 각 지점마다 부등지진운동을 입력하여 구조물에 미치는 영향을 검토하였다. 이를 위해 Fig. 1(a)와 같은 교량을 이용하여 예제를 작성하였고 지반조건은 Fig. 1(b)와 같이 적용하였다. 이때, 구조물의 동적거동을 정밀하게 고려하기 위하여 지반-구조물 상호작용(Soil-Structure Interaction, SSI)을 적용한 지진응답해석을 수행하였다. 또한, Fig. 2와 같이 각 지지점에 부등지진운동을 입력하기 위하여 Fig. 3과 같은 지점별 3방향의 인공지진파를 작성하였다.

교량의 동적 지진응답해석을 수행하기 위해서 부구조법인 경계반력법(Boundary Reaction Method, BRM)을 이용하여 상부구조물과 연결되는 교대 및 교각하부에서의 유효지진하중을 계산하였다. 또한, 수치해석 지반모델의 바깥쪽 경계에 에너지흡수경계조건으로 PML(Perfectly Matched Layer)을 적용하였다. BRM과 PML을 조합한 해석모델은 Fig. 4(a)와 같다. BRM-PML 해석모델의 검증에 위한 참조해로는 KIESSI-3D 프로그램을 이용하였고 Fig. 4(b)와 같이 해석모델을 작성하였으며 입력지진운동은 균등한 지진입력운동(X_{g2} , Y_{g2} , Z_{g2})을 적용하여 상부구조물에서의 응답을 비교하였다.

해석결과, Fig. 5와 같이 해석방법 및 부등지진 입력에 따라 각 구조물에서 응답의 차이가 크게 발생하였다. 이러한 이유는 전체모델의 경우, 지지점이 가깝기 때문에 교대와 중앙교각에서 발생하는 응답이 서로 영향을 미치는 기초-지반 상호작용(Foundation-Soil Interaction, FSI) 효과가 발생하기 때문이다. 이를 위해 참조해를 부구조모델과 전체모델로 구분하여 해석을 수행한 결과, Fig. 6과 같이 FSI 효과에 의한 차이가 발생하는 것을 확인하였다. 이를 통해, 단경간 교량의 동적 SSI 해석을 수행하는 경우, 공간적 비상관성과 SSI 및 FSI도 함께 고려되어야 할 것으로 판단된다.



(a) Real bridge picture

(b) Soil condition

Fig. 1. Meloland Road Overpass (MRO)

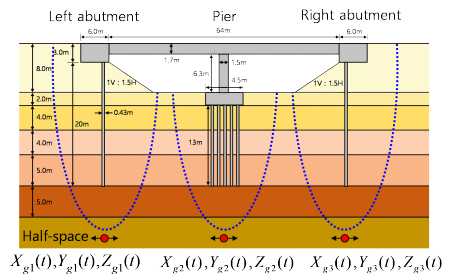
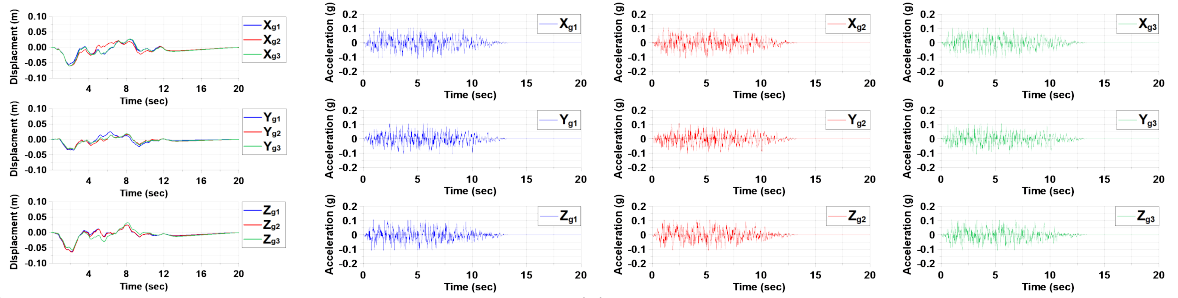


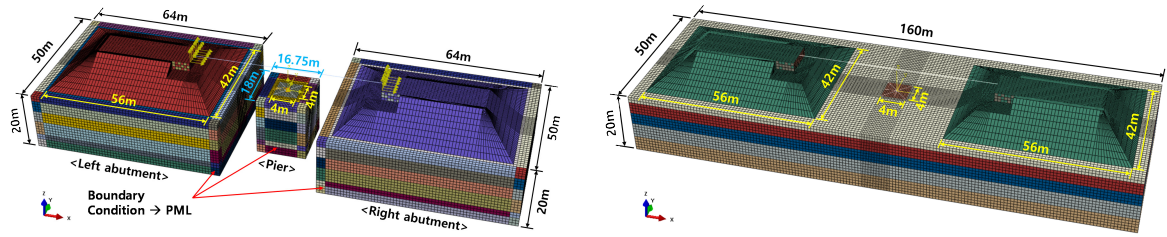
Fig. 2. Seismic input control points of example

* 정회원-전남대학교 일반대학원 건축토목공학과, 박사과정, 공학석사 (E-mail: gkskwotjd@naver.com)

** 정회원-전남대학교 토목공학과, 교수, 공학박사 (E-mail: jm4kim@jnu.ac.kr)



(a) Displacement time history (b) Acceleration time history
Fig. 3. Seismic motions entered into the control points



(a) BRM-PML analysis model(substructure model) (b) KIESSI-3D analysis model(full model)
Fig. 4. Analysis model including superstructure of bridge example

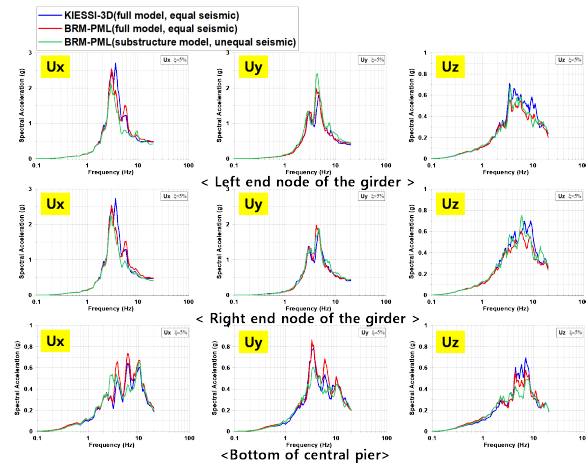


Fig. 5. Comparison of response spectrum(unequal vs. equal seismic input, damping ratio=5%)

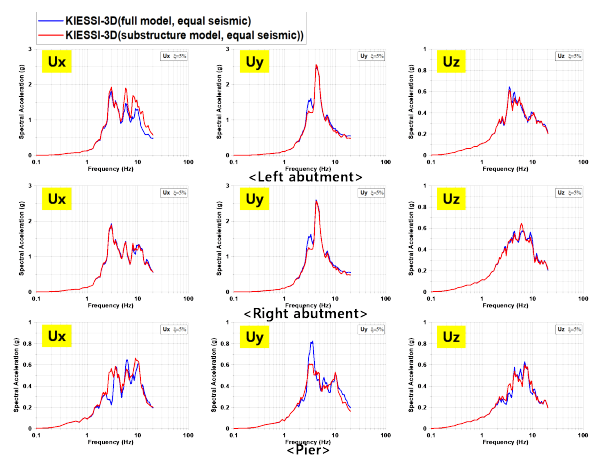


Fig. 6. Comparison of response spectrum(full model vs. substructure model, damping ratio=5%)

감사의 글

이 연구는 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원에 의해 수행되었습니다(No. NRF-2020R111A3069396). 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Saxena V., Deodatis G. and Shinozuka M. Effect of Spatial Variation of Earthquake Ground Motion on the Nonlinear Dynamic Response of Highway Bridges. Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand. 2000.
2. Mwafy A. M., Kwon O. S., Elnashai A. and Hashash Y. M. A. Wave Passage and Ground Motion Incoherency Effects on Seismic Response of an Extended Bridge. Journal of Bridge Engineering. 2011;16(3):364-374.

실험자료를 기반한 국내 철근콘크리트 휨거동 교각의 손상수준 별 횡변위비 산정

Estimation of drift ratio by damage level of domestic reinforced concrete bending behavior piers based on experimental data

남현웅*1) 홍기증**
Nam, Hyeonung Hong, Kee-Jeung

2016년 9월 경주 지진과 2017년 11월 포항 지진의 발생 이후, 국내 기존 구조물의 내진성능수준평가와 지진재해로 인한 손상평가의 필요성이 더욱 높아지고 있다. 강진이 자주 발생하는 해외 주요 국가에서는 미국의 Hazard U.S(HAZUS), 일본의 Disaster Information System(DIS), 대만의 Taiwan Earthquake Loss Estimation System(TELES) 등 독자적인 지진재난 평가시스템을 구축하고 있으나, 중약진지역에 해당되는 국내는 아직 이러한 지진재난평가시스템에 대한 연구가 부족한 편이다. 국내의 경우, 건축물에 대해서는 2012년도에 수행된 국립방재연구원의 지진피해 위험도 평가기술이 개발되었으나, 교량구조물의 지진재난위험도평가에 대한 연구는 부족한 실정이다. 지진재난위험도를 평가하기 위해서는 해당 지역의 지진재해도와 다양한 구조물의 지진취약도합수를 정의해야 한다.

본 연구는 다양한 구조물 중에서 교량의 지진취약도합수를 국내실정에 맞도록 개발하기 위한 선행연구이며, 교량 구조물의 주요 구성요소인 교각, 교량받침 및 기초 중에서, 휨거동 교각의 지진취약도를 결정하기 위한 횡변위비 기준을 제시하고자 한다. 휨거동 교각은 형상비가 대략 4이상인 교각이며, 여기서 형상비는 기둥단면의 지름(d)에 대한 교각의 기초 상부면부터 가력 중심점까지의 높이(h)의 비(h/d)이다. 교각에 발생하는 축력은 교각의 축강도 대비 대략 10% 정도이며 최대 30%를 초과하지 않지만, 지진에 의한 상부구조의 질량과 횡방향 지진가속도가 발생시키는 관성력은 교각에 상당한 휨모멘트를 발생시킨다. 휨모멘트에 의해 파괴가 발생하는 교각의 인명피해를 최소화하기 위해서, 충분한 횡변위능력을 확보하여 붕괴 발생 이전에 파괴징후를 감지할 수 있어야한다. 이를 위해 휨교각 설계 시 소성힌지구역에서의 충분한 곡률연성도(최대곡률/항복곡률)를 일정 수준 이상이 되도록 횡구속철근을 배근하여 심부구속력을 향상시켜야 한다. 따라서 이러한 휨교각은 지진력 작용 횡방향으로의 변형능력이 중요하므로, 교각의 전체적 거동지표인 횡변위비로써 휨교각의 손상수준을 정의하고자 한다. 본 연구에서는 미국의 FEMA(Federal Emergency Management Agency)에서 개발한 지리정보시스템 기반 자연재해 분석프로그램(HAZUS, 2020)을 참고하여, 휨거동 교각에 대한 횡변위성능한계를 손상수준에 따른 횡변위비로 제시하고 이를 국내 실험자료를 통하여 검증한다.

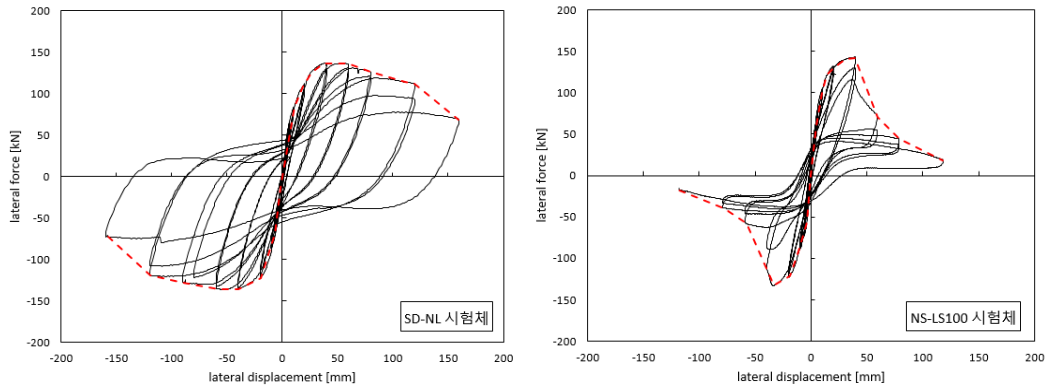
HAZUS는 손상수준을 Slight, Moderate, Extensive, Complete의 4단계로 나누어, 구조물의 종류에 따라 제시하고 있다. HAZUS는 건물에 대해 손상수준에 따른 취약도합수와 횡변위비를 제시하며, 그 외 구조물에 대해서는 취약도합수만을 제시하고 있다. HAZUS는 건물의 부재 종류에 따라 나누어 손상수준을 정의하고 있으며, 콘크리트 교각은 축력, 전단력 및 휨모멘트를 동시에 받는 Concrete Moment Frame의 부재로 취급할 수 있으므로, Concrete Moment Frame에 해당하는 횡변위비를 참고하였다. 본 연구에서는 HAZUS에서 제시한 각 손상수준에 따른 횡변위비를 휨기둥의 횡가력 실험결과와 비교하여, 손상수준 별 교각의 연성능력을 대표할 수 있는 횡변위비로 제시하고자 한다.

국내의 내진설계기준은 꾸준히 발전 및 개선되었으며, 이러한 내진설계상세의 변화를 반영하기 위해서 내진설계의 유무와 철근의 겹침이음정도(겹침이음 없음, 50%의 겹침이음, 100% 겹침이음)에 따라 실험군을 분류하

* 정회원. 국민대학교 건설시스템, 박사과정 (E-mail: gusdnd322@naver.com)

** 정회원. 국민대학교 건설시스템, 정교수 (E-mail: kjhong@kookmin.ac.kr)

었다. 횡변위에 따른 교각의 손상수준을 평가하기 위해서, 항복점에서의 횡변위비를 Slight, 극한점에서의 횡변위비를 Complete 손상수준에 해당할 것으로 가정하고 실험을 진행하였다. Fig.1은 본 연구에서 수행한 실험체 중 내진실험체와 비내진&100%접침이음 실험체의 이력곡선결과이다.



(a) Seismic design & Non spliced specimen

(b) Non seismic design & 100%-Spliced specimen

Fig. 1. Lateral force-Displacement relationship of specimens

국내 교각의 손상상태에 따른 횡변위비를 HAZUS의 횡변위비를 참고하여 제시하고, 이를 본 연구에서 수행한 횡가력 실험과 기존에 수행된 국내실험자료를 종합하여 실험적으로 검증한다. Table 1은 종합한 실험결과이다. 내진설계 실험체의 손상수준별 횡변위비는 HAZUS의 횡변위비와 유사하고, 비내진설계 실험체들은 접침이음의 정도가 증가함에 따라 횡변형능력이 부족하며 급격히 횡변위비가 감소하는 것을 확인하였다.

Table 1. Result of the limitation of lateral displacement ratio by damage level for bending piers in Korea.

Damage level	HAZUS (Low-rise)		Seismic design	Non seismic design		
	Low-code	Moderate-code	Lap-spliced	Non Lap-spliced	50% Lap-spliced	100% Lap-spliced
Slight	0.0050	0.0050	0.0049	0.0062	0.0049	0.0050
Moderate	0.0080	0.0087	-	-	-	-
Extensive	0.0200	0.0233	-	-	-	-
Complete	0.0500	0.0600	0.053	0.0356	0.0203	0.0131

감사의 글

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. FEMA, "Multi Hazard Loss Estimation Methodology, Earthquake Model," HAZUS-MH MR2 Technical Manual, Federal Emergency Management Agency 2020.
2. Park JY, Chung YS, Park CG, Kim YS, Lee DH. Evaluation of Seismic Performance for RC Bridge Piers According to Longitudinal Steel Connection Method. Journal of the Korea Concrete Institute. 2002 November;Vol.14 No.2; p.323-329

수평과 수직 지반운동이 동시에 작용하는 교각에 대한 실시간 하이브리드 실험

Real-Time Hybrid Simulation for a Bridge Pier Subjected to Horizontal and Vertical Ground Motions

채윤병*1) 박민석** 김철영***
 Chae, Yunbyeong Park, Minseok Kim, Chul-Young

지난 20여년간의 다양한 연구를 통해서 실시간 하이브리드 실험(real-time hybrid simulation, RTHS)의 중요성은 잘 알려져 있다. 하지만 이에 반해 대형구조물에 실시간 하이브리드 실험이 적용된 사례는 매우 적다. 기존에 실시되었던 대부분의 실시간 하이브리드 실험과 관련된 연구는 축소모델에 대한 것이고, 그마저도 변위제어나 수치적분과 같이 실시간 하이브리드 실험을 적용하기 위한 이론 개발이 다수였다. 실제 대형 구조물에 실시간 하이브리드 실험의 적용이 적은 이유 중 하나는 축방향 강성이 큰 부재에 대한 변위제어의 어려움에 있다. 실시간 하이브리드 실험에서는 유압가력기가 목표변위를 시험체에 재하하고, 이때 실험체로부터 얻어진 복원력을 전체 구조물의 운동방정식에 대입해 이를 수치적분을 통해 풀어 다음 단계에서의 구조물 응답을 얻는 방식이다. 지금까지 다양한 실시간 변위제어 알고리즘이 개발되었지만, 실험체에 재하되는 변위의 오차를 완벽히 제거하는 것은 여전히 불가능한 일이다. 특히, 축방향 강성이 큰 부재에 대해서는 변위의 오차가 작을지라도 비교적 큰 하중오차가 발생할 수 있는데, 이는 실시간 하이브리드 실험이 진행되는 동안 축방향 하중 경계조건을 만족시키기 어렵게 만드는 요인이 된다. 기둥, 보, 벽체 등과 같이 대부분의 구조물은 축방향 강성이 매우 크고, 이들 부재의 횡방향 거동은 축방향 하중에 지대한 영향을 받게 된다. 따라서 구조물의 정확한 지진응답을 얻기 위해서는 지진시 축방향 하중을 정확하게 모사해 주어야 하는데, 이를 만족시키기 쉽지가 않아 실시간 하이브리드 실험을 이용한 실용적인 내진성능평가가 많이 이루어지질 못했다.

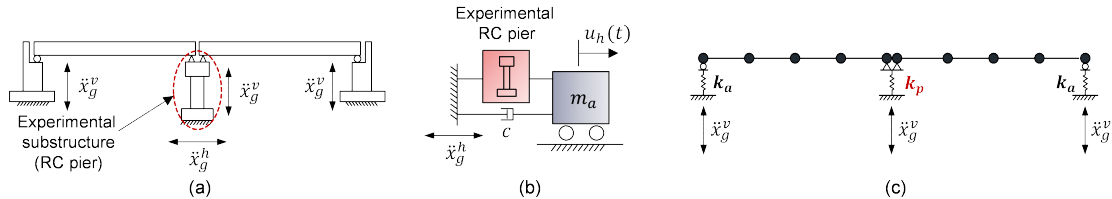


Fig. 1. (a) two-span bridge structure for RTHS; (b) horizontal RTHS model; (c) analytical modeling of the bridge to simulate the vertical vibration of the bridge.

축하중 제어의 문제를 효과적으로 해결하기 위해 Chae 등은 컴플라이언스 스프링과 adaptive time series (ATS) 보정기를 이용한 실시간 하중제어 알고리즘을 개발하였고[1], 이를 실험대형 크기의 실험체에 적용할 수 있도록 Flexible Loading Beam (FLB)을 개발하였다[3]. 본 연구에서는 이러한 실시간 하중제어 알고리즘과 FLB를 이용하여 수평 및 수직 지반운동이 가해진 2경간 교량의 RC 교각에 대한 실시간 하이브리드 실험을 실시하였다. Fig. 1은 본 실험에 사용된 2경간 교량과, 이에 대한 수평 및 수직방향 거동을 분석하기 위한 RTHS 모델을 보여준다. 전체 교량의 비선형 거동이 교각에 집중되기 때문에 교각의 거동은 실험을 통해 구현하고, 나머지 상부구조물은 해석적으로 모델링하여 두 구조물간의 상호작용을 고려해 지진응답을 얻는 방식이 된다. 수직방향 지반운동이 수평방향 거동에 미치는 영향은 교량 상부구조의 수직방향 진동에 따른 축력변

* 정회원서울대학교 건설환경공학부, 부교수 (E-mail: ybchae@snu.ac.kr)

** 하이브리드구조실험센터, 선임연구원 (E-mail: itfeels@nate.com)

*** 명지대학교 토목환경공학과, 교수 (E-mail: cykim@mju.ac.kr)

화를 실시간으로 교각에 직접 재하하여 구현하였다. Fig. 2는 본 연구의 RC 교각 형상 및 실시간 하이브리드 실험을 위한 테스트 셋업을 보여주고 있고, 이 중 RC 교각 상단에 설치되어 있는 수평보가 바로 FLB가 된다.

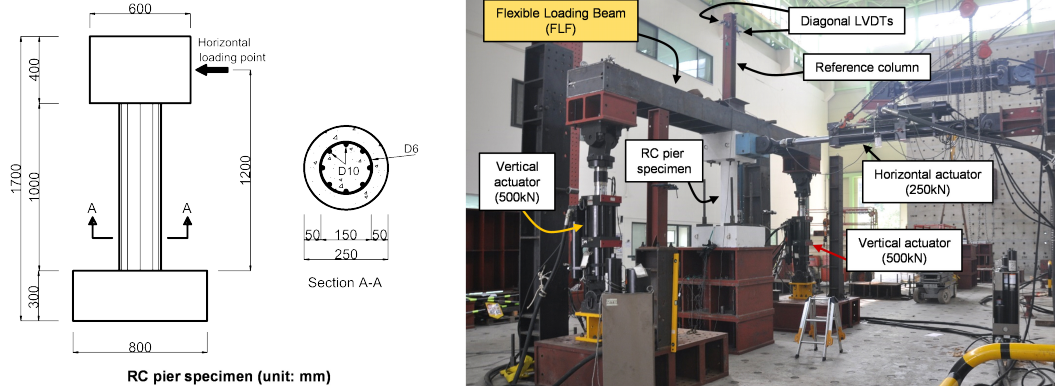


Fig. 2. RC pier test specimen and its experimental test setup for RTHS in the Hybrid Structural Testing Center (HYSTEC) at Myongji University

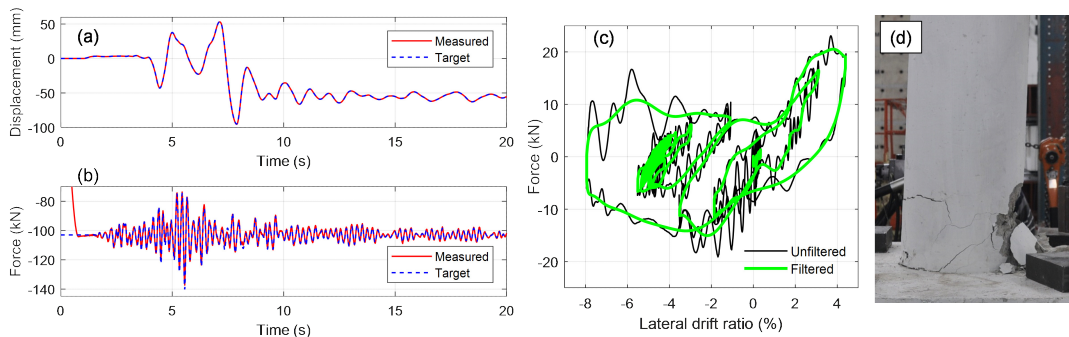


Fig. 3. Results of RTHS: (a) comparison of horizontal actuator displacements; (b) comparison of axial forces; (c) force-deformation relationship of RC pier; (d) damage at the bottom of RC pier after RTHS.

실시간 하이브리드 실험의 결과는 Fig. 3에 제시되어 있다. 수평방향의 목표변위는 실제 측정된 수평방향 변위와 잘 일치하고(Fig. 3(a)), 실시간 하중 제어알고리즘 및 FLB를 이용해 제어된 축하중은 수직방향 지반 운동에 따른 수직력 변화를 잘 따라가고 있는 것을 확인할 수 있다(Fig. 3(b)). Fig. 3(c)는 RC 교각의 수평하중-변위 관계를 보여주고 있는데, 이를 통해 실시간 하이브리드 실험동안 교각의 비선형 거동이 확연히 발생함을 알 수 있고, 이로 인한 교각의 손상된 모습은 Fig. 3(d)에 제시되어 있다. 본 연구는 실시간 하중제어 알고리즘과 FLB를 바탕으로 기존에 수행할 수 없었던 수평과 수직지반운동을 동시에 받고 있는 교각에 대한 실시간 하이브리드 실험을 세계 최초로 성공적으로 수행한 예를 보여주고 있다. 본 연구의 방법 및 결과는 향후 다양한 실험형 구조물에 대한 실시간 하이브리드 실험을 수행할 수 있는 발판이 될 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. Chae, Y., Rabiee, R. Dursun, A., and Kim, C-Y. (2018). "Real-time force control for servo-hydraulic actuator systems using adaptive time series compensator and compliance springs", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 47(4), 854-871.
2. Chae, Y., Lee, J., Park, M., and Kim, C-Y. (2019). "Fast and Slow Cyclic Tests for Reinforced Concrete Columns with an Improved Axial Force Control." *ASCE Journal of Structural Engineering*, 145(6): 04019044.

철근과 강연선 복합이음 방식 조립식 기둥의 내진 성능실험

Seismic Performance Evaluation on Precast Segmental Bridge Pier with Continuous Reinforcements and Bonded Tendon

정길제*1)
Jung, Kilje

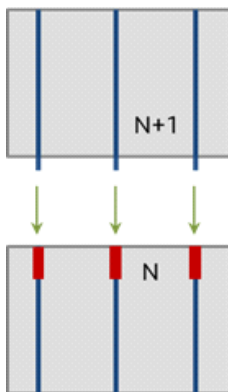
김종현**
Kim, Jong Hyun

이장석***
Yi, Jang Seok

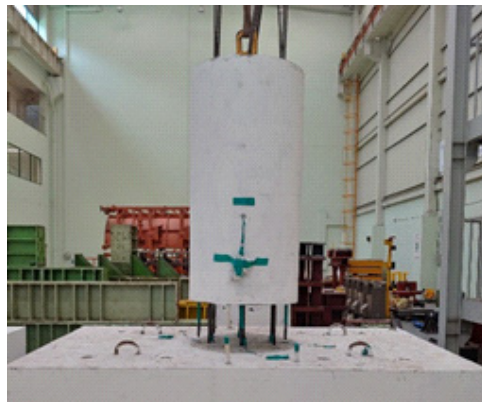
이성형****
Lee, Sung Hyung

그동안 조립식 교각 공법 개발과 관련한 다양한 연구가 수행되었다. 공장에서 제작된 PC 세그먼트를 적층하는 조립식 교각은 세그먼트간 연결부에서 요구되는 구조성능을 확보하는 것이 중요하며, 또한 현장에서의 시공성을 고려한 공법 개발이 필요하다. 세그먼트 간 연결은 주요 구조부재에 해당하는 철근 또는 강연선의 이음 방식에 따라 조립식 교각 공법을 분류할 수 있으며, 이음 방식의 상세에 따라 개발된 공법의 특징이 결정된다. 최근 ICT 국책연구단에서 개발된 철근과 강연선을 모두 적용한 복합이음방식의 조립식 교각 공법을 개발하였으며[1,2], 천안-아산 고속도로 현장에 시험시공을 완료하였다. 본 연구에서는 복합이음방식의 조립식 교각에 그라우트 주입형 커플러를 이용하여 철근 이음 작업의 시공성을 개선한 공법을 제안하였으며, 이를 통해 복합이음 방식의 내진성능 및 가설 중 전도안정성 확보 등 구조성능 측면에서의 장점을 최대한 활용하고자 하였다. 개발된 공법은 준정적 하중재하 실험을 통해 구조/내진성능을 검증하였다.

본 연구에서는 조립식 기둥의 세그먼트 간 연속화를 위해 플러그인 방식의 철근 이음 상세를 적용하였으며, 커플러 근입 깊이만큼 노출된 상태로 철근이 삽입된 세그먼트를 제작한 후 그라우트 채움 방식의 슬리브 커플러를 이용해 세그먼트 적층과 동시에 주철근이 연속화될 수 있게 하였다. 그림 1은 플러그인 방식의 철근 이음에 대한 개념도와 시험체 가설 전경을 도시한 것이다. 세그먼트 적층을 완료한 후에는 강연선 긴장을 통해 이음부의 사용성 기준과 교각의 구조 강성을 만족할 수 있게 하였다. 세그먼트 내 철근은 내진상세를 만족하도록 배근하였다.



(a) Concept



(b) Segment installation

Fig. 1. Plug-in type segment erection

* 현대건설 토목연구팀, 책임연구원 (E-mail: kjung@hdec.co.kr)

** 현대건설 토목연구팀, 책임연구원 (E-mail: chkim@hdec.co.kr)

*** 정회원.현대건설 토목연구팀, 책임연구원 (E-mail: jangseokyi@hdec.co.kr)

**** 현대건설 토목연구팀, 책임연구원 (E-mail: hlstl@hdec.co.kr)

조립식 교각의 구조 및 내진성능검증을 위하여 그림 2과 같이 준정적 하중재하 실험을 수행하였다. 교각에 작용하는 상재하중을 모사할 수 있도록 연직방향 압축력을 도입하였으며, 교각 상단에 수평하중을 반복하면서 가진 진폭을 증가시키면서 하중-변위 이력곡선을 측정하였다. 실험체 직경은 800 mm 이며, 높이 1,600 mm 인 세그먼트 2개를 이용해 제작하였으며, 수평하중 재하 위치와 기단부 간 거리는 2,750 mm 이다. 콘크리트 강도는 40 MPa 이며, 철근 강도는 400 MPa 이다. 수평하중을 재하한 유압잭의 최대하중은 2,000 kN이며, 최대 스크로크는 ± 250 mm 이다. 총 7개의 시험체를 제작하여 실험을 수행하였으며, 현장타설공법과 비교하기 위하여 일체로 제작된 RC 단면의 실험체와 강연선만을 이용한 실험체를 제작하여 실험결과를 비교하였다.

그림 3은 복합이음 방식으로 제작된 동일한 재료의 2개 실험체에 대한 하중-변위 곡선 실험결과를 모멘트-곡률 해석을 통해 산정된 성능곡선과 비교한 것이다. 일체로 제작된 RC 단면의 실험체보다는 교각의 연성 성능이 다소 저하됨을 확인하였으나, 강연선만을 이용한 실험체보다는 연성 성능이 향상됨을 확인하였으며, 실험 결과를 바탕으로 변위연성도를 산정한 결과 복합이음 방식의 두 실험체에 대하여 각각 7.0, 6.6으로 계산되었다. 이는 설계값 5.7 이상의 성능을 확보한 결과이며, 국내 설계기준에서 요구하는 교각의 소요 변위연성도 5 이상을 만족함을 확인하였다. 따라서 국내와 유사한 규모의 중강진 지역에서는 연성 거동을 고려한 내진 설계 적용이 가능할 것으로 판단된다.

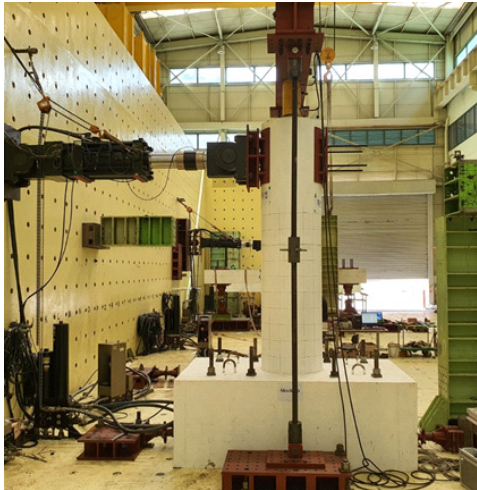


Fig. 2. Experimental test setup

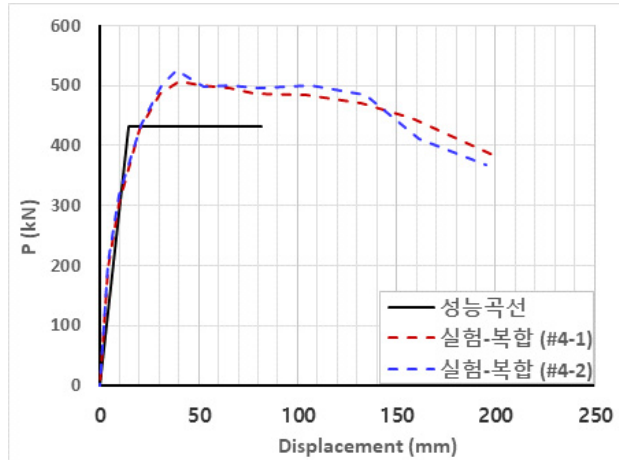


Fig. 3. Test Results - Envelope Curves

참고 문헌

1. Shim, C., Lee, S., Park, S., and Koem, C., "Experiments on prefabricated segmental bridge piers with continuous longitudinal reinforcing bars," *Engineering Structures*, Vol. 132, 2017, pp. 671-683.
2. 심창수, 코엠찬다라, "포스트텐션 조립식 교각의 유효프리스트레스 크기 결정," *한국지진공학회 논문집*, 20권, 3호, 2016, pp. 135-143.
3. 조재영, 이영호, 김도학, 박종현, "무수축 모르타르 충전형 슬리브를 사용한 중공 프리캐스트 교각 개발," *대한토목학회 논문집*, 31권, 3A호, 2011, pp. 215-225.

편심 회전체를 이용한 스페리컬 받침의 수평변위 제어

Horizontal displacement control of the spherical bearing using an eccentric rotating body.

박수민*1)
Park, Soo-Min

하동호**
Ha, Dong-Ho

지용수***
Ji, Yong-Soo

김봉식****
Kim, Bong-Sik

한반도는 환태평양지진대에서 벗어나 있었기 때문에 지진의 안전지대로 인식되었으나, 최근 울산, 경주 그리고 포항에서 규모 5.0 이상의 지진이 잇달아 발생되고 횡수 및 규모가 점진적으로 증가하고 있는 추세로서 한반도는 더 이상 지진에 대한 안전지대로 볼 수 없기 때문에 이에 대한 대책 마련이 필요하다. 1996년 내진설계 규정에 대한 기준을 수립함으로써 내진설계가 반영됨에 따라 1996년 이전의 교량은 내진성능이 부족한 것으로 분석된다. 내진설계 수립이전인 사용연수가 30년 이상의 철도교량이 전체의 약 38.3%를 차지하고 있어 이에 대한 내진 보강 계획이 필요하다.

일반적으로 단면보강 공법 대비 비교적 간단하고 경제적인 교량받침을 교체하여 내진성능을 향상시키는 공법이 많이 적용되고 있다. 교량받침의 교체를 통한 내진보강은 기존 교량받침의 교체만으로도 내진 보강이 가능하여 교량의 지진피해를 줄일 수 있으며, 구조물의 진동문제를 해결하는데 효과적인 방법으로 알려져있다. 그러나 일반적인 철도 교량은 수평 전달력이 고정단 받침으로 집중되기 때문에 지진 발생 시 교량받침의 파괴, 상판의 이탈 등이 초래되어 막대한 인명피해 및 재산상의 피해가 발생할 수 있어, 고정단 받침에 발생하는 수평력을 부재의 파손 없이 견고히 견뎌으로서 안전한 철도 운영이 가능한 교량받침의 필요성이 나타난다.

본 논문에서 편심 기구설계 기법을 적용한 철도 교량용 스페리컬 받침으로서 평상시 바람, 온도 신축 및 신장과 지진시 발생하는 이동변위를 이용하여 교량에 작용되는 힘을 분산시킴으로서 교량받침의 성능 및 안전성을 향상시켜 교량의 내진등급을 상향변경 할 수 있는 기술을 연구한다. 철도교량 변위 발생시 교량받침에 설치된 편심체의 회전을 통해 수평력은 수직력으로 전환되어 힘이 분산되고, 이때 교량받침 상판으로 분산된 수직력은 교량 상부구조를 들어 올리려는 힘으로 전환되지만 무거운 교량상부 구조 자중에 의해 저항됨으로서 수평하중 작용시 교량의 변위를 제어할 수 있다. 또한 철도교량에 적용시 이전 선받침 등 내구연한이 오래되어 기능을 상실한 받침의 내진등급을 상향시킬 수 있으며, 신규 및 노후 교량에 적용시 크기가 상대적으로 작은 받침으로도 큰 내진성능을 발휘할 수 있다.

편심 회전체를 이용한 스페리컬 받침의 성능을 확인하기 위해 본 논문에서는 ANSYS를 사용하여 모델링 해석을 수행하였다. 교량받침의 구성품 사이의 마찰계수를 설정하고, 상판의 수평 변위를 점차적으로 가하며 해석을 수행하였다. 이때 상판에 수직 방향 교량의 자중을 부여하였다. 스페리컬 받침 구성품의 물성치는 다음의 표의 재료로 입력하였다.

Table 1. 스페리컬 받침 구성품의 재료

상판	하판	스페리컬	회전판	전단핀	너트	STS Plate
SM490	SM490	SM490	SCM440	Grade 10.9	SS275	STS316

* 비회원.건국대학교 인프라시스템공학과, 석사과정 (E-mail: zph881@naver.com)

** 정회원.건국대학교 인프라시스템공학과, 교수 (E-mail: hadongho@konkuk.ac.kr)

*** 비회원.펜타드 대표이사, 공학박사 (E-mail: ysj@pentad.co.kr)

**** 비회원.펜타드 기술연구소, 연구소장 (E-mail: bskim@pentad.co.kr)

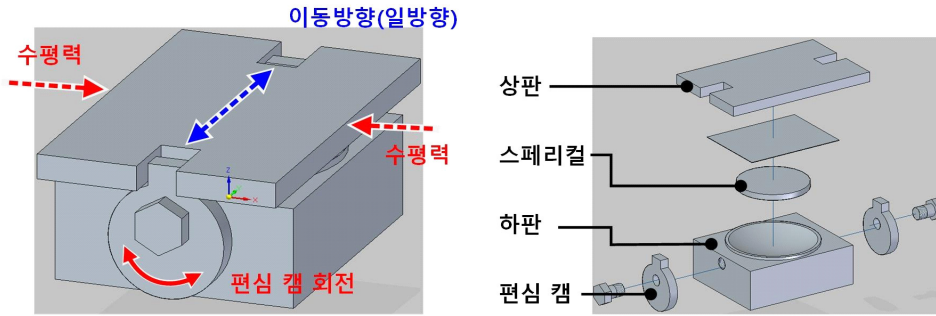


Fig. 1. 회전체를 이용한 개발 기술의 형상 및 구조

Fig. 2은 수평 변위를 가한 스페리컬 받침의 응력분포를 나타낸다. 상판과 전단핀에 접촉된 회전판에 응력이 집중되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 2에서 나타나는 응력분포를 통해 모델링한 스페리컬 받침에서 회전판과 전단핀이 취약하다는 것을 알 수 있다. Fig. 3은 이 스페리컬 받침의 취약 부분인 회전판과 전단핀의 최대 응력 값과 지점을 나타낸다. 회전판과 상부판의 접촉 부위와 전단핀 접촉 부위에서 최대 응력이 발생하는 사실을 확인할 수 있다.

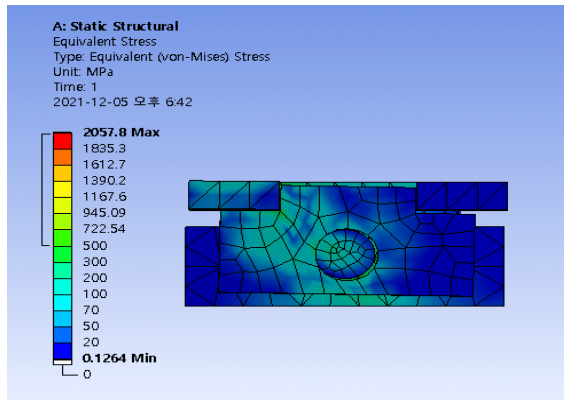


Fig. 2. 수평변위에 따른 받침의 응력분포

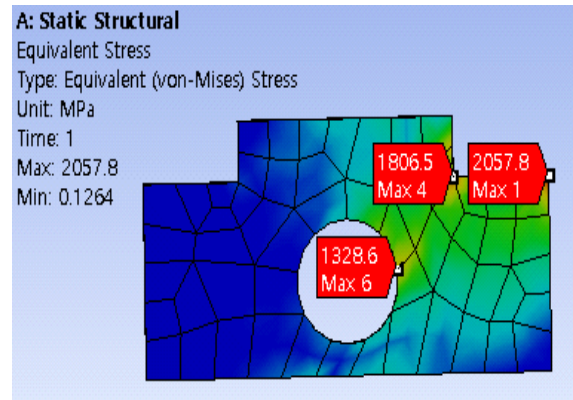


Fig. 3. 수평변위에 따른 회전판의 응력분포

해석결과에 따르면 제안한 스페리컬 받침은 설계 방법에 따라 수평변위를 제어하기에 충분한 성능을 발휘할 수 있으리라 판단된다. 그러나 교량의 자중과 수평력으로 인한 회전판의 압축 파괴나 전단핀의 전단파괴를 방지하기 위해 회전판과 상판이 면 접촉이 되도록 설계되어야 하며 알맞은 재료와 치수를 고려해야 한다. 구성품의 치수와 재료의 선정에 따라 한계상태에서 파손 형태의 컨트롤이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 중소기업기술정보진흥원이 주관하는 중소기업기술개발 “산학 Collabo R&D 사업(예비연구)” (No. S3098760)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 국토교통부. 교량 기타시설설계기준 (KDS 24 90 11). 2021.
2. Ansys Mechanical, Structural FEA Analysis Software. 2022

골조 구조물의 국내 지진파에 대한 면진설계 효용성 검토

Benefit Review of Seismic Isolation Design of Frame Structure
due to earthquakes occurred in Korea김대곤*1)
Kim, Dae-Kon김창현**
Kim, Chang-Hyun

비교적 최근인 2016년 9월 경주지진과 2017년 10월 포항지진 발생 시 건물 구조피해, 특히 지진의 발생 깊이가 비교적 얇은 포항지진에 의한 내진상세가 적용되지 않은 필로티 구조나 학교 건물의 벽체와 기둥에 큰 전단손상이 발생되는 등 건물의 피해가 많았다[1]. 우리나라는 1988년에 처음으로 내진설계기준이 제정되어 2016년까지 몇 차례의 개정을 거쳐 현재는 2층 이상 또는 연면적 500m^2 이상으로 새로 지어지는 건축물에 대해서 KBC 2016의 내진설계기준이 적용된다. 따라서 내진설계를 위하여 내진상세를 통한 구조물의 소성 변형 능력을 이용하거나 면진장치를 사용하여 기초로부터의 지진 진동의 건물로의 전달을 최소화하기 위해서 여러 가지 면진장치를 사용할 수 있다. 한편, 우리나라 건축물에는 면진 시스템이 1997년에 처음으로 시범 적용된 후 2000년 이후에 아파트, 주민복지센터, 전산 센터, 주상복합건물에 매우 제한적으로 적용되는 반면에 최근에 건설되는 규모가 큰 교량에는 대부분의 경우에 면진시스템이 적용되고 있다[2].

이 연구에서는 Fig. 1 과 같은 평면골조 건물의 면진에 적합한 LRB (납-고무 베어링)를 설계하여 이 골조의 지상층과 지하층 사이에 설치한 후에 포항지진과 경주지진에 대한 골조 구조물의 거동을 해석적으로 얻는다. 그 후 골조의 수평변위와 밀면 전단력 위주로 면진설계의 효용성을 검토한다. 일반적인 국내 면진구조물의 내진설계 기준은 2016년에 개정된 건축 구조기준 0306.12에 처음으로 포함되었다[3]. 한편 도로교설계기준에 강제보강 탄성 받침(laminated elastomeric bearing)의 설계원리가 있으며 본 연구를 위한 LRB를 설계할 때 참고하였다[4].

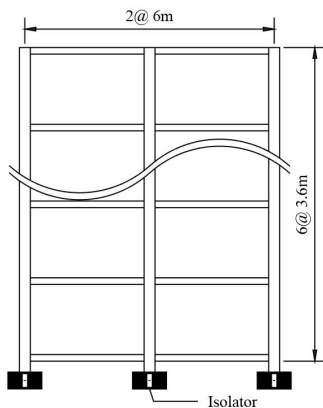


Fig. 1. Frame structure

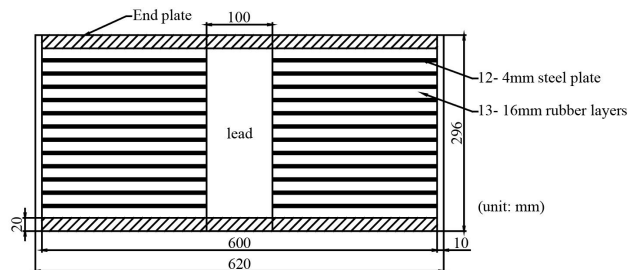


Fig. 2. Isolator(LRB)

골조 설계를 위하여 정방형 슬래브($6\text{ m} \times 6\text{ m}$)의 두께는 14 cm 로 가정하였으며 보, 내부 기둥, 그리고 외부 기둥의 단면은 각각 $26\text{ cm} \times 58\text{ cm}$, $46\text{ cm} \times 46\text{ cm}$, 그리고 $38\text{ cm} \times 38\text{ cm}$ 로 채택하였다. 바닥의 고정하중은 콘크리트 슬래브, 바닥마감, 칸막이벽, 설비 하중 등을 포함하여 5.1 kN/m^2 로 가정하였으며, 적재하중은 일반 사무실의 경우인 2.5 kN/m^2 을 채택하였다. 설계의 편의를 위하여 모든 층의 고정 및 적재하중은 동일한 것으로

* 정회원-서울과학기술대학교 건설시스템공학과, 교수 (E-mail: dkkim@seoultech.ac.kr)

** 서울과학기술대학교 건설시스템공학과, 석사과정 (E-mail: rlackdus95@seoultech.ac.kr)

가정하였다. 한편 건물에 사용될 면진장치의 설계법은 미국, 일본 등에 비해 건축물 면진구조물에 대한 설계경험과 적용사례가 비교적 적은 국내의 상황을 고려하여 건축 구조기준, 도로교설계기준, 및 경험적인 방법[5]에 의해 Fig. 2와 같은 LRB로 설계하였다.

설계된 골조 구조물의 국내 지진파에 대한 면진설계의 효용성을 검토하기 위하여 시간이력해석을 수행하였다. 면진장치의 전단 거동을 위하여 트러스 요소를 사용하여 2선형으로 모델링 하였다. 면진장치의 수직방향 거동은 선형 트러스 요소를 사용하여 지진하중에 의해 외부기둥에서 피해야할 국부적인 들림(uplift) 현상의 발생여부를 검토하였다. 골조의 기본주기를 구해보면 기초고정, 적층고무면진(LRB에서 납봉이 없는 경우), 그리고 LRB 면진의 경우 각각 1.13초, 2.14초, 그리고 1.39초 이다. Table 1은 기초고정(Fixed), 적층고무면진(Rubber), 그리고 LRB 면진의 경우의 최상층의 절대 수평변위, 최상층의 면진장치에 대한 상대변위, 그리고 지반으로 전달되는 수평 전단력(base shear)의 최댓값을 보여준다. Figure 3은 수평 전단력의 시간이력을 보여준다.

Table 1. Seismic performance of frame due to domestic earthquakes

Earthquake	Absolute Displacement (cm)			Relative Displacement (cm)			Base Shear (kN)		
	Fixed	Rubber	LRB	Fixed	Rubber	LRB	Fixed	Rubber	LRB
Pohang	5.78	3.52	3.76	5.78	1.48	2.95	195	96	167
Gyeongju	2.26	2.60	2.80	2.26	0.81	2.00	274	87	184

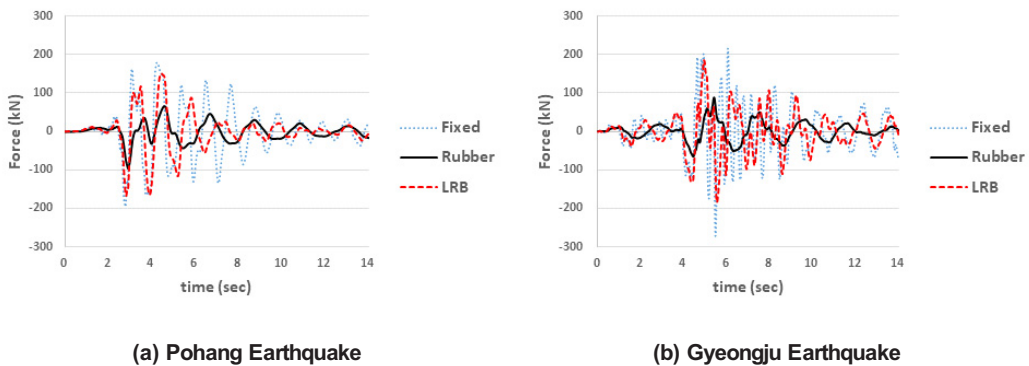


Fig. 3. Time history of base shear force

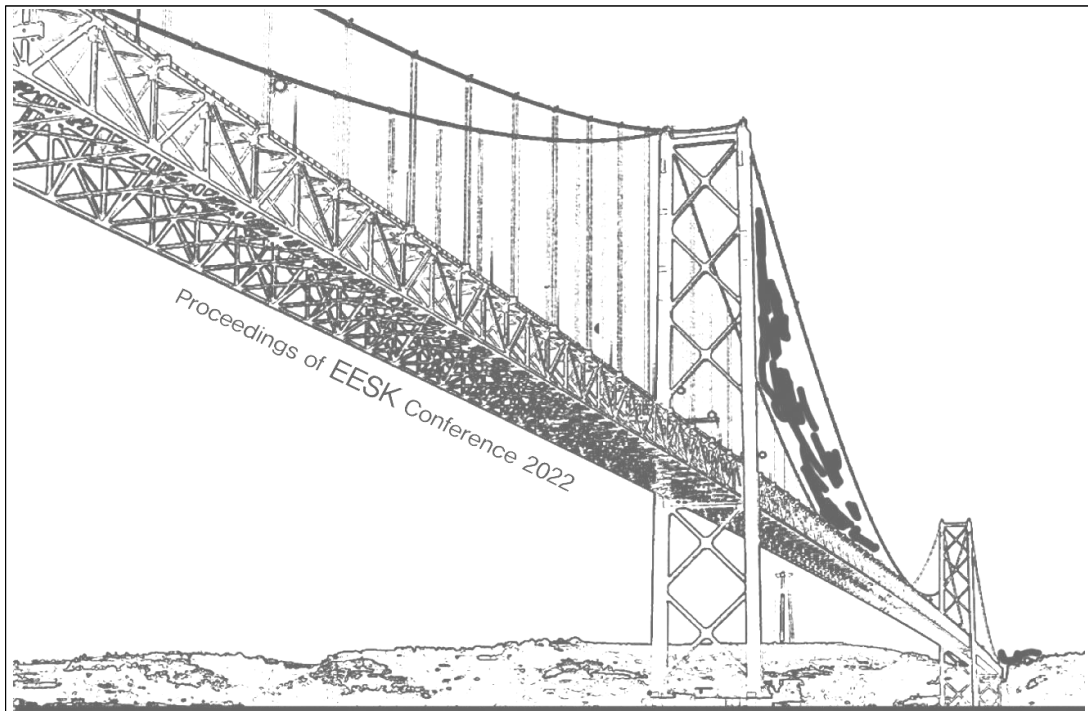
포항지진과 경주지진 발생 동안 LRB의 납봉은 항복하지 않고 거의 항복직전까지 거동하였다. 따라서 적층고무만의 면진장치보다 LRB의 수평강성이 커서(즉 골조의 기본주기를 충분히 늘릴 수 없어서) LRB로 면진된 골조의 경우 충분한 면진 효과는 얻지 못했다. 결론적으로 본 연구에서 채택한 골조의 경우 두 국내 지진파에 대한 면진 장치는 납이 없는 적층고무 면진장치만을 사용하는 것이 더 면진에 유리한 것으로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 2022년 서울과학기술대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Architectural Institute of Korea. Site Inspection and Damage Investigation of Buildings by Earthquakes in Gyeongju and Pohang 8. 2018.
2. Lee DG, Kim TH. Application of Seismic Isolation and Vibration Control in Korea. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea. 2006;10(6): 67-77.
3. Architectural Institute of Korea. Korean Building Code and Commentary 8. 2016.
4. (사)한국교량및구조공학회·교량설계핵심기술연구단, 도로교설계기준(한계상태설계법) 해설 2. 2015.
5. 김대곤외 3인. 내진 설계되지 않은 철골조에 사용될 면진장치. 한국강구조학회지. 1998;10(2):83-94.



지반진동

지형 효과를 고려한 포항 분지 지진과 증폭 모델 개발

Development of Seismic Amplification Model considering Topographic Effect on Pohang Basin

이준영*1)

Lee, Junyoung

김광희**

Kim, Kwang-Hee

강수영***

Kang, Su Young

김병민****

Kim, Byungmin

2017년 11월 15일 규모 5.4의 포항지진이 발생하였고 진앙지를 바라보는 사면에 위치한 포항 곡강리 북부 지역에서 심각한 정도의 건물 피해가 다수 발생하였지만 이와 대조적으로 진앙지를 등지는 사면에 위치한 남부 지역에서는 경미한 피해가 발생한 것을 확인하였다. 이후, 각각의 지역에서 측정한 여진들을 비교하여 진앙지를 바라보는 사면에서 지진파가 증폭하는 증폭현상을 확인하였다[1]. 우리는 포항 분지의 지형이 지진과 증폭에 미친 영향을 정량화하기 위해 상대고도(h_r)와 같은 지형 요소들을 선정하였고 부산대학교 지구물리학 연구실에서 포항분지 주변에 설치한 122개의 임시관측소와 기상청에서 운영하는 포항 지진관측소(PHA2)에서 2019/01/03 ~ 2019/02/14 기간 동안 측정한 513개의 지진파의 주기(0.01~0.5s)별 속도응답스펙트럼을 규모(M), 진앙거리(R_{epi}), 천부 30m 평균 전단파속도(V_{S30}), 지형적 요소에 대하여 회귀분석하여 지진과 증폭 모델을 개발하였다.

이 연구에서 상대고도와 관측소 위치의 사면의 방향에 대한 진앙지의 상대적 각도(α)를 지진과 증폭 모델의 지형 변수로 선정하였다. 상대고도란 특정 위치에서의 고도(h)와 그 위치로부터 특정 반경 내 고도의 평균(h_{mean})의 차이이다. 상대고도 값이 양수이면 산마루 같은 지형이고 값이 음수이면 계곡 같은 지형을 뜻한다. 본 연구에서는 100m, 500m, 1km를 상대고도의 반경의 길이로 고려하였다. Fig. 1과 같이 관측소가 위치한 사면의 방향(Aspect)에 대한 진앙지의 상대적 방향을 각도(α)로 표현하였으며 회전 방향(반시계 방향, 시계방향)에 상관없이, 진앙지의 위치를 사면 방향에서 사면의 반대 방향까지 0 ~ 180°로 표현하였다(Fig 1(b)). 즉 α 가 0°이면 진앙지가 사면방향에 존재하는 것이고 α 가 180°이면 진앙지가 사면의 정반대 방향에 존재하는 것이다.

규모에 따른 속도응답스펙트럼(S_v)을 주기별로 분석했다. 규모가 커질수록 속도 응답 스펙트럼이 커지는 경향을 확인했고 수식 (1)과 같이 Fitting line을 규모에 대한 함수로 표현하였다.

$$f_M = c_0 \cdot M + c_1 \quad (1)$$

여기서, c_0 과 c_1 은 모델의 계수를 의미한다. f_M 과 자연로그를 취한 속도 응답스펙트럼 값 사이의 잔차($Res1$)를 계산하여 진앙거리와 비교하였다. 진앙거리가 커질수록 $Res1$ 이 작아지는 경향을 확인하였고 수식 (2)와 같이 Fitting line을 진앙거리에 대한 함수로 표현하였다.

$$f_{R_{epi}} = c_2 \cdot R_{epi} + c_3 \quad (2)$$

여기서 c_2 과 c_3 은 모델의 계수를 의미한다. $f_{R_{epi}}$ 과 $Res1$ 값 사이의 잔차($Res2$)를 계산하여 V_{S30} 와 비교하였다. (Fig. 2(c))과 같이 V_{S30} 에 따른 $Res2$ 를 분석하였지만 뚜렷한 경향을 확인하지 못하였다. 따라서 $Res2$ 와 지형적 요소와의 관계를 확인하였다.

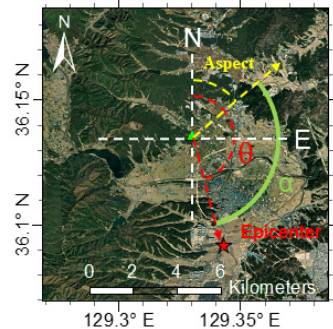


Fig. 1. direction the epicenter exists respect to the slope direction

* 울산과학기술원 도시환경공학부, 박사과정 (E-mail: leeje@unist.ac.kr)

** 정회원 부산대학교 지질환경과학과, 교수 (E-mail: kwanghee@pusan.ac.kr)

*** 정회원 부산대학교 지질해산업자원연구소, 연구교수 (E-mail: su kang@pusan.ac.kr)

**** 정회원 울산과학기술원 도시환경공학부, 부교수 (E-mail: byungmin.kim@unist.ac.kr)

상대고도를 세 개의 구간(낮음, 중간, 높음)으로 나누고 구간 별로 α 에 따른 $Res2$ 를 분석하였다(Fig. 2). 상대고도가 낮은 구간의 경우, 진앙지를 바라보는 사면에서 감쇠, 반대사면에서는 감쇠가 사라지는 경향 확인하였다. 상대고도가 중간인 구간의 경우, 진앙지의 위치에 상관없이 증폭 혹은 감쇠 경향이 없었다. 상대고도가 높은 구간의 경우, 진앙지를 바라보는 사면에서 증폭, 반대사면에서 감쇠하는 경향을 확인하였다. 수식 (3)과 같이 fitting line을 α 에 대한 함수로 표현하였다.

$$f_{\alpha} = c_4 \cdot \alpha + c_5 \quad (3)$$

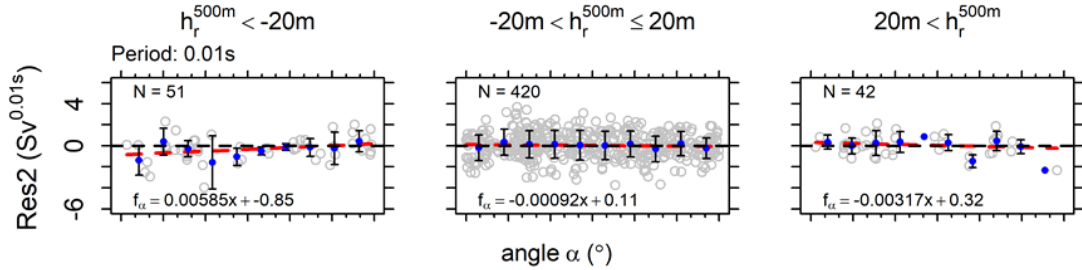


Fig. 2. Residual 2 against α for period of 0.01s by low, intermediate, and high section of relative elevation

여기서 c_4 과 c_5 은 모델의 계수를 의미한다. 상대고도 반경 100m, 500m, 1km 별로 f_{α} 와 $Res2$ 사이의 잔차 ($Res3$)를 계산하였다. 상대고도 반경이 500m인 경우, $Res3$ 의 표준편차 값이 가장 작았기 때문에 최종적으로 반경이 500m인 상대고도를 이용하여 지진과 증폭 모델을 제작하였다. 수식 (4)와 같이 최종적으로 포항 분지의 지반운동을 예측하는 모델을 제작하였고 모델에 사용된 계수들은 Table 1에 정리하였다.

$$\ln(Sv) = f_M + f_{R_{epi}} + f_{\alpha} \quad (4)$$

Table 1. Coefficient of ground motion amplification model for period of 0.01-0.5 s

Period (s)	c_0	c_1	c_2	c_3	c_4			c_5		
					Low	Intermediate	High	Low	Intermediate	High
0.01	1.71	-14.51	-0.15	0.59	0.00548	-0.00064	-0.00783	-0.97	0.13	0.75
0.02	1.71	-14.43	-0.15	0.58	0.00553	-0.00065	-0.00761	-0.97	0.13	0.72
0.03	1.7	-14.26	-0.15	0.56	0.00559	-0.00055	-0.00705	-0.97	0.13	0.62
0.05	1.67	-13.59	-0.15	0.53	0.00616	-0.00036	-0.0032	-1.02	0.12	0.22
0.07	1.66	-13.49	-0.14	0.55	0.00242	-0.00075	-0.00471	-0.73	0.14	0.5
0.1	1.67	-13.63	-0.14	0.58	0.00292	0.00026	-0.00811	-0.6	0.02	0.86
0.2	1.52	-14.31	-0.16	0.9	0.00109	0.00019	-0.00852	-0.46	0.03	0.84
0.3	1.39	-14.65	-0.17	0.99	0.00065	-0.00035	-0.01149	-0.5	0.09	1.02
0.5	1.3	-15.39	-0.24	1.71	0.0015	-0.00115	-0.00508	-0.57	0.17	0.35

감사의 글

이 연구는 한국기상산업기술원 기상기술개발사업의(KMI2018-02801-2) 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Kang, S., Kim, B., Cho, H., Lee, J., Kim, K., Bae, S., & Sun, C. G. (2019b). Ground-Motion Amplifications in Small-Size Hills: Case Study of Gokgang-ri, South Korea, during the 2017 ML 5.4 Pohang Earthquake Sequence. Bulletin of the Seismological Society of America, 109(6), 2626-2643. doi:https://doi.org/10.1785/0120190064

GAN 모델에 따른 가상 지진파 생성 결과 비교 연구

A study on the Comparison of the Artificial Seismic Waves by Generative Adversarial Network Models

김병학*
Kim, Byeong-Hak안재광**1)
Ahn, Jae-Kwang황의홍***
Hwang, Eui-Hong박순천****
Park, Sun-Cheon

지진성능 평가를 위해 엔지니어는 우선 기존에 관측된 지진파형을 수집하고 이를 보정하여 대상 구조물에 적용한다. 국내의 경우 강진 기록이 부족하기에 국외에서 발생한 지진기록을 사용하는데, 이때 기록된 지진파형은 진원, 경로, 부지 증폭 등의 대상 구간의 지진 환경적 고유 특성을 포함하고 있다. 따라서, 국외 강진 기록을 국내에 그대로 적용할 경우 보정은 필수적이다. 그렇다면 ‘보정된 기록은 과연 국내 지진환경을 잘 고려할 수 있는가?’ 라는 질문에 완벽한 답변이 불가능하다. 또한, 전 세계에 지진기록을 살펴보다도 non-stationary한 특성까지 완벽하게 일치하는 경우는 없다. 결국, 우리는 가능성이 0에 가까운 진동에 대한 안정성 검토가 수행되고 있는지 모른다. 본 연구에서는 이러한 한계점을 최소화하고자 인공지능 기술인 GAN(Generative Adversarial Networks, 적대적 생성 신경망)을 사용하여 최대한 국내에서 발생 가능한 인공 지진파를 생성하였다.

GAN은 생성자(generator)와 판별자(discriminator)의 경쟁적인 학습과정을 통해 생성자가 실제 데이터의 확률 분포를 모사하게 되는 기계학습 알고리즘이다[1]. 인공지능 분야에서 데이터 생성을 위해 널리 사용되는 GAN은 random noise 신호로부터 사실적 패턴을 가진 확률분포를 학습할 수 있어 특히 유용하다.

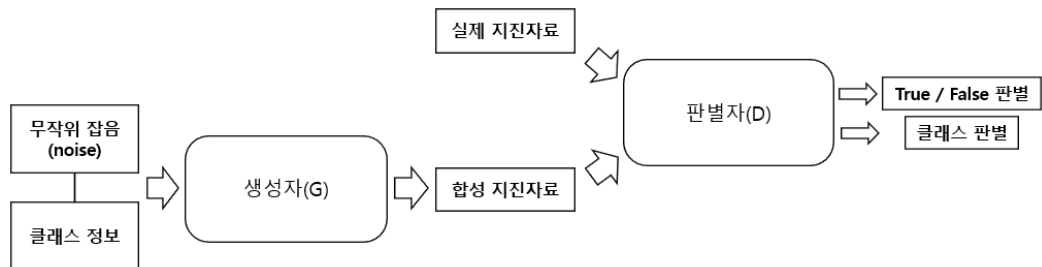


Fig. 1. The process of synthesizing earthquake scenarios using auxiliary conditional generative adversarial networks

Fig.1.에는 가상의 지진자료 생성을 위해 본 연구에 사용된 인공지능망 모델이 동작하는 과정을 도시하였다. 본 연구에서는 첫 번째로 일반적인 GAN 모델을 적용하였다. 일반적인 GAN 모델은 생성자와 판별자의 상호적인 관계만이 고려되며, 이를 통해 다양한 지진형상에서 보여지는 P파와 S파의 진폭, Duration, 에너지 감쇠 등이 고려된 파형을 산출해낸다. 이때 산출된 지진파는 학습자료로 사용된 파형에 의존적이다. 결국 사용된 지진파의 규모, 이격거리, 지반정보가 다양할수록 생성된 지진파의 특성이 다양해지고 광범위해진다. 두 번째 GAN모델의 학습에서는 생성자에 규모와 진앙 이격거리를 구분한 클래스 정보를 추가하였다. 이때 판별자의 출력역시 클래스에 대한 판단이 가능하도록 알고리즘을 구성하였다. 이러한 생성모델을 보조의 클래스 판별기가 탑재된 모델을 ACGAN(Auxiliary Classifier Generative Adversarial Networks)이라 부른다[2]. ACGAN

* 기상청 지진화산연구과, 연구원

** 정회원, 기상청 지진화산연구과, 기상연구소 (E-mail: propjk@korea.kr)

*** 기상청 지진화산연구과, 기상연구소

**** 정회원, 기상청 지진화산연구과 과장

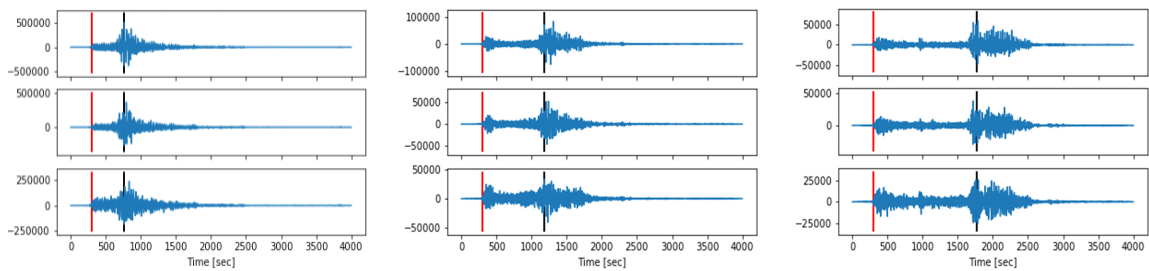
을 통해 합성 지진자료는 규모와 진앙 이격거리에 따른 파형의 변화가 반영되는 것으로 확인되었다.

Table 1. The number of KiK-net training data by magnitude and distance section

	0~20 km	20~40 km	40~60 km	60~80 km	80~100 km	100~120 km	Total
M 3~4	6,360	12,868	13,248	9,718	3,764	2,534	48,492
M 4~5	2,473	6,856	11,096	13,815	11,320	10,918	56,478
M 5~6	336	899	1,605	2,509	3,261	3,751	12,361
Total	9,169	20,623	25,949	26,042	18,345	17,203	117,331

본 연구에서는 선행적인 학습을 통해 지진파 생성에 최적화된 GAN 모델을 결정하였고, 기반암 심도의 움직임 모사할 수 있는 지진파 생성 시스템을 개발하기 위해 기반암 위치의 과거 지진기록을 학습에 사용하였다. Table 1은 인공지능 학습을 위해 사용된 총 11만여 개의 시추공 지진계에서 기록된 KiK-net 지진 데이터 수를 정리하였다. 이때 규모와 진앙거리를 각각 3개와 6개의 구간으로 나누어 데이터 수를 측량하였고 각 구간에 분포한 데이터의 편차는 300% 미만인 되도록 가능한 균등하게 설정하였다.

ACGAN을 통해 생성된 지진자료는 파형 시각화, PS시, GMPE에 따른 PGA 및 PGV 모사, 응답 스펙트럼 등 지진학적 특성이 반영되는지 검토하였다. 앞서 언급한 것과 같이 인공지능 기반으로 생성된 지진파가 실제와 매우 유사한 특성을 보인 것을 확인하였다. 추가로 생성된 지진파는 규모와 이격거리진폭특성은 GMPE 모델의 감쇠특성을 잘 반영하는 것으로 나타났다. Fig. 2는 제안하는 기법으로 생성된 지진의 진앙거리에 따른 PS시 변화를 도시하였다. 붉은색 선은 P파, 검은색 선은 S파가 검출된 시각을 의미한다. 진앙거리가 증가함에 따라 PS시가 증가되는 경향을 확인하였다.



(a) P/S wave picking result [20-40km] (b) P/S wave picking result [60-80km] (c) P/S wave picking result [100-120km]
Fig. 2. The process of synthesizing earthquake scenarios using auxiliary conditional generative adversarial networks

본 연구에 활용된 인공지능 기반 지진파 생성 시스템은 AC-GAN이며 해당 기술은 원하는 규모와 진앙거리의 입력에 따라 기상청 시추공 관측소의 인공자료 혹은 진앙거리가 고려된 목표 지점의 인공자료로 생성된다. 개발된 시스템은 향후 지진 분야에서 활용도가 높을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 지진·지진해일·화산감시 및 예측기술 개발 과제(과제번호: 135002988)의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Goodfellow I. Generative adversarial nets. Advances in Neural Information Processing Systems, 27.
2. Odena A. Conditional image synthesis with auxiliary classifier gans. International Conference on Machine Learning, pp. 2642–2261. PMLR.

2017년 M5.4 포항 지진의 광대역 지반운동 시뮬레이션

Broadband ground motion simulation of the 2017 M5.4 Pohang earthquake

정석호*1)
Jeong, Seokho배성은**
Bae, Sung Eun김광영***
Kim, Gwangyoung

2017년 포항시에서 규모 Mw5.4의 지진이 발생하여 최대 진도 6에 달하는 진동과 함께 큰 피해가 발생하였다. 본 연구는 Graves and Pitarka [2, 3]의 광대역 하이브리드 지반운동 시뮬레이션 플랫폼을 이용하여 2017년 Mw5.4 포항지진의 시뮬레이션을 실시하고 결과를 계측자료와 비교하였다. 지진 발생시 지반 운동 특성의 공간적 분포는 지진파가 전파되는 지각 내부의 3차원적 속도 구조에 영향을 받게 되는데, 한반도의 지각 구조가 지진파의 전달에 미치는 영향을 효과적으로 반영하기 위해 Kim et al. [5]의 남한지역 3차원 속도모델을 구현하였다. 유한단층 효과가 지반운동에 미치는 영향을 반영하기 위해 Fig. 1과 같이 운동학적 지진원 모델링 기법을 적용하고, 단층의 파열 면적을 추정하기 위해 Stirling et al. [6]의 지진규모-단층면적 상관관계를 적용하였다.

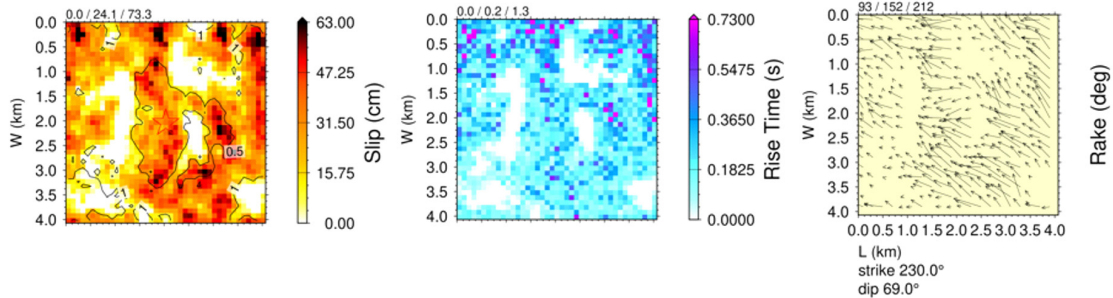


Fig. 1. Kinematic rupture model generated for the simulation of 2017 Pohang earthquake

한국과학기술정보연구원에서 운용중인 슈퍼컴퓨터(Nurion)상에 시뮬레이션 플랫폼 및 3차원 속도모델을 구현하고 그리드 간격 100m, 최저 전단파 속도 500m/s를 적용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 지진공학에서 큰 중요성을 가지는 부지증폭효과는 직접적으로 모사되지는 않았으나 Vs30에 기반한 경험적 방법[1] 및 USGS Global Vs30 모델[4]을 적용하여 사후 보정을 실시하였다. Fig. 2(a)는 시뮬레이션 결과와 관측자료 기반 MMI 진도를 비교하고 있으며, 시뮬레이션 기반 MMI 진도 분포는 관측 자료와 상당히 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 2(b)가 보여주는 사례와 같이 기상청 지진관측소 위치에서 응답스펙트럼(pSA)의 비교 또한 실시하였다. 응답스펙트럼의 비교는 전반적인 유사성을 보이고 있으나, 관측소 위치에 따라 시뮬레이션과 관측기록의 유사성에 크고 작은 차이가 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 차이는 구현된 속도모델과 실제 지각구조와의 차이, 반영된 유한단층 지진원 모델의 현실성 등 여러 요인에 영향을 받는 것으로 판단되며, 현재 시뮬레이션과 계측자료의 차이에 대한 분석을 진행 중이다. 시뮬레이션은 지진관측망의 공간적 밀도보다 훨씬 조밀하게 지진파를 생성할수 있는 장점이 있으며, Fig. 2(a)의 MMI 진도 분포가 보여주는 대구분지, 진영분지, 김해평야에서의 부지증폭효과와 같은 지진파의 공간적 특성을 효과적으로 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

* 정희원, 창원대학교 스마트그린공학부, 조교수 (E-mail: seokho.jeong@changwon.ac.kr)

** 창원대학교 산업기술연구원, 전임연구원 (E-mail: sung.bae@canterbury.ac.nz)

*** 한국과학기술정보연구원, 책임연구원 (E-mail: glorykim@kisti.re.kr)

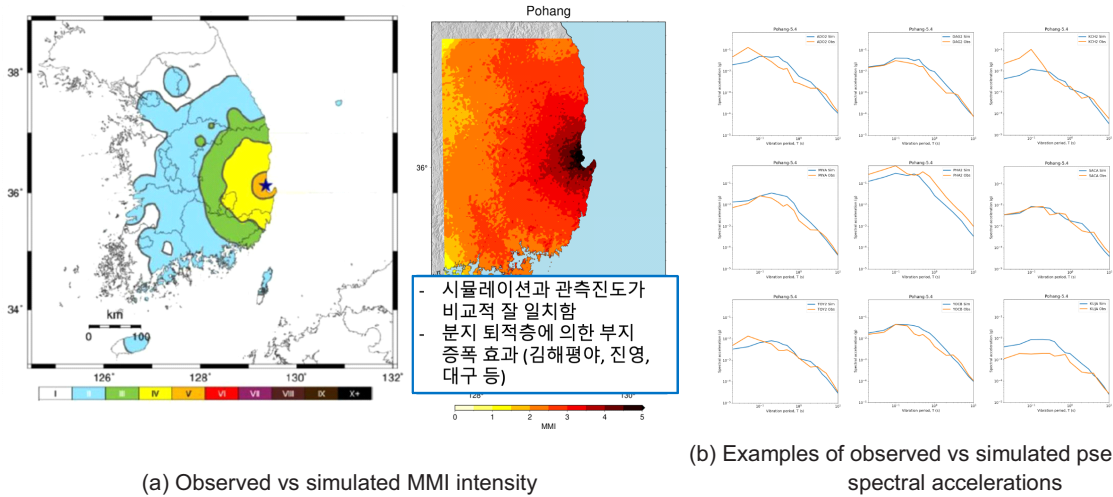


Fig. 2. Comparison of simulation with observed ground motion intensity

감사의 글

이 논문은 국가과학 기술연구회 개방형데이터솔루션(DDS) 융합연구사업 (No. CRC-19-01-KISTI) 및 2021년 과학기술정보통신부의 「해외우수과학자유치사업」의 지원을 받아 수행되었음(NRF-2021H1D3A2A01096514).

참고 문헌

1. Campbell, K. W., & Bozorgnia, Y. (2008). NGA Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damped Linear Elastic Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s. *Earthquake Spectra*, 24(1), 139-171.
2. Graves, R. W., & Pitarka, A. (2010). Broadband ground-motion simulation using a hybrid approach. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(5 A), 2095-2123.
3. Graves, R., & Pitarka, A. (2016). Kinematic ground-motion simulations on rough faults including effects of 3D stochastic velocity perturbations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(5), 2136-2153.
4. Heath, D. C., Wald, D. J., Worden, C. B., Thompson, E. M., & Smoczyk, G. M. (2020). A global hybrid Vs30 map with a topographic slope-based default and regional map insets. *Earthquake Spectra*, 36(3), 1570-1584.
5. Kim, K.-H., Park, J.-H., Park, Y., Hao, T.-Y., & Kim, H.-J. (2017). Crustal structure beneath the southern Korean Peninsula from local earthquakes. *Geophysical Journal International*, 209(2), 969-978.
6. Stirling, M., Rhoades, D., & Berryman, K. (2002). Comparison of Earthquake Scaling Relations Derived from Data of the Instrumental and Preinstrumental Era. *Bulletin of the Seismological Society of America* (Vol. 92, Issue 2).

한반도 지역 지반분류별 지반운동 감쇠 예측식 구축

Korean Peninsula Site Classification Ground Motion Prediction Equation Construction

지현우*1) 한상환**
Jee, Hyun Woo Han, Sang Whan

안정대륙지역 (stable continental regions, SCRs)에 속해있는 한반도[1]는 강진발생빈도가 낮은 편에 속한다. 그럼에도 불구하고, 역사적으로 규모 5.0 이상의 지진이 수차례 발생하여 한반도에 크고 작은 다양한 피해를 유발하였으며 비교적 가까운 현대에는 내륙에서만 1978년의 속리산 지진과 홍성 지진, 2007년 오대산 지진, 2016년 경주 지진, 2017년 포항 지진이 발생하였다. 이 중 2017년 포항 지진은 인명피해와 동반하여 많은 경제적 피해를 동반한 바 있다. 이에 관련한 연구[2]에 따르면 포항 지진 피해는 지진 규모 뿐 아니라 지역별 부지 효과의 영향이 있을 것으로 보고된다. 이에 따라서 정확한 부지 효과를 반영한 국내의 지진 특성 연구의 중요성이 부각된다. 본 연구의 목적은 국내의 내진설계 및 내진성능평가에 충분히 활용할 수 있도록 한반도의 지진 특성과 지역별 부지 특성을 반영한 지반운동 감쇠 예측식 (Ground Motion Prediction Equation, GMPE)을 구축하는 것이다.

지반운동 감쇠 예측식의 경우 지역 별로 발생한 강진 기록을 수집하여 유효한 지진 매개변수 (peak ground-motion acceleration, PGA; pseudo spectral acceleration, PSA)로 변환하여 특정 지진 시나리오 목록 (지진 규모, 지진 거리, 부지 특성 지표, 단층 특성 등)에 따라 평가하는 것이 일반적이다. 그러나, 한반도와 같은 안정대륙지역의 경우에는 강진 기록이 매우 제한적이기 때문에 이를 보충하는 방법이 요구된다. 이에 관련 선행연구[3]에서는 수집된 지반운동 기록과 한반도의 지진 특성을 반영한 인공 지반운동 기록을 조합하여 부지효과를 제외한 기반암에서의 GMPE를 구축하는 절차를 제안한 바 있다. 본 연구에서는 선행 연구[3]의 방법론과 GIT (Generalized Inversion Technique) 기반 비 매개변수 인공 지반운동 생성 모델을 조합하여 개선된 예측식 모델을 구축하였다.

예측식 모델 $[\log Y(M_W, R_{HYPO}, V_{S30}, T)]$ 은 이와 관련된 선행연구들[3-4]의 형태를 기반으로 개발하였으며 식 (1)과 같다.

$$\log Y(M_W, R_{HYPO}, V_{S30}, T) = \log Y_{w/osite}(M_W, R_{HYPO}, T) + \log Site_{GMPE}(V_{S30}, T) + \delta B_e(T) + \delta S2S_s(T) + \delta W_{o,es}(T) \quad (1)$$

여기서, $\log Y$, $\log Y_{w/osite}$ 는 부지효과를 반영한 감쇠 예측식과 부지효과를 제외한 기반암에서의 평균 감쇠 예측식이다. $\log Site_{GMPE}$ 는 감쇠 예측식의 부지효과를 평가한 모델식이다. M_W , R_{HYPO} , V_{S30} , T 은 각각 지진 모멘트 규모, 진원 거리, 지표면 30m 깊이 평균 전단파 속도, 주기 값을 의미한다. $\delta B_e(T)$, $\delta S2S_s(T)$, $\delta W_{o,es}(T)$ 는 각각 지진이벤트 무작위 효과, 특정 부지 (관측소)의 무작위 효과, 지진 이벤트와 관측소 보정한 무작위 효과를 의미한다.

예측식 모델 개발을 위해, 본 연구에서는 국가지진종합정보시스템 (National Earthquake Comprehensive Information System, NECIS)에서 제공한 데이터 (2010년 - 2020년 기간 중에 발생한 지진 이벤트) 중 약 3만 개의 지반운동 기록을 사용하여 인공 지반운동 생성 모델의 평가와 지반운동 예측 감쇠식 개발을 수행하였다. Fig. 1은 PGA와 주기별 PSA 감쇠식과 지반운동을 비교하여 나타낸 도표이다.

* 정회원.한양대학교 건축공학과, 석박사 통합과정 (E-mail: hyunwoo71@hanyang.ac.kr)

** 정회원.한양대학교 건축공학과, 교수 (E-mail: swan@hanyang.ac.kr)

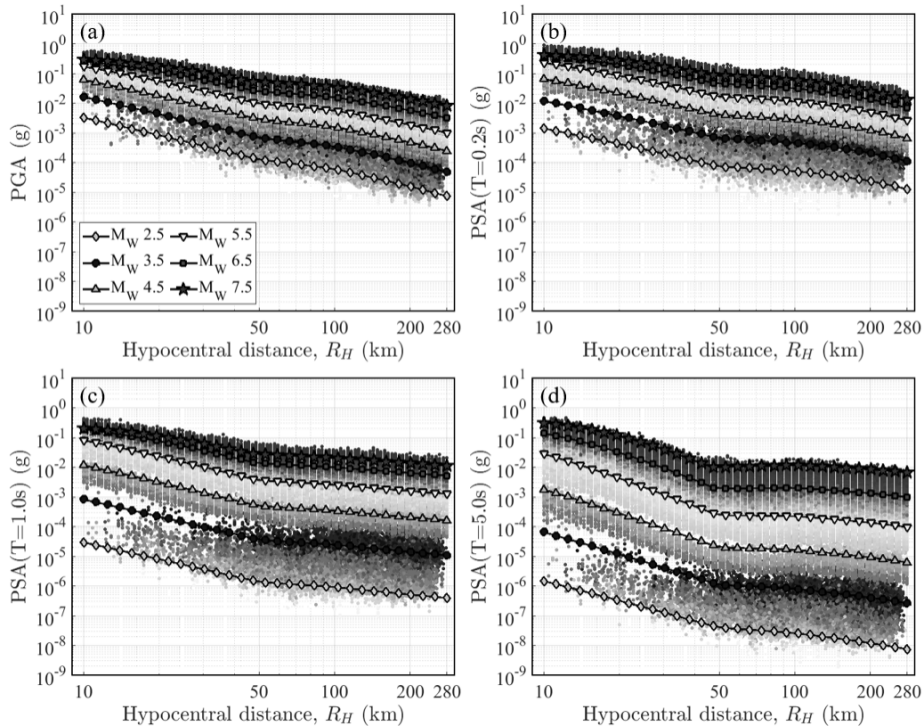


Fig. 1. PGA and PSA for GMPE with collected and simulated ground motions

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 지원 (NRF-2020R1A2C2010548)에 의하여 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Schulte SM, Mooney WD. An updated global earthquake catalogue for stable continental regions: Reassessing the correlation with ancient rifts. *Geophysical Journal International*. 2005; 161(3):707-721.
2. Kim HS, Sun CG, Cho HI. Geospatial Assessment of the Post-Earthquake Hazard of the 2017 Pohang Earthquake Considering Seismic Site Effects. *International Journal of Geo-Information*. 2018; 7(9):375.
3. Jee HW, Han SW. Regional Ground Motion Prediction Equation Developed for the Korean Peninsula Using Recorded and Simulated Ground Motions. *Journal of Earthquake Engineering*. 2021; DOI: 10.1080/13632469.2021.1871682
4. Seyhan E, Stewart JP. Semi-Empirical Nonlinear Site Amplification from NGA-West2 Data and Simulations. *Earthquake Spectra*. 2014; 30(3):1241-1256.

장거리(>30km) 지중 광통신 분산형 진동센서를 이용한 지진과 감지 사례 연구

Case study of detecting earthquakes using long-range (>30km) underground fiber-optic Distributed Acoustic Sensing

연관희* 최신규* 이강렬* 송석용**
 Yun, Kwan-Hee Choi, Shin-Kyu Lee, Kang-Ryel Song, Suk Yong

최근 광통신 분야에서의 기술 발전으로 인해, 주요 life-line과 함께 인접 위치에 포설되는 지중 광통신 분산형 진동센서(이하 'DAS')의 다양한 응용분야(석유탐사 및 개발, 인근 침입자 감시, 선로 위험 감시, 지진감시 등) 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 DAS의 다양한 응용분야 중 하나인 지진감시와 관련하여 DAS의 활용 가능성을 사전 검토하기 위해, 국내 최초로 DAS에서 감지된 지진파 분석 사례를 소개하고자 한다. 일반적인 지진계는 특정 지점에서의 3성분(수직, 동서/남북 수평) 지진동을 측정하지만, DAS는 선로 방향과 평행한 단일성분의 탄성변화를만을 장거리(30~100km) 구간에 대해 공간적 단위 구간(gauge length)별로 측정하는 계측기법이다. 당초 DAS는 석유탐사 및 원유 시추개발 분야에서 사용되었는데, 해당 응용분야에서는 탄성파의 특정 파(P, S 표면파 등)의 공간적인 도달 시각만을 이용하는 데 제한적으로 활용되었으나, 최근에는 그 응용범위가 확대되어 지진분야에서도 활용을 시도하고 있다([1, 2]). 한편 이를 위해서는 주파수 응답크기에 대한 검토가 추가적으로 필요한데, 본 연구에서는 주파수 응답크기의 활용성 측면에서 최근에 발생한 두 개의 중규모 지진에 대하여 DAS에서 계측된 자료를 분석하고자 한다. 분석 방법으로는 특정 지역 DAS 계측장비에서 관측된 지진파와, 인근에서 운영 중인 지진계의 계측자료를 비교하여 DAS를 이용한 지진파 감지의 가능성을 평가하였다. 이러한 비교분석을 통해 1) DAS 자료의 지진계측 감도에 특정 방향성이 있는지와 2) 지진파 에너지의 주요 주파수 대역에서 DAS가 반복적으로 지진파 감지 능력이 있는지를 확인할 수 있다.

한국전력은 평택지역의 주요 지중선로 보호를 위해 DAS 계측장비(제작사 APSensing)를 2021년 이후 설치하여 운영하고 있다. 해당 선로는 총 연장 35km(27km×10km 영역)이며, 경로 상의 설치환경으로는 전력구, 관로, 해저터널 등 다양한 조건의 지중 구간이 존재하며, 이로 인해 지진발생시 다양한 관측환경이 반영된 DAS 계측자료의 특성이 나타난다. 분석에 사용된 지진은 규모 4.6의 서해지진('21.01.19)과 규모 4.9의 제주지진('21.12.14.)이 사용되었다. Fig. 1에 나타난 서해지진의 DAS 계측자료로부터 P파와 S파가 확인하게 구분되며, 이러한 정보를 활용하면 지진원의 위치 파악이 가능하다고 판단된다. 따라서 지진관측공백 지역에 위치한 DAS 선로 인근에서 지진이 발생한다면 지진조기경보 기능 수행도 가능하다. 그러나 관측된 지진파의 강도가 DAS 채널별로 변동성이 심하게 관측되고 있어 지진규모 산정 및 피해평가 등의 공학적 활용시에는 추가적인 검토가 필요함을 알 수 있다.

평택 DAS 선로 인근 지진관측소 중 하나인 전력 연구원의 평택화력 스위치야드 지진계(TPT)의 진앙 거리는, 서해지진은 286.9km, 제주지진은 439.5km이었으며, 지진원의 방향은 상호 거의 수직을 이루었다. 추가로 활용된 인근 지진관측소로는 CEA2(기상청 천안), SWO2(기상청 수원) 등이 있으며, 상호 40~60km 이격거리를 갖는 관측소이다. 해당 지진관측 자료의 S파에 대한 신호는 0.5~10Hz의 주파수

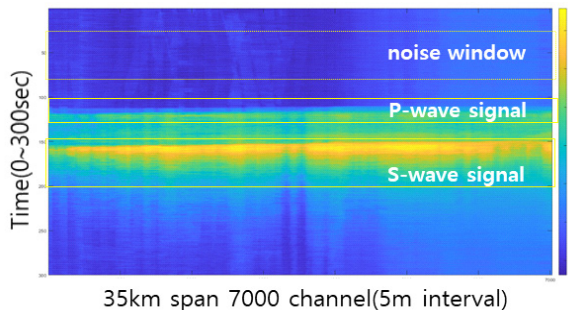


Fig. 1. Signal amplitude of DAS recording for West-Sea earthquake('21.1.19, M=4.6) for 0 ~ 10 Hz

* 정회원·한전 전력연구원, 수석(E-mail: geoyun0@kepeco.co.kr)/선임(E-mail: newsk4@kepeco.co.kr)/선임(E-mail: leekangryel@kepeco.co.kr)

** 에피텍(주), 대표 이사 (E-mail: sukyong@aptechinc.kr)

구간 에너지를 포함하였다. 5분 단위로 저장되는 DAS 계측자료 파일의 크기는 각 지진에 대해 8 Gbyte의 방대한 양의 자료이다. 한편 DAS 계측자료와 인근 지진관측소의 계측자료 비교시, 인근 지진계의 공간적인 분포가 대략 수십 km 이내에 분포하고 있어, 비교 대상인 DAS 신호로는 35km의 DAS 전구간에서 5m 간격으로 감지된 DAS 신호에 대한 평균적인 통계값을 이용하였다. 이때 35km 구간 7,000개의 DAS 채널별로 계측된 신호는 설치환경에 따라(주변 매질과의 coupling 정도) SN비가 차이가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 총 7,000개의 채널에서 계측된 DAS 채널에 대해 SN비 선별기준을 적용하였고, 선별된 DAS 채널자료에 대해서만 2개 지진(제주/서해지진)에 대한 S파 구간의 스펙트럼 상대 비율을 계산하였다. 이때 DAS에서 계측된 지진파의 신호 스펙트럼 주파수 구간은, 지진파 도달 전후의 잡음 계측자료에 대한 S파 스펙트럼의 SN비가 2배 이상을 나타내는 구간으로 결정하였다. 다음으로는 두 지진에 대한 DAS 신호 스펙트럼의 구간별 최소값 중 큰 값($f_{q_{min}}$)과 구간별 최대값 중 작은 값($f_{q_{max}}$)이 다음 기준을 동시에 만족하는 채널을 선택하였다.

$$1) [\log_{10}(f_{q_{max}}) - \log_{10}(f_{q_{min}})] > 0.55, \quad 2) f_{q_{max}} > 8\text{Hz}, \quad 3) f_{q_{min}} < 5\text{Hz}$$

선별된 DAS 채널의 개수로는 전체의 40%인 2,775개이며, 해저터널 구간의 DAS 채널은 전혀 채택되지 않았다. 선별된 채널의 신호 스펙트럼 구간 $f_{q_{min}}$ 은 평균 1.74Hz이었으며, 구간 $f_{q_{max}}$ 는 평균 18.3Hz이었다. 2개 지진에 대한 선별된 DAS 채널의 S파 구간에 대해서는 신호의 상대적인 스펙트럼 비율을 계산하고 관련 자료의 통계특성을 분석하였다(Fig. 2의 'DAS mean'). 1~10Hz 구간에서의 'DAS mean' 자연로그 표준편차는 평균 0.64로 계산되었다. Fig. 2는 'DAS mean'과 평택 인근 3개 지진관측소 계측자료의 (평활화한)수평, 수직성분 스펙트럼 비율의 중앙값(각각 'H, Vmedian')을 상호 비교한 결과이다. 이때 2개 지진에 대한 인근 3개 지진관측소 파형자료의 수평, 수직성분 스펙트럼의 상대적 비율은 지진파의 부지 및 지각전달특성이 제거된 지진원만의 스펙트럼 비율을 의미하므로 공간적인 위치와는 무관하게 서로 잘 일치하였으며, 수평성분으로는 동서/남북 방향 지진계측자료 스펙트럼의 기하학적인 평균값을 취하였다. 'DAS mean'과 지진관측소 계측자료의 'H, Vmedian'은 약 6Hz까지는 대체로 상호 일치하는 특성을 나타내었는데, 특이한 사항은 저주파(약 2Hz 이하)에서는 'DAS mean'이 'Hmedian'과 유사하였으며, 고주파 구간(약 2Hz 이상)에서는 'Vmedian'과 유사하였다. 이러한 결과는 DAS의 지진계측자료가 서로 다른 주파수 구간에서 지진파의 수직, 수평성분의 특징을 반복적으로 감지해 낼 수 있음을 의미한다. 반면 상호 일치하지 않는 일부 DAS 채널 구간도 존재하였는데, 이는 해당 구간에서는 DAS를 이용한 지진파 감지 특성이 지중 설치환경에 따른 방향성을 나타냄을 의미한다. 향후에는 DAS 선로상에 추가적인 지진계를 설치하고, 개별 지진에 대한 스펙트럼의 직접 비교를 통해 지진계를 대체할 수 있는 DAS의 지중 설치환경에 대한 세부적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

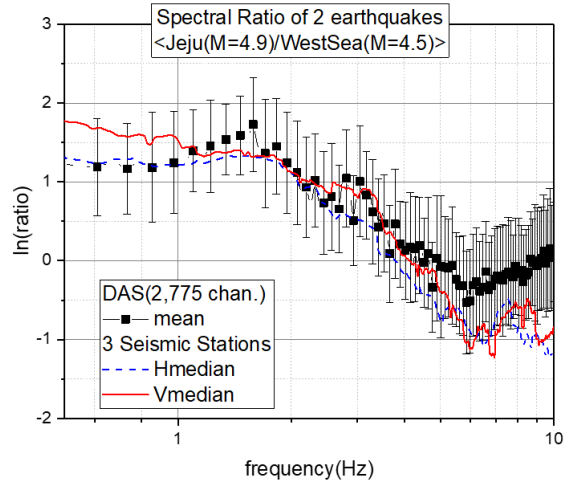


Fig. 2. S-wave spectral ratios of 2 earthquake are compared between DAS signals and adjacent seismic data

참고 문헌

1. Ajo-Franklin, J.B., Dou, S., Lindsey, N.J. et al., *Distributed Acoustic Sensing Using Dark Fiber for Near-Surface Characterization and Broadband Seismic Event Detection*, Sci. Rep., 2019;9:1328, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36675-8>.
2. Paitz, P., P. Edme, D. Gräff, F. Walter, J. Doetsch, A. Chalari, C. Schmelzbach, and A. Fichtner, *Empirical Investigations of the Instrument Response for Distributed Acoustic Sensing (DAS) across 17 Octaves*, Bull. Seismol. Soc. Am., 2020;111;1-10.

2016 경주지진 관측 지진동 부지응답 보정 및 지진동 모사

Site response correction and ground-motion simulation for the 2016 Gyeongju earthquake

안병석*1)

Ahn, Byeong Seok

강태섭**

Kang, Tae-Seob

유현재***

Yoo, Hyun Jae

지진 발생시 관측 부지에 전파된 지진동은 부지 아래 지질 조건에 따라 증폭 및 감쇄될 수 있으며, 이를 부지 효과라 한다. 부지효과는 부지마다 다르기 때문에 전파거리에 따른 전반적인 지진동 감쇄 양상을 분석하는데 있어 고려되어야 할 필요가 있다.

이 연구에서는 2016년 9월에 발생한 M_L 5.8 경주지진(이하 경주지진)에 대해 관측 지진동 분석과 추계학적 유한단층 지진동 모사를 수행하였다. 지표 관측소의 관측 지진동에 포함된 부지효과를 보정하기 위하여 horizontal-to-vertical spectrum ratio(HVSR) 방법을 이용하였다[1]. HVSR 계산을 위해 기상청 및 한국지질자원연구원에서 운영하는 한반도 상시지진관측망의 지표 관측소 상시미동 자료를 이용하였으며, 이때 HVSR은 해당 부지의 선형적인 부지응답함수로 가정된다[2]. 하지만 일반적으로 HVSR은 실제 부지증폭(surface-to-borrehole spectral ratio: SBSR) 보다 과소평가된다고 알려져 있으며, 이를 보완하기 위해 HVSR 보정식[3]을 사용한다. 이번 연구에서는 HVSR 보정식을 적용해 구한 pseudo SBSR(pSBSR)을 부지증폭함수로 사용하였다. 지표 관측 지진동의 부지효과 보정 결과, 지표 관측 지진동이 부지효과가 무시되는 시추공 관측소의 관측 지진동과 유사한 수준으로 조정되는 것을 확인하였다(Fig. 1).

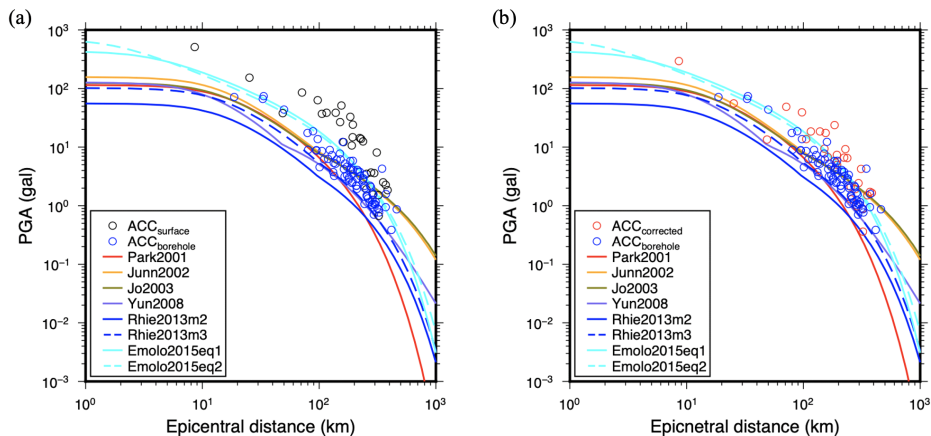


Fig. 1. 2016 M_L 5.8 경주지진에 대한 부지효과 보정 전(a)과 후(b)에 따른 지표 관측 지진동 분포. 시추공 관측소의 관측 지진동은 파란 색 원으로 표시되어있다. 여러 색의 곡선들은 각 한반도 GMPE 평균 예측치를 의미한다.

추계학적 유한단층 지진동 모사법은 발생 지진에 대한 진원, 경로 및 부지 관련 지진학적 변수를 이용하여 진원으로부터 관측점에서 도달하는 지진동을 계산한다[4]. 부지 변수의 경우 부지의 고주파 스펙트럼 감쇄 상수인 κ_0 를 이용하여 부지 감쇄효과를 고려하였다[5]. 한반도 상시지진관측망의 2003년부터 2019년까지의 지진자료를 이용하여 산정한 110개소 관측소의 κ_0 를 지진동 모사에 이용하였다. 전파경로 상에서 발생하는 지진동 감쇄와 지진동 지속시간에 따른 진폭감소를 고려하기 위해 기하학적 확산, 비탄성 감쇄 및 지진동 지속시간을 경로 변수

* 부경대학교 지구환경시스템과학부, 박사수료 (E-mail: 11196abs@gmail.com)

** 부경대학교 지구환경과학과, 교수 (E-mail: tskang@pknu.ac.kr)

*** 부경대학교 지질환경연구소, 전임연구원 (E-mail: yoonow@gmail.com)

로 사용한다. 이전 연구들에서 제안된 여러 경로 변수들로부터 8가지의 변수 조합을 구성하여 각 변수 조합에 따른 경주지진 지진동 모사 결과를 획득하였다.

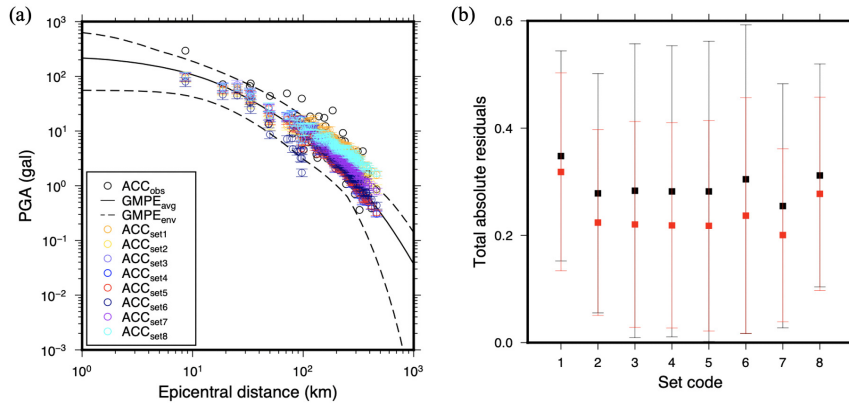


Fig. 2. (a) 2016 M_L 5.8 경주지진에 대한 관측 지진동 및 변수 조합에 따른 모사 지진동 분포. 검은 실선과 점선은 각각 비교에 사용된 한밤도 GMPE들의 평균값과 포락선을 의미한다. (b) 관측 지진동과 모사 지진동 간의 절대 로그 잔차. 사각형과 수직선은 각각 평균과 표준편차를 의미한다. 검은 색과 빨간 색은 부지효과 보정 전후에 따른 결과를 의미한다.

각 변수 조합을 이용하여 수행한 지진동 모사 결과를 관측 지진동과 비교하였다(Fig. 2). 관측 지진동과 모사 지진동 간의 잔차가 최소인 변수 조합을 확인하였으며, 부지응답 보정 후에 전체 평균 잔차가 감소하는 것을 확인하였다. 약 70-200 km 거리에서 모사 지진동과 GMPE보다 큰 관측 지진동이 확인되는데, 이는 모호면과 같은 반사면에서 발생한 반사파가 관측점에서 직접파와 동시도달하면서 나타난 보강간섭 효과를 모사에 사용된 경로 변수가 충분히 반영하지 못하는 것으로 파악된다[6]. 또한 근거리에서 확인되는 관측 및 모사 지진동 간의 큰 불일치는 100 gal 이상의 강한 지진동으로 인해 발생한 비선형적 부지효과에 의해 나타났을 가능성이 있다[3].

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다 (No.20201510100020).

참고 문헌

1. Nakamura, Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, 1989;30.1.
2. 기상청. 국가 강지진동 관측소 부지특성 연구 (Ⅲ). 2010.
3. Ghofrani, H.; & Atkinson, Gail M.; Goda, K. Implications of the 2011 M9. 0 Tohoku Japan earthquake for the treatment of site effects in large earthquakes. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2013; 11.1:171-203.
4. Boore, David M. Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure and applied geophysics*, 2003, 160.3: 635-676.
5. Anderson, John G.; & Hough, Susan E. A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1984, 74.5: 1969-1993.
6. Bugar, R. W.; Somerville, P. G.; Barker, J. S.; Herrmann, R. B.; & Helmberger, D. V. The effect of crustal structure on strong ground motion attenuation relations in eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1987, 77.2: 420-439.

한반도 남동부 제 4기 단층 지진재현모델 추정을 위한 단층지진원의 지진발생율 산정

Estimating seismic recurrence rate of fault seismic source for presumption of the earthquake recurrence model of the quaternary faults in SE Korea

박제찬*1)
Park, Jechan

한신애*
Han, Sinae

임성빈*
Lim, Sung-bin

유현재**
Yoo, Hyeun Jae

단층지진원의 지진발생율은 발생지진의 규모 및 공간적 범위가 한정적이고, 면적지진원에 비해 관련 지진기록이 부족하기 때문에 지질조사를 통해 획득된 단층 정보 및 고지진학적 증거로부터 산정한다. 획득된 지질정보 및 고지진학적 증거를 토대로 단층지진원의 재현주기 확률분포를 구하는 방법은 두 가지이며, 하나는 고지진학적 증거와 지진재현모델(earthquake recurrence model)을 활용하는 방법이고, 다른 하나는 단층의 모멘트 평형(moment balancing) 이론과 논리수목(logic-tree)을 활용하는 방법이다. 하지만 국내에서는 단층들의 주기적 특성을 밝히기 위한 연구의 부재와 고지진자료의 부족으로 단층지진원의 지진발생율 산정을 위해 지진재현모델(포아송 및 리뉴얼 모델)을 활용하는 방법은 제한된다. 따라서 이번 연구에서는 최근 조사되고 있는 한반도 남동부 단층조사를 통해 획득된 여러 지질정보를 토대로 모멘트 평형 이론을 활용하여 지진발생율을 산정하고, 계산된 지진발생율을 적용하여 각 단층에 적합한 지진재현모델을 추정함으로써 각 단층의 주기적 특성을 확인하고자 한다.

이 연구를 위해 최근 국내에서 진행되고있는 단층조사의 논문 및 보고서를 통해 한반도 남동부 제 4기 단층(Fig. 1)의 단층면위율, 발생가능 규모, 고지진활동 횟수 및 연대에 대한 정보 등을 획득하였다. 또한, 단층지진원의 지진발생율은 모멘트평형 이론을 적용하여 산출하였다. 모멘트평형 이론을 활용하면 단층지진원에 축적되는 모멘트 총량(moment/year)을 특성지진(Characteristic earthquake)의 평균 모멘트 크기로 나누어줌으로써 해당 단층지진원의 지진발생율을 산정한다.

$$\text{지진발생율 } \lambda = \frac{\dot{M}_0}{\bar{M}_0} \begin{matrix} \nearrow \text{모멘트 총량(moment/year)} \\ \searrow \text{특성지진의 평균 모멘트 크기} \end{matrix}$$

단층지진원의 모멘트 총량은 단층조사에서 보고된 단층의 변위율(Slip rate)과 단층의 면적으로 계산되며, 한 단층에서의 지진모멘트 연간축적률은 지진원 비례공식을 시간에 대해 미분하여 계산할 수 있다. 또한, 특성지진의 평균 모멘트 크기는 단층지진원에 의해 발

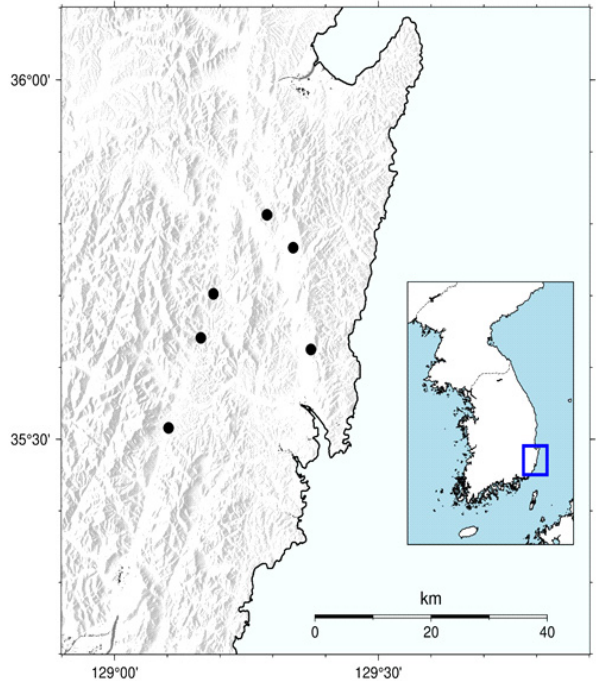


Fig. 1. 한반도 남동부 제 4기 단층 조사 지점

* 한국전력기술(주) (원)토건환경기술실 (E-mail: jcpark5062@kepc0-enc.com)

** 정희원, 부경대학교 환경·해양과학기술연구원 지질환경연구소, 전임연구원 (E-mail: yoonow@gmail.com)

생하는 특성지진의 평균 규모로부터 구할 수 있으며, 만약 단층이 모멘트 축적률과 방출률이 동일한 상태인 모멘트 평형상태를 유지한다고 가정한다면, 단층변위율로부터 지진발생율을 산정할 수 있게 된다. 또한, 단층의 면적 및 변위율을 이용해 모멘트의 연간집적률을 계산하고, 단층의 면적을 이용해 특성지진의 규모를 결정하여 특성지진에 의한 평균 모멘트 방출량을 계산하는 과정에서 단층 파라미터 및 모델 등 가정이 사용되며, 이러한 입력자료들은 어느 정도 불확실성을 내포하고 있어 논리수목을 구성하여 지진발생을 산정하였다.

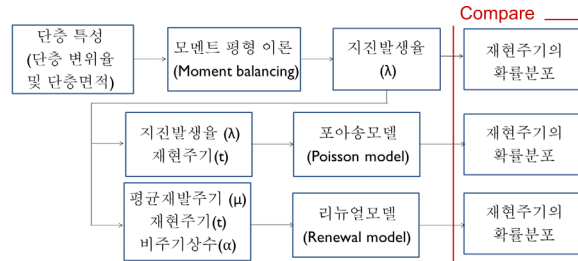


Fig. 2. 단층특성을 반영한 모멘트 평형이론으로 지진발생을 산정 및 재현주기의 확률분포 산정 절차도

한편, 각 단층의 주기적 특성 파악을 위해 모멘트 평형 방법으로 산정된 지진발생율과 평균 재현주기 및 임의의 비주기상수($\alpha=0.5 \sim 2.0$)을 활용하여 지진재현모델인 포아송 및 리뉴얼 모델의 재현주기의 확률분포를 구현하였고, 그 결과를 모멘트평형 이론으로부터 산정된 각 단층의 재현주기의 확률분포와 비교하였다(Fig 3).

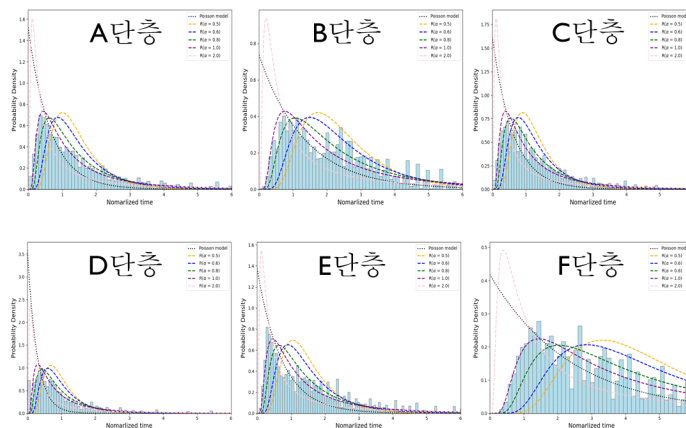


Fig. 3. 모멘트 평형이론을 통한 지진발생 재현주기 확률분포 및 지진재현모델 비교(6개 단층분절)

모멘트 평형이론 및 지진재현모델로부터 산정된 A~F단층의 재현주기 확률분포를 비교한 결과, A~F 단층은 모두 비주기상수가 1.0인 리뉴얼모델의 확률분포와 일치함을 보였으며, 이는 한반도 동남부에 위치한 A~F 단층은 주기적으로 발생할 가능성이 높다는 것을 의미한다. 비주기 상수가 높을수록 주기성이 다소 감소되고 포아송 모델과 가까울수록 무작위적 특성을 보인다는 점을 고려하면, 비주기상수 1.0 리뉴얼모델과 일치한 A~F 단층의 경우 비교적 약한 주기성을 가지는 것으로 예상할 수 있다. 향후 비주기상수 1.0 리뉴얼모델의 지진재현모델에 해당하는 단층의 주기성을 확인하고, 확률론적 지진재해도 분석에서 지진발생을 산정에 활용 가능하다.

참고 문헌

1. Working Group On California Earthquake Probabilities, 2003, Earthquake Probabilities in the San Francisco Bay Region: 2002-2031, Open-File Report 03-214.

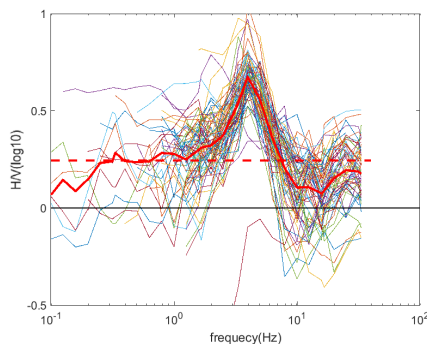
주파수 특성을 이용한 국내 지진관측소의 부지분류

Site Classification of Seismic Stations based on the Site Fundamental Frequency

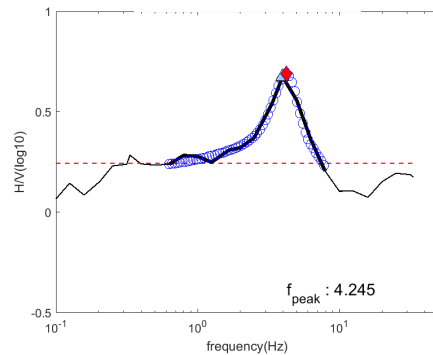
최세운*1) 박동희** 홍성일*** 한아림***
 Choi, Saewoon Park, Donghee Hong, Soungel Han, Arim

지반운동을 예측하는데 있어서 지진원의 특성과 지진파전달특성 외에 주된 요소로 고려되는 것이 지반특성에 의한 부지효과(site effect)이다. 부지효과에 영향을 주는 다양한 요소들 중에 많은 영향을 주는 인자가 지반의 전단파 속도라고 할 수 있으며, 특히 하부 30m 깊이까지의 평균 전단파 속도인 V_{S30} 이 대표적으로 활용되어져 왔다. 다만, shakemap과 같이 광범위한 지역에 대한 지진동을 예측할 경우에는 지점별로의 전단파속도를 직접적으로 취득하는데 한계가 있기 때문에, 지형, 고도, 암종, 지반의 고유진동수 등의 대리변수(proxy variable)를 통해서 V_{S30} 을 추정하여 적용하기도 한다.

본 연구에서는 국내 지진관측소의 지진동 자료를 이용하여 관측소 부지 하부 지반의 고유진동수를 평가하고, 이를 지진관측소에서 조사된 바 있는 V_{S30} 자료들과 비교하여 지반 고유진동수와 V_{S30} 간의 관계식을 유도한 후 관계식을 이용하여 지진관측소 부지에 대한 지반분류를 수행하였다. 지진관측소 지반의 고유진동수는 Hassani and Atkinson(2016)이 제안한 절차를 적용하여 관측된 지진동에 대한 스펙트럴 가속도의 수평-수직비를 계산한 후 f_{peak} (site fundamental frequency)를 결정하여 평가하였다[1]. Fig. 1은 지진관측소 지반의 f_{peak} 를 산정하는 과정을 나타내는 것으로 합천 지진관측소(관측소코드 : HAC)에 대한 예시를 보여준다.



(a) Spectral H/V ratio for the HAC station

(b) Calculated f_{peak} for the HAC stationFig. 1. Determination of the f_{peak} value using the method proposed by Hassani and Atkinson(2016)

지진관측소는 기상청(KMA)에서 운영 중인 관측소를 대상으로 하였으며, 관측소별 지반의 f_{peak} 를 평가하기 위한 지진동 자료는 2003년부터 2017년까지 한반도 및 인근 지역에서 발생한 규모 3.0이상의 지진에 대한 속도 및 가속도 계측자료가 사용되었다. 시추공 관측소와 f_{peak} 가 나타나지 않는 관측소를 제외하고 총 67개소에 대하여 지반의 f_{peak} 를 취득하였다. 지반의 f_{peak} 와 V_{S30} 의 관계식을 유도하기 위한 V_{S30} 자료는 ‘한반도 시나리오 지진에 대한 ShakeMap database 연구(2015)’에서 58개 기상청 관측소에 대해 다운홀 시험과 다중채

* 정희원-한국수력원자력 중앙연구원, 선임연구원 (E-mail: choisewoon@khnp.co.kr)

** 정희원-한국수력원자력 중앙연구원, 책임연구원 (E-mail: donghee94@khnp.co.kr)

*** 한국수력원자력 중앙연구원, 선임보안연구원 (E-mail: hong0604@khnp.co.kr)

**** 한국수력원자력 중앙연구원, 일반연구원 (E-mail: arimh0523@khnp.co.kr)

널 표면과 탐사(MASW)을 수행하여 도출한 V_{S30} 값을 사용하였다[2]. 58개 기상청 관측소 중 시추공 관측소 등을 제외하고 f_{peak} 이 나타나는 20개 관측소를 이용하여 f_{peak} 와 V_{S30} 을 Fig. 2에 비교하였다. 선형 회귀분석을 통해 f_{peak} 와 V_{S30} 에 대한 관계식을 유도하였으며, 다른 지역과의 경향성을 비교하기 위하여 미국의 중동부(CENA) 및 서부지역(NGA-West2)에 대한 관계식을 함께 도시하였다. 2Hz 이상의 f_{peak} 을 갖는 국내 지진관측소 지반에서 V_{S30} 값의 경향성은 미국 서부지역보다는 중동부 지역과 유사한 경향을 보여주었다. 유도된 관계식을 통해 f_{peak} 이 나타나는 국내 지진관측소에 대하여 V_{S30} 을 추정하고 건축구조기준(Korea Building Code, KBC)에 따른 지반종류를 분류하였다. KBC 2016의 경우, 보통암의 위치가 지반 분류의 기준면으로부터 5m 이상 30m 이하인 경우, 보통암까지의 지반 특성을 통해 분류하게 되어 있으나, 본 연구에서는 기존 연구에서 도출된 V_{S30} 값을 평균 전단파속도로 적용하였다. 지반분류 결과, 지진관측소 총 67개소 중에서 S_A 지반에 해당하는 관측소는 없었고, S_B , S_C , S_D , S_E 지반이 각각 14개소, 43개소, 9개소, 1개소로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20171510101960)

참고 문헌

1. Hassani B., Atkinson G. M. Applicability of the Site Fundamental Frequency as a V_{S30} Proxy for Central and Eastern North America. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2016 April; 106(2): 653-664
2. 기상청. 한반도 시나리오 지진에 대한 ShakeMap database 구축 기반 연구. 2015.

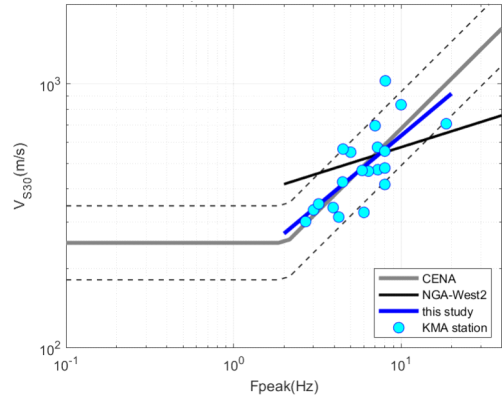
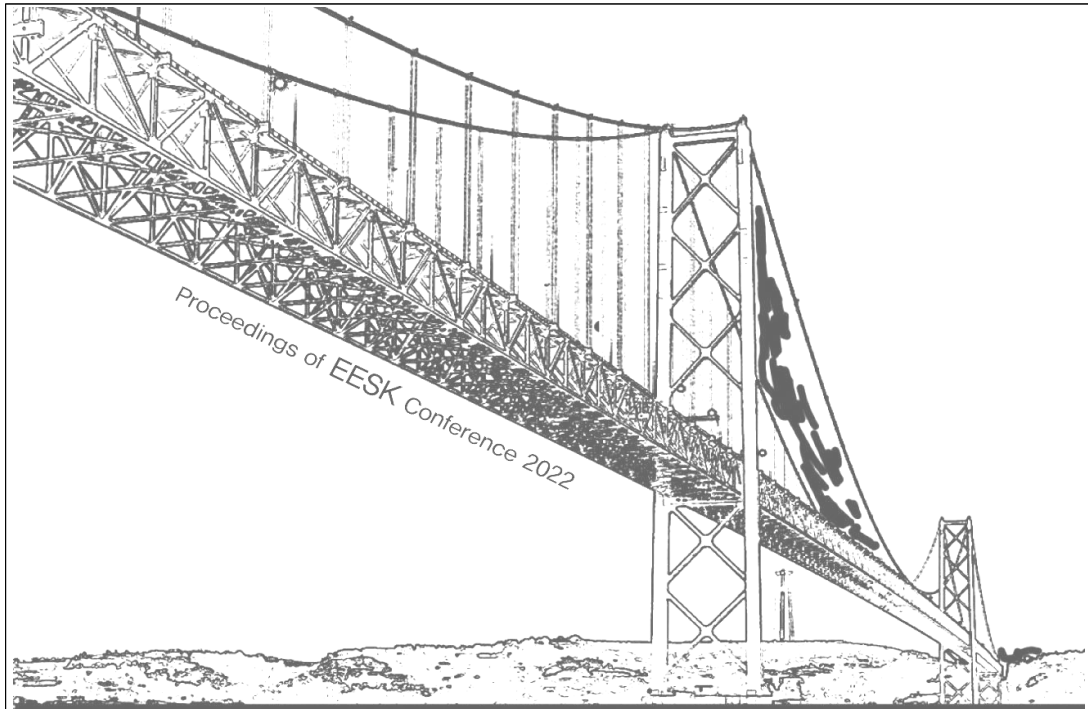


Fig. 2. Measured V_{S30} values for the KMA stations with the f_{peak} - V_{S30} models



포항 지진과 지진 방재 정책

지진 발생시 도로망 용량감소로 인한 교통운영분석 기법에 관한 연구

Traffic operation analysis of roadway capacity loss from earthquakes

서원호*1)
Suh, Wonho조중민**
Cho, Joongmin장선희***
Jang, Sunhee김성하****
Kim, Sung Ha이채린*****
Lee, ChaeRin

도로망을 구성하는 요소 중 하나인 교량은 지진에 취약한 특성을 가지고 있다. 지진이 발생하여 교량에 구조적인 손상이 발생하는 경우 도로용량의 감소 및 도로망의 단절이 발생할 수 있다. 지진과 같은 재난·재해 발생 시 도로망에 미치는 영향에 대한 다양한 연구가 진행되었다. 구조적인 측면에서 교량의 손상 정도에 따른 교통망 기능 저하에 대한 연구 및 교통공학 측면에서 지진 발생시 우회도로 선정, 피해지역 대피시간 등에 대한 연구가 진행되었다. 다만, 기존 연구들에서는 지진으로 인한 구조적인 측면에서 교량의 손상 정도를 구분하고, 이를 단순히 통과가능 교통량으로 환산하여 분석하여서, 구조적인 측면에서 교량 손상 정도에 따라 교통공학적인 측면에서 교량을 포함한 도로구간의 용량감소 정도를 차별적으로 분석한 연구는 미비하였다.

본 연구에서는 구조적인 측면에서 지진으로 인한 교량의 손상 정도를 교통용량에 미치는 영향을 차등하여 적용하고, 전체 교통망을 분석하였다. 교량의 손상정도에 따라 교통공학 측면에서 통행가능 차로수 제한, 제한속도의 하향 등을 적용하여, 교통운영측면에서의 영향을 분석하였다. 구체적으로 지진 발생 시 각 교량의 파손 정도를 No Damage, Minor Damage, Moderate Damage, Major Damage의 4단계로 구분하여 각 피해 정도에 따른 제한속도와 통행가능 차로 수를 순차적으로 감소하여 시나리오를 구성하였다. 지진에 따른 교통망의 영향을 분석하기 위하여 네 가지 시나리오를 거시적 교통분석 프로그램인 EMM4를 이용하여 통행속도와 통행시간 및 통행량을 비교·분석하였다.

본 연구에서는 한국교통연구원에서 배포한 국가교통데이터베이스를 수정하여 활용하였다. 네트워크는 ‘대구광역시권 장래도로반영링크’ 자료를 기반하였으며, 대구광역시권 기종점 통행교통량을 적용하였다.

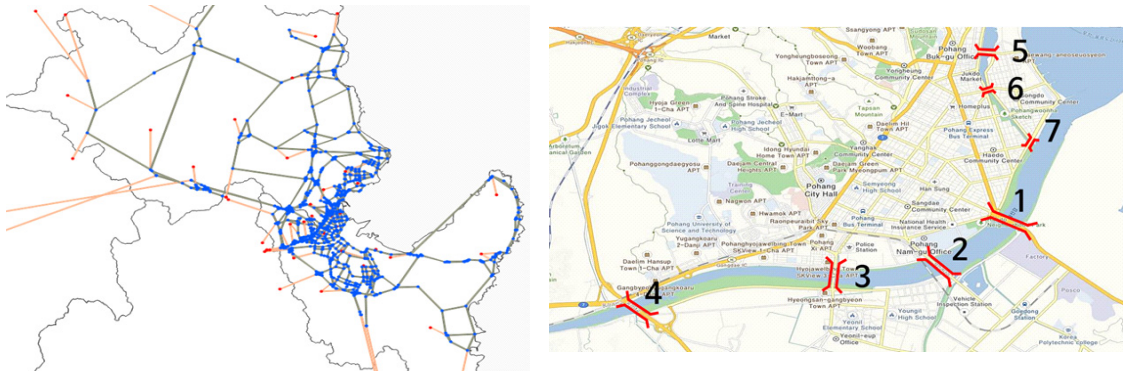


Fig. 1. 분석 네트워크 (a) EMM4 프로그램에 구현된 도로교통망, (b) 네트워크 중 분석 대상 교량 [1]

* 정회원.한양대학교 ERICA캠퍼스 교통물류공학과, 부교수 (E-mail: wonhosuh@hanyang.ac.kr)

** 한양대학교 스마트시티공학과, 석사과정 (E-mail: heecs123@hanyang.ac.kr)

*** 한양대학교 스마트시티공학과, 석사과정 (E-mail: zz5516685@hanyang.ac.kr)

**** 한양대학교 스마트시티공학과, 석사과정 (E-mail: mick2016hy@hanyang.ac.kr)

***** 한양대학교 스마트시티공학과, 석사과정 (E-mail: crlee98@hanyang.ac.kr)

Damage states	Description	Number of Lanes Open to Traffic			Speed Limit		
No Damage	-	10	6	5	80	60	40
Minor Damage	Any column experiencing minor cracking	8	4	2	60	40	30
Moderate Damage	Any column experiencing moderate cracking	4	2	2	40	20	20
Major Damage	Any column degrading without collapse	2	2	2	20	10	10

Table 1. 시나리오별 통행가능 차로수와 제한속도 [1]

분석결과 교량의 평균통행속도는 모든 교량에 대해서 현저히 감소하는 것을 확인하였다. 다만, 교통량은 교량의 피해정도에 따라 다르기는 하지만, 일부 증가하는 교량과 감소하는 교량이 확인되었다. 예를 들어, 1번 교량에서 상당한 교통량이 주변 교량으로 전환되는 것을 확인하였다. 6번 교량 7번 교량의 경우 통행량이 현저히 감소하였는데, 이는 교량의 교통용량 감소로 인하여 교통량이 주변 대안 경로를 이용한 것으로 분석되었다. 본 분석을 통하여 지진 발생시 교량의 피해정도에 따라 교통량이 전환되는 양상에 차이가 존재하는 것으로 분석되었다. 이는 지진 발생시 통과교통량을 담당하는 교량의 위상이 달라지는 것으로서, 지진 발생시 교량의 피해정도에 따라 교량의 처리교통용량에 미치는 영향을 제시한다고 판단된다.

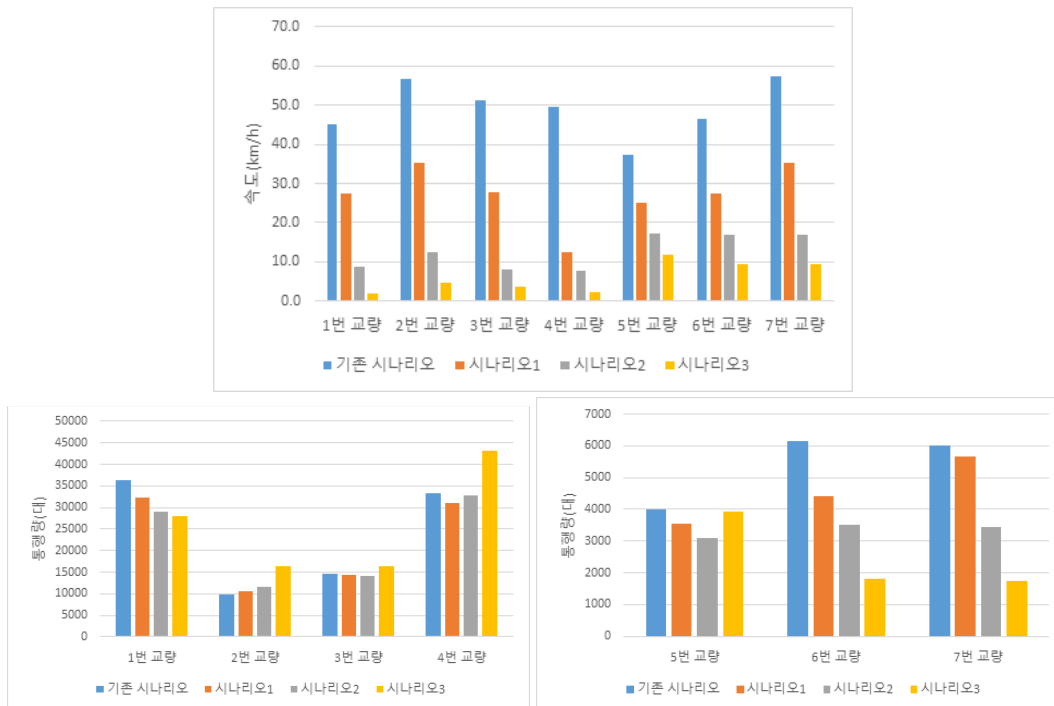


Fig. 2. 시나리오별 교량 비교 (a) 교량별 평균통행속도, (b) (c) 교량별 통과 교통량

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 지원으로 수행되었음(과제번호 NRF-2020R1A2C1011060).

참고 문헌

1. Cho, J., Y. Lee, S. M. Lee, K. H. Song, and W. Suh (2021) "Analysis of Macroscopic Traffic Network Impacted by Structural Damage to Bridges from Earthquakes" Applied Sciences 11, no. 7: 3226.

도로망의 내진 성능을 고려한 교량의 최적 복구 계획 수립 기법 개발

Development of methodology for the establishment of optimal bridge recovery strategies based seismic performance of transportation network

윤성식*1)
Yoon, Sungsik

김민선**
Kim, Minsun

이영주***
Lee, Young-Joo

지진 발생 후 도로망을 구성하는 교량의 손상평가 및 복구순서에 대한 계획 수립은 중요하며, 이는 지진 발생 후 교량의 손상으로 인해 발생하는 도로 정체를 최소화해야 피해 지역에 복구자원과 공공지원품의 보급을 원활히 할 수 있기 때문이다. 하지만 일반적으로 지진 피해 지역 내 도로망에 포함된 교량은 많고 그 종류는 다양하지만, 복구에 할당된 예산은 제한적이기 때문에, 어떤 교량을 우선하여 복구할 것인가에 대한 효율적인 의사결정 기법이 필요하다[1].

이에 본 연구에서는 지진 발생으로 인해 손상된 교량의 최적 복구순서를 결정하기 위한 의사결정기법을 제안한다. 제안 기법은 크게 세 개의 해석이 서로 연동해 수행되는 과정을 거치게 된다. 먼저 도로망의 성능해석 단계에서 성능을 평가하기 위한 지표로 총 시스템 이동 시간(total system travel time, TSTT)을 채택하였으며, 인공 신경망을 기반으로 한 대리모델(surrogate model)을 사용해 TSTT를 평가한다. 이는 기존 기법과 달리 반복되는 해석으로 인해 급격히 커지는 도로망 성능해석 시간을 줄이는 역할을 한다. 그리고 이익-비용 지표를 기반으로 한 민감도 해석이 수행되는데, 이는 회복 해석 단계에 해당한다. 그 과정에서 각 교량의 이익-비용 중요도 지표(benefit-cost importance measure)를 이용해 각 교량의 직·간접적인 손상비로 계산한다. 회복 해석을 통해 각 교량의 수리 비용을 반영해 교량의 회복 우선순위를 결정하도록 하며, 이는 선행 연구 Lee et al. (2011)에서 사용한 중요도 지표와 차별화된다 [2]. 앞서 두 해석 과정에서 얻어진 결과를 토대로 마지막 해석 단계에서는 지진 회복 곡선을 도출하며, 총 손상 비용에 대해 계산한다. 결과적으로는 이러한 세 해석을 통해 지진 발생 후 최적의 복구 계획을 수립하도록 하며, 이는 도로망의 내진 성능을 고려해 교량의 복구 우선순위를 결정할 수 있도록 해준다.

제안 기법의 검증에 위해 수치해석 예제에 적용하였으며, 적용 예제는 국내에 있는 포항지역의 실제 도로망을 바탕으로 구성하였다. 대상 도로망은 Fig. 1에 보여진 바와 같이 총 1,440개의 노드와 3,490개의 링크, 48개의 교량으로 구성된 도로망으로, 지리정보시스템(GIS)를 활용해 재구축하였다. 인공 신경망을 기반으로 한 대리모델은 과거에 실제 발생한 지진의 진원지를 바탕으로 생성한 데이터를 훈련 데이터로 사용해 구축하였으며, 이를 활용해 교량의 복구율에 따른 도로망의 총 시스템 이동 시간을 평가하였다. 또한, 이익-비용 지표를 기반으로 한 민감도 해석을 48개 교량 전체에 대해 수행하였다.

그 결과 다양한 규모의 지진에 관한 최적의 복구 우선순위 결과를 도출할 수 있었으며, Fig. 2는 그 중 규모 7.0 지진이 발생하였을 때 교량 구조물의 손상상태에 대한 공간적 분포결과를 보여준다. 제안 기법은 지진에

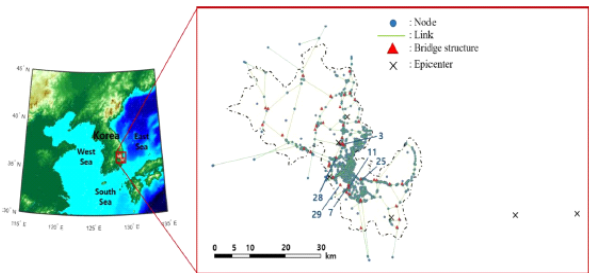


Fig. 1. 수치해석 예제 대상 도로망 [1]

* 정회원-울산과학기술원 도시환경공학과, 박사후연구원 (E-mail: yss3366@unist.ac.kr)

** 학생회원-울산과학기술원 도시환경공학과, 석박통합과정 (E-mail: minsun741@unist.ac.kr)

*** 울산과학기술원 도시환경공학과, 부교수 (E-mail: ylee@unist.ac.kr)

의해 손상된 교량들의 손상정도를 공간적으로 잘 보여주며, 본 연구에서 제안하는 이익-비용 중요도 지표를 이용해 회복 계획을 세우면, 기존에 제안되었던 TSTT increment factor(TIF)를 활용했을 때보다 시간이 지남에 따라 손상 수준이 더 낮은 것을 확인할 수 있다.

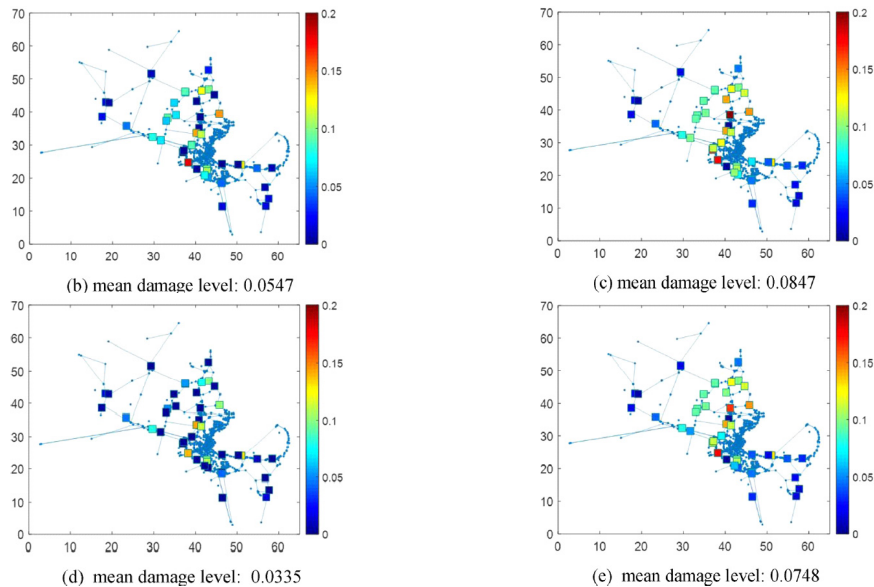


Fig. 2. 규모 7.0에서의 교량 손상상태 (a) 이익-비용 중요도 지표를 이용해 회복 계획을 수립한 경우(230일 이후), (b) TIF를 이용해 회복 계획을 수립한 경우(230일 이후), (c) 이익-비용 중요도 지표를 이용해 회복 계획을 수립한 경우(460일 이후), (d) TIF를 이용해 회복 계획을 수립한 경우(460일 이후). [1]

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 22RMPP-C163162-02).

참고 문헌

1. Yoon, S., Suh, W., & Lee, Y. J. (2021). Optimal decision making in post-hazard bridge recovery strategies for transportation networks after seismic events. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 2629-2653.
2. Lee, Y. J., Song, J., Gardoni, P., & Lim, H. W. (2011). Post-hazard flow capacity of bridge transportation network considering structural deterioration of bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*, 7(7-8), 509-521.

2017 포항지진이 지역상권에 미친 시·공간적 영향

The Spatial and Temporal effects of 2017 Pohang Earthquake on the Local Commercial districts

김정섭*1)
Kim, Jeongseob

서정석**
Seo, Jungseok

2017년에 발생한 포항 지진으로 인해 실제 주택 또는 상가건물에 직접적인 물리적 피해가 발생하였다. 이에 사람들이 대피소로 이동하거나 상가점포 운영이 제한되고 다른 지역에서 유입되는 관광인구가 줄어들어 소비심리가 감소하고 지역상권이 침체되는 현상이 발생하였다. 그러나 회복 탄력성(resilience) 관점에서 2017 포항 지진으로 인한 지역상권의 침체 정도와 회복속도가 지역의 공간적 특성에 따라 어떻게 다른지 실증분석은 거의 진행되지 않은 실정이다[3, 4, 8]

상권의 개념적 정의는 점포의 공간적 분포와 구매자의 소비 활동이 상호작용하는 지리적 공간이다[1, 7]. 즉, 상권의 물리적 특성에 따라 소비자와의 상호작용 등이 상이하게 나타날 수 있음을 시사한다. 특히, 제인 제이콥스(Jane Jacobs)는 그녀의 저서 「The Death and Life of Great American Cities」에서 도시의 물리적 다양성이 도시의 활력을 증진하기 위한 중요한 요인이라고 언급하였다. 예를 들어, 다양한 점포가 입점한 상권의 경우 비교 쇼핑(Comparison shopping) 이점으로 인해 더 많은 소비자를 유도할 수 있으므로 점포의 다양성은 상권 활력에 긍정적인 영향을 미친다고 볼 수 있다. 도시경제학의 집적경제(agglomeration economics)이론 관점에서도 다양성이 상권의 가로 활성화 또는 매출액에 미치는 영향은 많은 관심을 받아왔다[1, 2]. 그러나 다양성뿐 아니라 어떤 상권의 특징이 상권의 회복탄력성(retail resilience)에 영향을 미치는지에 관한 연구는 아직 초기 단계이다. 따라서 Fig. 1과 같이 도시계획적 요소와 상권 내 점포 특성을 구분하여 지진과 같은 외부충격에 더 빠르게 회복시키는 데 긍정적인 영향을 미치는지 살펴볼 필요가 있다.

본 연구에서는 음식점 및 주점업 창·폐업 자료를 활용하여 2017 포항 지진 이후 지역상권의 침체 정도와 회복 속도가 상권유형별로 어떤 특징을 가지는지 살펴보고자 한다. 분석 결과, 2017 포항 지진 발생이 상권에 미친 영향은 창업보다 폐업에 더 유의미하게 부정적인 것으로 나타났으며 그 영향은 약 1년간

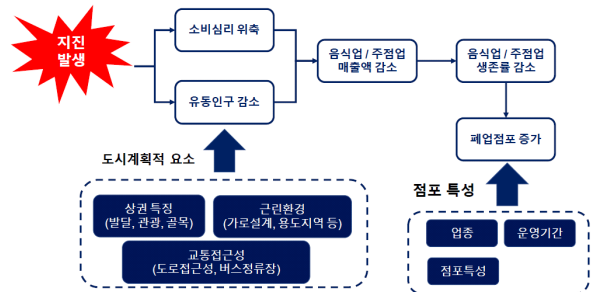
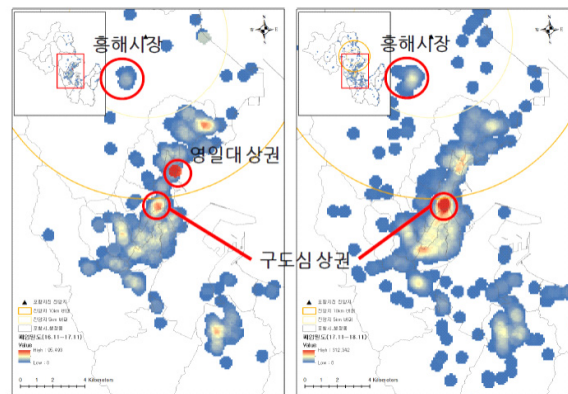


Fig. 1. Conceptual Framework



Before Earthquake (16.11~17.11) After Earthquake (17.11~18.11)
Fig. 2. The Closure Spatial Trends of Food & Alcohol Shops before & after 2017 Pohang Earthquake

* ?회원·울산과학기술원 도시환경공학과, 교수 (E-mail: jskim14@unist.ac.kr)

** ?회원·울산과학기술원 도시환경공학과, 박사과정 (E-mail: tjwjdtr12@unist.ac.kr)

지속되었던 것으로 나타났다. 특히 Fig. 2와 같이 진양지 인근 상권뿐 아니라 포항시 전반적으로 폐업건수가 증가한 것으로 미루어보아 지진으로 인한 물리적 타격보다는 소비심리 침체에 따른 폐업 증가가 더 큰 요인인 것으로 해석된다.

한편, Arcmap의 대표적인 군집분석 중 하나인 “Cluster and Outlier” 분석을 통해 포항시 지역 상권을 분류한 결과 Fig. 2와 같이 1개의 발달상권과, 3개의 관광상권 그리고 5개의 지역상권으로 분류되었다. 지역상권 중 하나인 흥해시장과 칠포해수욕장 인근 관광상권은 진양지 반경 5km 이내 위치해 있고, 10km 반경 내에는 구도심 상권(발달상권) 등이 위치해 있는 것으로 나타났다. 상권유형별로 Kaplan-Meier 생존 분석(Survival Analysis)을 수행한 결과는 Fig. 4와 같다. 지진 발생 전 폐업율은 최대 약 60%였지만 지진 발생 후 폐업율은 약 75%까지 상승하였다. 또한, 지진발생 직후 해안가 일대에 형성되어 있는 관광상권 폐업율이 단기간에 약 25%까지 비교적 가파르게 상승하는 것으로 나타났다.

본 연구결과는 2017 포항 지진을 사례로 재난 발생이 상권 내 주요 업종에 해당하는 음식점과 주점업의 생존률에 미친 영향을 시·공간적으로 이해하는데 기여하였다. 추후 연구를 통해 상권의 공간적 특성 및 점포의 특성에 따라 재난에 회복탄력적인 상권의 특징을 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

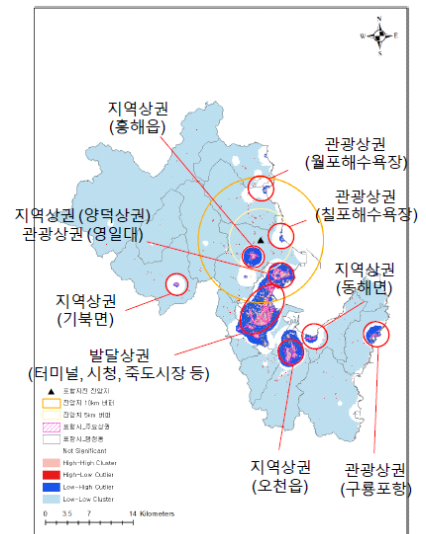


Fig. 3. Major Commercial District in Study area

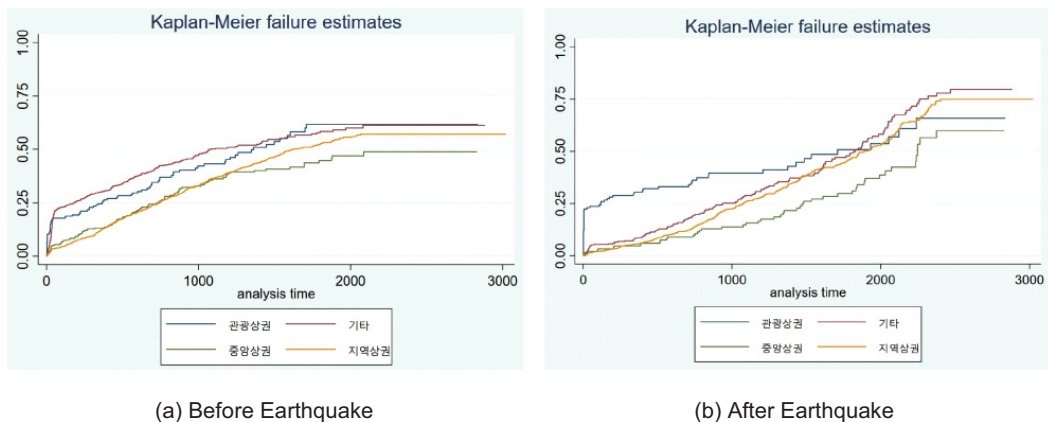


Fig. 4. The results of Survival analysis of food & alcohol stores before & after 2017 Pohang Earthquake

감사의 글

이 연구는 행정안전부 극한재난대응기반기술개발 사업의 지원을 받아 수행되었습니다(2020-MOIS31-013). 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김현철·안영수 (2019). "상점 밀도와 업종 다양성을 이용한 서울시 골목상권의 동태적 변화 모니터링 연구." 서울시연구, 20(4): 149~170.
2. 채희원·신정엽. (2015). "수도권 도시 공간의 사회적 다양성 변화 탐색." 한국지리학회지, 4(1): 139~154.
3. Brown, N. A., Rovins, J. E., Feldmann-Jensen, S., Orchiston, C., & Johnston, D. (2017). Exploring disaster resilience within the hotel sector: A systematic review of literature. *Int J Disaster Risk Reduct*, 22, 362-370.
4. Hall, M. C., Prayag, G., Fieger, P., & Dyason, D. (2020). Beyond panic buying: consumption displacement and COVID-19. *Journal of Service Management*, 32(1), 113-128.
5. Kaplan, E. L., Meier P., (1958). "Nonparametric estimation from incomplete observations". *Journal of the American Statistical Association*, 53, 457-481.
6. Kickert, C. (2021). What's in store: prospects and challenges for American street-level commerce. *Journal of Urban Design*, 26(2), 159-177.
7. Peterson, R. A., 1974, "Trade Area Analysis Using Trend Surface Mapping", *Journal of Marketing Research*, 11(3): 338~342.
8. Rose, A., & Krausmann, E. (2013). An economic framework for the development of a resilience index for business recovery. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 5, 73-83.

2017 포항 지진 경험이 대비행위에 미친 영향 분석

Analysis of the impact of the 2017 Pohang earthquake experience on preparedness behavior

장상훈*1) 김청일** 정지범***
Jang, Sanghoon Kim, Cheongil Chung, Ji-bum

2017년 11월 15일 포항지진은 우리나라도 더 이상 지진 안전지대가 아님을 잘 보여주었다. 포항지진 이후 정부는 ‘지진 국민행동요령’을 개정 및 배포하고, 평소 개인이 지진 대비행동요령을 숙지하도록 함으로써 지진피해 위험을 최소화하고자 하였다. 일반적으로 대비행동은 재난대비(Emergency preparedness), 비구조적 예방(nonstructural mitigation), 구조적 예방(structural mitigation)으로[1] 구분할 수 있다. 이 연구는 개인의 지진 대비 정도를 확인할 수 있는 7가지 지진 대비 현황 체크리스트에 관한 설문데이터를 활용하여 개인의 지진 대비 행동에 영향을 주는 변수를 도출함으로써 지진 경험과 대비행동에 관한 학술적·정책적 담론에 기여하고자 한다.

중규모(moderate scale) 지진 경험과 대비행동에 관한 기존 연구에서는 지진에 대한 경험이 지진 대비행동이나 의지를 일시적으로 증가시킬 뿐 시간이 지남에 따라 직접적인 경험의 영향이 감소하거나, 정상화(normalization)로 인한 낙관적 편향(optimistic bias)이 발생한다고 주장한다[2]. 특히 Moon et al.(2019)에서는 포항지진과 같은 중규모 지진 경험 상황에서 실제 피해가 발생하지 않는다면 정상화 편향(normalcy bias)을 발생시켜 지진 대비행동이나 의지를 감소시킨다고 하였다. 이러한 대비행동은 지진 경험뿐만 아니라 위험인식, 재난대비 지식, 성별, 나이, 교육 수준, 임금 등의 사회인구학적 요인의 영향을 받는다[4, 5].

이 연구에서는 지진 발생 바로 다음 해인 2018년과 지진 발생 3년 후인 2020년 포항시 및 전국의 거주자(19세 이상)를 대상으로 한 설문조사 데이터를 활용하였다. 전국을 직접경험지역과 간접경험지역으로 나누어 동일한 지진 경험에 대한 개인 대비행동이 시간에 따라 어떻게 변하는지 확인하였다. 포항시 설문대상자는 지진을 직접 경험한 사람들로서 지진이 발생한 시점에 진원지와 가까운 곳(25km 이내)에서 지진을 경험했고, 이로 인해 실제 피해를 입은 사람들이다. 전국 설문대상자의 경우 지진을 간접 경험한 사람들로서 진원지에서 상대적으로 먼 곳에 위치하여 실제 피해를 입지 않은 사람들이 대부분이었다.

포항의 대비점수 평균은 2018년 2.5점(표준편차 1.86)에서 2020년 4.76점(표준편차 2.00)으로 크게 증가하였다. 반면 전국의 대비점수 평균은 2018년 2.59점(표준편차 1.96)에서 2.97점(표준편차 2.19)으로 약간 증가하는데 그쳤다. 지진 대비행동에 대한 회귀분석 결과, 포항 주민의 대비행동은 설문조사시기(지진 경험 여부), 두려움, 자녀유무의 영향을 받은 것으로 나타났다(표 1). 전국의 개인 대비행동은 회귀가능성, 설문조사 시기, 정부의 책임, 두려움, 자녀유무 등의 영향을 받은 것으로 나타났다(표 2). 포항과 전국의 응답자를 모두 포함한 종합적 회귀분석 결과, 설문조사 시기, 직접 경험 여부와 두려움 등이 개인 대비행동에 가장 큰 영향을 준다는 것을 확인했다(표 3). 지진 직접경험 지역인 포항의 응답자들의 경우, 지진 발생 3년 후인 2020년에 지진 직후인 2018년보다 더 높은 수준의 개인 대비행동을 하는 것으로 나타났다. 이는 지진의 직접적 피해를 경험한 사람들이 그 경험으로 인해 지진대비를 더 잘했다는 사실을 증명한다. 간접경험지역의 응답자들 역시 개인 대비행동이 증가한 것으로 나타났으나 포항의 응답자(0.277)들의 설명력에 비하여 뚜렷하게 낮은 설명력(0.056)을 보이고 있어, 간접적 지진 경험의 경우에는 재난대비 증진 효과가 낮은 것으로 나타났다.

* 울산과학기술원 박사과정 (E-mail: jsh4319@unist.ac.kr)

** 울산과학기술원 박사후연구원 (E-mail: kblue1@unist.ac.kr)

*** 정회원-울산과학기술원 도시환경공학부, 교수 (E-mail: learning@unist.ac.kr)

Table 1. 지진대비 다중회귀분석(포항)

포항	model1	model2	model3	model4
거리	0.030	0.043	0.061 .	0.027
MMI	-0.035	-0.076 *	-0.072 *	-0.034
지원금신청	0.121 ***	0.122 ***	0.121 ***	0.047
두려움		0.209 ***	0.214 ***	0.141 ***
발생가능성		-0.034	-0.023	0.001
예상피해규모		-0.004	-0.008	-0.014
성별			-0.008	0.003
고등학교졸업이하			-0.071 *	-0.046
대학원졸업			0.086 **	-0.004
자녀유무			0.049	0.088 **
설문조사시기				0.488 ***
Adjusted R-squared	0.010	0.047	0.163	0.277
p-value	0.005	0.000	< 2.2e-16	< 2.2e-16

Table 2. 지진대비 다중회귀분석(전국)

전국	model1	model2	model3
거리	-0.039 .	-0.038 .	-0.037 .
두려움	0.086 ***	0.077 ***	0.081 ***
익숙함	-0.059 **	-0.055 *	-0.063 **
회피가능성	-0.154 ***	-0.153 ***	-0.144 ***
정부의책임	0.071 **	0.068 **	0.114 ***
성별		0.028	0.024
고등학교졸업이하		-0.029	-0.030
대학원졸업		-0.011	-0.003
자녀유무		0.063 **	0.067 **
설문조사시기			0.128 ***
Adjusted R-squared	0.040	0.043	0.056
p-value	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16

Table 3. 지진대비 다중회귀분석(통합)

전체	model1	model2	model3	model4
거리	-0.117 ***	-0.122 ***	-0.177 ***	-0.017
두려움	0.122 ***	0.113 ***	0.121 ***	0.116 ***
성별		0.021	0.021	0.023
고등학교졸업이하		-0.034 ***	-0.026	-0.034 *
대학원졸업		0.008 ***	0.012 *	0.012 ***
자녀유무		0.067 ***	0.080 ***	0.079 ***
설문조사시기			0.244 ***	0.250 ***
직접경험지역				0.183 ***
Adjusted R-squared	0.035	0.060	0.096	0.104
p-value	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16

직접경험지역인 포항시에서 대비행동이 더 높게 상승한 이유는 두려움을 크게 느낀 개인일수록 지진에 대한 대비를 더 잘하는 경향이 있으며[6], 실제 피해에 따라 자신의 삶에 큰 변화를 경험한 사람들이 더 대비를 잘할 수 있다는 기존 연구 결과를 증명한다[7]. 또한 반복적인 지진 경험은 새로운 대비 행동을 취하는 것이 아닌 기존의 대비행동을 점검하고 강화하는 것으로 나타났다[2]. 한편, 비구조적 대비행위인 보험가입 지불의사와 구조적 대비행위인 내진보강 지불의사 역시 직접 경험지역인 포항에서는 증가하는 경향을 보였으나 간접 경험지역에서는 그렇지 않은 것으로 나타났다. 결국 포항 본진과 여진에 따른 실제 피해가 발생한 직접경험자들은 실제 피해가 없는 간접경험자들에 비해 재난 대비행동이 통계적으로 유의하게 증가한 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 행정안전부 국한재난대응기술개발 사업의 지원을 받아 수행되었습니다(2020-MOIS31-013). 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- Paton, D. and J. McClure, Preparing for Disaster: Building Household and Community Capacity, 2013.
- Doyle, E.E.H., et al., Motivations to prepare after the 2013 Cook Strait Earthquake, N.Z. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2018. 31: p. 637-649.
- Moon, J.-W., H. Hwang, and J.-B. Chung, Factors affecting awareness of preparedness after moderate earthquakes: An analysis of the Pohang earthquake in Korea. Disaster Prevention and Management: An International Journal, 2019.
- Botzen, W.J.W., J.C.J.H. Aerts, and J.C.J.M. Van Den Bergh, Dependence of flood risk perceptions on socioeconomic and objective risk factors. Water Resources Research, 2009. 45(10): p. n/a-n/a.
- Kohn, S., et al., Personal Disaster Preparedness: An Integrative Review of the Literature. Disaster Medicine and Public Health Preparedness, 2012. 6(3): p. 217-231.
- Russell, L.A., J.D. Goltz, and L.B. Bourque, Preparedness and hazard mitigation actions before and after two earthquakes. Environment and behavior, 1995. 27(6): p. 744-770.
- Norris, F.H. and K. Kaniasty, Reliability of delayed self-reports in disaster research. Journal of Traumatic Stress, 1992. 5(4): p. 575-588.

재난회복력을 고려한 교통로 복구 우선순위 지표 개발 연구

Development of priority index assessment model for road restoration considering disaster resilience

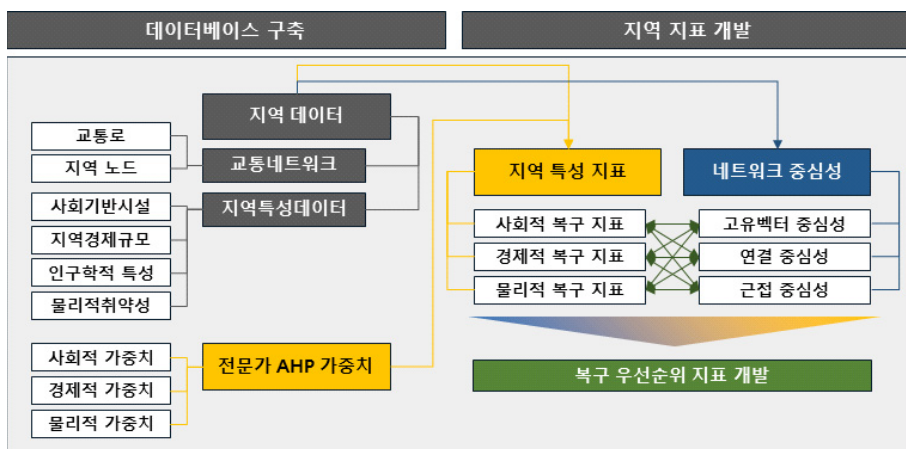
조기혁*1)

Cho, Gi-Hyoung

심재웅**

Sim, Jae-Woong

지진으로 인한 피해는 건축물의 붕괴나 도로의 파손 등의 물리적인 피해뿐만 아니라, 이재민의 발생, 피난 등 사회경제적인 피해를 포함한다. 지진으로 인한 광범위한 피해는 시간이 지남에 따라 지속적으로 발생하기 때문에, 신속한 대응과 복구를 바탕으로 지역 기능을 회복하는 것이 중요하다. 최근, 포항 및 경주 지진과 같이 국내 지진피해사례가 발생함에 따라 지진 대응에 관한 연구 및 기술 개발의 필요성이 대두되고 있다. 본 연구는 재난 상황 시 피해를 입는 여러 도시기능 중 교통 기능을 회복하는 것에 초점을 맞춰 수행되었다. 교통은 재난 발생 시 외부지역과의 연결을 담당하는 도시기능으로 교통 기능이 확보되었을 때 이재민 및 재난 대응 인력의 이동과 복구 및 생활 자원의 이동이 원활하게 이뤄진다는 측면에서 재난 대응에 중요한 역할을 한다. 본 연구는 재난 상황 시 교통 기능이 마비되는 상황에서 지역사회 기능을 유지하기 위해 신속하게 복구해야 하는 교통로를 선정하는 복구 우선순위 의사결정 지원기술을 개발한다. 방재도로 등과 같이 재난 상황에서의 교통로의 중요도를 산정했던 기존 연구(Ruth, 2007; Haasnoot, 2011; Newman, 2003; Freeman, 1978; 노운승, 2014; 박준식, 2010; 김호정, 2012; 정연식, 2015)들은 인근 지역의 잠재자원과 잠재회복속도를 고려하지 않고, 물자 수송 및 대피를 위한 교통 기능에만 초점을 두고 있다는 한계가 있었다. 본 연구는 교통로의 교통 기능과 더불어 인근 지역의 재난회복력(Holling, 1973)을 함께 고려하여 복구 우선순위를 선정한다. 본 연구는 교통로의 재난 상황에서의 교통 기능과 인근 지역의 재난회복력을 함께 고려하여 교통로의 우선순위를 평가하는 지표를 개발함으로써, 지진피해로부터 도시기능을 신속하게 회복하게 하는 지원기술을 개발하는 것을 목표로 한다. 또한, 본 연구는 포항시에만 국한되지 않고 모든 지자체에서 범용적으로 활용할 수 있도록 DB를 구축하는 등 실무단계에서 활용될 수 있도록 연구개발을 진행하였다.



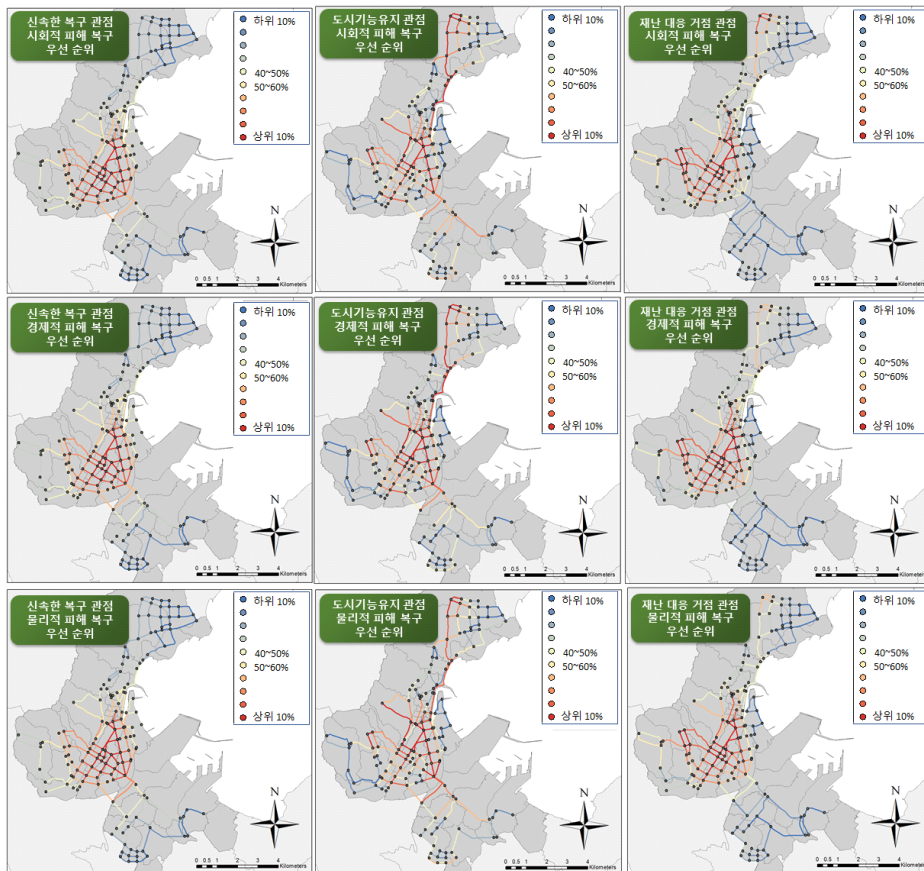
<그림 1> 복구 우선순위 지표 산출 알고리즘

복구 우선순위 지표개발을 위해 수행하는 과정들은 크게 데이터베이스(DB) 구축과정과 지역 지표 개발과정

* 조기혁-울산과학기술원 도시환경공학부, 정교수 (E-mail: gicho@unist.ac.kr)

** 심재웅-울산과학기술원 도시환경공학부, 석박통합과정 (E-mail: ryghl1994@unist.ac.kr)

으로 나눌 수 있다. 데이터베이스 구축과정에서는 ‘지역 특성 데이터 수집’과 ‘전문가 AHP 설문조사’ 과제가 진행된다. ‘지역 지표 개발’과정에서는 ‘지역 특성지표 개발’과 ‘네트워크 중심성 지표 개발’ 과제가 수행되며 이를 바탕으로 ‘복구 우선순위 지표’가 개발된다. <그림 1>는 본 연구에서 복구 우선순위 지표 개발을 위해 수행해야 하는 과정과 순서를 도식화한 그림이다. 본 연구에서는 우선적으로 복구 우선순위 지표를 개발하기 위해 수집해야 하는 데이터 항목을 정의하고 이를 수집하여 지역 특성 DB를 구축한다. 그리고 수집한 지역 특성 데이터에 재난회복력의 관점에서 가중치를 산정하기 위해 전문가 AHP 설문을 진행한다. 지역 데이터베이스 구축과정이 완료되면, 본 연구는 이를 바탕으로 ‘지역 특성 지표’와 ‘네트워크 특성 지표’를 개발한다. 해당 과정은 <그림 1>에서 상세히 확인할 수 있다. <그림 1>는 ‘지역 특성 지표’와 ‘네트워크 특성 지표’를 바탕으로 ‘복구 우선순위 지표’를 개발하는 알고리즘을 나타낸다. 본 연구에서 개발한 ‘지역 특성 지표’는 ‘사회 기반 시설’, ‘지역 경제규모’, ‘인구학적 특성’, ‘물리적 취약성’으로 정의되는 지역 특성 데이터와 목적에 따라 구분된 3가지의 전문가 AHP 가중치를 결합하여 산출된다. ‘네트워크 중심성 지표’는 ‘고유벡터 중심성’, ‘매개 중심성’, ‘근접 중심성’으로 구분되어 산출된다. 마지막 과정으로, 본 연구는 개발된 3가지 종류의 ‘지역 특성 지표’와 3가지 종류의 ‘네트워크 중심성 지표’를 집계하여 피해 유형과 교통 기능에 따라 구분되는 9가지의 ‘복구 우선순위 지표’를 개발한다.



<그림 2> 포항시 교통로 복구 우선순위 산출 결과

본 연구에서 개발한 복구 우선순위 지표는 피해 유형과 필요 교통 기능에 따라 9가지 결과로 나타나며 이는 <그림 2>와 같다. 연구 결과, ‘남구 상대동’과 ‘남구 해도동’, ‘남구 죽도동’에 위치한 교통로는 모든 복구 우선순위 지표에서 높은 순위를 차지하는 것으로 나타났다. 이는 해당 지역에서 인구 및 경제 특성 등 재난회복탄력성과 관련된 항목과 네트워크 중심성 지표가 동시에 높게 나타나기 때문이다. 특히, 죽도동의 중흥로와 양학천로, 포항시 남구 해도동과 죽도동을 관통하는 중앙로의 경우 모든 지역 특성지표와 네트워크 중심성에서

높은 수치를 부여받아, 9가지 복구 우선순위 지표에서 상위 그룹에 속하게 되었다.

상황에 따라 가변적으로 우선순위가 변하는 지역은 ‘복구 장량동’ 지역과 ‘남구 제철동’으로 나타났다. ‘복구 장량동’에서는 삼흥로, ‘남구 제철동’에서는 동해안로가 이와같은 특징이 두드러지게 나타난다. 이는 매개 중심성이 반영된 ‘도시기능유지 관점’ 복구 우선순위에서 두드러지게 나타나는데, 해당 지역에 위치한 도로가 재난 상황 시 가장 많이 활용되는 위상을 가졌기 때문이다.

본 연구에서 개발한 복구 우선순위 지표는 지역의 인근 재난회복력이 높아 적은 대응으로도 신속한 복구가 가능하며, 교통 네트워크상 중요한 기능이 있는 교통로를 나타낸다. 본 연구에서 개발한 복구 우선순위 지표는 재난 상황 시 기능을 유지해야하는 중요한 도로를 직관적으로 파악할 수 있게 한다. 높은 복구 우선순위를 가진 교통로의 기능이 마비되었을 경우 도시의 기능을 복구하는데 많은 시간이 발생하고 지속적으로 추가피해가 발생할 가능성이 높다. 따라서, 재난 발생 후 중요 교통로의 기능이 마비되지 않게 신속한 복구를 진행해야 한다.

참고 문헌

- Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual review of ecology and systematics*, 4(1), 1-23.
- Ruth, M.D. & Coelho. 2007, “Understanding and managing the complexity of urban systems under climate change”, *Climate Policy*, 7: 317-336
- Haasnoot, M. & Middelkoop, H. & Van Beek, E. & Van Deursen, W.P.A. 2011, “A method to develop sustainable water management strategies for an uncertain future”, *Sustainable Development*, 19(6): 369-381
- Newman, M. E. J. (2003), “The Structure and Function of Complex Networks,” *SIAM Review*, Vol. 45, No. 2, pp. 167-256.
- Freeman, L. C., (1978), “Centrality in Social Networks Conceptual Clarification”, *Social Networks*, 1, p215-239.
- 노윤승·도명식, 2014, “도로네트워크 기능 및 연결성을 고려한 긴급대피교통로 선정”, 「한국ITS학회논문집」, 13(6): 34-42.
- 박준식·강성철, 2010, “도로 네트워크의 노드 연계성 산정에 관한 연구”, 「대한교통학회」, 28(4): 129-139
- 김호정, 이준용, 고용석, 김종학, 김혜란, 2012, “네트워크 지수를 활용한 국가교통인프라 추진전략 연구”, 「국토연구원」, 35:1-147.
- 정연식, 이준, 이해선, 안혜린, & 박태욱. (2015). 재난 유형별 및 도로 위계별 방재도로 선정 기준 연구. 한국교통연구원 기본연구보고서, 1-208.

국내 지반 특성에 적합한 최적의 지반 운동 감쇠식 선정

Applicability Evaluation of Ground Motion Models for Korean Peninsula

이혜진*1)

김병민**

Lee, Hyejin

Kim, Byungmin

지진계측 역사상 가장 큰 규모의 지진이 경주 및 포항 지역에서 발생한 이후, 지속적으로 2020년 전남 해남지역 지진, 2021년 서귀포 해역 지진(규모 4.8) 등이 발생하며 대한민국은 더 이상 지진의 안전지대가 아니라는 인식과 함께 대형지진의 발생 가능성이 잠재되어 있는 것으로 분석되고 있다. 진동의 크기와 규모, 거리에 따라 달라지는 지진재해를 예측하기 위해서는 지반 특성과 토질 특성 등에 따라 변화하는 지진파의 특성, 즉 지반운동 감쇠식(Ground-motion attenuation relations, or ground motion prediction equations; 본 연구에서는 지반운동 예측식, 지반운동 예측모델 등을 포함함)을 고려해야 한다. 국내에서 사용하고 있는 감쇠식의 경우 해당 시스템 구축 초기인 2000년대 초반에 선정된 감쇠식들이다. 중규모의 지진들이 발생해 실측 데이터 기반의 지반운동 감쇠식 선정이 가능해져 국내의 감쇠식 중 국내 특성에 적합한 최적 지반운동 감쇠식을 통계 분석을 통해 선정하였다.

최적의 지반운동 감쇠식을 선정하기 위해 사용된 국외의 감쇠식은 미국 지질조사소의 NGA Project에 의해 개발된 NGA-West2 지반운동 예측식^[1], NGA-East 지반운동 예측모델^[2], 유럽을 대상으로 개발된 감쇠식 등 14개와 국내의 경우 최근 국내를 대상으로 개발된 EEA15^[3], JL18^[4], JH21^[5] 감쇠식을 포함한 6개로, 국내외 총 21개의 감쇠식들을 우선 순위 결정을 위한 감쇠식 모델로 사용하였다. 증폭 현상에 대한 계수가 포함되지 않은 모델의 경우, Midorikawa et al. (1994)식^[6]과 NGA-East 프로젝트에 의해 개발된 증폭식^[7, 8]을 이용하여 증폭 현상을 적용하였다. 증폭식을 적용한 후 최종적으로 사용된 감쇠식 모델은 35개이다. NECIS에서 다운로드 받은 한국 지진파 데이터를 가공(baseline correction, zero padding, and filtering)한 후, 규모 3.5 이상의 668개 데이터에 대한 통계 분석을 시행했다(Fig. 1).

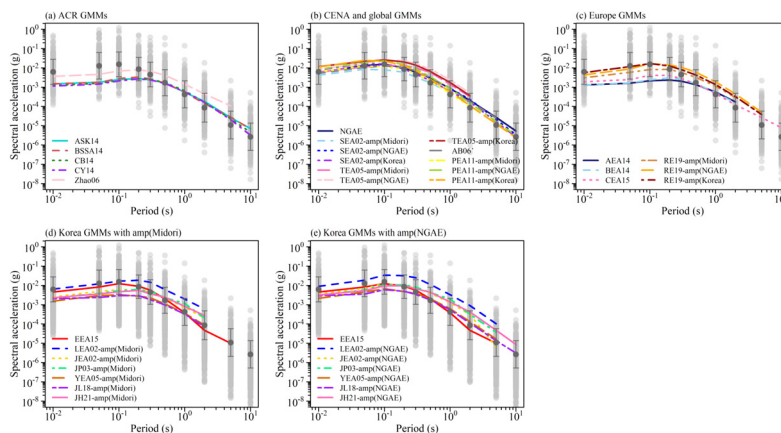


Fig. 1. 지진파 데이터의 평균값과 감쇠식들의 예측 평균값의 비교 (규모 4.0 이상)

* 울산과학기술원 도시환경공학과, 박사과정 (E-mail: hyejinlee@unist.ac.kr)

** 정회원-울산과학기술원 도시환경공학과, 부교수 (E-mail: byungmin.kim@unist.ac.kr)

본 연구에서는 LLH 방법(Log-likelihood method)^[9], EDR 방법(Euclidean distance-based ranking)^[10]을 이용한 통계 분석을 통해 최적의 지반운동 감쇠식을 선정하였다.

$$LLH = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log_2(g(x_i))$$

$$EDR^2 = \kappa \times \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N MDE_i^2$$

x_i : individual observation, $g(x_i)$: probability density function(PDF) of the candidate GMM, N: total number of observations, p and q: vectors of logarithmic prediction and observed ground motion, κ : ratio of original and corrected Euclidean distances, and MDE: modified Euclidean distance

한국 지진파 데이터를 사용하여 LLH, EDR 평가를 토대로 weight를 주어 합산한 적합성 평가를 실시한 결과(Fig. 2), 모든 주기에 대하여 NGAE 감쇠식을 적합한 것으로 확인되었다. 추가로, KMA 감쇠식(EEA15+Zhao06_crustal)의 경우도 모든 주기에 적용하기 적절하다고 판단된다.

Period	0.01	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	1	2	5	10
NGAE	0.023013	0.020343	0.022297	0.028093	0.030742	0.037322	0.039746	0.044889	0.072992	0.126526
Emolo	0.024253	0.02041	0.022757	0.031981	0.033129	0.033907	0.033279	0.03396	0.055686	NA
Zhao	0.025315	0.025378	0.026313	0.0357	0.052226	0.079289	0.092787	0.102383	0.197182	NA
SEA_ampM	0.025354	0.021977	0.02691	0.032405	0.033338	0.033449	0.032559	0.036649	NA	NA
SEA_ampNAGE	0.025458	0.022105	0.025172	0.033236	0.036001	0.039609	0.035038	0.036053	0.070504	0.1646
AB	0.026523	0.023495	0.025092	0.031782	0.035809	0.038154	0.036995	0.035792	0.051593	NA
Junn_ampNAGE	0.027655	0.023922	0.025787	0.033368	0.039783	0.041383	0.04141	0.040843	0.067257	NA
JH_ampNAGE	0.027668	0.025199	0.02505	0.029306	0.033128	0.043803	0.045841	0.05063	0.065077	0.109957
PEA_ampM	0.027999	0.024586	0.025626	0.032601	0.034139	0.033914	0.032082	0.034824	NA	NA
LEE_ampM	0.029367	0.025603	0.029016	0.042993	0.054092	0.050059	0.050635	0.056561	NA	NA
JP_ampM	0.029711	0.026388	0.025798	0.033543	0.040187	0.041814	0.0532	0.04106	0.057914	NA
RE_ampNAGE	0.030213	0.025185	0.025639	0.033482	0.040586	0.050701	0.054516	0.051891	0.061523	NA
Junn_ampM	0.031262	0.026951	0.02972	0.033226	0.034839	0.036366	0.037166	0.036536	NA	NA
LEE_ampNAGE	0.031279	0.027765	0.036365	0.054347	0.069622	0.064518	0.063247	0.068784	0.096365	NA
TEA_ampM	0.032254	0.026081	0.029425	0.050388	0.061961	0.071908	0.056846	0.042533	NA	NA
PEA_ampNAGE	0.032491	0.029139	0.032696	0.042933	0.047328	0.045976	0.036289	0.032703	0.055258	0.123441
JH_ampM	0.032742	0.030643	0.034867	0.03289	0.033024	0.033553	0.034659	0.039645	NA	NA
JP_ampM	0.034829	0.031415	0.03191	0.032889	0.034849	0.036992	0.041566	0.036928	NA	NA
Yun_ampNAGE	0.035274	0.029126	0.029978	0.036184	0.036927	0.036952	0.037886	0.042276	0.060027	NA
RE_ampM	0.036056	0.029885	0.031842	0.032358	0.033991	0.038539	0.043679	0.046941	NA	NA
TEA_ampNAGE	0.037248	0.030492	0.038857	0.064878	0.078828	0.088907	0.075784	0.051915	NA	NA
Yun_ampM	0.041922	0.035415	0.041176	0.043849	0.039251	0.04035	0.043457	0.048201	NA	NA
CF	0.045615	0.054931	0.049529	0.040339	0.035043	0.033581	0.032153	0.031835	0.051112	0.104607
AK	0.058328	0.061507	0.065165	0.057694	0.043521	0.035872	0.032095	0.032496	NA	NA
ASK	0.059394	0.063448	0.067417	0.059622	0.045353	0.035222	0.032359	0.034286	0.051676	0.105323
BI	0.062343	0.063533	0.063469	0.050609	0.043758	0.039075	0.033208	0.033731	NA	NA
BSSA	0.066369	0.068839	0.069528	0.05743	0.045007	0.037135	0.032476	0.030876	0.051433	0.105161
CY	0.07342	0.07716	0.077782	0.061278	0.045305	0.035722	0.031744	0.032016	0.048218	0.108875
CB	0.074397	0.072627	0.077993	0.067865	0.049251	0.039257	0.033856	0.032805	0.049825	0.101852
JL_ampNAGE	0.201326	0.229109	0.166041	0.121753	0.100769	0.086133	0.09415	0.100955	0.12533	0.232403
JL_ampM	0.260984	0.314492	0.304673	0.197965	0.165105	0.138703	0.143985	0.139036	NA	NA

Fig. 2. LLH, EDR 평가를 토대로 weight를 둔 감쇠식들의 적합성 (값이 클수록 예측이 잘 되었음을 나타냄. 빨간색이 최적)

감사의 글

이 연구는 한국연구재단 신진연구사업(NRF-2020R1C1C1013317)의 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- Bozorgnia Y, Abrahamson N A, Atik L A, Ancheta T D, Atkinson G M, Baker J W, Baltay A, Boore D M, Campbell K W, Chiou B S J, Darragh R, Day S, Donahue J, Graves R W, Gregor N, Hanks T, Idriss I M, Kamai R, Kishida T, Kottke A, Mahin S A, Rezaeian S, Rowshandel B, Seyhan E, Shahi S, Shantz T, Silva W, Spudich P, Stewart J P, Watson-Lamprey J, Wooddell K, and Youngs R (2014) NGA-West2 Research Project, Earthquake Spectra 30(3):973-987. <http://doi.org/10.1193/072113EQS209M>
- Goulet C, Bozorgnia Y, Abrahamson N, Kuehn N, Atik L A, Youngs R, and Graves R (2018) Central and Eastern North America Ground-Motion Characterization - NGA-East Final Report, in *PEER Report 2018:1-817*.
- Emolo A, Sharma N, Festa G, Zollo A, Convertito V, Park J H, Chi H C, and Lim I S (2015) Ground-Motion Prediction Equations for South Korea Peninsula Ground-Motion Prediction Equations for South Korea Peninsula, Bulletin of the Seismological Society of America 105(5):2625-2640. <http://doi.org/10.1785/0120140296>
- Jeong K H, and Lee H S (2018) Ground-motion prediction equation for South Korea based on recent earthquake records, Earthquake and Structures 15(1):29-44. 10.12989/eas.2018.15.1.029
- Jee H W, and Han S W (2021) Regional Ground Motion Prediction Equation Developed for the Korean Peninsula Using Recorded and Simulated Ground Motions, Journal of Earthquake Engineering:1-23. 10.1080/13632469.2021.1871682
- Midorikawa S (1994) Site effects on strong-motion records observed during the 1987 Chiba-ken-toho-oki, Japan earthquake, in *Proc. Ninth Japan Earthq. Eng. Symposium, 1994*:85-90
- Stewart, J. P., Parker, G. A., Atkinson, G. M., Boore, D. M., Hashash, Y. M. A., & Silva, W. J. (2020). Ergodic site amplification model for central and eastern North America. Earthquake Spectra, 36(1), 42-68. <https://doi.org/http://doi.org/10.1177/8755293019878185>
- Hashash, Y. M. A., Ilhan, O., Harmon, J. A., Parker, G. A., Stewart, J. P., Rathje, E. M., Campbell, K. W., & Silva, W. J. (2020). Nonlinear site amplification model for ergodic seismic hazard analysis in Central and Eastern North America. Earthquake Spectra, 36(1), 69-86. <https://doi.org/10.1177/8755293019878193>
- Scherbaum, F., E. Delavaud, and C. Riggelsen, Model Selection in Seismic Hazard Analysis: An Information-Theoretic Perspective Model Selection in Seismic Hazard Analysis: An Information-Theoretic Perspective. Bulletin of the Seismological Society of America, 2009. 99(6): p. 3234-3247.
- Kale, Ö., & Akkar, S. (2013). A New Procedure for Selecting and Ranking Ground-Motion Prediction Equations (GMPes): The Euclidean Distance-Based Ranking (EDR) Method. Bulletin of the Seismological Society of America, 103(2A), 1069-1084. <https://doi.org/10.1785/0120120134>

포항시 액상화 확률 모델 개발

Development of geospatial liquefaction probability model for Pohang

서환우*1) 김한샘** 김병민***
Seo, Hwanwoo Kim, Han-saem Kim, Byungmin

규모 5.4의 포항지진 발생 이후, 진앙지로 부터 15km 이내에 위치한 4기 퇴적층에서 액상화 현상으로 인해 약 600개의 모래분사(Sand boil)가 지표에서 관측되었으며, 포항시 송도동에서는 지반 융기와 침하가 발생하였다[1]. 이와 같은 액상화 발생을 예측하기 위해, 로지스틱 회귀(Logistic regression)를 활용하여 액상화 확률 모델을 개발한 사례가 있다[2,3]. 우리는 포항시에서 관측된 모래분사 데이터와 다양한 예측 변수를 활용하여 로지스틱 회귀와 랜덤포레스트(Random forest)를 기반으로 한 포항시 액상화 확률 모델을 개발 및 평가하였으며, 연구지역(Study area) 범위 밖에서 발생한 모래분사 위치와 액상화 확률 모델 지도를 비교하여 검증하였다.

이 연구에서는 액상화 확률 모델 개발을 위해 Fig. 1과 같이 연구지역 범위(22.88km²)를 설정하였고, 1600개 그리드(Grid)로 나누었다(40개×40개; 가로 110m×세로 130m). 1600개 그리드 중 205개 그리드는 액상화 발생 지역으로 분류되었고, 1395개 그리드는 액상화가 발생하지 않은 지역으로 분류되었다. 또한, 산지지역(1395개 그리드 중 336개)은 액상화가 발생하지 않는 지역으로 가정하였다. 모델 개발을 위해 598개 모래분사 데이터와 7개 예측 변수들(Peak ground acceleration (PGA), slope-derived average shear wave velocity of the upper 30 meters (V_{s30}), standard penetration test (SPT) N value, depth to rock (D^{rock}), compound topographic index (CTI), distance to river (d_r), and roughness)을 활용하였으며, 로지스틱 회귀와 랜덤포레스트를 기반으로 5개 모델(Base model A, B, and C, and best model A and B)을 개발하였다. 또한, 6가지 분류평가지표(Accuracy, sensitivity, precision, specificity, balanced accuracy, and F1 score)를 활용하여 어느 지역에 적용할 수 있는 글로벌모델인 Zhu et al.[2]과 비교하였다. Table 1은 6개 액상화 확률 모델의 성능을 나타낸다. 랜덤포레스트 기반의 Best model B가 다른 모델들보다 더 뛰어난 성능을 보였다.

Best model B를 활용하여 포항시 액상화 확률 지도를 나타내었다(Fig. 2). 연구지역 범위 밖에서 발생한 모래분사 위치와 비교하였을 때, 확률이 크게 산정된 곳에 모래분사가 위치한 것을 볼 수 있다. 또한, 모래분사가 발생하지 않았지만, 액상화 확률이 크게 산정된 곳을 확인할 수 있다.

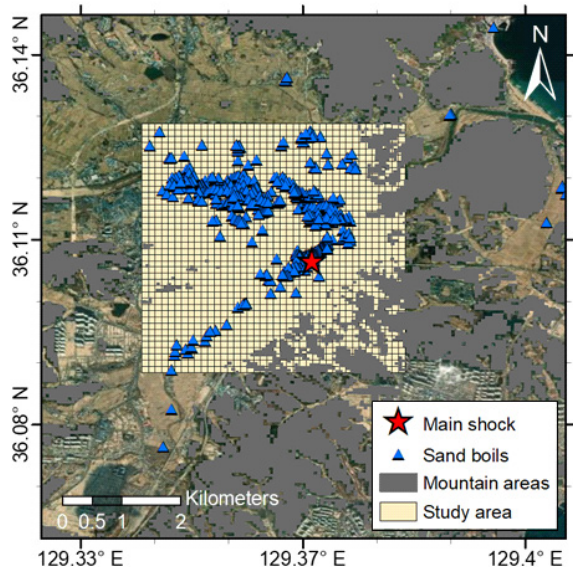


Fig. 1. Sand boils observed after 2017 M5.4 Pohang earthquake and the epicenter.

* 울산과학기술원 도시환경공학부, 석박사통합과정 (E-mail: hwanwooseo@unist.ac.kr)

** 정회원 한국지질자원연구원 지진연구센터 선임연구원 (E-mail: adoogen@kigam.re.kr)

*** 정회원 울산과학기술원 도시환경공학부, 부교수 (E-mail: byungmin.kim@unist.ac.kr)

Table 1. LPI-based assessment for 26 sites where MASW tests were conducted

Model algorithm	Model name	Accuracy	Sensitivity	Precision	Specificity	Balanced accuracy	F1 score
Logistic regression	Base model A	0.7302	0.6170	0.3671	0.7561	0.6866	0.4603
Logistic regression	Base model B	0.6786	0.5532	0.3023	0.7073	0.6303	0.3910
Logistic regression	Base model C	0.6825	0.7660	0.3429	0.6634	0.7147	0.4737
Logistic regression	Best model A	0.7738	0.8085	0.4419	0.7659	0.7872	0.5714
Random forest	Best model B	0.8373	0.8085	0.5429	0.8439	0.8262	0.6496
Logistic regression	Zhu et al[2]	0.7341	0.7660	0.3913	0.7268	0.7464	0.5180

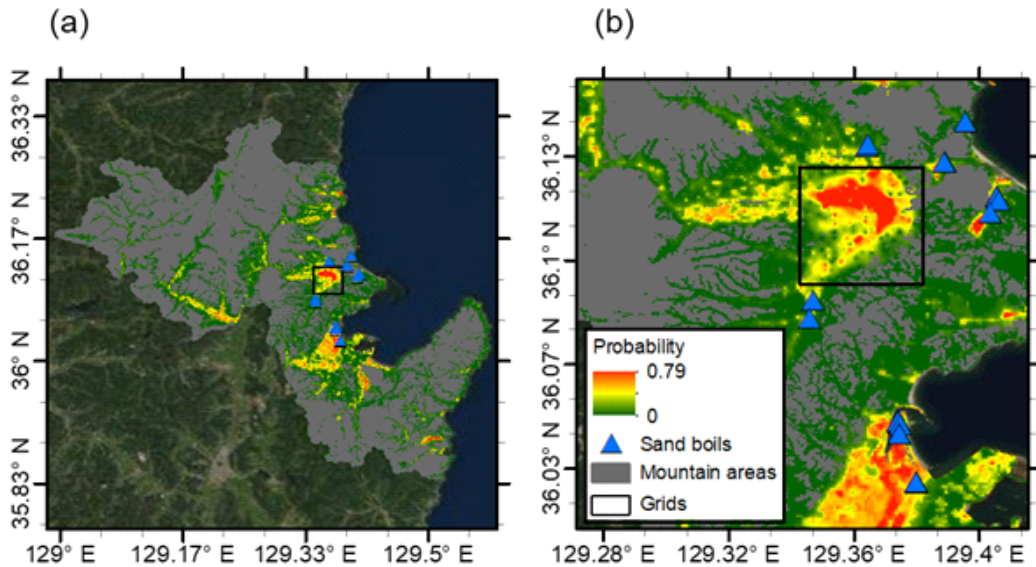


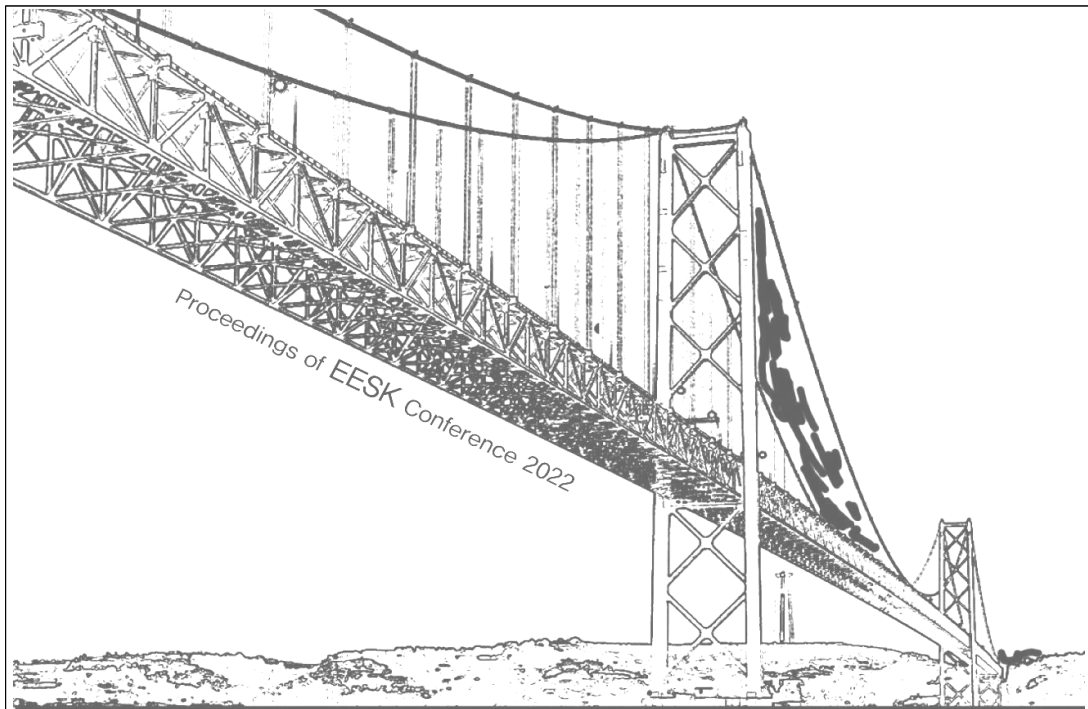
Fig. 2. Liquefaction probability predicted from the Best model B: (a) for Pohang and (b) near the grids area.

감사의 글

이 연구는 연구재단 신진과제(NRF-2020R1C1C1013317) 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Ghim Y. S., Kim S. W., Ko K., Choi J. H., Bae H., Hong P. S., Lee Y., Lee H., Jin K., and Choi S. Paleoseismological implications of liquefaction-induced structures caused by the 2017 Pohang earthquake. *Geosciences Journal*. 2018; 22: 871–880.
2. Zhu J., D. Daley, L. G. Baise, E. M. Thompson, D. J. Wald, and K. L. Jnudsen. A geospatial liquefaction model for rapid response and loss estimation. *Earthquake Spectra*. 2015; 31(3): 1813–1837.
3. Rashidian V., and L. G. Baise. Regional efficacy of a global geospatial liquefaction model. *Engineering Geology*. 2020; 272: 105644.



원자력발전소 및 산업시설물의 내진설계 및 내진성능평가

중·저준위 방사성 폐기물 처분시설에 대한 지진취약도 평가

Seismic Fragility Assessment of Low- and Intermediate-Level
Radioactive Waste Disposal Facilities하정곤*1)
Ha, Jeong-Gon박준희**
Park, Junhee김민규***
Kim, Minkyu

방사성 폐기물은 일반폐기물과 같이 처분할 수 없으며, 별도의 시설을 이용하여 영구적으로 처분해야 한다. 방사성 폐기물은 폐기물이 지닌 방사능의 농도에 따라서 고준위, 중준위, 저준위, 극저준위 방사성 폐기물로 분류할 수 있고, 그 분류에 따라 처분방식도 달라진다. 일반적으로 중준위 이하의 방사성 폐기물은 깊이 100m 이하의 지하 암반에 동굴을 굴착하여 처분하는 동굴처분방식과 지표 부근에 처분고를 건설하여 처분하는 표층처분시설을 주로 활용하고 있다. 국내에서는 1단계 동굴처분시설이 2015년부터 운영중이며, 2단계 표층처분시설이 두 단계에 걸쳐 개발될 예정이다. 이러한 처분시설은 설계 및 시공 단계에서 설계 지진에 대한 거동을 평가하여 일정 수준의 안전성을 확보하고 있다. 그러나, 설계 단계에서의 안전성 검토는 설계 지진에 대한 결정론적인 방법을 이용해서 이루어지므로, 운영 및 처분기간 동안 일어나는 다양한 비정상 시나리오 및 설계초과 강진에 대한 평가가 부족한 문제점이 있다. 이러한 문제점을 보완하고 처분시설의 실질적인 내진성능을 평가하기 위해서 지진취약도 분석이 필요하다. 지진취약도는 지진하중 수준에 따른 시설물의 조건부 파괴 확률을 의미한다[1].

본 연구에서는 국내 중·저준위 방사성 폐기물 처분시설들에 대한 지진취약도를 평가하였다. 지진취약도 평가를 위한 입력지진은 Fig. 1에 도시한 절차를 바탕으로 도출되었다. 먼저, 처분시설 부지에 대한 확률론적 지진재해도 평가를 통해서 최대지반가속도에 대한 지진재해도 곡선과 연초과확률에 따른 등재해도 스펙트럼을 도출하였다. 처분시설 부지와 지진규모-거리 특성이 유사한 지역에서 관측된 지진기록을 등재해도 스펙트럼에 매칭하여 지표면 지반운동으로 결정하였다. 이를 바탕으로 1차원 부지응답해석을 수행하여 암반 하부의 지반운동을 도출하였다. 도출된 암반 하부의 지반운동은 목표하는 최대지반가속도 수준에 맞추어 보정한 후 처분시설의 지진응답을 평가하기 위한 지진해석의 입력 지진파로 활용하였다.

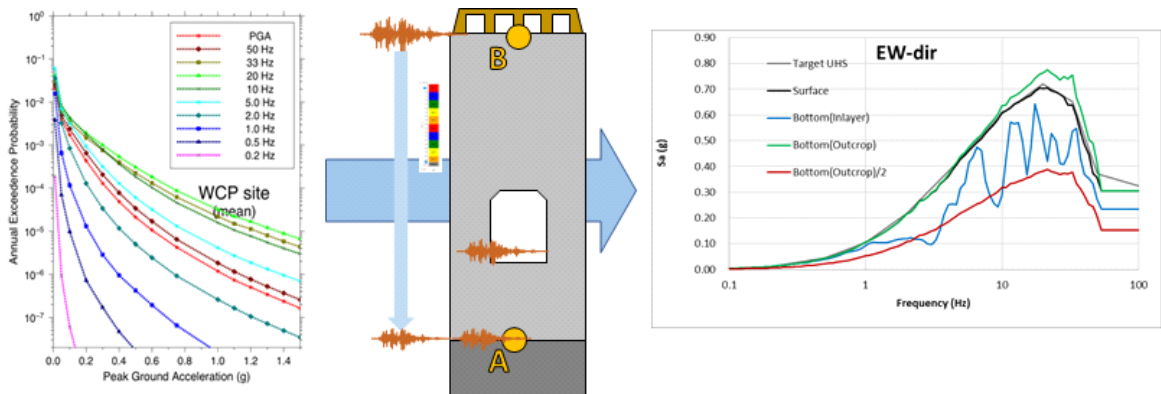


Fig. 1. Procedure of deriving the Input seismic motion for seismic fragility analysis

* 정회원-한국원자력연구원 첨단구조·지진안전연구부, 선임연구원 (E-mail: jgha@kaeri.re.kr)

** 정회원-한국원자력연구원 첨단구조·지진안전연구부, 책임연구원 (E-mail: jhpark78@kaeri.re.kr)

*** 정회원-한국원자력연구원 첨단구조·지진안전연구부, 책임연구원 (E-mail: minkyu@kaeri.re.kr)

동굴처분시설과 표층처분시설에 대한 지진응답은 3차원 지진해석을 통해서 평가하였다. 지반-구조물 상호작용을 고려하기 위해서 처분시설 주위 암반 지반과 표층처분시설의 덮개층을 단순화하여 모델링에 포함하였다. 지반모델은 Mohr-Coulomb 모델을 이용하였으며 지반, 처분시설 구조체는 주로 Shell과 Liner 요소를 이용하였다. 구축된 처분시설의 3차원 수치해석 모델은 Fig. 2와 같으며, 각각 좌측 그림은 전체 모델을 우측 그림은 처분고의 상세 모습을 나타낸다. 수치해석 결과로 직교하는 수평양방향과 수직방향, 총 3개의 축 방향에 대한 처분고 위치별 부재력들의 시간이력을 산정하였다.

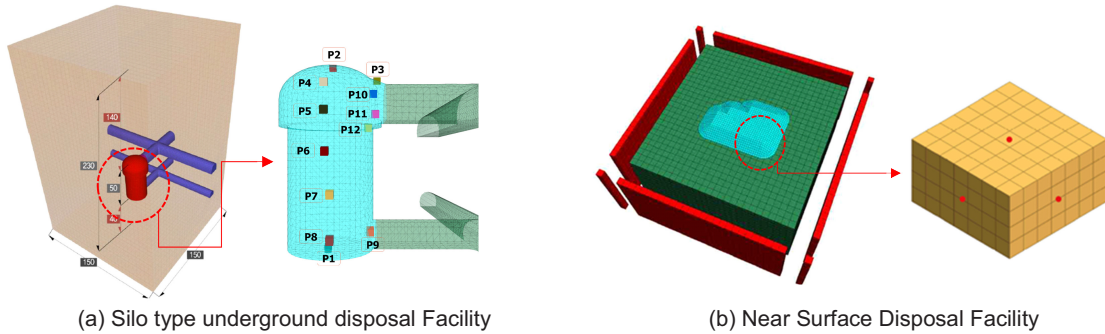


Fig. 2. Three-dimensional seismic analysis model for the radioactive waste disposal facilities

처분시설의 지진 시 파괴모드는 각 처분고 벽체의 전단파괴로 정의하였으며, 처분고 벽체의 성능은 Ogaki[2]가 제시한 극한전단강도식을 적용하여 결정하였다. 지진취약도 평가는 변수분리법을 통해서 수행하였으며, 최종적으로 도출된 처분시설의 지진취약도 곡선은 Fig. 3과 같다. 동굴처분시설과 표층처분시설의 고신뢰도 저파손 확률(HCLPF)은 각각 2.04g와 3.47g로, 처분시설들이 높은 내진성능을 보유한 것으로 평가되었다.

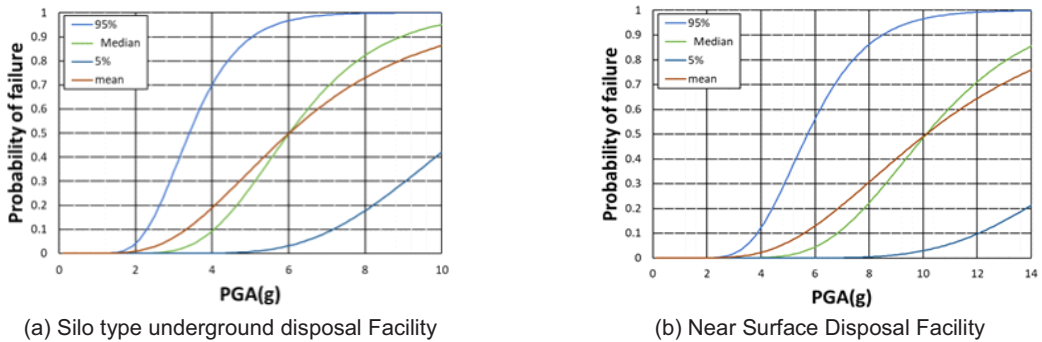


Fig. 3. Seismic fragility curves for radioactive waste disposal facilities

감사의 글

이 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행하였습니다 (No.20193210100040). 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Park JH, Kim MK, Choi IK. Seismic Fragility Evaluation of Surface Facility Structures in Intermediate-Low Level Radioactive Waste Repository. Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea. 2012;25(1):57-64.
2. Ogaki Y, Kobayashi M, Takeda T, Yamaguchi T, Yoshizaki S, Sugano S. Shear strength tests of prestressed concrete containment vessels. InStructural mechanics in reactor technology. Vol. J (a) 1981.

원전부지 설계지진 결정을 위한 규제지침 개정(안)

Revision (Draft) of Regulatory Guide for Determining Design Earthquake for Nuclear Power Plant Sites

최호선*1)

Choi, Hoseon

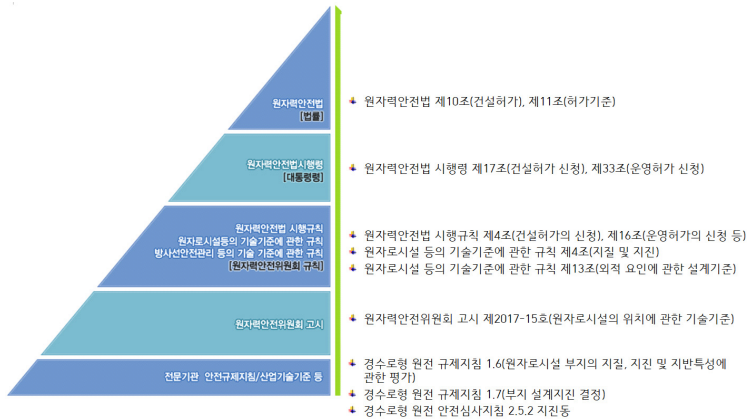
2016년 9월 12일 국지규모(M_L) 5.8의 경주지진은 지표에 드러나지 않은 지하단층에서 발생한 지진으로서, 통상적인 지표지질조사만으로는 경주지진을 발생시킨 지진원(Seismic Source)의 특성 규명에 어려움이 있다. 한편, 2016년 경주지진을 비롯하여 2007년 오대산지진, 2017년 포항지진 등 우리나라의 주요 지진은 지표에 드러나지 않은 지하단층에서 발생하는 경향이 있다. 그러므로 지하단층에 대한 지진원의 특성 평가를 위한 기술기준을 개발하는 것은 원전뿐만 아니라 일반 시설물의 지진안전성 확보에도 매우 중요하다.

한국원자력안전기술원에서 2018년 1월부터 2021년 12월까지 수행한 원자력안전연구사업 ‘원전부지 설계지진 평가기술 개발’ 목표 중의 하나는 ‘경주지진 지진원 특성을 반영한 지진동 평가 기술기준(안)’을 개발하는 것이다. 원전부지에서 활동성단층(Capable Fault)을 고려한 설계지진(Design Earthquake) 평가 기술기준은 정립되어 있으나, 이는 대체로 지표과열 및 변위를 이용한 지질학적, 지질연대학적 방법에 기초하고 있다. 지진학적 방법을 이용한 지진원 특성 규명 및 최대잠재지진(Maximum Earthquake Potential) 평가 그리고 부지에서의 최대지진동 결정에 관한 기술기준은 아직 정립되어 있지 않다. 따라서 향후 지표단층운동(Surface Faulting)을 수반하지 않는 지진의 경우, 지진원에 대한 특성을 규명하고 원전부지에서의 설계지진 평가를 위한 기술기준이 필요하다. 이에 해당 기술기준의 효율적인 원전부지 규제적용을 고려하여, 한국원자력안전기술원 경수로형 원전 규제지침 1.7[1] ‘부지 설계지진 결정’의 개정(안)을 작성하였다. 한편, 원자력안전위원회고시 제2017-15호[2] ‘원자로시설의 위치에 관한 기술기준’의 준용할 외국 규정 순번 1(원자로시설 부지의 지질 및 지진에 관한 조사·평가지침)에 대한 고시 개정(안)이 마련 중이나 일정이 요원하므로, 해당 고시 개정(안)의 일부 문구를 규제지침 개정(안)에 반영하되 전체적인 내용은 기존 고시의 준용할 외국 규정인 10 CFR 100 Appendix A[3] ‘Seismic and Geologic Criteria for Nuclear Power Plants’를 따르기로 하였다.

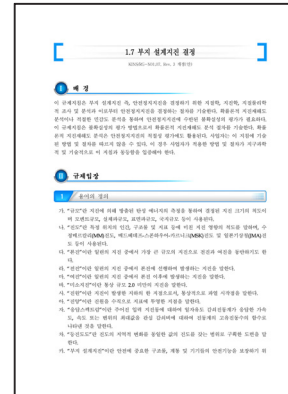
기존 경수로형 원전 규제지침 1.7에서 지표단층운동이 없는 지하단층에 의한 설계지진 평가를 반영하기 위해 몇 가지 보완사항이 확인되었다. 특히 ① 10 CFR 100 Appendix A[3]에서는, 원인단층(Causative Fault)이 부지 근처에 위치할 경우, 지진의 근접성(Proximity)이 설계지진의 스펙트럼 특성에 미칠 수 있는 영향을 고려하도록 하고 있으며, ② IAEA Draft Safety Guide No. DS 507 (Step 12)[4] ‘Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations’는, 지진동 분석과 부지응답 분석 사이의 인터페이스를 중요한 문제로 인식하여 명확하게 정의하도록 요구하고 있다. 이러한 사항을 비롯하여 기타 수정사항을 규제지침 개정(안)에 반영하였다. 그림 1(a)는 지질 및 지진과 관련한 원전부지 법령과 기술기준 체계를, 그림 1(b)는 규제지침 1.7 개정(안)의 도입 페이지를 보여준다.

아직은 ‘원인단층의 근접성을 고려한 부지 지진동 평가’와 ‘지진동 분석과 부지응답 분석 인터페이스의 명확한 설정’ 등을 초기에 적용하는데 국내 연구나 자료의 부족, 관련 불확실성 등으로 어려움이 발생할 수 있을 것으로 예상된다. 이러한 부분은 국내 적용성을 높일 수 있도록 향후 지속적인 연구가 뒷받침되어야 한다.

* 정회원.한국원자력안전기술원 원자력안전연구실, 책임연구원 (E-mail: hoseon@kins.re.kr)



(a)



(b)

Fig. 1. (a) Laws and technical standards (b) Regulatory guide 1.7 for light water reactors

감사의 글

이 연구는 한국원자력안전재단이 출원한 원자력안전연구사업인 ‘원전부지 설계지진 평가기술 개발’ 및 ‘성능 기반 설계지진 규제검증 기반기술 개발’ 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 한국원자력안전기술원. 부지 설계지진 결정. KINS/R-N01.07, Revision 3. 2021.
2. 원자력안전위원회. 원자로시설의 위치에 관한 기술기준. 원자력안전위원회고시 제2017-15호(원자로.04).
3. United States Nuclear Regulatory Commission. Seismic and geologic siting criteria for nuclear power plants. Appendix A to 10 CFR Part 100. 1973.
4. International Atomic Energy Agency. Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations. Draft Safety Guide No. DS 507. 2020.

원전 기기의 지진취약도 분석에 관한 고찰

A Review on Seismic Fragility Analyses of Nuclear Power Plant Equipment

김두기¹

Kim, Dookie

김석철²

Kim, Seok Chu

ABSTRACT

본 논문은 에너지기술평가원에서 발주한 ‘원전 지진대응 역량강화를 위한 지진·단층 특성분석 및 내진성능 향상 원천기술 개발 연구단’에서 연구를 수행한 ‘기기의 지진취약도 평가’를 소개하였다. 이 연구는 가동원전에 대한 보다 정확한 내진성능평가를 위하여 확률론적 내진성능평가 방법을 사용하여 원전구조물의 내진성능 평가에 관한 향상 및 보완을 목표로 하였다. 본 논문에서는 기기의 내진성능평가에 대한 기초, 평가방법, 지진취약도 등 원전 기기의 지진취약도 전반에 관해 고찰하였다.

1. 연구 배경

기기 내진성능평가 배경을 요약하면 다음과 같다.

- 1980년: NRC는 가동원전의 내진검증(SQ)을 미해결 안전문제(USI A-46)로 선정하였다.
- 1982년: IEEE 344(1975) 이전에 설계된 기기들에 대한 내진검증방법 문제점 발견하였으며, SQUG를 구성한 후 역사지진데이터를 이용하여 내진검증 시작하였다. 이후 EPRI NP-7149(1991)는 8종에서 20종 기기(Equipment)로 내진검증 확대하였다.
- 1983년: SQUG에 의해 SSRAP 구성하였다.
- 1987년: IEEE-344(1987)에서 경험적 방법을 인정하였다.
- 1988년: RG 1.100(1988)에서 IEEE를 추천하였다.
- 1991년: EPRI NP-5223-SL(1991)에서 경험자료에 근거한 GERS 제시하였다.
- 1991년: SQUG와 EPRI는 GIP를 공동개발하였다.

내진평가기술의 배경을 요약하면 다음과 같다.

- 1975년: SRP 3.7 및 IEEE 344을 발행하였다.
- 1979년: Diablo Canyon 원전 SPSA를 수행하였고, SFA 모델을 개발하였다.
- 1980년: USI A-46을 지정하였다.
- 1981년: Zion 원전 SPSA를 수행하였으며, SPSA 방법론을 개발하였다.
- 1983-1989년: SSMRP를 연구하였으며, SSMRP 방법론을 개발하였다.
- 1983-1988년: SMA를 연구하였으며, SMA 기법을 개발하였다.
- 1987년: GL 87-02을 발행하였고, USI A-46의 이행을 요구하였으며, 경험적 방법을 인정하였다.
- 1988년: GL 88-20을 발행하였고, IPEEE의 수행을 요구하였다.
- 1991년: NUREG 1407을 발행하였다.
- 1991년: EPRI NP-6041을 발행하였고, SMA 방법론을 확립하였다.
- 1994년: EPRI TR-103959을 발행하였고, SPSA 방법론을 확립하였다.
- 2002년: EPRI TR-1002988을 발행하였다.
- 2009년: EPRI 1019200을 발행하였다.

1) 공주대학교 교수

2) 한국수력원자력 중앙연구원 선임연구원

- 2009년: ASME/ANS RA-Sa 발행하였고, 지진PSA Code & Standard를 확립하였다.
- 2012년: 10 CFR 50.54(f) NTTF 2.1/2.3 Seismic을 발행하였고, NRC에서는 후쿠시마 후속조치를 요구하였다.
- 2013년: EPRI 1025287/3002000704 발행하였고, NTTF Seismic 수행 방법론을 확립하였다.

2. 지진취약도

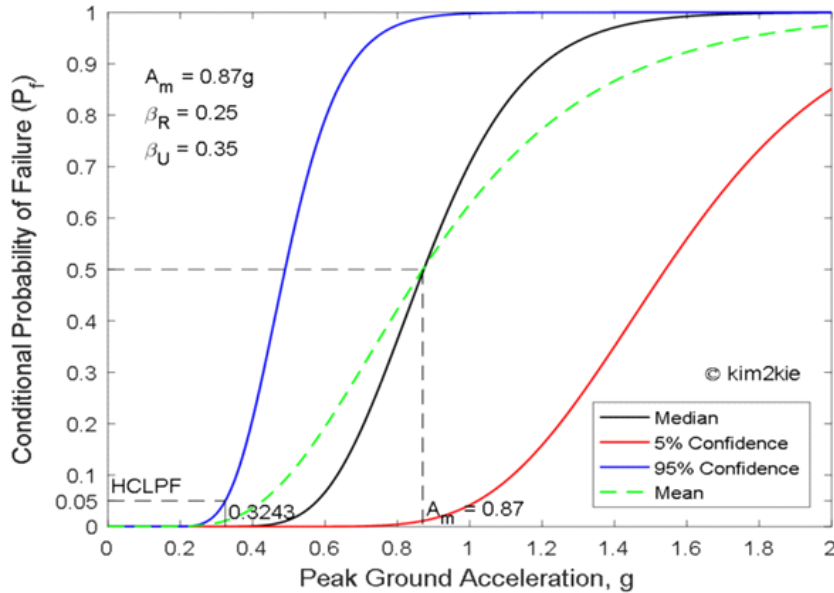


그림 1 일반적인 취약도 곡선과 HCLPF 산정 예

감사의 글

이 논문은 행정안전부장관의 방재안전분야 전문인력 양성사업으로 지원되었습니다.

참고문헌

EPRI TR-3002012994 Seismic Fragility(SF) and Seismic Margin Guidance(SMA) for Seismic Probabilistic Risk Assessments(SPRA)

기기-구조물 상호작용을 고려한 원전 보조건물의 층응답스펙트럼

Floor Response Spectrum of an Auxiliary Building in a Nuclear Power Plant Considering Equipment-Structure Interaction

안숙진*
Ahn, Sook-Jin

박지훈**
Park, Ji-Hun

원전 구조물의 지진해석에 있어서 주구조물과 부구조물의 연성해석(coupled analysis)은 비연성해석 대비 주구조물의 응답을 증가하는 경우에 요구되며, ASCE 4-16에서는 기준이 되는 증가율로서 10%를 규정하고 있다[1]. 그러나 이와 같은 연성해석은 주구조물의 안전측 설계 이외에도 기기와 구조물의 상호작용을 고려함으로써 기기의 응답가속도를 보다 정확하게 산정할 수 있다. 연성해석을 통하여 구조물과의 상호작용을 고려하여 산정된 기기 응답은 구조물만 독립적으로 해석하여 얻어진 층응답가속도로부터 산정된 기기 응답에 비하여 감소 또는 증가하게 되며 이는 구조물 내에서의 위치와 자유도에 따라 달라지게 된다[2]. 또한 증가 또는 감소폭은 구조물과 기기의 질량비 및 진동수비에 민감하다.

기기에 대한 지진입력을 나타내는 층응답스펙트럼(floor response spectrum, FRS)은 기기 위치에서의 구조물의 응답가속도에 대한 단자유도 시스템의 최고응답가속도를 나타내는 선도이다. 비연성해석의 경우에는 구조물의 응답가속도 시간이력에 대한 단자유도 시스템의 반복적인 해석을 통해서 FRS를 작성할 수 있다. 그러나 연성해석의 경우에는 단자유도 시스템이 연결된 다자유도의 주구조물에 대한 해석이 요구되므로 응답스펙트럼을 작성할 진동수의 수량만큼 전체구조물의 해석이 요구된다. 따라서 자유도가 많은 보조건물의 유한요소 해석모델의 경우에 연성해석을 통해서 FRS를 작성하는 경우 과도하게 많은 시간에 소요되므로 보다 효율적인 연성해석 방법이 요구된다. 이 연구에서는 부분구조해석법을 통해서 독립된 주구조물의 해석결과와 impedance 함수만을 이용하여 효율적으로 층응답스펙트럼을 작성하였다(Fig. 1)[2, 3].

APR1400 원전 보조건물의 유한요소해석모델을 작성하였으며, 서로 다른 크기를 갖는 3개의 슬래브와 1개의 벽체를 선정하여 각각의 중심에서 세 직교 방향에 대한 FRS를 산정하였다(Fig. 2). 각각의 측정 위치에서 건물 총질량 대비 질량비가 0.1%인 구조물의 H2 방향 FRS는 Fig. 3과 같다. 대부분의 위치에서 기기-구조물 상호작용의 영향은 크지 않은 것으로 나타났으나 4번 절점의 H2 방향 자유도는 벽체의 면외방향 국부진동에 관련된 것으로서 응답저감효과가 현저한 것으로 나타났다. 질량비 1.0, 0.1 및 0.01%에 대하여 3번 슬래브의 V 방향 FRS를 작성한 결과는 Fig. 4와 같다. 동일 위치의 수평방향 FRS를 나타낸 Fig. 3(c)와 비교하면 상대적으로 더 작은 질량비에 대해서도 FRS의 감소가 현저한 것으로 나타났다. 이는 슬래브의 경계부인 벽체의 수직강성이 크기 때문에 지반운동이 직접적으로 전달되는 반면에 슬래브의 수직진동 모드의 참여 질량은 건물 전체 질량에 비해 현저히 작기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 벽체 또는 슬래브의 면외방향 진동에 민감한 기기의 평가에 있어서는 기기와 구조물의 상호작용을 고려함으로써 보다 정확한 평가가 가능할 것으로 판단되며, 상기 부분구조해석법을 이용하여 효율적으로 FRS를 작성할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20201510100020).

* 인천대학교 일반대학원 건축학과, 석사과정

** 인천대학교 도시건축학부, 교수 (E-mail: jhpark606@inu.ac.kr)

참고 문헌

1. American Society of Civil Engineers. ASCE 41-16 Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures. c2017
2. Electric Power Research Institute. Advanced Nuclear Technology: High-Frequency Seismic Loading Evaluation for Standard Nuclear Power Plants (EPRI TR-3002009429). c2017.
3. Choi DH, LEE SH. Generation of Floor Response Spectra including Equipment-Structure Interaction in Frequency Domain. Journal of Engineering Society of Korea. 2005;9(6):13-19.

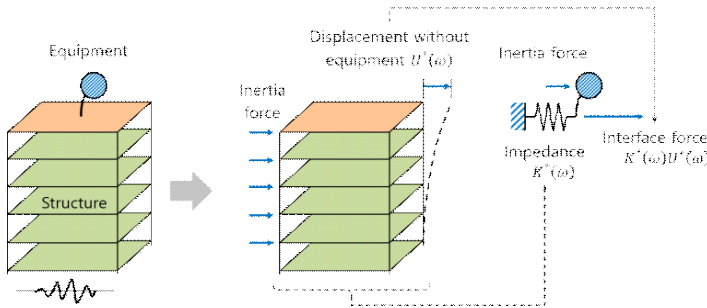


Fig. 1. Substructure method for the coupled system composed of a building and an equipment

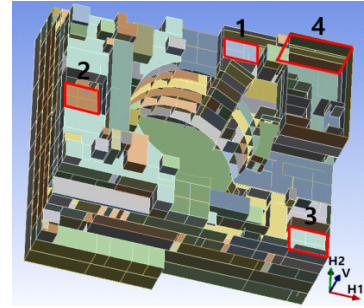


Fig. 2. Finite element model for the auxiliary building of an NPP

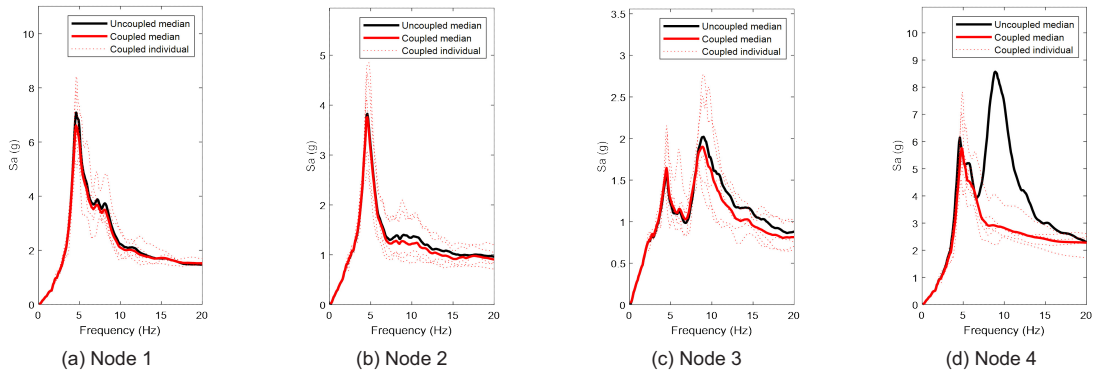


Fig. 3. FRS for mass ratio 0.1 % obtained from decoupled and coupled analysis H2-direction

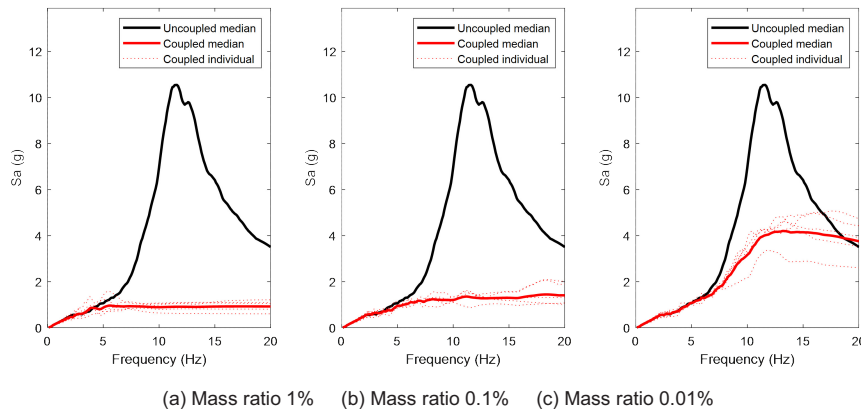


Fig. 4. FRS by decoupled and coupled analysis at Node 3 in V-direction

그룹화된 원전설비 내진시험 지진응답 분석

Seismic Testing Response of Grouped Electrical Cabinets for NPPs

김석철*1)

Kim, Seokchul

김두기**

Kim, Dookie

박동희***

Park, Donghee

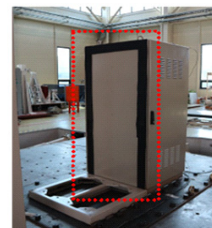
가동원전의 안전관련 필수 설비는 설계지진 수준에 해당하는 지진이 발생하였을 경우 원자로의 안전정지를 위해서 고유기능을 유지해야 한다. 지진 시에도 각각의 원전 설비가 고유기능이 유지됨을 보증하기 위해서 설치 전에 내진시험 및 해석을 통해서 건전성과 기능성이 입증된다. 그러나 기기들은 발전소 내부의 제한된 공간 때문에 내진검증 시에 고려하지 못한 지진상호 작용 환경에 설치되는 상황이 발생한다. 충분한 이격거리를 확보하기 힘든 환경은 충돌을 방지하기 위한 적절한 현장 조치가 요구된다. 현재, 적용될 수 있는 임시 조치는 인접한 두 기기의 일체 거동을 유도하기 위해 상부를 접속 부재로 연결하거나, 두 기기 사이에 탄성체를 삽입하여 충격을 완화시킬 수 있다. 그러나 적용된 조치는 내진 검증시에 고려되지 못한 설치 조건으로 지진 발생으로 인한 내부 부품의 기능성 유지를 보증하기 어려울 수도 있다. 따라서 상세 지진해석 또는 시험을 통해서 적용된 현장 조치가 초기 내진검증 조건과 비교하여 더 가혹한 조건이 아님을 확인해야 한다.

본 연구에서는 원전의 대표 설비중 하나인 캐비닛 형 전기설비를 활용하여 내진검증을 모사한 사례, 두 설비 사이에 탄성체를 삽입한 사례, 상부를 결속시킨 사례의 지진응답을 각각 도출하여 내부응답의 변화에 대해서 분석하였다.

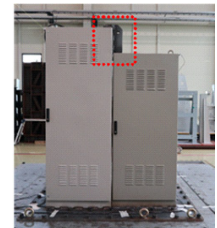
Fig. 1은 원전용 내진1등급 단일 캐비닛 설비를 보여주고 있다. 내진시험을 위해 적용된 입력 지진동 스펙트럼은 캐비닛 설비가 주로 설치된 층의 응답스펙트럼을 모두 포괄하는 스펙트럼을 생성하여 적용하였다. 내진시험은 IEEE 344 시험요건에 따라 수행되었으며 각 사례별 공진탐색시험 및 안전정지지진(SSE)수준의 지진모사 시험을 수행하였다. 조치사항에 따른 가속도 응답을 계측하기 위해서 동일한 위치 12개소에서 지진응답을 계측하였다. 0.2g 기준지진이 적용된 내진 시험을 수행한 결과 그룹화 전의 지진 응답과 다른 응답이 계측되었다. 응답 변화의 원인은 각 조치사항이 대상기기의 동적 시스템에 영향을 주어 나타난 결과로 분석되며 발생한 가속도의 크기는 상부의 강제결속 조건(Case3)보다는 기기 사이에



Case 1(내진검증조건 모사)



Case 2(탄성체 삽입 조건)



Case 3(상부결속 조건)

Fig. 1. Test type for Equipment Interaction

탄성체 삽입 조건(Case2)의 응답이 더 작게 계측되었다. 그룹화시 각 방향별로 지진응답의 차이를 분석한 결과 수직 방향보다는 수평방향의 응답에 영향이 더 크고, 수평방향 중에서도 측면방향 거동에 더 큰 영향을 주는 것으로 분석되었다.

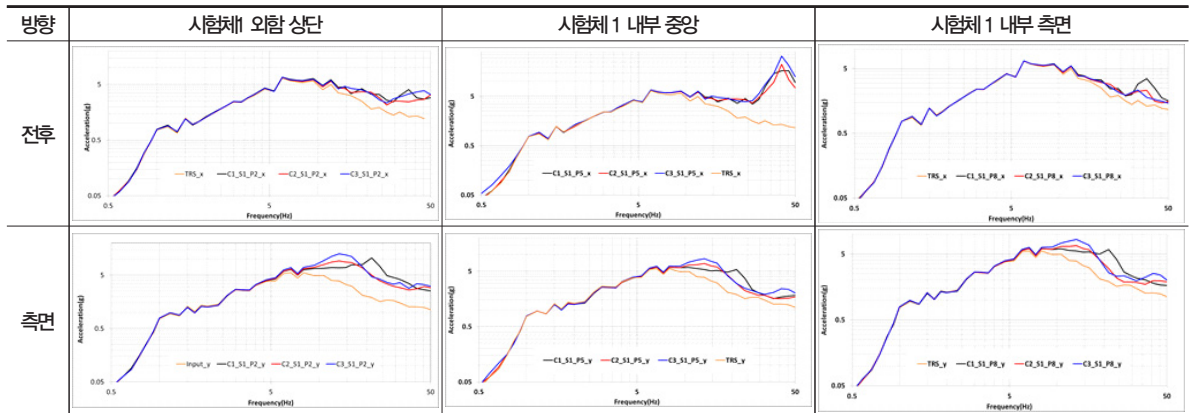
0.3g 기준지진에 대한 기기상호작용 방지를 위해 요구되는 간격은 기기가 설치된 높이가 40ft 이상에서는 4-inch 초과, 40ft 미만에서는 2-inch가 초과된 간격을 확보할 것을 권고한다.[1] 그러나 내진검증(0.2g)측면

* 정회원-한국수력원자력 중앙연구원, 선임연구원 (E-mail: seokchul.k@khnp.co.kr)

** 정회원-공주대학교 건설환경공학부, 교수 (E-mail: kim2kie@kongju.ac.kr)

*** 정회원-한국수력원자력 중앙연구원, 책임연구원 (E-mail: donghee94@khnp.co.kr)

Table 1. Seismic response of grouped electrical cabinets



에서는 권고 수치가 매우 보수적이므로 국내 원전 실정에 맞는 최대수평변위 예측식이 요구된다. 예측식 (S_a/w^2)의 적용성을 검증하기 위해서 각 시험체의 최상단에 변위 계측 센서를 부착하여 각각 전후방향과 측면 방향 변위를 계측하여 분석한 결과 예측식은 충분히 적용이 가능할 것으로 분석되었다.

또한 미국전력연구원(EPRI) 취약도 평가 방법론[2]을 활용하여 그룹화에 따른 내진성능 변화를 분석한 결과 그룹화 되기전의 성능보다는 감소하였지만 0.2g이상의 성능을 보유하고 있음을 확인하였다.

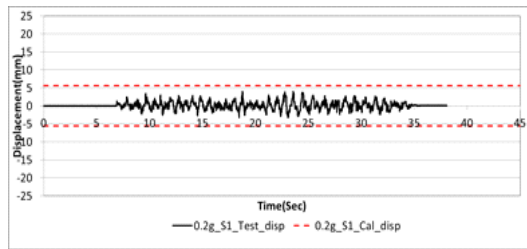


Fig. 2. Maximum horizontal displacement at top of cabinets

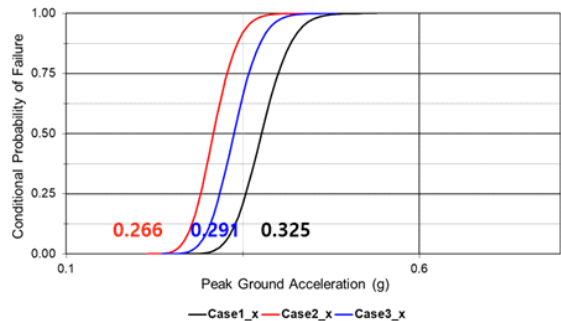


Fig. 3. Fragility Curve in grouping condition

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20171510101960)

참고 문헌

1. EPRI. A Method for Assessment of Nuclear Power Plant Seismic Margin, Revision 1 :NP-6041-SLR-1. Electric Power Research Institute: Palo Alto, CA, USA, 1991.
2. EPRI. Seismic Fragility and Seismic Margin Guidance for Seismic Probabilistic Risk Assessment: No. 3002012994. Electric Power Research Institute: Palo Alto, CA, USA, 2018.

비탄성 에너지 흡수 계수를 고려한 앵커의 지진취약도 평가

Seismic Fragility Evaluation of Anchor Considering Inelastic Energy Absorption Factor For Nuclear Power Plants

임승현*1) 광신영** 최인길*** 정재욱**** 김석철*****
 Eem, Seunghyun Kwag, Shinyoung Choi, In-Kil Jung, Jae-Wook Kim, Seokchul

원자력발전소(이하 원전)은 구조물, 시스템 및 기기 등을 종합적으로 평가하여 그 안전성을 평가한다. 또한 국내에서 발생한 경주지진(2016년)과 포항지진(2017년)에 발생한 지진 특성을 분석[1]하면 국내 원전 설계에서 많이 활용한 NRC의 Regulatory Guide 1.60(R.G. 1.60)의 설계응답스펙트럼[2]과 차이를 보인다. 그 차이는 R.G. 1.60의 설계응답스펙트럼과 비교하여 국내에서 발생한 지진은 고진동수 영역에서 스펙트럼 가속도가 큰 것을 확인 할 수 있다[3]. 따라서 구조물에 비해 상대적으로 고유진동수가 높은 기기들에 안전성에 영향을 미칠 수 있다. 기기의 경우 기능적 손상과 구조적 손상이 있으며, 구조적 손상의 경우 정착부의 손상이 대표적이다. Electric Power Research Institute(EPRI)에서는 앵커부의 내진성능 평가 수행 시 고려하지 않던 비탄성 에너지 흡수 계수를 고려하여 앵커의 지진취약도 방법을 제안하였다[4]. 따라서 본 연구에서는 국내 지진동 특성을 반영한 등재해도 응답스펙트럼을 바탕으로 비탄성 에너지 흡수 계수를 적용 여부에 따른 앵커의 지진취약도 평가를 수행하였다[5].

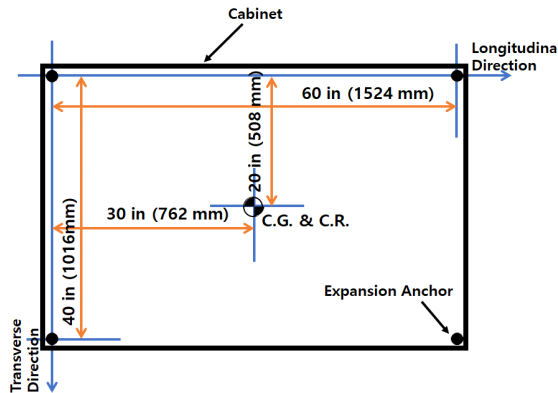


Fig. 1. Cabinet anchorage details[5]

대상 캐비닛은 Fig. 1에 나타내었으며, 무게는 22.2kN이며 콘크리트 바닥에 고정되었다고 가정하였다[4]. 사용된 앵커는 Phillips사의 확장앵커이며 직경은 9.525mm 이며, 삽입깊이는 44.45mm 이다. 비탄성 에너지 흡수 계수 적용 여부에 따른 캐비닛의 지진취약도 계수는 Fig. 2에 나타내었다. 본 예제에서 캐비닛의 비탄성 에너지 흡수 계수를 고려하는 경우 고려하지 않았을 때 보다 내진성능이 증가하는 것을 확인할 수 있다[5].

* 정회원, 경북대학교 융복합시스템공학부, 플랜트시스템전공 조교수 (E-mail: eemsh@knu.ac.kr)

** 한밭대학교 건설환경공학과, 조교수 (E-mail: skwag@hanbat.ac.kr)

*** 한국원자력연구원 첨단구조·지진안전연구부, 책임연구원 (E-mail: cik@kaeri.re.kr)

**** 한국원자력연구원 첨단구조·지진안전연구부, 선임연구원 (E-mail: jaewook1987@kaeri.re.kr)

***** 한국수력원자력 중앙연구원, 선임연구원 (E-mail: seokchul.k@khnp.co.kr)

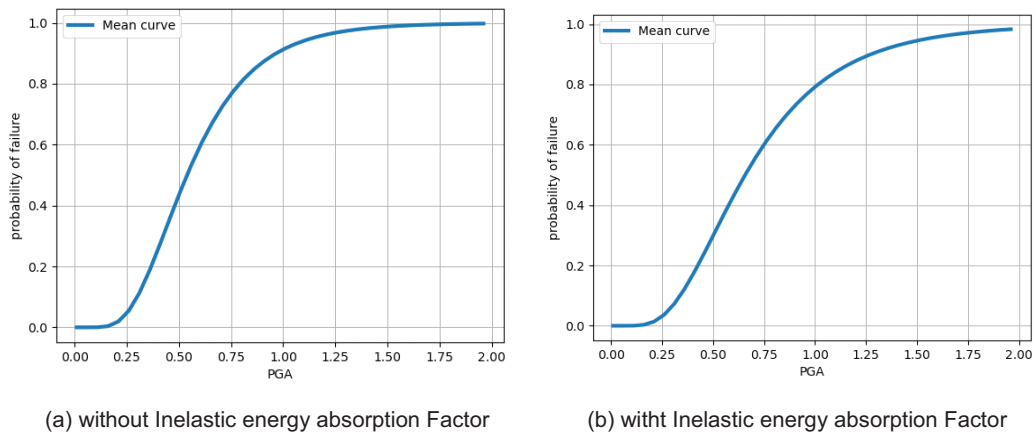


Fig. 2. Seismic fragility curve of the cabinet[5]

감사의 글

이 연구는 2020년도 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다(No. 2020R1G1A1007570).

참고 문헌

1. Eem S, Yang B, Jeon H. Earthquake Damage Assessment of Buildings Using Opendata in the Pohang and the Gyeongju Earthquakes. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*. 2018; 22(3):121-128.
2. US Nuclear Regulatory Commission. Regulatory Guide 1.60: Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants. c2014.
3. Eem S, Choi IK. Shape of the Response Spectrum for Evaluation of the Ultimate Seismic Capacity of Structures and Equipment including High-frequency Earthquake Characteristics. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*. 2020;24(1): 1-8.
4. Kassawara B, Richards J. High Frequency Seismic Inelastic Effects on Equipment Anchorage. EPRI 3002010665. c2017.
5. Eem, S., Kwag, S., Choi, I. K., Jung, J. W., & Kim, S. (2021). Seismic Fragility Analysis Considering the Inelastic Behavior of Equipment Anchorages for High-Frequency Earthquakes. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 25(6), 261-266.

수직 평저 유체저장탱크의 지진취약도 분석 방법에 대한 비교 검토

Comparison of Seismic Fragility Analysis Results of Flat-Bottom Vertical Fluid Storage Tank Estimated by Different Guidelines

조성국*1)
Cho, Sung Gook소기환**
So, Gi Hwan모지훈***
Moo, Jee Hoon

원자력발전소에 대한 확률론적지진위험도평가(seismic probabilistic risk assessment : SPRA)의 기본적인 자료와 정보는 다양한 기기 및 기계 시스템의 취약도와 관련이 있다. 어떤 기기에 대한 지진취약도 및 그와 관련된 불확실성의 특성은 SPRA의 결과에 직접적으로 영향을 미친다. 수직 평저 유체저장탱크는 원자력발전소에서 널리 사용되고 있으며 특히 보조건물의 응축수저장탱크에 사용되고 있다. 원자력발전소의 내진범주 I 급으로 분류되는 급수저장탱크와 연료 보급용 유체저장탱크의 파손은 확률론적내진안전성평가(seismic probabilistic safety assessment : SPSA)에서 가장 관심을 갖는 파괴 유형의 하나이다. 수직 평저 탱크에 발생 가능한 파괴모드는 탱크의 활동 및 전복 또는 탱크 벽면의 좌굴 등이며 이 파괴모드는 탱크의 HCLPF(고 신뢰도저파손확률) 성능을 지배한다.

이 연구에서는 수직 평저 유체저장탱크에 적용하는 지진취약도 분석 방법론을 검토하였다. 이를 위해 실무에서 이용하는 세 가지 분석방법을 조사하고, 각 방법의 특징을 분석하였으며, 실제 탱크를 대상으로 각 방법에 따라 계산된 지진취약도를 비교하였다. 이 연구에서 사용한 방법은 미국 전력연구소의 실무지침인 EPRI/NP-6041, EPRI/TR-103959, EPRI/TR-3002012294에서 제시하고 있는 방법이다.

정량적인 비교를 위하여 수치해석을 실시하였다. 선정된 수직 평저 유체저장탱크는 EPRI/NP-6041의 예시에서 제시하고 있는 탱크로서 탱크의 제원은 다음과 같다.

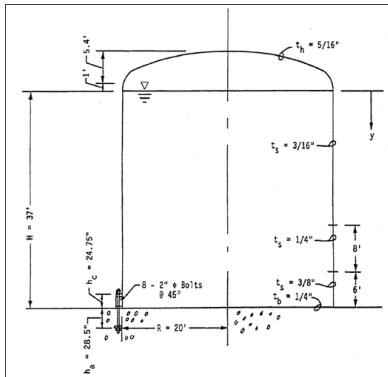


Fig. 1. shape of Flat-Bottom Vertical Fluid Storage Tank

Table 1. Tank dimensions, component weights, and material properties

dimension, weights of tank	material properties
Tank Radius: $R=20$ ft	Young's Modulus :
Tank Height: $H_T=43.4$ ft	$E_s=2.77E+07$ psi
Water Height: $H_W=37$ ft	Mass Density of steel :
Head Weight: $W_H=17.2$ kips	$\rho_s=490$ pcf
Shell Weight: $W_S=44.9$ kips	Mass Density of water :
Bottom Weight: $W_B=12.8$ kips	$\rho_W=62$ pcf
Water Weight: $W_W=2900$ kips	Poisson's Ratio : $\nu=0.3$
Average Shell Thickness: $t_s=0.22$ in	

EPRI/NP-6041에서는 내진여유도 평가 방법에 기초하여 기기의 지진취약도를 계산하며, 이를 위해 결정론적내진여유도평가법(CDFM 접근법)을 사용한다. 최근에 발간된 지진취약도 분석 실무지침서인 EPRI/TR-3002012294는 EPRI/NP-6041을 기반으로 과거의 지진취약도 분석 지침서인 EPRI/TR-103959와 통합하여 개발된 것이다. EPRI/NP-6041과 다르게 EPRI/TR-103959와 EPRI/TR-3002012294는 결정론적내

* 정희원, 이노스기술, 대표이사 (E-mail: sgcho@innose.co.kr)

** 정희원, 이노스기술, 차장 (E-mail: ghso@innose.co.kr)

*** 정희원, 이노스기술, 사원 (E-mail: jhmoo@innose.co.kr)

진여유도(CDFM) 방법 및 변수분리(SOV) 방법을 사용한다. SOV 방법은 중앙값 가속도 성능 (S_{am})과 그 성능의 무작위성을 반영하는 로그표준편차 (β_R) 및 불확실성을 반영하는 로그표준편차 (β_U)를 가진 취약도 모델을 사용하여 계산된다.

$$HCLFP = S_{am} e^{-1.65(\beta_R + \beta_U)}$$

EPRI/NP-6041, EPRI/TR-103959 EPRI/및 TR-3002012294의 주요 특징과 각 방법으로 계산된 탱크의 지진취약도 결과를 Table 2에 비교하였다.

Table 2. Summary of results and differences of 3 guidelines for seismic fragility analysis

구 분	NP-6041 (1991)	TR-103959 (2010)	TR-3002012294 (2018)
결 과	1) CDFM 접근법: $SME_M = 0.31g$	1) HCLFP CDFM 접근법: $HCLPF_{84}(PGA) = F_s * F_\mu * PGA_R$ $= 0.29g$ 2) SOV 접근법 (Fragility): $HCLPF_{84}(PGA) = \frac{\bar{S}_A}{2.12} = 0.29g$	1) HCLFP CDFM 접근법: $HCLPF_{84}(PGA) = F_s * F_\mu * PGA_R$ $= 0.23g$ 2) SOV 접근법 (Fragility): $HCLPF_{84}(PGA) = S_{am} e^{-1.65(\beta_U + \beta_R)}$ $= 0.26g$
차이점	1) 모멘트 (응답, 내력) $M_R = \sqrt{M_{impulse}^2 + M_{convection}^2}$ $M_R = 19600 kip-ft$ $M_C = 22300 kip-ft$ 2) 에너지 흡수 계수 $F_\mu = 1.0$ (권고 값) 3) 중립축에 대한 각 β : 2.65 , 2.70, 2.75, 2.80 4) 바닥판 정수압 및 동수압: 1) 바닥판 정수압 및 동수압: $P_{C-} = P_{ST} + P_{SH} - 0.4P_V$ $P_{C-} = 17.5 psi$ $P_{T-} = P_{ST} - P_{SH} - 0.4P_V$ $P_{T-} = 10.5 psi$	1) 모멘트 (응답, 내력) $M_R = f_{ss} f_L / A f_f f_d f_m c f_m (SF) M_{R_R}$ $M_{R_R} = 19600 kip-ft$ $M_R = 42700 kip-ft$ $M_C = 26800 kip-ft$ 2) 에너지 흡수 계수 $F_\mu = 1.54$ (계산) 3) 중립축에 대한 각 β : 2.45, 2.50 , 2.55 4) 바닥판 정수압 및 동수압: $P_{C-} = P_{ST} + f_{ss} f_f f_d f_m c f_m (SF)$ $* [f_{L/A} P_{SH_R} - f_v / H f_{DVH} P_{VR}]$ $P_{C-} = 19.4 psi$ $P_{T-} = P_{ST} - f_{ss} f_f f_d f_m c f_m (SF)$ $* [f_{L/A} P_{SH_R} - f_v / H f_{DVH} P_{VR}]$ $P_{T-} = 4.2 psi$ 5) 중앙성능 가속도: $S_{am} = 0.61g$	1) 모멘트 (응답, 내력) $M_R = F_{HDPN} \sqrt{M_{impulse_m}^2 + M_{convection_m}^2}$ $M_R = 27000 kip-ft$ $M_C = 271300 kip-ft$ 2) 에너지 흡수 계수 $F_\mu = 1.52$ (계산) 3) 중립축에 대한 각 β : 2.48, 2.53 , 2.57, 2.60 4) 바닥판 정수압 및 동수압: $P_{C-} = P_{ST} + F_{HFP} P_{H_m} - F_{ECC} F_{VFP} P_{V_m}$ $P_{C-} = 2.66 psi$ $P_{T-} = P_{ST} - F_{HFP} P_{H_m} - F_{ECC} F_{VFP} P_{V_m}$ $P_{T-} = 1.28 psi$ 5) 중앙성능 가속도: $S_{am} = 0.50g$

이 연구에서는 동일한 유체저장탱크를 대상으로 세가지 방법을 적용하여 지진취약도를 계산하고 각 결과를 비교하였다. 세가지 지침을 적용하여 동일한 조건에 대하여 계산된 지진취약도는 약간의 차이가 발생하였다.

감사의 글

이 연구는 2021년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 고리1호기기·설비활용 원전안전기술실증사업의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20217910100150)

참고 문헌

- Electric Power Research Institute, EPRI TR-103959, Methodology for Developing Seismic Fragilities., Palo Alto, California. 2010.
- Electric Power Research Institute, TR 3002012294, Seismic Fragility and Seismic Margin Guidance for Seismic Probabilistic Risk Assessments, Palo Alto, California. 2018.
- Electric Power Research Institute, NP-6041-SL1, A Methodology for Assessment of Nuclear Power Plant Seismic Margin (Revision 1), Palo Alto, CA, August 1991.
- Jeongguk Song, Dongwook Kim, Nakhyun Chun, "HCLPF Capacity against Sliding Failure of Flat-Bottom Vertical Fluid Storage Tank", Korean Nuclear Society Spring Meeting, Jeju, Korea May 23-24, 2019.

국의 기준 분석을 통한 설비 내진검증 기준 제안

Suggestion of Equipment Seismic Qualification Criteria through Analysis of Overseas Standards

김정환*1)

홍기증**

Kim, Jung Han

Hong, Kee-Jeung

산업시설과 같이 구조물도 중요하지만 구조물 내에 수용되어있는 설비가 주요 구성요소인 시설에 대해서는 설비 자체의 안전성이 보다 강조되어야 한다. 구조물은 구조설계 및 내진설계 기준에 따라 해석적 방법을 통해 안전성 확보가 가능하다. 반면 대다수의 중요 설비들은 기계적, 전기적 혹은 제어계측 관련 능동설비(Active Component)인 경우가 많고, 이들에 대해서는 구조적 건전성(Structural Integrity)뿐만 아니라 기능수행(Functional Operability) 측면에서도 안전성 검토가 필요하다. 이러한 기능수행 측면에서 설비는 특이 진동에 대해 취약하므로 지진하중에 대한 내진검증이 중요하다. 그러나 다양한 설비 종류를 포괄하고 대규모 장비들을 대상으로 하는 체계적인 국내 내진검증 기준은 아직 확립되어있지 않다. 특히 설비의 구조적 손상에 의한 간접적인 인명피해보다 설비 자체의 기능유지가 중요한 산업시설의 특성이 반영된 내진검증 기준이 필요하다. 이러한 국내 상황을 개선하기 위해 이 연구에서는 설비에 대한 내진검증 기준을 국내 지진하중 특성과 국외 내진검증 기준을 참고하여 제안하고자 한다.

일반적인 비구조요소의 내진안전성을 검증하기 위한 진동대 시험방법은 미국의 ICC-ES AC156[1]이 대표적이다. 변전소 시설에 대한 내진안전성은 IEEE Std 693[2]에서 요구하고 있는 시험절차에 따라 수행하고 있으며, 원자력발전소에 설치되는 설비의 내진검증에는 IEEE Std 344[3]의 기준이 적용되고 있다. 각 기준들의 특징은 다음과 같다.

(1) AC156

- 건축, 기계, 전기 및 기타 비구조 시스템, 구성품 및 구조물에 영구적으로 부착된 요소를 대상으로 함
- IBC(International Building Code)에 따라 ICC Evaluation Service, LLC, (ICC-ES) 평가 보고서에 인정되는 비구조요소의 진동대 시험으로 내진 인증에 대한 최소 요건을 설정
- ASCE 7에서 적용된 중요도계수 개념이 포함됨

(2) IEEE Std 693

- 내진설계와 내진검증을 모두 다룸
- 변전소에만 적용이 국한되며 변전소 설비별로 상세히 기술됨
- 내진검증은 일반적으로 감소된 지진세기에서 시험 또는 해석을 통해 수행

(3) IEEE Std 344

- 원자력발전소의 설비에 대한 내진검증(Seismic Qualification) 절차
- 기본적으로 내진범주(Seismic Category) I 설비를 대상으로 하며 일부 내진범주 II도 포함
- 특정 지진세기, 즉 목표포 하는 응답스펙트럼 수준을 제공하지 않음
- 시험된 설비는 발전소에 설치해서는 안됨

* 정회원부산대학교 건설융합학부, 부교수 (E-mail: jhankim@pusan.ac.kr)

** 정회원국민대학교 건설시스템공학부, 교수 (E-mail: kjhong@kookmin.ac.kr)

- 발전소 가동 기간 동안 발전소 부지에서 발생할 것으로 예상되는 지진인 Operating Basis Earthquake (OBE)와 최대잠재지진인 Safe Shutdown Earthquake (SSE)에 대하여 검증

이들 기준들을 종합하여 국내 실정에 적합한 설비 내진검증 기준을 제시하기 위해서는 다음과 같이 항목들을 고려할 수 있다.

- 내진검증 대상 기준: 중요도에 따른 기준, 기능수행 여부에 따른 기준, 선별제거 기준 등을 고려
- 내진검증 방법 제시: 진동대 시험, 정적 시험, 해석적 방법 병행 등 제시. 설비 유형 및 중요도에 따라 선택 하도록 제시
- 내진검증 시 입력지진 제시: 재현주기에 따른 입력지진 세기 수준 결정. 국내 설계스펙트럼 형상 고려 필요. 지면 설치시 및 구조물 내 설치시 요구응답스펙트럼의 형상 결정 필요. 시간이력 파형 조건 제시
- 내진검증 손상 허용 기준 제시: 설비 유형에 따른 기준 및 중요도에 따른 기준 제시

현 시점에서는 국내에서 완전히 독자적인 내진검증 기준을 제시할 수는 없을 것이다. 하지만 이러한 고려사항들을 체계적으로 정리하고 각 설비의 특성에 맞도록 적용하고자 하는 국외 참조기준을 연계함으로써 국내 각 시설별로 보다 일관된 내진검증 기준 적용이 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2021년 국가건설기준센터의 "산업시설 구조기준 제정(안) 마련을 위한 검증 연구" 지원을 받아 수행한 연구입니다.

참고 문헌

1. ICCES. Acceptance Criteria for Seismic Qualification Testing of Nonstructural Components (AC156), 2015.
2. IEEE. IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations (IEEE Standard 693), The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2018.
3. IEEE. IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations (IEEE Standard 344), The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2013.

2022년도 한국지진공학회 학술발표회 논문집

발행일	2022년 3월 18일
발행처	사단법인 한국지진공학회
발행인	김익현
주 소	서울시 강남구 테헤란로7길 22, 신관 1003호 Tel. 02-555-2838 Fax. 02-555-2851
인쇄처	동양기획 Tel. 02-2272-6826
