

2023 튀르키예-시리아 지진피해

분석 및 사례 모음집



한국지진공학회 여성위원회

서문

2023년 2월 6일 튀르키예 중·남부와 시리아 서부 지역에 규모 7.8의 첫 강진에 이어서 9시간 후 별도의 단층선에서 규모 7.7 지진이 발생하였고, 계속해서 규모 6.7을 포함한 다수의 여진이 지속적으로 발생하였다. 일련의 연속 지진으로 인해서 튀르키예 중·남부와 시리아 서부 지역에서는 광범위한 구조물의 피해뿐만 아니라 특히, 인구 밀집지역에서는 엄청난 인명피해가 발생하였다. 국내에서도 2016년 9월 12일 규모 5.1의 경주지진과 2017년 11월 15일 규모 5.4의 포항지진을 경험하였기에, 지진에 대비한 시민들의 안전의식이 한층 높아졌고, 기존 시설물의 내진 보강과 신축구조물에 대한 내진설계의 강화 등 여러 방면으로 지진 피해를 최소화하고자 하는 노력을 기울이고 있다.

여성위원회에서는 2023년 튀르키예-시리아 지진피해에 대한 교훈을 얻고자, 2023년 가을 Workshop 및 학술발표회에서 ‘튀르키예-시리아 지진피해’ 특별세션을 개최하였다. 이 특별세션을 통하여, 지진 전문가로부터 튀르키예-시리아 지진에 대한 특성을 들으면서 구조물의 피해와 어떻게 연관 지을 수 있는지 상호 소통하는 계기가 되었다. 또한, 지진 피해 지역에 다녀온 구조기술자들로부터 신축 구조물마저 붕괴된 현지에서의 내진설계 적용의 문제점들은 어떠한 것들인지 있는지 인터뷰한 내용들을 전해 들었다. 구체적인 구조물에 대한 피해사례와 관련해서는 건축물의 피해가 컸던 철근콘크리트 구조물의 피해와 인명피해에 큰 영향을 미치는 비구조요소, 그리고 도로·교량·댐을 포함한 사회기반시설물과 문화재의 지진피해를 중점적으로 조사한 자료들을 공유하였다.

이 자료집은 이번 ‘튀르키예-시리아 지진피해’ 특별세션에서 발표되었던 주제들을 가지고 우리 학회 회원들과 국내 관계자들과 공유하고자 하는 내용들을 정리하여 국내 지진에 대비한 대응력을 키우는데 조금이나마 보탬이 되도록 구성한 것이다.

2023.10.31

김남희

한국지진공학회 여성위원회 위원장

목차

서문

1. 튀르키예-시리아 지진의 특성

박동희 · 최세운

2. 내진설계와 건축물의 지진피해

한상환

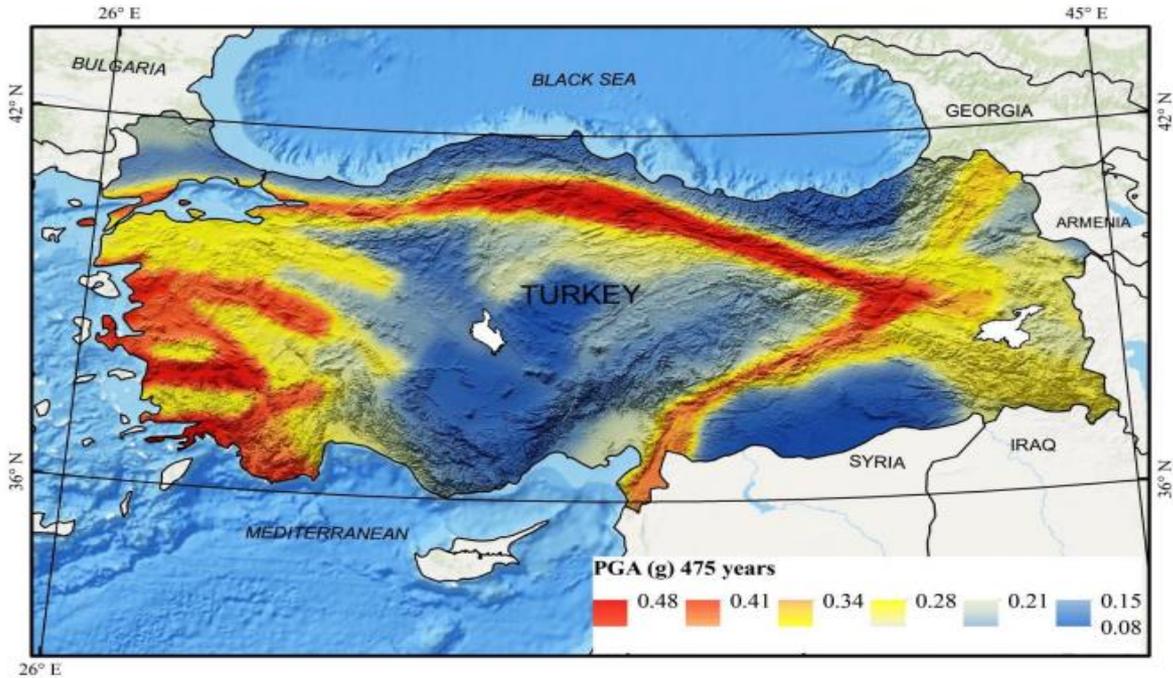
3. 비구조 요소의 피해

백은림 · 김재봉 · 오상훈 · 이상호

4. 사회기반 시설물과 문화재 피해

김남희 · 홍성걸

1. 튀르키예-시리아 지진의 특성



박동희

한국수력원자력 중앙연구원
구조내진그룹장

최세운

한국수력원자력 중앙연구원
구조내진그룹 차장

목 차

1. 튀르키예-시리아 지진의 특성

1.1 2023년 튀르키예-시리아 지진의 특성

1.2 튀르키예 인근의 지진발생 현황과 지진재해도

1.3 튀르키예의 원자력발전소 건설 현황과 지진영향

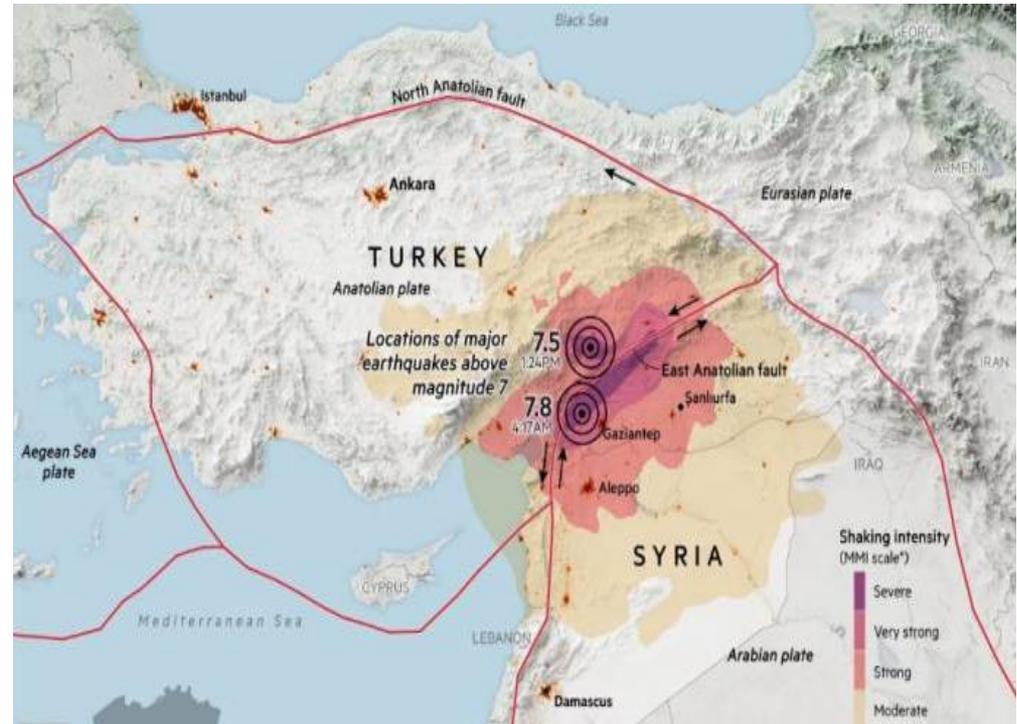
1.1 2023년 튀르키예-시리아 지진의 특성

2023년 2월 6일 오전 1시 17경(UTC, Universal Time Coordinated) 튀르키예 가지 안테프 남쪽 지역에서 모멘트 규모(Moment magnitude, M_w) 7.8의 강진이 발생하여 최대진도는 IX에 이르는 등 튀르키예 중부와 남부를 포함하여 시리아 지역까지 막대한 피해를 미쳤다. 이 지진 발생 11분 후 M_w 6.7의 여진이 발생하였고 지진 발생 9시간 후인 10시 24분(UTC)에는 M_w 7.5의 지진이 발생하여 이 지역에 인적, 물적 피해는 더욱 가중되었으며 현재까지 여진이 이어지고 있다. 이번 장에서는 2023년 2월 발생한 튀르키예-시리아 지진의 발생원인과 과거 이 지역의 지진발생 사례 및 확률론적 지진재해도 분석 결과를 미국 지질조사소 및 국외에서 발표된 논문을 참조하여 정리하였다.

튀르키예-시리아 지역은 아나톨리아판, 아라비아판, 아프리카판 3개의 판의 경계가 위치하고 있으며, 진앙 인근에는 아라비아판이 아나톨리안 판을 밀어올리며 형성된 총 길이 700 km의 동아나톨리안 단층(East Anatolian Fault, EAFZ)과 아라비아판을 유라시아판과 아프리카판의 북쪽으로 밀고있는 사해 변환단층(Dead Sea Transform)이 존재하고 있다. 미국지질조사소에서는 teleseismic 및 regional 지진파형과 GNSS, SAR 관측자료 등을 기반으로 유한단층 모델(Finite fault model) 분석을 수행하였으며, 이에 따르면 이번 지진은 동아나톨리안 단층 인근 3개의 단층 분절(segment)에서 연차적으로 발생하였다. 본진인 M_w 7.8 지진은 길이 약 190km, 폭 25km의 단층을 파열시켰으며 진앙지 인근에서는 진도 IX에 이르고 있고, M_w 7.5의 지진은 본진과는 별도의 단층 분절에서 발생한 지진으로 길이 120km, 폭 18km의 단층을 파열되었다. 튀르키예-시리아 지역은 판의 경계지역으로 지진활동이 비교적 활발하여 규모 7.0 이상의 지진이 다수 발생하고 있으며 대표적인 지진으로는 1789년 지진(M_w 7.2), 1795년 지진(M_w 7.0), 1872년 지진(M_w 7.2), 1894년 지진(M_w 7.1) 등이 있다.

1.1 2023년 튀르키예-시리아 지진의 특성

- 규모(Mw) 7.8 지진
 - 진원시 : 2023-02-06 01:17:34
 - 발생심도: 10.0 km depth
 - 진앙 : 37.226°N 37.014°E
 - 최대진도 : MMI : IX
- 규모(Mw) 7.5 지진
 - 진원시 : 2023-02-06 10:24:48
 - 발생심도 : 7.4 km depth
 - 진앙 : 38.011°N 37.196°E



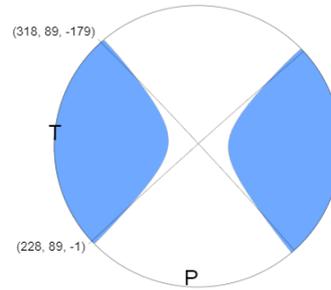
출처 : United States Geological Survey(USGS)

2023년 2월 6일 오전 1시 17경(UTC, Universal Time Coordinated) 튀르키예 가지 안테프 남쪽 지역에서 모멘트 규모(Moment magnitude, Mw) 7.8의 강진이 발생하였다. 본진발생 11분 후 규모(Mw) 6.7의 여진이 발생하였으며, 9시간 후에 모멘트 규모(Mw) 7.5의 지진이 발생하였다.

1.1 2023년 튀르키예-시리아 지진의 특성

■ 규모(Mw) 7.8 지진

- 진원시 : 2023-02-06 01:17:34
- 발생심도: 10.0 km depth
- 진앙 : 37.226°N 37.014°E
- 최대진도 : MMI : IX

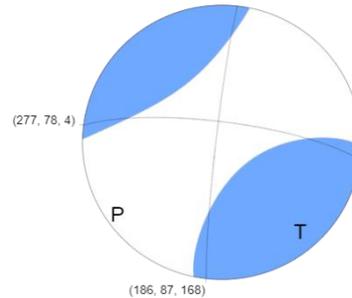


Nodal Planes

Plane	Strike	Dip	Rake
NP1	318°	89°	-179°
NP2	228°	89°	-1°

■ 규모(Mw) 7.5 지진

- 진원시 : 2023-02-06 10:24:48
- 발생심도 : 7.4 km depth
- 진앙 : 38.011°N 37.196°E



Nodal Planes

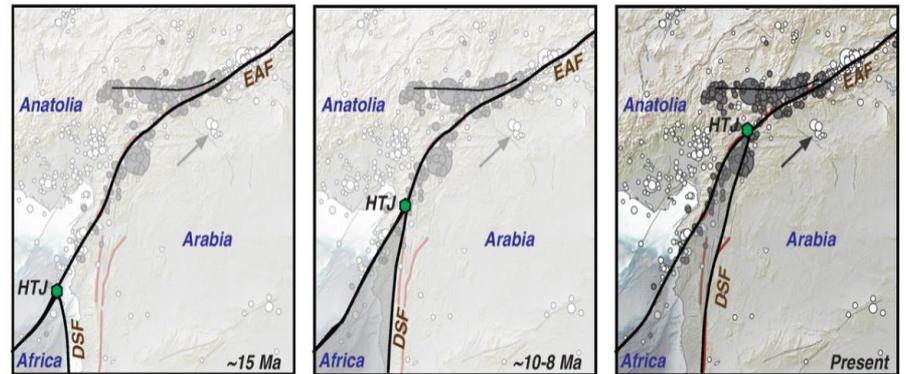
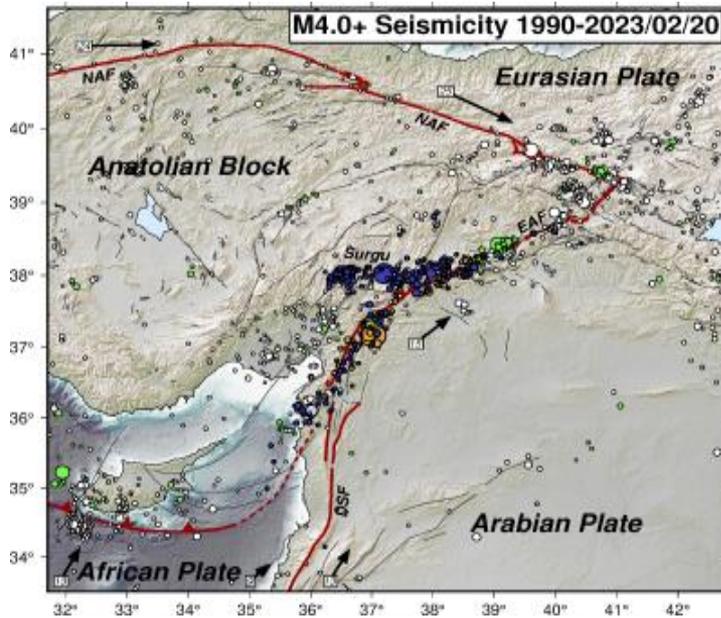
Plane	Strike	Dip	Rake
NP1	277°	78°	4°
NP2	186°	87°	168°

출처 : United States Geological Survey(USGS)

미국 지질조사소(USGS) 에서 수행된 발진기구 분석(Focal Mechanism)에 따르면 규모(Mw)7.8의 지진은 주향이동성분이 우세한 지진으로 nodal plane은 각각 318°/89°, 228°/89° 이며 규모(Mw) 7.5의 지진은 본진과는 별도의 단층 세그먼트에서 난 지진으로 nodal plane은 277°/ 78°, 186°/ 87° 로 분석되었다.

1.1 2023년 튀르키예-시리아 지진의 특성

- Mw 7.8 지진과 Mw 7.5 지진 발생 인근의 판경계의 진화 (HTJ : Hatay Triple Junction)

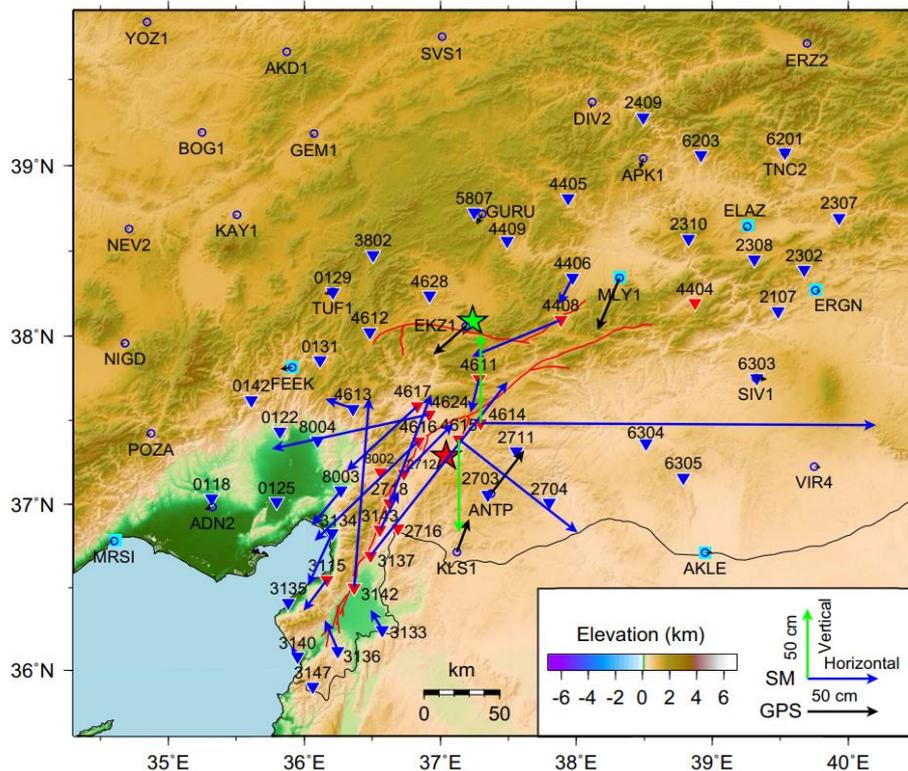


출처 : United States Geological Survey(USGS)

튀르키예-시리아 지역은 아나톨리아판, 아라비아판, 아프리카판 3개의 판의 경계가 한 지점에서 만나고 있는 HTJ(Hatay Triple junction)이 존재한다. HTJ는 약 15Ma 부터 북동방향으로 이동하기 시작하여 약 10-8Ma, 현재에 이르기까지 계속 이동중에 있다.

1.1 2023년 튀르키예-시리아 지진의 특성

- 2023 튀르키예-시리아 지진 시 지표파열(surface rupture)와 GNSS(Global Navigation Satellite System) 관측결과



지진 발생시 단층의 움직임으로 인해 지표에서 변형이 확인되는 지표파열 (surface rupture)이 튀르키예-시리아 지진에서도 관측이 되었다.

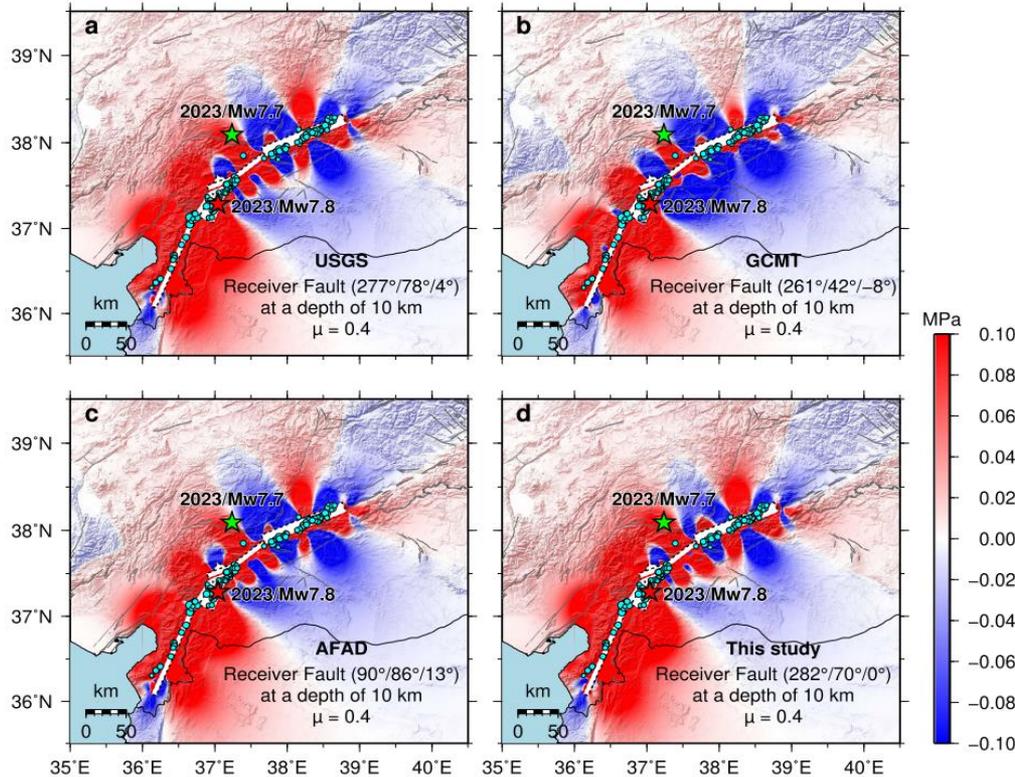
이번 지진으로 동아나톨리아 단층대 내의 수많은 지표변위가 확인되는데, 미국 지질조사소에 따른 초기 추정에 따르면 약 300 km의 단층 길이가 파열된 것으로 나타났다.

또한, 위성 및 레이더 이미지 분석을 통하여 지표변위를 확인하였는데, 동아나톨리안 단층의 북서 지괴는 남서쪽으로 이동하고, 남동부 지괴는 북동쪽으로 이동하는 좌수평 변위가 관찰되었다. 특히, 동아나톨리아 단층의 일부는 약 6.5m 이상의 수평변위가 확인되었다.

출처 : Chengli Liu et al(2023)

1.1 2023년 튀르키예-시리아 지진의 특성

2023 튀르키예-시리아 지진의 지진 발생 전후의 응력 변화



출처 : Chengli Liu et al(2023)

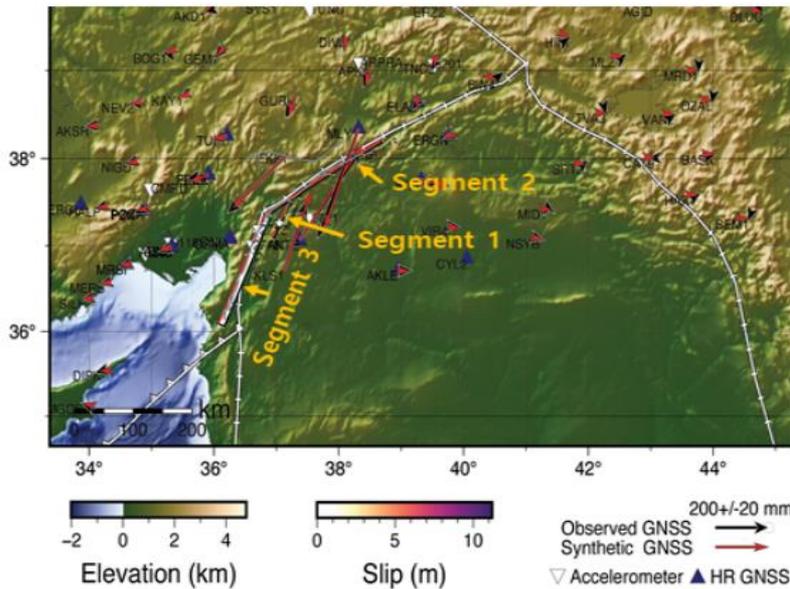
튀르키예-시리아 지진의 본진인 규모 7.8 발생 이후 불과 9시간 후에 발생한 규모 7.5의 지진이 발생하였으며, 7.8의 지진은 EAFZ의 중심부에서 발생하였으며, 7.5의 지진은 EAFZ의 북쪽지점이 파열되었다.

규모 7.5의 발생 메커니즘을 알아보기 위하여 쿨롱 응력변화 분석 수행 결과가 좌측그림과 같다. 그림에서 a, b, c, d는 유효마찰계수 0.4를 적용하였을 경우, 심도 10 km에서 응력 변화량을 계산할 결과이다. 규모 7.8의 지진에 의한 쿨롱 응력변화에 의해 지진이 유발(trigger) 되었다.

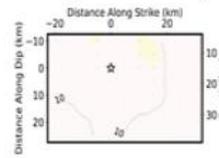
규모 7.8 지진을 유발시킨 단층의 경사가 변화하게 되어 경사각이 42도에서 86로 변화하게 됨에 따라 응력변화가 유발되었고 이에 따라 규모 7.5의 지진이 발생하게 되었다.

1.1 2023년 튀르키예-시리아 지진의 특성

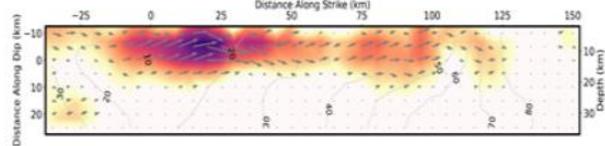
- 모멘트 규모 (Mw 7.8) 지진의 유한단층모델 (finite fault model)



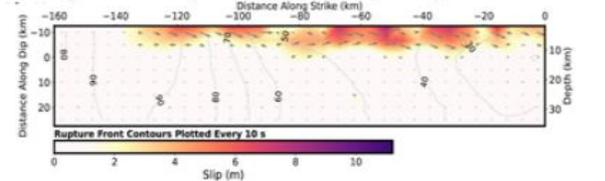
Segment 1 (Strike=28 / Dip=85)



Segment 2 (Strike=60 / Dip=85)



Segment 3 (Strike=25 / Dip=75)

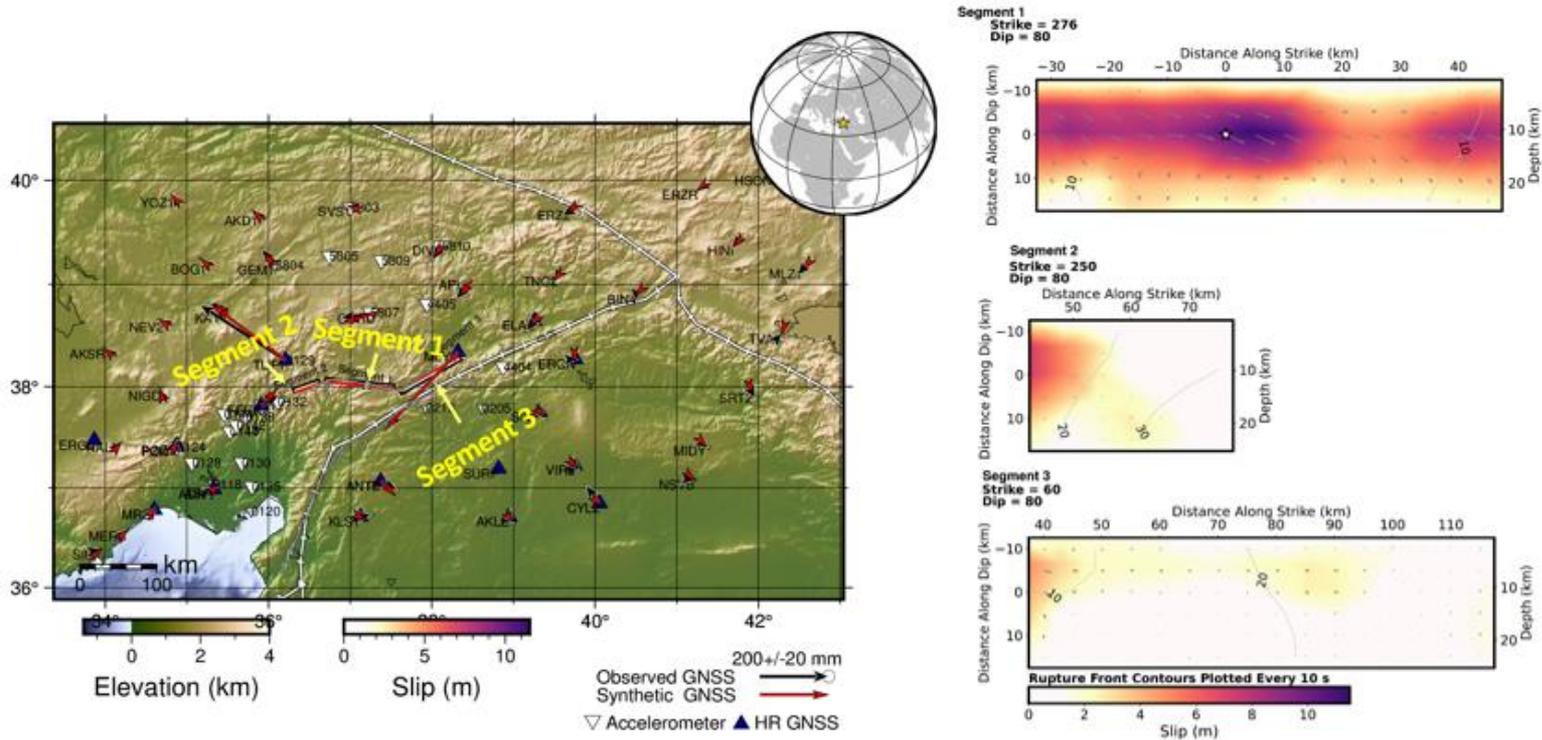


출처 : United States Geological Survey(USGS)

미국 지질조사소에서는 튀르키예-시리아 지진의 유한단층모델 분석을 위하여 45개의 teleseismic P파와, 26개의 광대역 SH파, 72개의 장주기 표면파를 분석하였다. 지진파는 계기응답을 제거하기 위하여 변위자료로 변환하여, Ji et al(2022)가 제안한 finite fault inverse 알고리즘을 이용하여 분석하였다. 그 결과 규모 7.8의 지진의 유한단층모델은 3개의 분절(segment)로 분석되었으며, 각각의 단층분절에 대한 지표 투영결과 및 유한단층 모델을 위 그림에 표시하였다. 그림에서 별표는 진앙지, 단층면상의 slip의 진폭은 칼라색으로 표시하였다. 본진중 가장 큰 분절의 단층길이는 약 190km, 폭 25km이다.

1.1 2023년 튀르키예-시리아 지진의 특성

- 모멘트 규모 (Mw 7.5) 지진의 유한단층모델 (finite fault model)

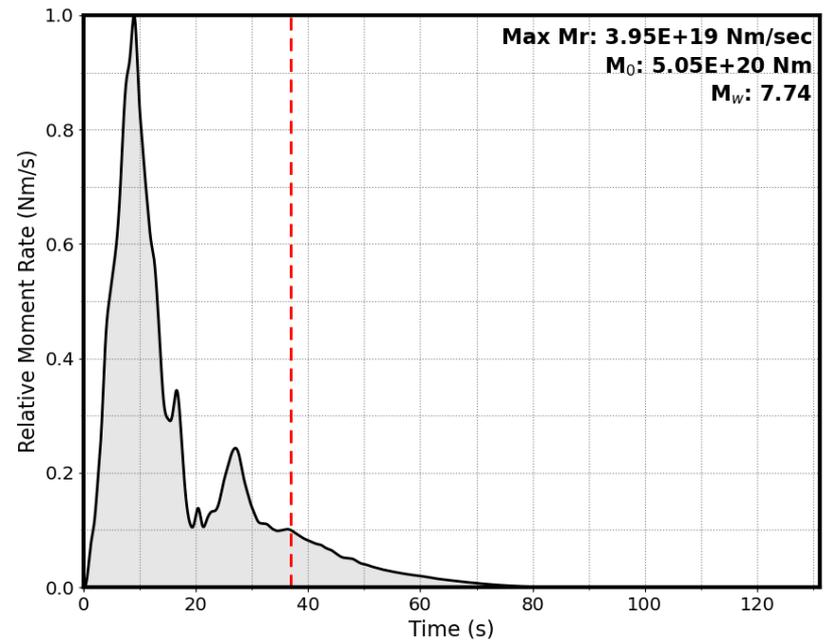
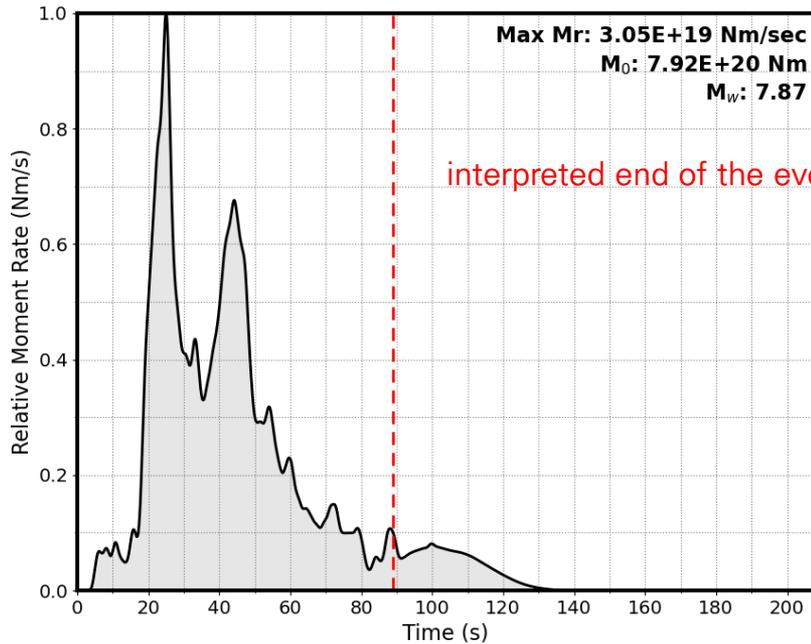


출처 : United States Geological Survey(USGS)

규모 7.5의 지진의 유한단층모델은 3개의 분절(segment)로 분석되었으며, 각각의 단층분절에 대한 지표 투영결과 및 유한단층 모델을 위 그림에 표시하였다. 그림에서 별표는 진앙지, 단층면상의 slip의 진폭은 칼라색으로 표시하였다. 가장 큰 단층 분절의 (그림에서 분절 1) 단층길이는 120km, 폭 18km이다.

1.1 2023년 튀르키예-시리아 지진의 특성

- Mw 7.8 및 Mw 7.8 지진의 source time function

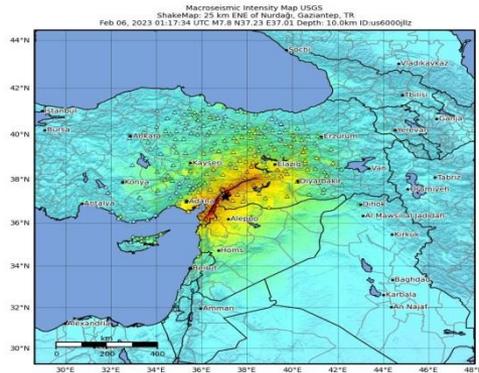


출처 : United States Geological Survey(USGS)

상기 그림은 규모 7.8 및 규모 7.5 지진의 source time function 을 지진 발생 후 시간에 따른 moment 방출율로 표시한 그림이다.

1.1 2023년 튀르키예-시리아 지진의 특성

- Mw 7.8 지진의 진도(intensity), 최대지반가속도(PGA), 최대지반속도(PGV) 분포

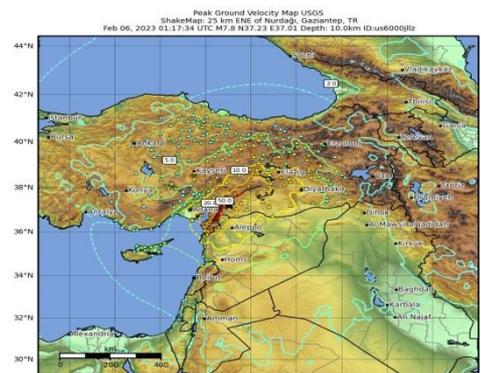


SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
SHAKE	None	None	Very light	Light	Moderate	Moderate/heavy	Heavy	Very heavy	Very heavy
PGA(g)	0.04	0.29	1.41	6.2	11.5	21.5	40.3	74.7	143.9
PGV(cm/s)	<0.021	0.135	1.41	4.65	9.6	20	41.4	85.8	178
INTENSITY	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX

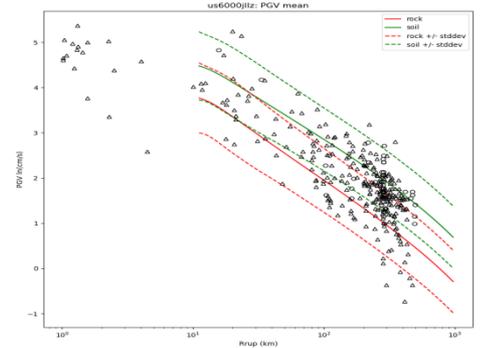
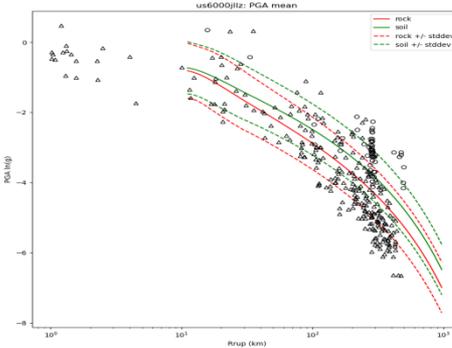
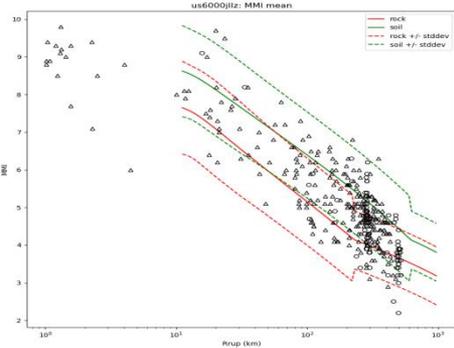
Scale based on Worden et al. (2012) Version 17; Processed 2023-04-14T18:03:10Z
 △ Seismic Instrument ○ Reported Intensity ★ Epicenter ▣ Rupture



PGA (g) | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 | 600
 Scale based on Worden et al. (2012) Version 17; Processed 2023-04-14T18:03:10Z
 △ Seismic Instrument ○ Reported Intensity ★ Epicenter ▣ Rupture



PGV (cm/s) | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 | 200
 Scale based on Worden et al. (2012) Version 17; Processed 2023-04-14T18:03:10Z
 △ Seismic Instrument ○ Reported Intensity ★ Epicenter ▣ Rupture

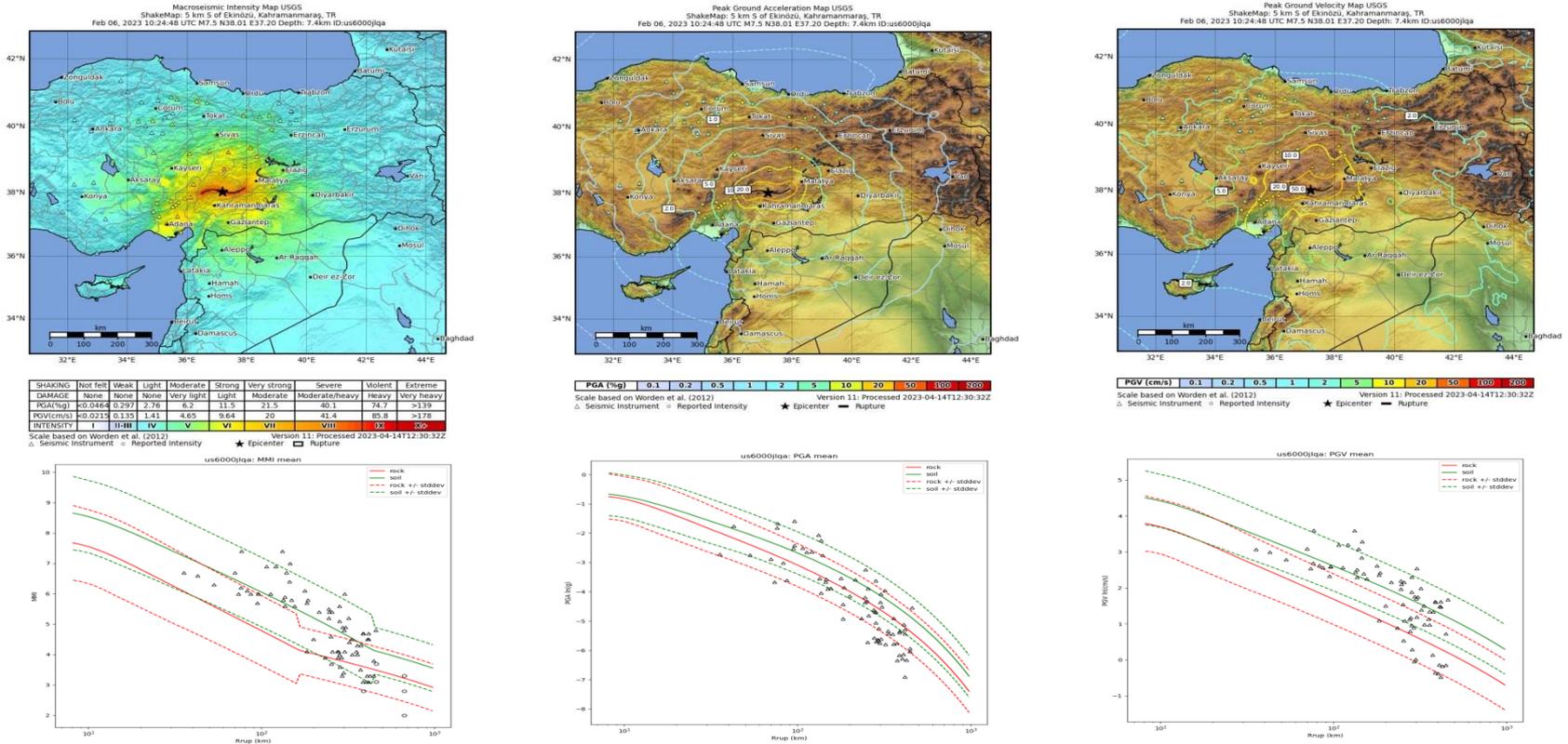


출처 : United States Geological Survey(USGS)

그림은 Mw 7.8 지진의 진도(intensity), 최대지반가속도(PGA), 최대지반속도(PGV) 분포를 각각 나타내고 있다. 하단 그림은 거리에 따른 진도, PGA, PGV 분포를 보여주는 것으로, 초록색은 soil site, 붉은색은 rock site에서 관측 값이다. Rock site에 비하여 soil site에서 진도, 최대지반가속도, 최대지반속도 모두에서 증폭현상을 보이고 있음을 알 수 있다.

1.1 2023년 튀르키예-시리아 지진의 특성

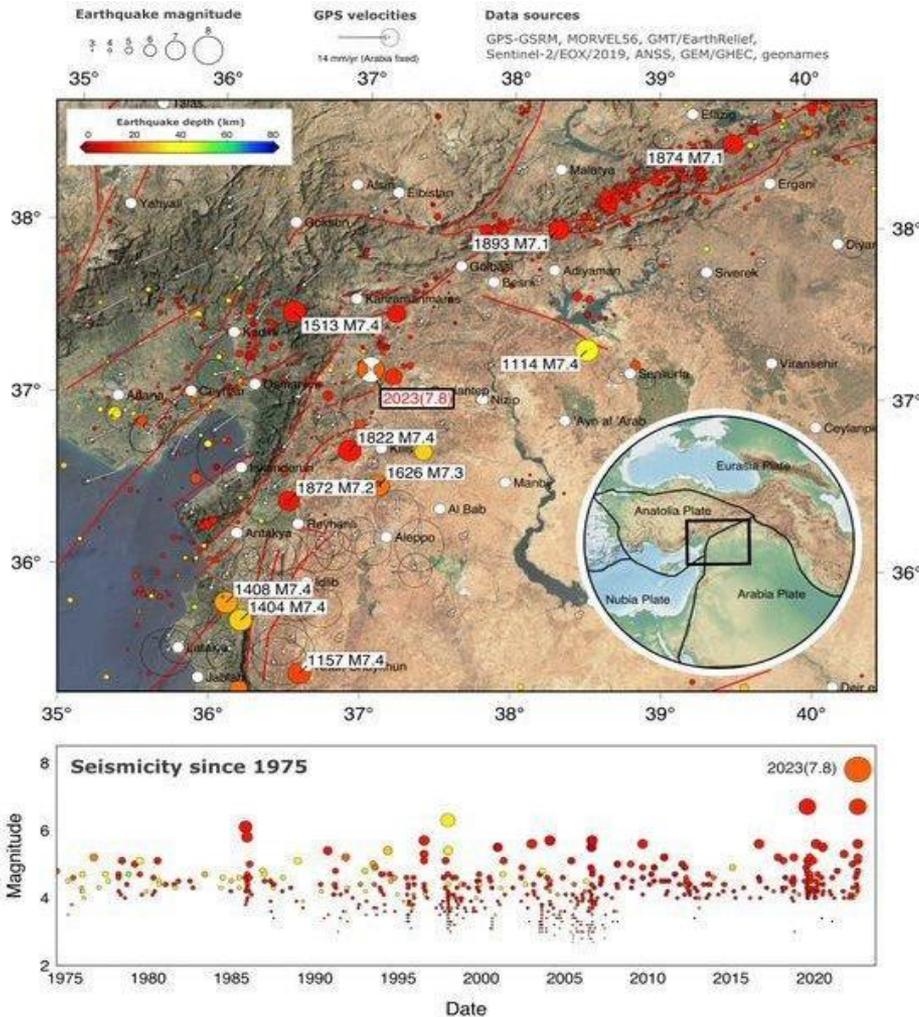
- Mw 7.5 지진의 진도(intensity), 최대지반가속도(PGA), 최대지반속도(PGV) 분포



출처 : United States Geological Survey(USGS)

그림은 Mw 7.5 지진의 진도(intensity), 최대지반가속도(PGA), 최대지반속도(PGV) 분포를 각각 나타내고 있다. 하단 그림은 거리에 따른 진도, PGA, PGV 분포를 보여주는 것으로, 초록색은 soil site, 붉은색은 rock site에서 관측 값이다. 규모 7.8의 지진과 동일하게 rock site에 비하여 soil site에서 증폭현상을 보이고 있음을 알 수 있다.

1.2 튀르키예 인근 지진발생 현황과 지진재해도



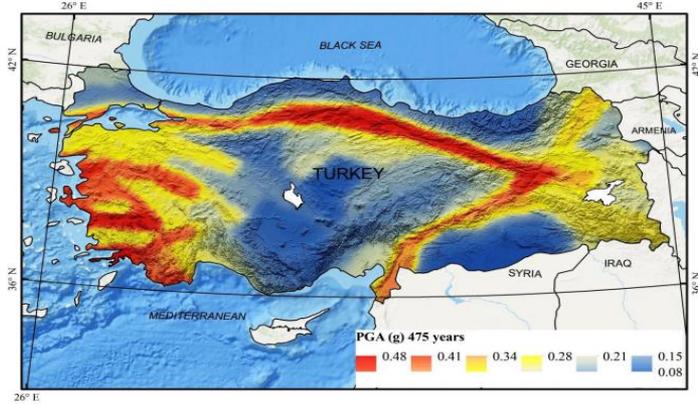
1900년 이후 튀르키예 지역에서 규모 7.0 이상의 지진은 총 21회 발생하였으며, 이들 지진 중 11회는 북아나톨리아 단층 또는 인근지역에서 발생하였다.

동아나톨리아 단층 근처에서 발생한 대표적인 지진으로는 1789년 지진(Mw 7.2), 1795년 지진(Mw 7.0), 1872년 지진(Mw 7.2), 1894년 지진(Mw 7.1) 등이 있다 튀르키예 동쪽의 팔루 단층과 튀르키예 단층에서는 약 150년을 주기로 규모 6.8-7.0의 지진이 발생하고 있으며, 이보다 서쪽의 파자르스크 단층과 아마노스 단층은 각각 237-772년 과 414-941년 주기로 규모 7.0-7.4의 지진이 발생한다.

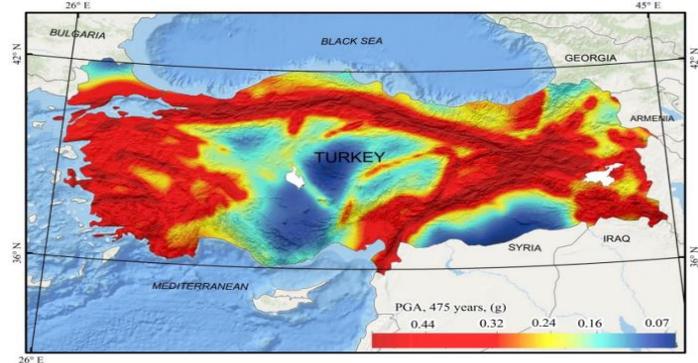
출처 : Twitter from Dr. Juddith Hubbard (2023)

1.2 튀르키예 인근 지진발생 현황과 지진재해도

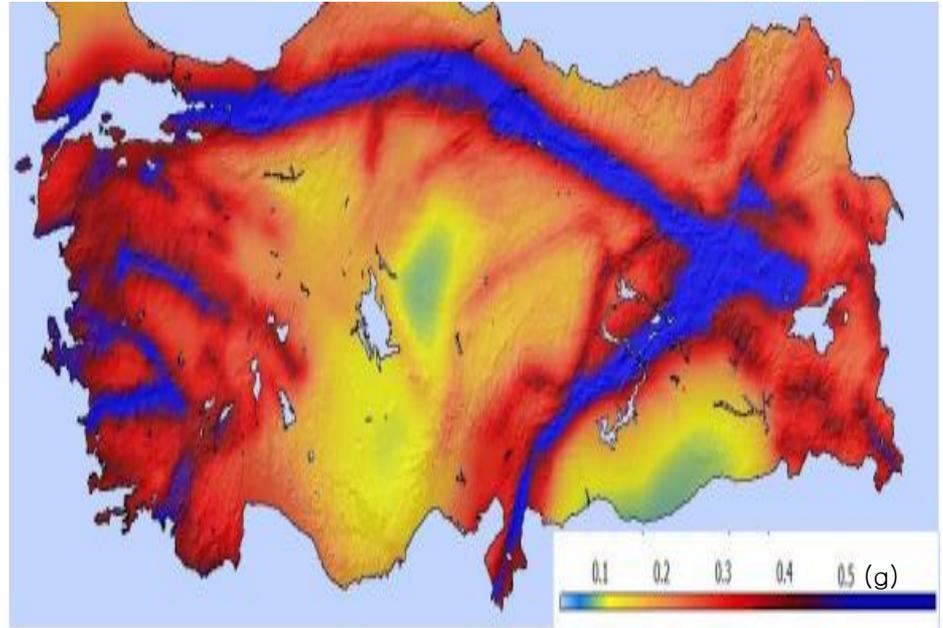
면적지진원에 대한 지진재해도 분석결과(475년 빈도)



단층지진원에 대한 지진재해도 분석결과(475년 빈도)



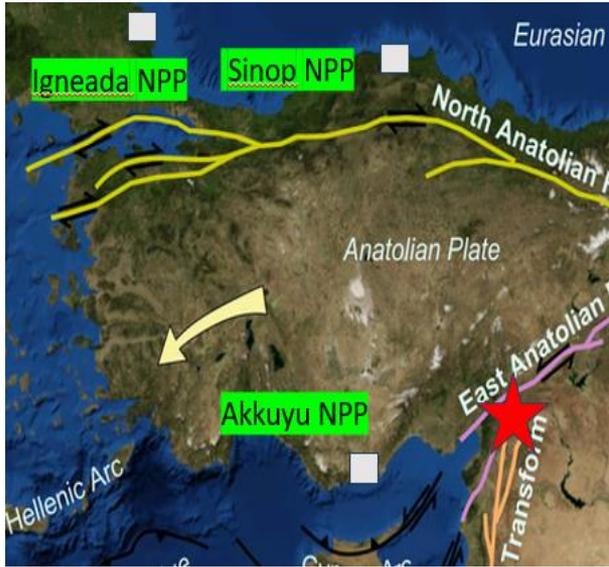
면적+단층 지진원에 대한 확률론적 지진재해도 (475년 빈도)



출처 : Akkar, S. et al (<http://seismo.ethz.ch>)

튀르키예-시리아 지역의 확률론적 지진재해도 분석 결과, 동북 아나톨리안 단층과 아나톨리안 단층 지역에 가장 큰 지진재해도 값을 가지고 있음을 알 수 있으며, 이 지역의 475년 빈도(주기)의 지진재해도 분석결과 북아나톨리안 지역 및 동아나톨리안 지역의 지진재해도는 0.5g 또는 이를 상회하는 값으로 전세계적으로 지진재해도 값이 큰 지역에 해당된다.

1.3 튀르키예의 원자력발전소 건설 현황과 지진 영향



튀르키예 지역의 건설중 또는 건설
계획중인 원자력발전소 위치

Site	Type	MWe gross	Locality	Proponent/utility	Construction start
Sinop 1-4	APR-1400? VVER-1200?	c. 5200'	Sinop Province		
Igneada 1-4	HPR1000 x 4	4 x 1100	Kirklareli Province		

건설원전	건설 현황 ²⁾				피해 현황 ³⁾
	용량 (MWe)	내진설계	건설착수	발전개시 (예정)	
Akkuyu #1	1200	0.388g	2018.4.	2023.	<ul style="list-style-type: none"> 진앙지 거리 : 330km 진도3 수준 진동 영향 현 구조물, 설비, 크레인 피해 없음 건설 영향 관련 세부 진단 수행 중
Akkuyu #2	1200		2020.4.	2024.	
Akkuyu #3	1200		2021.3.	2025.	
Akkuyu #4	1200		2022.7.	2026.	

1) IAEA 공식 Twitter : 튀르키예 원자력규제위원회의 IAEA 보고사항 인용

2) 출처: WNA(World Nuclear Association)

3) Rosatom(Russia nuclear energy company, Akkuyu 원전건설 주계약사) 관계자 인터뷰 인용

강진이 발생할 경우 가장 많이 영향을 받는 시설물 중의 하나로 원자력발전소가 있다. 튀르키예는 1970년 부터 원자력발전소 건설계획을 수립한 이후 2023년 현재 Akkuyu 지역에 러시아의 VVER노형 4800Mwe 원 자력발전소가 건설되고 있다. Akyyu 원전의 설계지진은 0.388g(1g=981cm/s²)이며, 이번 지진과 진앙거리가 330km로 지진에 따른 원자력발전소의 영향은 없으나 진도 3의 진동이 감지되었다.

참고문헌

1. U.S.Geological Survey website. <https://earthquake.usgs.gov>
2. Güvencin, S E., Karabulut, H., Konca, A.O. Dogan, U., Ergintav, S., 2022, Active Seismotectonics of the East Anatolian Fault, *Geological Journal International*, 230, (1), 50-69pp
3. Liu, C., Lay, T., Wang, R. *et al.*, 2023, Complex multi-fault rupture and triggering during the 2023 earthquake doublet in southeastern Türkiye. *Nat Commun* **14**, 5564. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41404-5>
4. Twitter from Dr. Juddith Hubbard (2023)
5. Akkar,S., Azak,T., Çan,T., Çeken, U. et al., 2017, Updated probabilistic seismic hazard maps for turkey, <http://www.seismo.ethz.ch>

2. 내진설계와 건축물의 지진피해



한상환 한양대학교 건축공학부 교수

목 차

2. 내진설계와 건축물의 지진피해

2.1 2023 튀르키예-시리아 지진

2.2 기준의 변화

2.3. 2023 지진으로 인한 피해 건물 수

2.4. 손상수준(DS)에 대한 RC 구조시스템의 손상 정의

2.5 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인

2.6 상세에 따른 내진거동비교 (접합부)

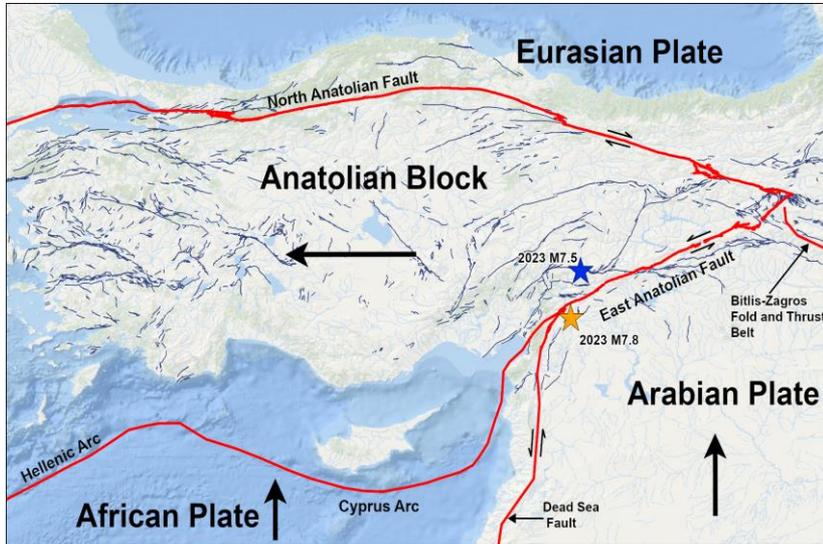
2.7 결론

2.1 2023 튀르키예-시리아 지진

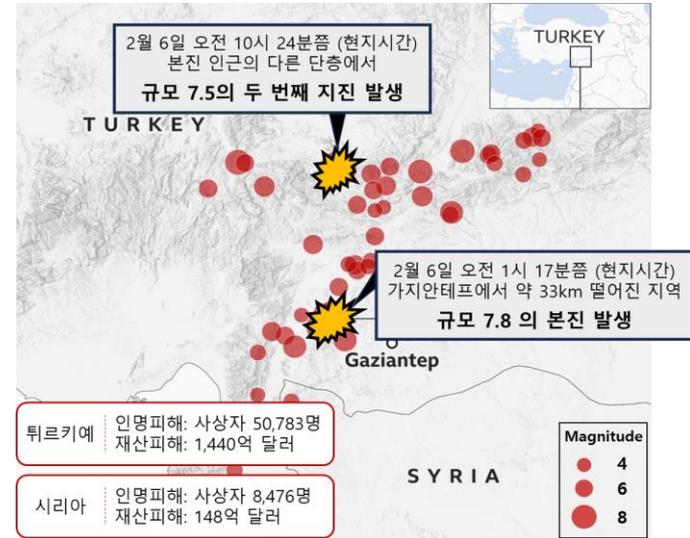
■ 본진 및 여진의 강도 분포

- 2023년 2월 6일 오전 1시 17분경 튀르키예 가지안테프로부터 약 33km 떨어진 지역에서 규모 7.8 (M_w)의 지진 발생.
- 본진 발생 후 24시간 이내 570회 이상 여진이 발생, 2023년 5월까지 30,000회 이상 발생.
- 첫 지진 발생 9시간 후 본진 인근의 다른 단층에서 $M_w=7.5$ 지진이 발생.

시간에 따른 지진 규모 분포



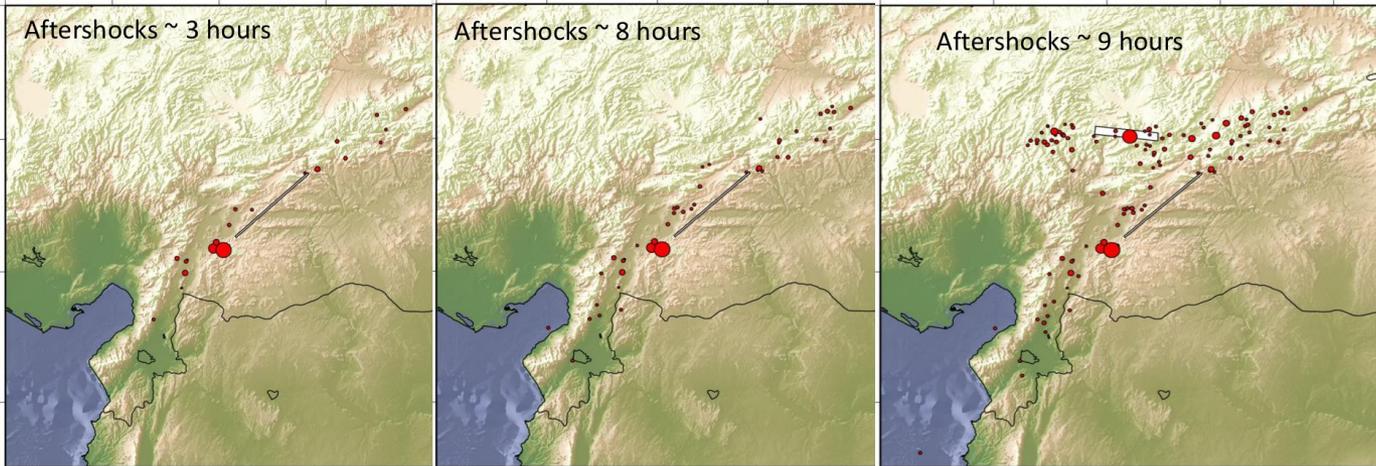
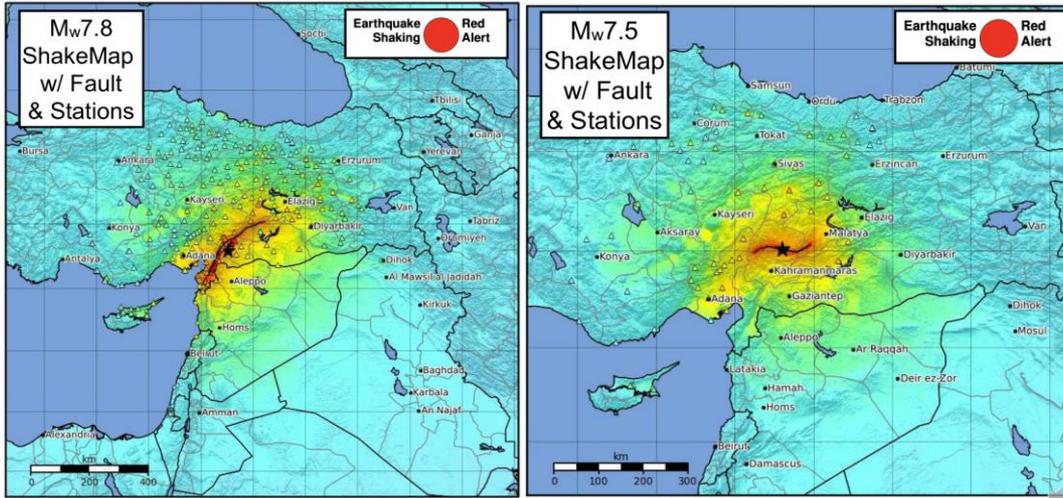
지진 발생 현황



<https://earthquake.usgs.gov/storymap/index-turkey2023.html>

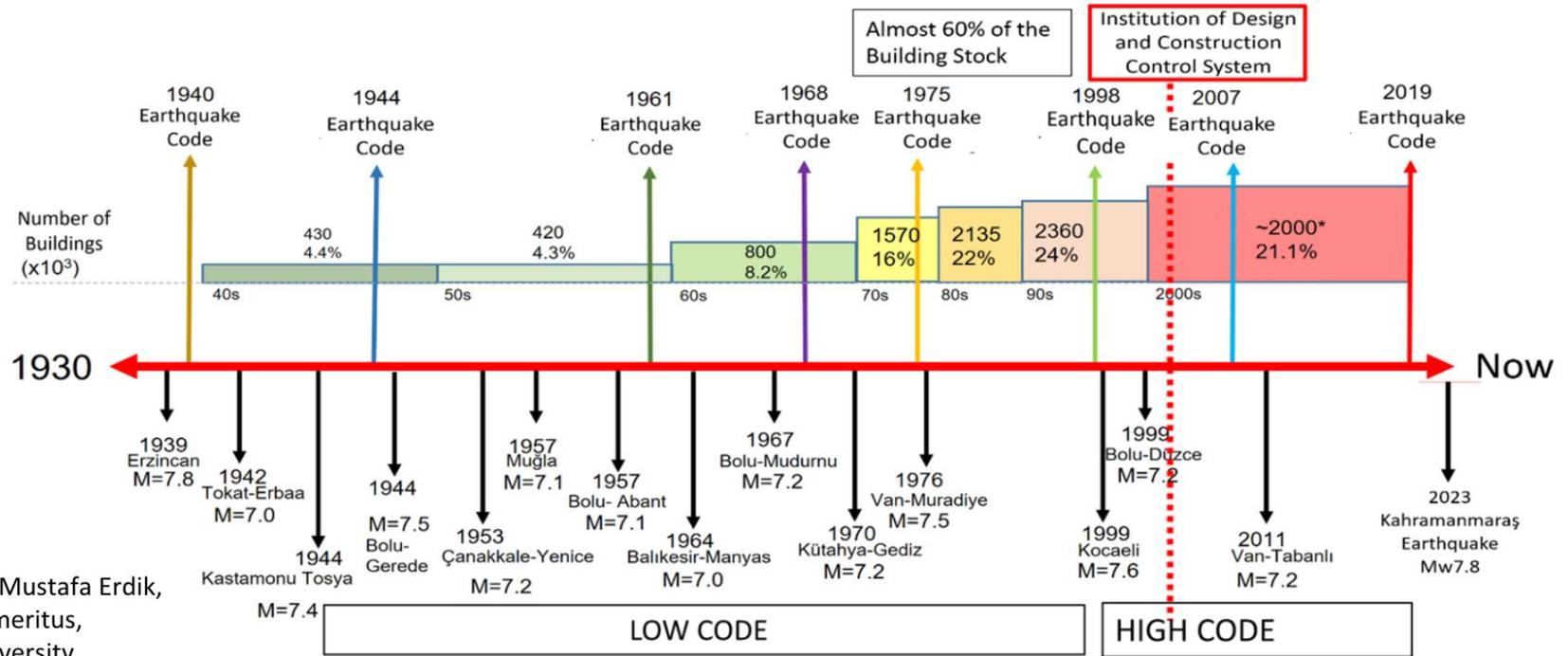
2.1 2023 튀르키예-시리아 지진

■ 본진 및 여진의 강도 분포



<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000jlqa/shakemap/intensity>

2.2 기준의 변화



Courtesy of Mustafa Erdik, Professor Emeritus, Bogazici University

Mieler and Garai (2023)

2.3 2023년 지진으로 인한 피해 건물수

Province	Resident	Workplace	Public	Other	Overall Total
Adana	404,502	29,920	8,916	7,779	451,117
Adıyaman	107,242	5,765	4,370	3,119	120,496
Diyarbakır	199,138	11,412	11,964	3,165	225,679
Elazığ	106,569	7,221	2,872	7,051	123,713
Gaziantep	269,212	22,829	5,480	8,162	305,683
Hatay	357,467	33,511	10,382	5,489	406,849
Kahramanmaraş	219,351	12,358	6,879	4,565	243,153
Kilis	33,399	1,526	1,651	736	37,312
Malatya	159,896	8,370	6,670	4,051	178,987
Osmaniye	128,163	9,428	3,105	2,384	143,080
Şanlıurfa	347,902	18,847	11,790	4,089	382,628
Total in 11 Provinces	2,332,841	161,187	74,079	50,590	2,618,697

Source: MoEUCC



Status	Number of buildings	Percentage of total
Undamaged	860,006	50.2%
Lightly damaged	431,421	25.2%
Moderately damaged	40,228	2.3%
Severely damaged	179,786	10.5%
Collapsed	35,355	2.1%
Requiring urgent demolition	17,491	1.0%
Not assessed	147,895	8.6%
Total	1,712,182	100%



Immediate
Occupancy



Damage
Control



Life
Safety



Collapse
Prevention



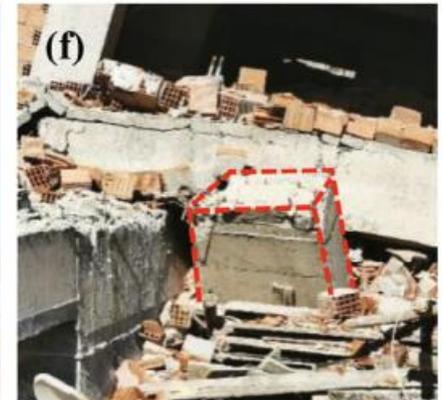
Unsafe

Mieler and Garai (2023)

Sumer et al.(2023)

2.4 RC 구조시스템 손상수준(DS) 정의

- DS4: 붕괴



Tao et al (2023)

2.4 RC 구조시스템 손상수준(DS) 정의

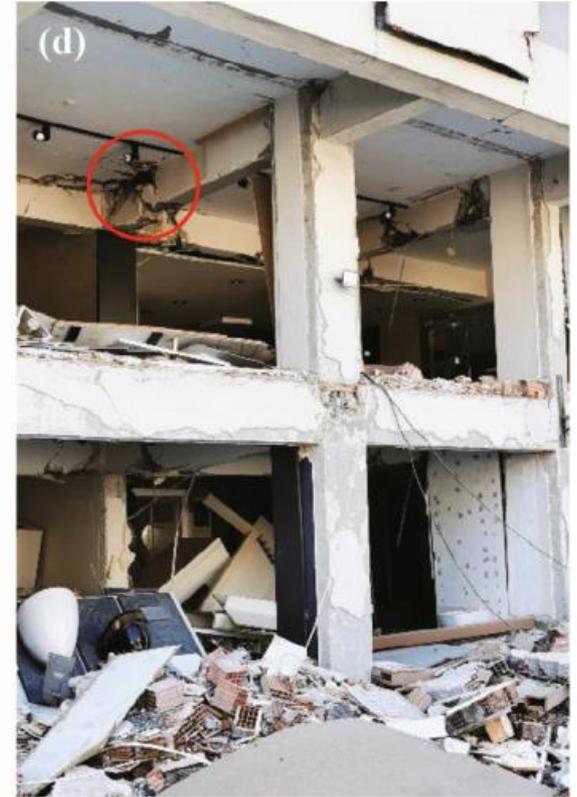
- DS4: 붕괴 (저층부 채움벽 없음)



Mieler and Garai (2023)

2.4 RC 구조시스템 손상수준(DS) 정의

- DS3: 큰 손상



Tao et al (2023)

2.4 RC 구조시스템 손상수준(DS) 정의

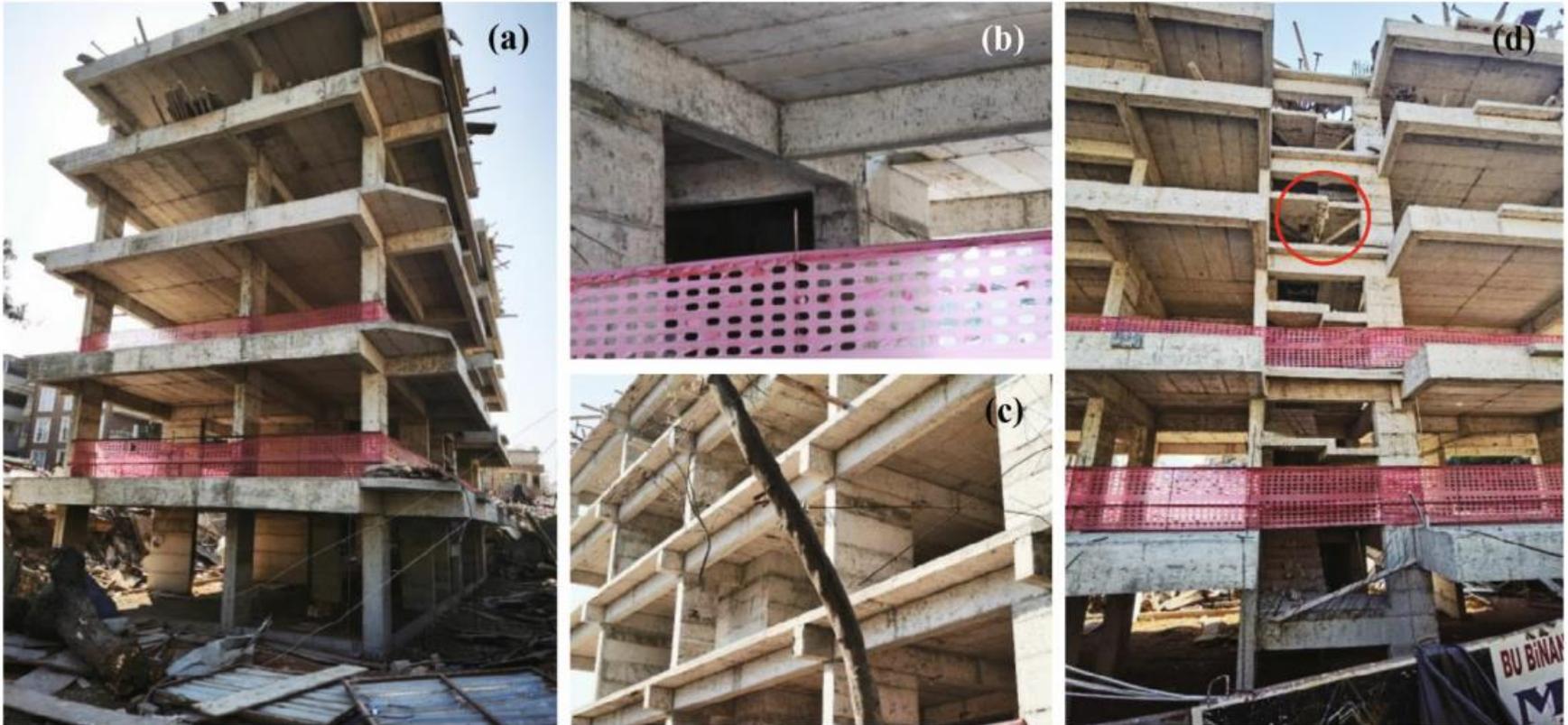
- DS2: 중간 손상



Tao et al (2023)

2.4 RC 구조시스템 손상수준(DS) 정의

- DS1: 작은 손상



Tao et al (2023)

2.5 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인

- RC 구조물은 건설된 연도에 따라 분류하여 원인을 구명하여야 함 (EERC 2003).
 - (1) 현행기준은 1998년 부터 적용되었고, 1999년 8월과 11월에 발생한 두 개의 파괴적인 Kocaeli (Izmit) (7.6)와 Düzce 지진 (7.2)이 구조물 안전에 경종 울림.
 - (2) 2000년 최신 RC 설계 가이드라인 (TS-500)이 개발되었고, 콘크리트 품질관리 규정 (ready mix concrete), 연성 철근 사용에 대한 규정이 제시됨.
 - (3) 건물 감리 (Building Inspection) 법이 2001년 19개 도시를 대상으로 적용되었고, 2010년에는 전국으로 확대.
 - (4) 따라서 2000년 이전에 지어진 건물과 이후에 지어진 건물을 분류하여 피해의 원인 분석하는 것이 타당.



GARINI and GAZETAS (2023)

2.5 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인

- 2000년 이전 건설된 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인
 - (1) 원형철근 사용
 - (2) 부족한 철근 상세



Zeynep Tuna Deger (2023)
GEER report 082 (2023)

2.5 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인

- 2000년 이전 건설된 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인

- (2) 부족한 철근 상세

- 넓은 횡보강근 간격과
품질이 확보되지 않은 콘크리트



Zeynep Tuna Deger (2023)

2.5 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인

- 2000년 이전 건설된 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인

- (2) 부족한 철근 상세

- 넓은 횡보강근 간격과 품질이 확보되지 않은 콘크리트



부적절한 겹침 이음
(Inadequate lap splice length)



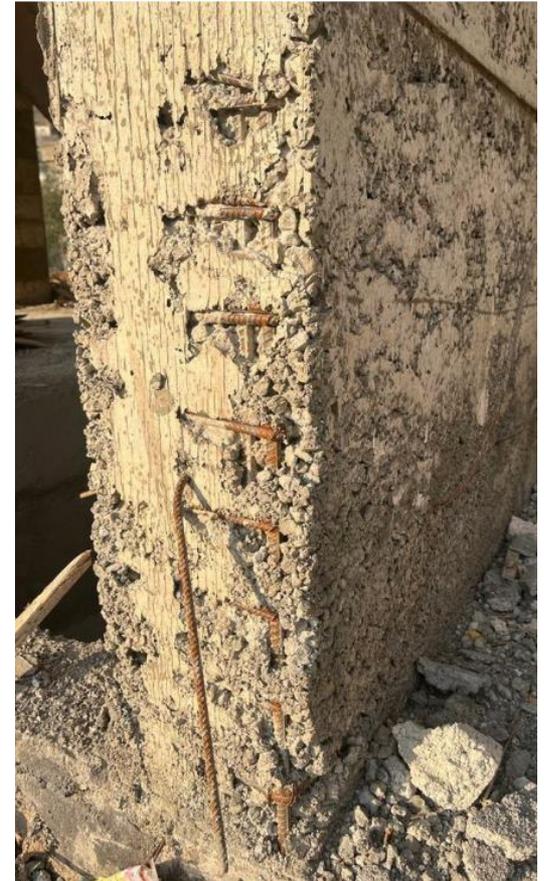
부적절한 갈고리 앵글
(incorrect end hook angles)

Zeynep Tuna Deger (2023)

2.5 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인

- 2000년 이전 건설된 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인

(3) 낮은 콘크리트 강도와 품질

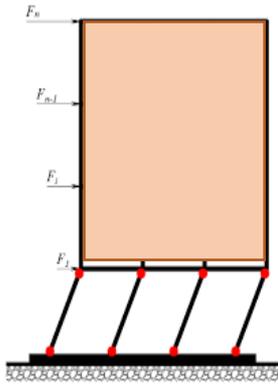


Zeynep Tuna Deger (2023)

2.5 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인

- 2000년 이전 건설된 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인

(4) 연약층 형성으로 인한 붕괴



연약층 거동



<https://www.esquire.com/news-politics/a43217538/turkey-earthquake-photos/>



Garini and Gazetas (2023)

2.5 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인

- 2000년 이전 건설된 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인

(4) 연약층 형성으로 인한 붕괴



Location: Kavaşlı, Turkey



Courtesy of Mustafa Erdik, Professor Emeritus, Deger (2023), Garini and Gazetas (2023), Mieler and Garai (2023)

2.5 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인

- 2000년 이전 건설된 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인

 - (5) Pancake failure (중력하중)



<https://www.esquire.com/news-politics/a43217538/turkey-earthquake-photos/>



<https://www.cNBC.com/2023/02/09/turkey-earthquake-comes-at-a-critical-time-for-the-countrys-future.html>



<https://www.eeri.org/about-eeri/news/14872-eeri-response-to-m7-8-and-m7-5-earthquakes-in-southern-turkey>



Garini and Gazetas (2023)

2.5 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인

- 2000년 이전 건설된 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인

(6) 기둥-보 접합부 파괴



a. Beam-column joint without proper design. Van earthquake in Turkey, 2011 [5].



b. Insufficient lateral ties at the joint [11].

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124105>



Park and Mossalam
2013

2.5 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인

- 2000년 이전 건설된 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인

(7) 약기둥-강보 파괴



<https://doi.org/10.3390/buildings3010173>

2.5 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인

- 2000년 이전 건설된 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인

(8) 건물 충돌 및 전도



Mieler and Garai (2023)

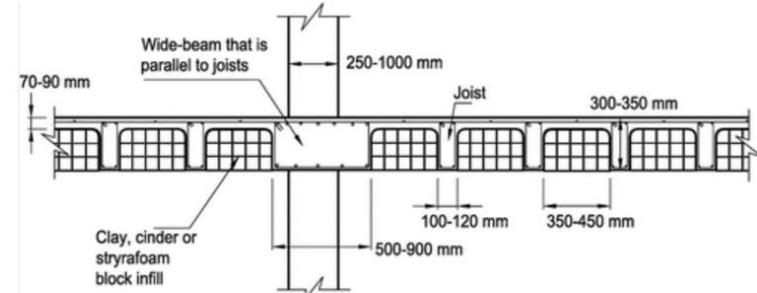
2.5 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인

- 2000년 이후 건설된 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인
 - 2000년 이후에 지어진 건물은 현행 기준에 따라 건설되고 관리되어 내진성능 우수할 것으로 예측.
 - 하지만 이 시기에 지어진 건물 중 1000동 이상이 큰 손상이나 붕괴를 발생.
 - 이는 현행 기준이 정한 내진 성능목표를 만족시키지 못한 것임.
 - 이러한 건물들 피해 원인은 다음과 같이 분류해 볼 수 있음.
 - (1) 다이아프램용 유연한 장선 슬래브 (flexible joist slab) 사용
 - (2) 맹목적인 소프트웨어 사용하는 설계자의 능력 부족과 하중전달 메커니즘에 대한 지식 결여
 - (3) 현장에서 적용한 상세들의 오류
 - (4) 지진으로 인한 요구하중 과소평가
 - (5) 지반조사 미수행과 적합하지 않은 기초설계

2.5 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인

▪ 2000년 이후 건설된 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인

(1) 다이아프램용 유연한 장선 슬래브 (flexible joist slab) 사용



GEER Report 082

- 콘크리트 슬래브 하부에 일정한 간격 배열된 장선보 가짐. 수직부재들에 하중을 전달하는 역할 해야함.
그러나 낮은 슬래브의 두께/보의 너비 비율로 낮은 휨강성을 가져, 적절한 하중전달 메커니즘을 형성하기 어려움.
- TBEC-2018에서는 이를 방지하기 위해 전단벽 설치를 권장하나 이를 따르지 않음.

2.5 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인

- 2000년 이후 건설된 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인
 - (2) 맹목적인 소프트웨어 사용하는 설계자의 능력 부족과 하중전달 메커니즘에 대한 지식 결여
 - (3) 현장에서 적용한 상세들의 오류



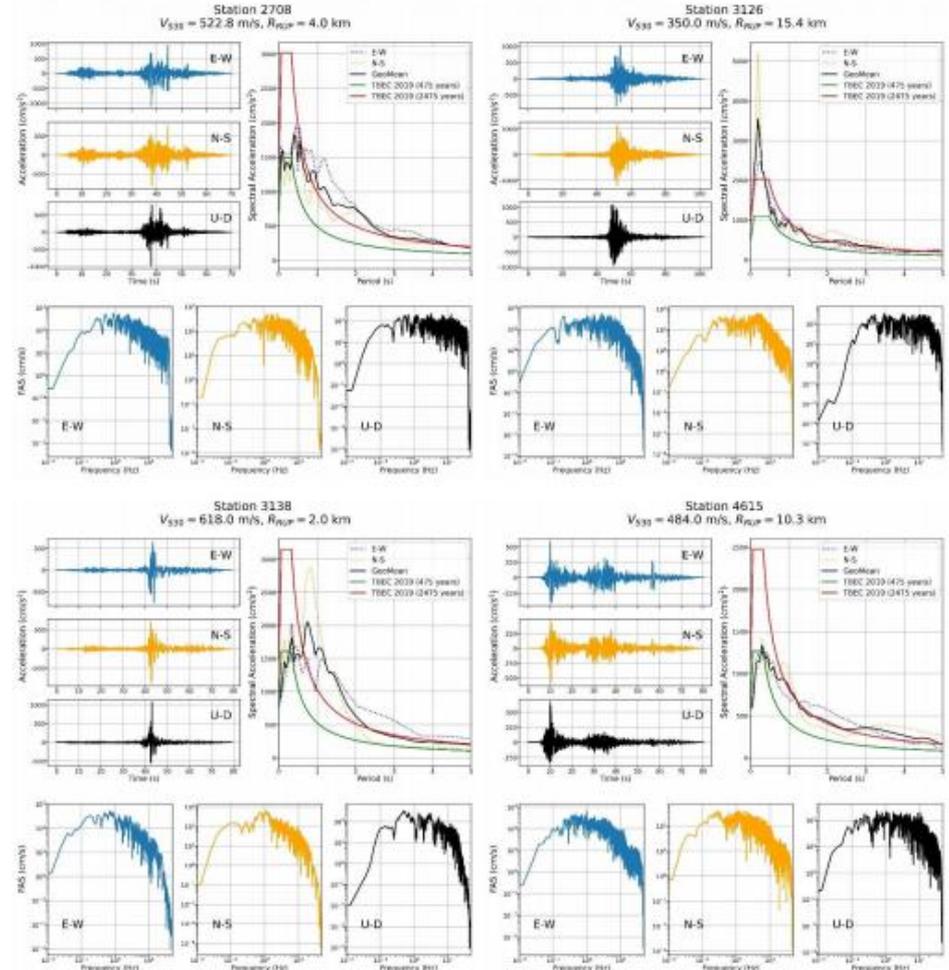
GEER report 082 (2023)
Mieler and Garai (2023)

2.5 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인

2000년 이후 건설된 RC 구조물의 일반적인 피해 발생 원인

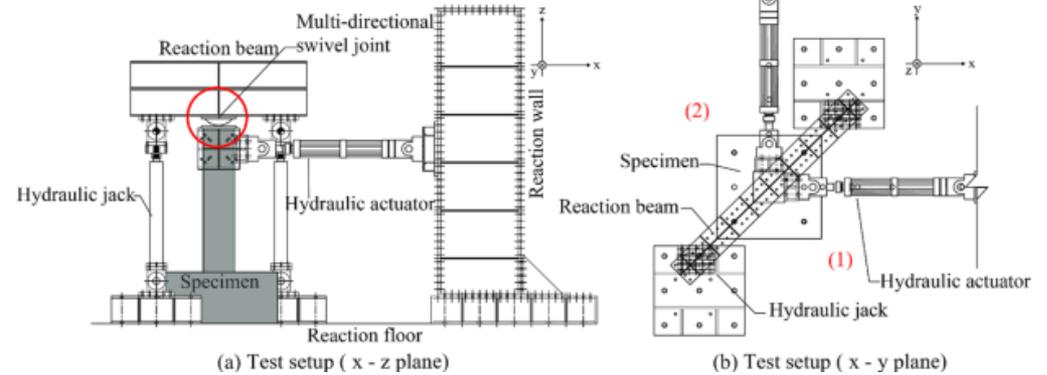
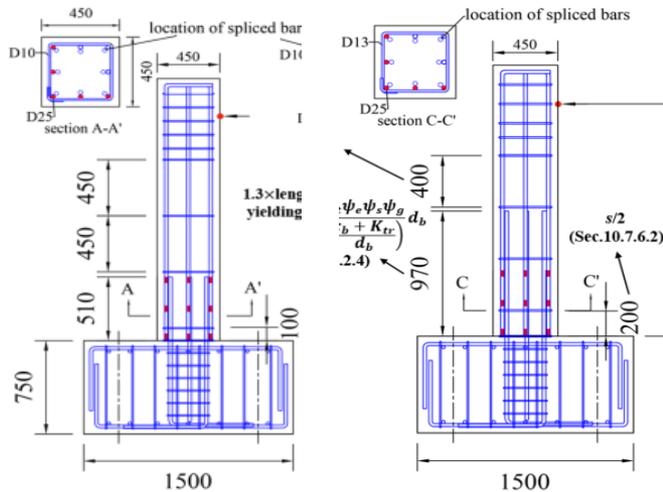
- (4) 지진으로 인한 요구하중 과소평가
- (5) 지반조사 미수행과 적합하지 않은 기초설계

- 계측된 지반운동의 수평방향 가속도 스펙트럼이 평균재현주기 475년 설계 스펙트럼을 초과하는 것이 확인됨.
- 또한 2475년 재현주기 스펙트럼과 비교해도 0.7초보다 큰 구간에서는 계측된 지반운동의 스펙트럼이 더 큰 지역이 있음이 확인됨.
- 특히 313B 지진관측소에서 계측된 기록에서 더욱 명확하게 나타났음. 현장 관측팀도 이 지역에서 많은 건물의 붕괴를 확인함.



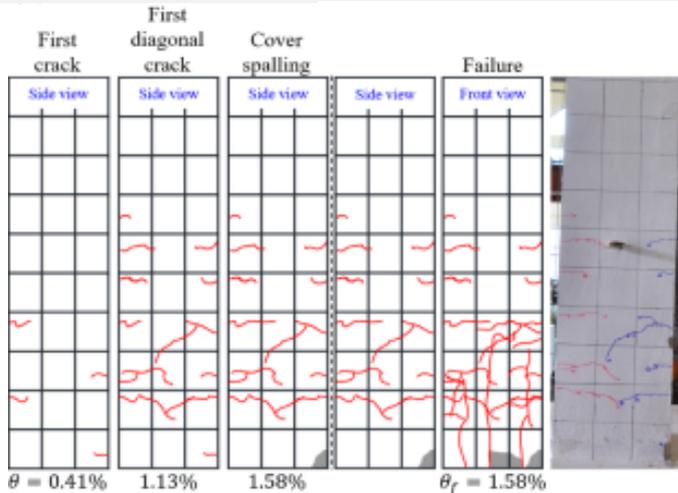
Çetin et al. (2023)

2.6 상세에 따른 내진거동 비교 (기둥)

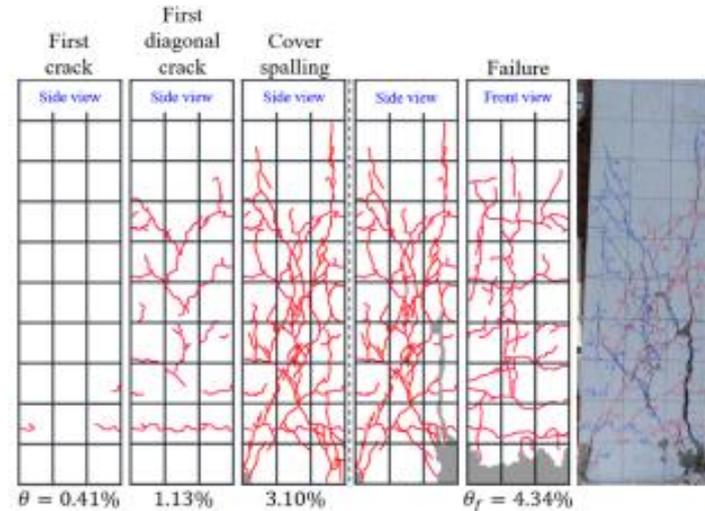


Lightly reinforced (오래된 건물 기둥 상세) OMF column (보통모멘트골조 기둥 상세)

(실험결과) 균열패턴의 확연한 차이 발생, OMF기둥 다수의 균열이 전역에 분포



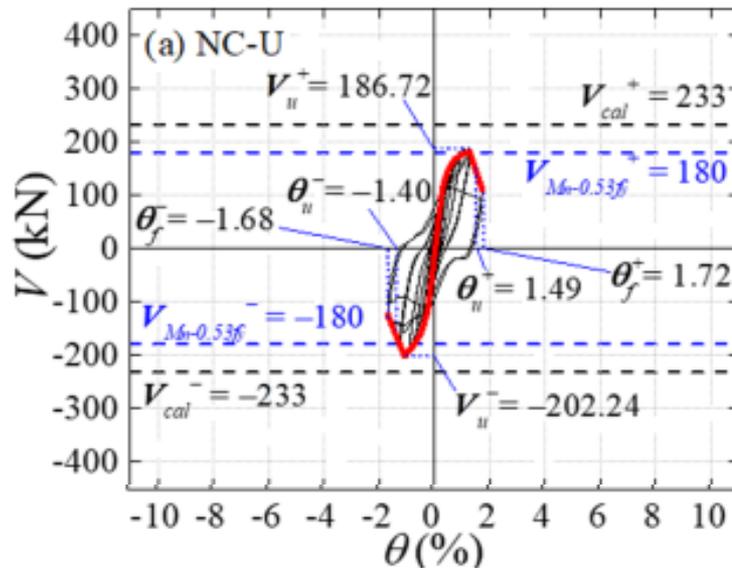
Lightly reinforced



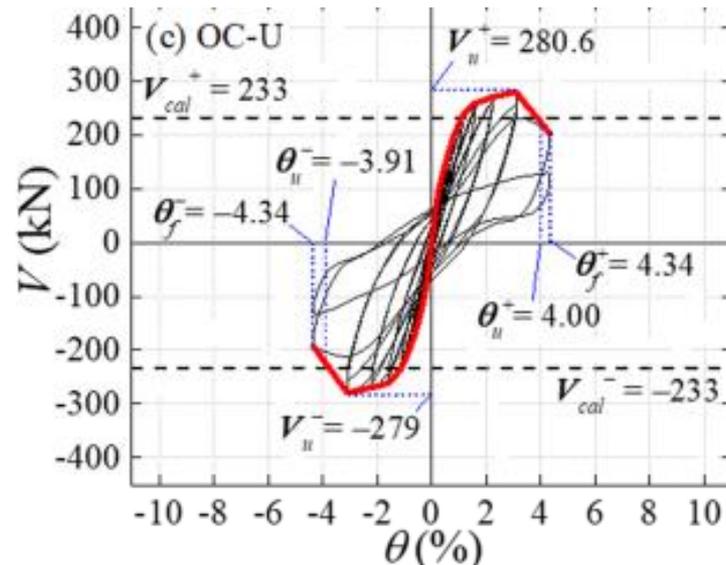
OMF column

Han and Kang (2023)

2.6 상세에 따른 내진거동 비교 (기둥)



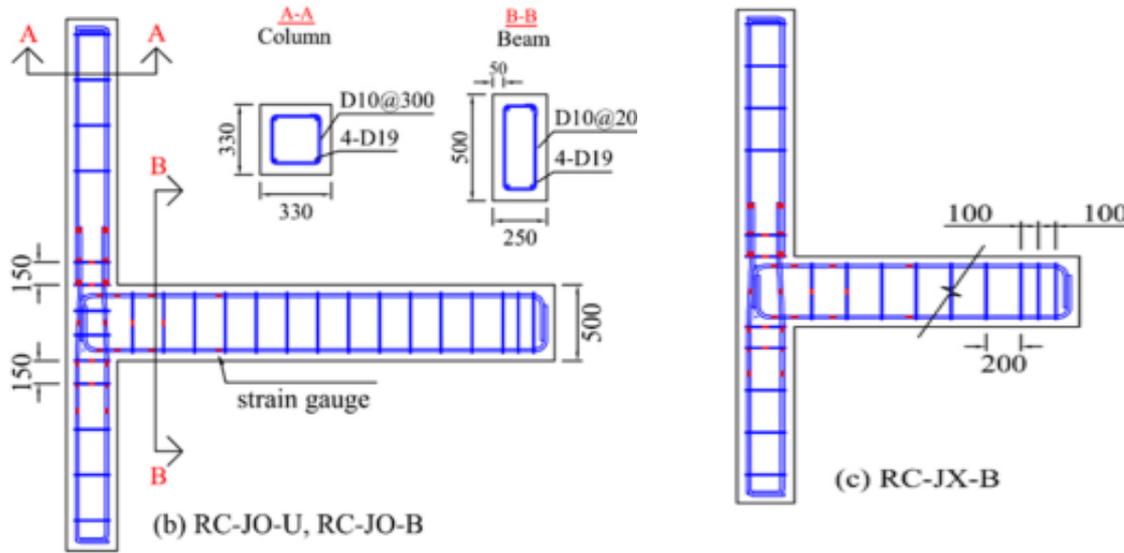
Lightly reinforced



OMF column

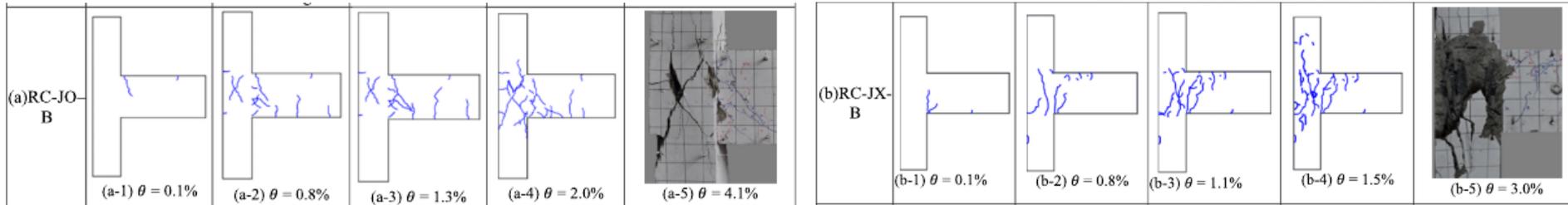
(실험결과) 반복가력 곡선의 차이 확연히 발생. OMF 기둥이 강도, 변형능력, 에너지면에서 모두 우수

2.6 상세에 따른 내진거동 비교 (접합부)



보통모멘트골조 접합부상세

오래된 건물 접합부 상세

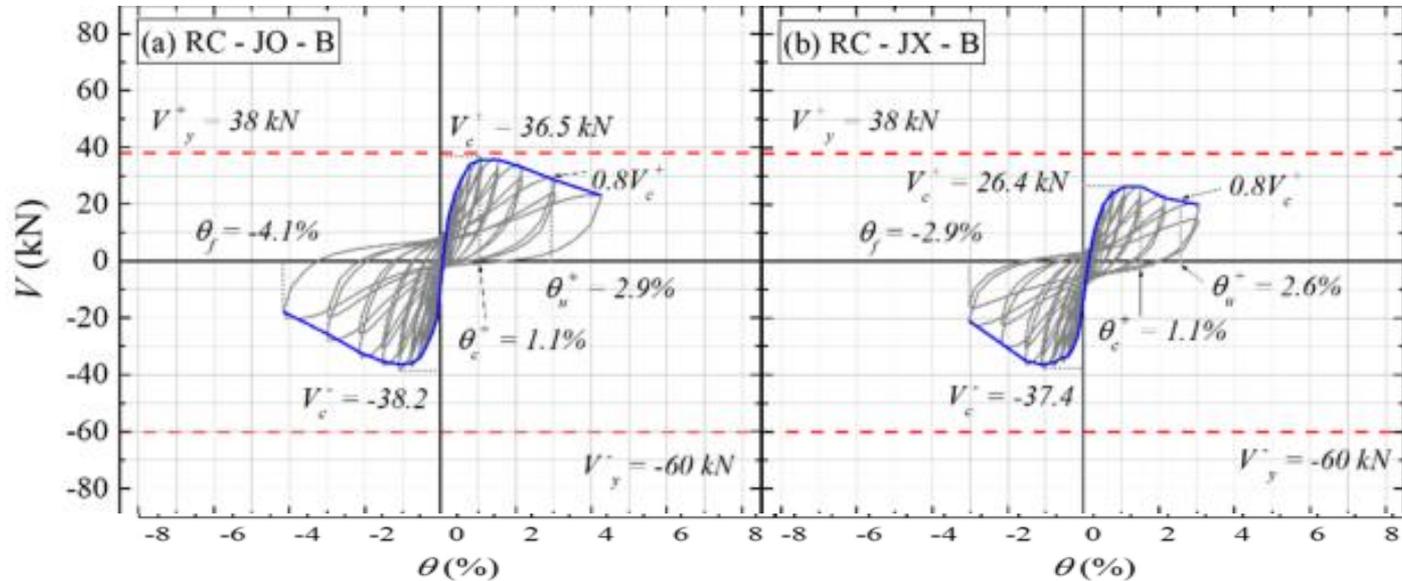


보통모멘트골조 접합부상세

오래된 건물 접합부 상세

(실험결과) 균열패턴의 확연한 차이 발생, OMF 접합부에서 접합부와 보에 균일한 균열 발생

2.6 상세에 따른 내진거동 비교 (접합부)



보통모멘트골조 접합부상세

오래된 건물 접합부 상세

(실험결과) 반복가력 곡선의 차이 확연히 발생. 접합부에 횡보강 최소보강이 있는 경우 강도, 변형능력, 에너지면에서 모두 우수

2.7 결론

- 2000년 이전과 이후에 지어진 건물의 2023년 터키지진으로 인한 피해 사례를 조사하였음.
- 2000년 이전에 지어진 오래된 건물의 경우 과거 지진들로 부터 경험한 파괴의 원인과 매우 유사함 (원형철근사용, 부족한 철근상세, 저품질 콘크리트사용, 연약층, 강보-약기둥, 중력하중 저항능력 결여(팬케익파괴), 접합부 강도 및 연성 결여).
- 2000년 이후에 지어진 최근 기준에 따라 내진설계가 수행된 건물에서도 많은 피해 확인함. 그 원인은 다음과 같음 (엔지니어의 능력 부족과 맹목적인 소프트웨어 사용, 철근상세나 접합부 상세에 대한 이해 부족, 현장시공 품질 결여, 유연한 장선슬라브사용으로 부적절한 횡력 분배, 지진하중 과소 평가, 지반조사 및 기초설계가 제대로 수행되지 않음).
- 기둥과 접합부의 상세와 이에 따른 내진 거동 차이를 관찰하였음. 부재 상세가 내진 거동에 큰 영향을 준다는 인식을 엔지니어들이 분명히 인식 하는 것이 중요함.

참고문헌

1. USGS, <https://earthquake.usgs.gov/storymap/index-turkey2023.html>
2. USGS, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000jlqa/shakemap/intensity>
3. USGS, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000jllz/shakemap/intensity>
4. Mike Mieler and Rupa Garai, EERI Buildings Reconnaissance Team Briefing, EERI, 2023.
5. Zeynep Tuna Deger, Field Observations on Structural Performance of Public Buildings in Turkey, LTE 50, EERI, 2023.
6. Wang Tao, Chen Jie, Zhou Yujiang, Wang Xiaoqing, Lin Xuchuan, Wang Xiaoting and Shang Qingxue, Preliminary investigation of building damage in Hatay under February 6, 2023 Turkey earthquakes, Earthq Eng & Eng Vib, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11803-023-2201-0>
7. Ali Sumer, Bret Lizundia, Maryann Phipps, Ricardo Henoch, Ali Roufegarinejad, Onder Akinci, Observations on Structural and Nonstructural Performance of Hospitals, LFE 50, EERI, 2023.
8. EERI, February 6, 2023 Türkiye Earthquakes: Report on Geoscience and Engineering Impacts, LFE Program GEER Association Report 082, 2023.
9. Evangelia GARINI and George GAZETAS, The 2 earthquakes of February 6th 2023 in Turkey, NTUA, Greece, 2023.
10. EERI, EERI Response to M7.8 and M7.5 earthquakes in Southern Turkey <https://www.eeri.org/about-eeri/news/14872-eeri-response-to-m7-8-and-m7-5-earthquakes-in-southern-turkey>, 2023.
11. Kemal Önder Çetin, Makbule Ilgaç, Gizem Can and Elife Çakır, Preliminary Reconnaissance Report on
12. February 6, 2023, Pazarcık Mw=7.7 and Elbistan Mw=7.6, Kahramanmaraş-Türkiye Earthquakes, Report no. METU/EERC 2023-01, METU, 2023.
13. Sangjoon Park, Khalid M. Mosalam, Parameters for shear strength prediction of exterior beam-column joints without transverse reinforcement, Engineering Structures, 36, 198-209, 2012.
14. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.11.017>
15. Sang Whan Han, Hojae Kang Han. Seismic behavior of high-performance fiber reinforced cementitious composites columns with limited reinforcement details, Engineering Structures 277:115419, 2023.
16. Han SW, Lee SH, Cyclic behavior of high-performance fiber-reinforced cementitious composite corner joints, Journal of Building Engineering, 47:103892, 2022.

3. 비구조요소의 피해



백은림 부산대학교 지진방재연구센터 연구교수

김재봉 부산대학교 지진방재연구센터 연구교수

오상훈 부산대학교 건설융합학부 교수

이상호 부산대학교 건설융합학부 교수

목 차

3. 비구조요소의 피해

- 3.1 파사드 및 칸막이벽
- 3.2 천장재
- 3.3 배관시스템
- 3.4 옥상구조물 - 태양광 패널 및 탱크
- 3.5 병원시설의 비구조요소
- 3.6 고찰

3.1 파사드와 칸막이벽

▪ 조적채움 외부 벽체 – 전형적인 외부 벽체 형식

- (재료) 경량 콘크리트 벽돌, 중공 점토 벽돌 또는 둘의 조합으로 사용
- (구조) 철근콘크리트 골조내 단열재와 방수 마감이 된 조적채움벽, 채움벽 내 창문
- (파괴양상) 전단균열 및 파괴, 층간 변형이 큰 경우 면외 붕괴
- (강도부족 요인) 타이 등 인장 보강 및 구속 벽체 요건 미적용
- (피해) 인명 안전의 위험 초래, 기능 복구 지연



▶ □ 조적 재료 [출처: GEER]



▶ □ 조적채움 외장벽체의 전단균열 [출처: GEER]

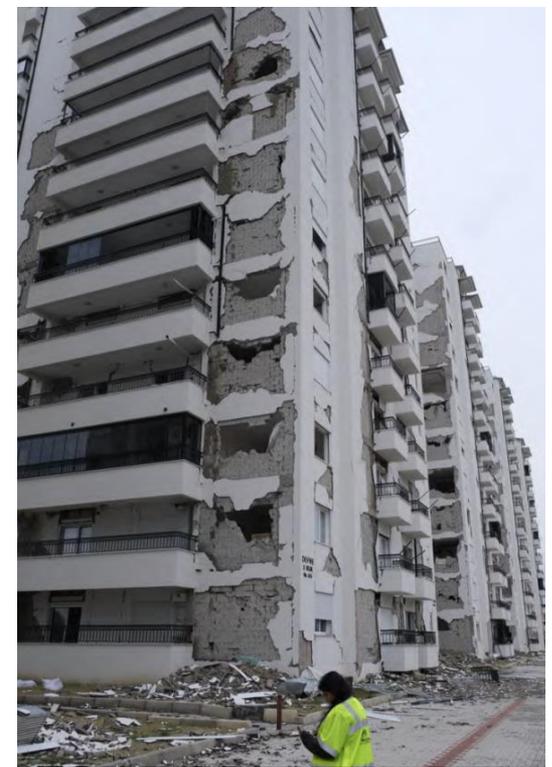
3.1 파사드와 칸막이벽



▶ □ 조적채움외벽 마감 탈락 및 부착 균열 파괴 [출처: GEER]



▶ □ 조적채움외벽 면외 붕괴 [출처: GEER]



▶ □ 조적채움외벽 일부 붕괴 [출처: GEER]

3.1 파사드와 칸막이벽

■ 유리 파사드

- 상업용 및 복합용도 건물의 1층 상점 전면 유리 형식 다수
- 금속 프레임내 유리패널 설치 형식
- (파괴 양상) 철제 프레임의 변형, 좌굴 및 내부 유리 파손
- 구조적 손상 클수록(즉, 건물의 변형각 클수록) 손상도 큼



▶ □ 유리 파사드의 전형적인 파괴 양상 - 유리 깨짐, 금속 프레임 좌굴, 파사드 붕괴 [출처: GEER]

3.1 파사드와 칸막이벽

▪ 내부 칸막이벽 - 조적채움벽

- 거의 모든 건물 유형, 특히 콘크리트 골조 및 벽식 건물에서 칸막이 벽으로 주로 사용
- 파괴 양상 : 전단 균열 및 파괴, 층간 변형각 클수록 면외 전도 및 붕괴
- 피해 유형 : 인명 안전 위험 초래, 기능 회복 지연 유발, 전기 배선과 수도관 등이 벽에 매립되어 건물의 기능 저해 유발



▶ □ 내부 조적채움벽의 붕괴 [출처: GEER]



▶ □ 내부 조적채움벽(중공점토벽돌)의 붕괴 [출처: 한국면진제진협회]

3.1 파사드와 칸막이벽

- 내부 칸막이벽 - 건식 칸막이벽

- 피해 조사시 관찰되었으나 일반적으로 사용되지 않음
- 구조체 변형에 따른 스테드 프레임 좌굴, 석고보드/목재 패널 등 붕괴



▶ □ 건식 칸막이벽의 붕괴 [출처: 한국면진제진협회]



▶ □ 금속 프레임 건식 칸막이벽의 파괴 [출처: GEER]

3.3 천장재

- (구조형식) 금속프레임 + 석고보드(흡음보드) 시스템
- (파괴양상) 개별 천장패널 낙하, 금속프레임 좌굴 및 붕괴, 천장 프레임의 일부 또는 전체 붕괴, 벽체 접합부 파괴, 공조/배관시스템 연결부 파괴
 - * 천장시스템 중 다수는 지진력에 저항하기 위한 구속력 부족이 원인
- (피해) 낙하로 인한 인명피해, 건물 기능 저해 유발



▶ □ 상업건물의 천장 시스템 붕괴
[출처: GEER]



▶ □ 천장 전체 낙하 [출처: GEER]



▶ □ 벽체 접합부로부터 붕괴
[출처: 한국면진제진협회]

3.4 배관시스템

- 상하수도, 소방배관, 도시가스 배관 손상 발생
 - - 건물 변형으로 인한 배관연결부 이음 분리, 지중 연결부 파손 등 전형적 기능유지 관련 피해 유발
- 도시가스 등 배관 파괴는 가스 누출로 인한 폭발 및 화재 발생 가능 → 유연한 연결부 필요
- 배관 고정용 앵커 파괴 발생 - 앵커 등 정착부 설계 주의 필요



▶ □ 배관, 덕트 등 피해 사례 [출처:한국면진제진협회]

3.5 옥상기기 및 구조물

- 태양열 집열시스템 (태양열 패널, 온수탱크 등) 옥상 구조물 일반적으로 사용됨
- (파괴양상) 물탱크 무게로 인한 지지구조물 좌굴 등 파괴 → 시스템 붕괴, 낙하
- 두꺼운 점토 타일로 구성된 목조 프레임 지붕 구조 붕괴, 옥상 펜트하우스 및 부속물 손상 및 파괴

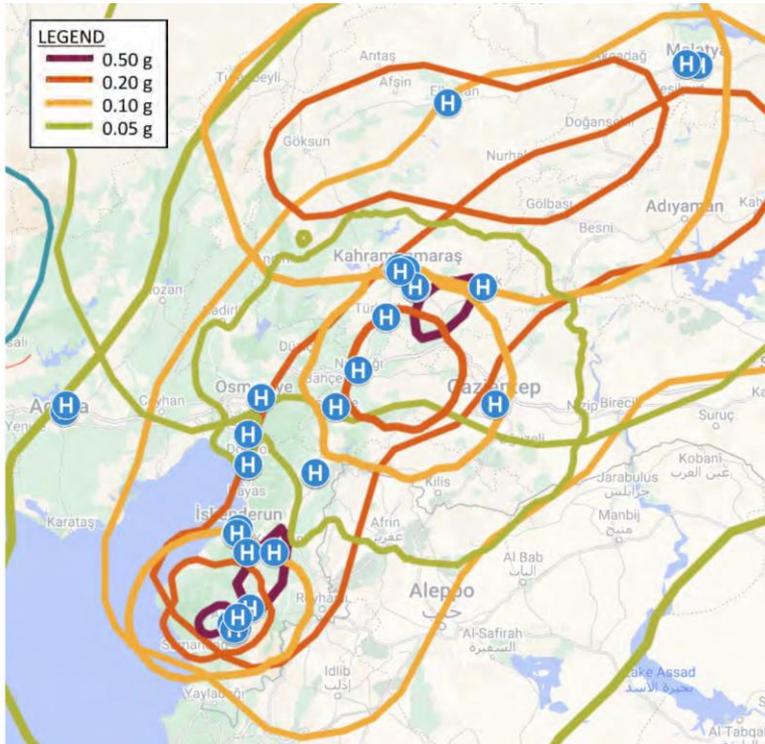


▶ □ 옥상기기 온수 탱크 및 태양열 시스템 붕괴 [출처:GEER]

▶ □ 목조 박공지붕 붕괴 [출처:GEER]

3.5 병원시설의 비구조요소

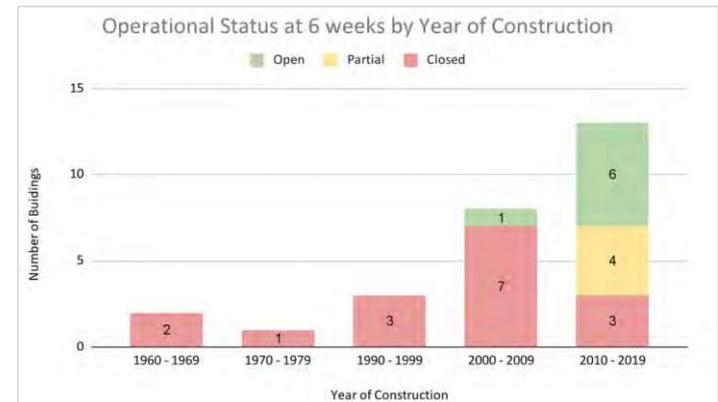
- 병원시설 내진 조치 : 병상 100개 이상 신축병원 면진 적용 의무화(2013년)
- GEER 조사: 병원 구조물 37개 조사 (면진구조 6개)
 - 지진발생 후 6주차 운영현황: PGA 클수록, 건설연도 오래될 수록 영업 중단 비율 높음



▶ □ EERI 병원 조사 지역 및 위치 [출처 : GEER]



▶ □ PGA별 병원 운영 현황 [출처 : GEER]



▶ □ 건설연도별 병원 운영 현황 [출처 : GEER]

3.5 병원시설의 비구조요소

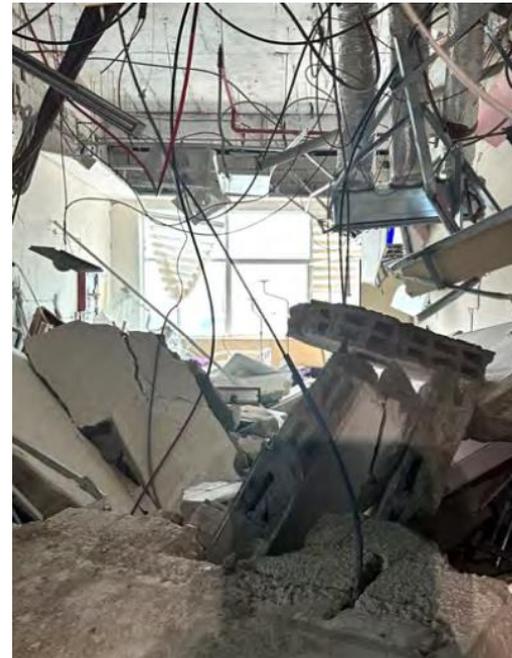
- 구조 성능
 - Iskenderun Government Hospital: 3차례 건물 증설 → 건설연도별 건물 성능 확인
 - 구 설계기준에 따른 건물 붕괴, 20년 신축 건물동은 영업가능
 - 면진 병원 시설 : 면진층 손상 일부 발생, 그 외 구조체 및 비구조요소 손상 제한됨



▶ □ Iskenderun Government Hospital 시공연도별 피해 현황 [출처: GEER]

3.5 병원시설의 비구조요소

- 비구조요소 피해
 - 내외부 벽체로 비보강 조적채움은 지진 유격 없이 골조내 단단히 채움,
 - 전도방지 상세(restraint) 미적용
 - 중량 칸막이벽의 붕괴로 재실자 사고 위험 발생
 - 육안으로 관찰가능한 전단 균열은 환자의 심리적 충격 발생 → 사용 불가 초래



▶ □ 병원건물의 조적채움 카나막이벽 균열 및 붕괴 사례 [출처: GEER]

3.5 병원시설의 비구조요소

- 다양한 기계 및 전기 설비 손상
 - 제너레이터, 칠러 등 기계요소는 앵커 정착 미적용 → 미끄러짐 거의 미발생
 - 반면, 변위는 미발생하였으나 비상발전기 미작동으로 병원 폐쇄 사례
(일부 병원의 경우 비상발전기 작동으로 제한된 의료 서비스 가능 사례도 있음)
 - 탱크 등의 미고정으로 인한 전도 발생, 의료기기 미작동 (recalibration 필요)



▶ □ 미정착 Chiller, 탱크의 전도, CT 촬영기기 사용 불능 사례 [출처: GEER]

3.6 고찰

◎ 인명안전을 위한 비구조요소의 내진성능 확보 중요성

- 조적채움벽 등 중량물 낙하로 인한 인명피해, 재산피해 증가
- 병원건물 등 중요시설에서 기능확보, 복원에 필요한 소요 시간별 내진목표 고려 하여 비구조요소 내진성능 목표 설정 필요

◎ 건물의 손상이 경미한 경우 비구조요소의 성능이 건물 성능을 재결정

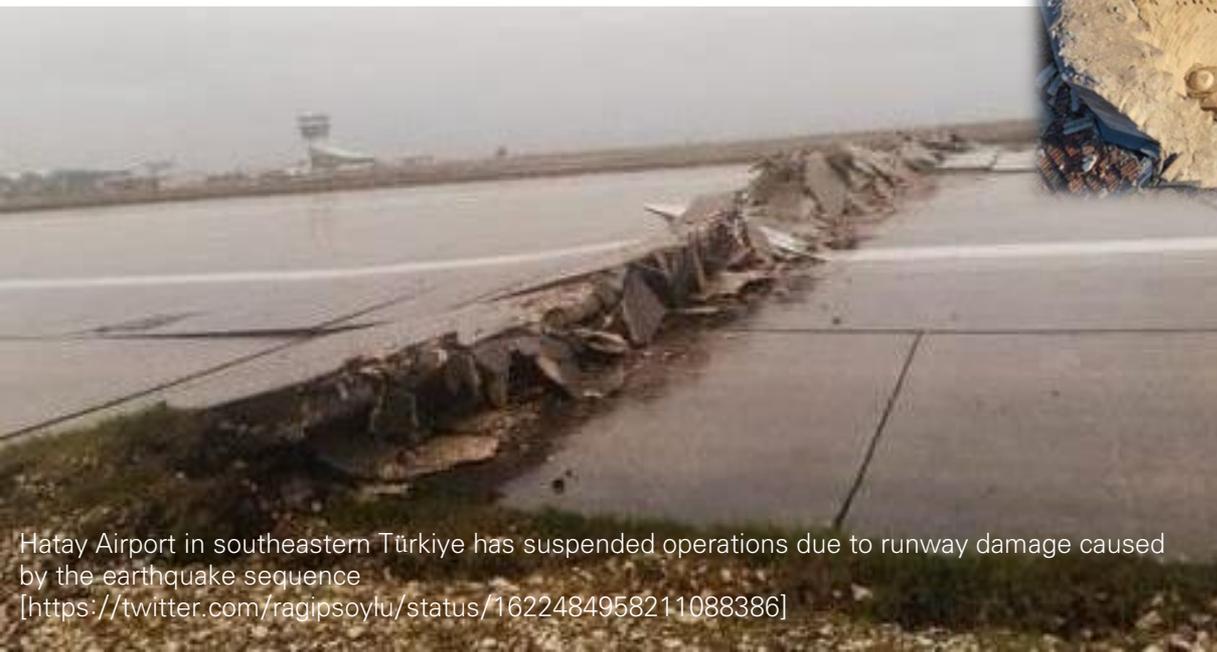
- 비구조요소는 건물 구조물의 손상이 경미하더라도 심각한 손상 발생 가능
 - 건물의 손상이 없더라도 사용성 저해
- * 지진 피해 경험자 일부는 구조적 손상 경미하더라도 비구조요소의 손상만으로도 심리손상, 트라우마로 건물 재사용 포기

◎ 구조요소와 비구조요소 동시 보호를 위한 면진구조

- 구조체의 내진설계가 적용된 경우라도 비구조요소의 상당한 피해 발생
- 면진 병원 건물에서 구조물과 비구조물의 피해 최소화
- 면진층 배관의 유연한 연결부 등을 적절히 고려

4. 사회기반 시설물과 문화재 피해

투르키예 남동부의 하타이 공항은 지진으로 인한 활주로 손상으로 인해 운영을 중단했습니다.



안디옥 그리스 정교회
the Antioch Greek Orthodox Church

김남희 서울대학교 건축학과 객원교수
홍성걸 서울대학교 건축학과 교수

Hatay Airport in southeastern Türkiye has suspended operations due to runway damage caused by the earthquake sequence
[<https://twitter.com/ragipsoylu/status/1622484958211088386>]

목 차

4. 사회기반 시설물과 문화재 피해

4.1 도로

4.2 댐

4.3 항만·공항 시설

4.4 교량

4.5 산업 시설

4.6 라이프라인

4.7 문화재

4.8 소고

4.1 도로

Fault slip of 3.0 to 3.5 m at the Anatolian plate from the February 6, 2023 earthquake sequence



Deformed railway between Kahramanmaraş, Türkoğlu, and Gaziantep, İslahiye



https://old.reddit.com/r/europe/comments/10wss6o/anatolian_plate_moved_335_meters_after_the/

2023년 2월 6일 연속적으로 발생한 지진에 의해서 아나톨리아 판이 3.0~3.5m 정도 움직임

Kahramanmaraş, Türkoğlu와 Gaziantep, İslahiye사이에 놓인 철도가 변형됨

4.1 도로

- 랜드슬라이드

2월 6일에 발생한 Mw 7.8 및 Mw 7.5 지진으로 아다나(Adana)와 가지안테프(Gaziantep) 사이의 도로에서 산사태 확산이 발견되었다.

수평변위는 대략 1.5 m~3 m 정도 관찰됨



(Source: Reuters via National Post).

<https://nationalpost.com/news/world/turkey-syria-earthquake-fault-line>

Source: Extracted from Sokagin Sesi Gazetesi, Twitter).

4.1 도로

▪ Tarsus-Adana-Gaziantep (TAG) 고속도로의 피해 사례

- 규모 7.8 지진에 의해서 Tarsus-Adana-Gaziantep (TAG) 고속도로의 피해
- 지진에 의한 압축 및 침하, 뒤틀림 전단
- 도로 포장의 균열 cracking of pavement (e.g., Figures 5.1(a-c)) due to seismic compression



<https://expatguideturkey.com/tag-highway-divided-in-two/>

4.1 도로

- 도로 표면 파손



(Source: Channel News Asia)

<https://www.channelnewsasia.com/singapore/singaporeans-turkey-turkiye-earthquake-syria-damage-death-toll-3257291>

4.1 도로

- 도로의 움직임



대략 3미터 정도로 이동한 것으로 측정됨



마을 근처 길의 차등 이동(differential movement)
(Source: Veryansin TV)

4.1 도로

▪ 도로 폐쇄

- 2023년 2월 6일 오후 6시 29분 기준 도로 폐쇄 및 교량 붕괴 요약

위치	거리 (km)	이유	비고
Bahce – Gaziantep junction	40+000		
Malatya – Golbasi – 5th District	76+000, 78+000	Erkenek 터널에 콘크리트 박락	
Malatya – Yazihan	61+000; 62+3000	교량 접합부 열림	Tohma 교, 15 경간, 길이 517.50m
Adiyaman – Celikhan	49+000	교량 붕괴	Bulam 3개 교량 붕괴, 3경간, 길이 55.3m
Celikhan – Surgu	3+000	교량 붕괴	Balikburnu교 붕괴, 단경간, 14.2m
Hatay – Reyhanli	20+000; 22+000	도로 붕괴	
Goksun – Maras	47+825	터널 손상	

4.1 도로

- 도로 무너짐

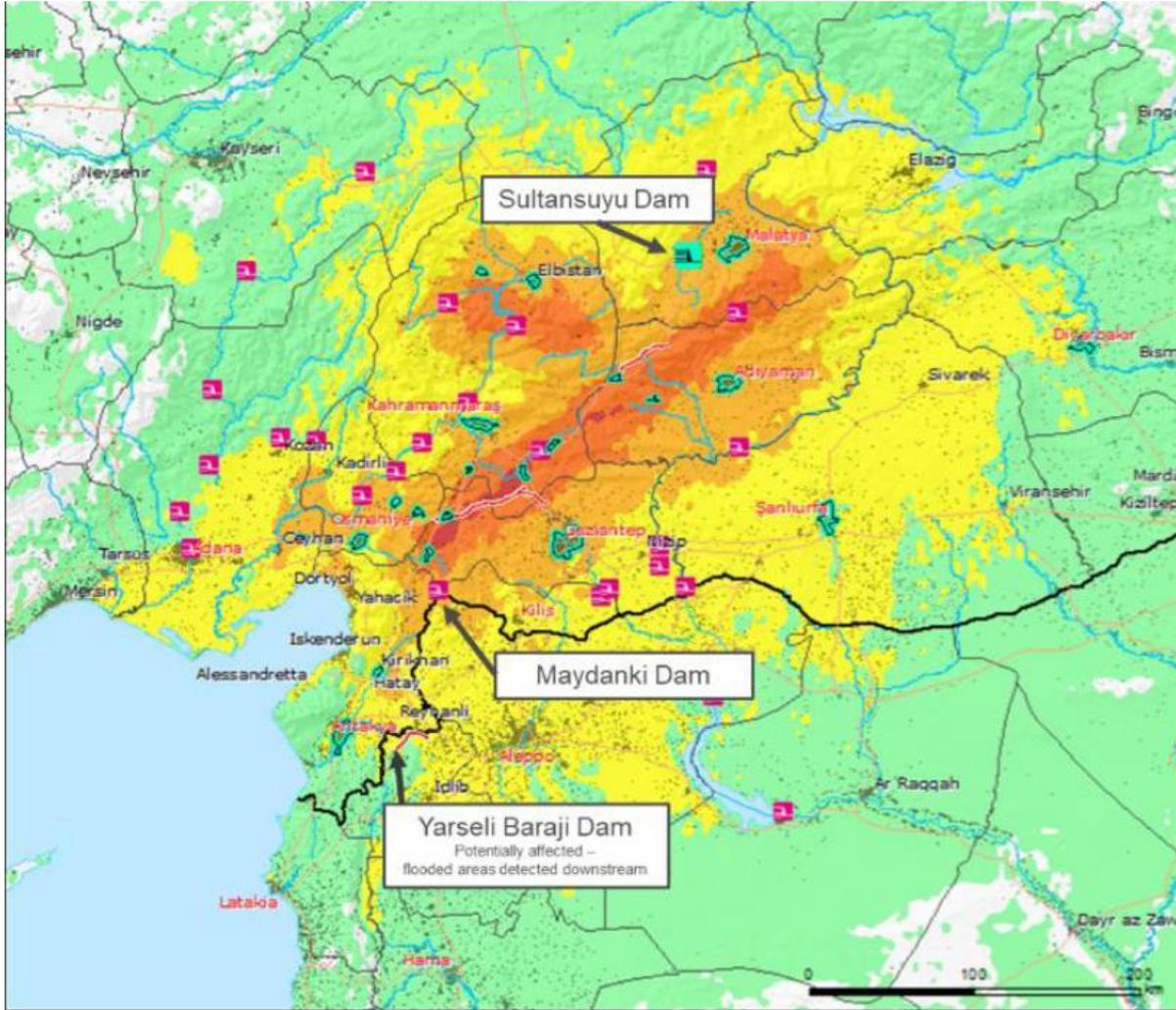
하타이를 중심으로 발생한 지진 후 규모 6.4 지진에 의해서 하타이 주립병원 도로에 있던 다리가 10cm 무너져 도로로부터 분리됨



<https://www.trthaber.com/haber/turkiye/64luk-deprem-sonrasi-kopru-10-santimetre-coktu-747709.html>

4.2 댐

지진 피해 입은 댐의 위치와 피해 수준



- 튀르키예의 Sultansuyu 댐
- 시리아의 Maydanki(Afrin) 댐
- Yarseli Baraji 댐

- 저수지 용량이 50k m3 이상인 댐으로, 진도 세기 MMI 5이상인 경우가 표시되어 있음
(MMI=V: 녹색, MMI=VI: 노란색, MMI=VII: 연한 주황색, MMI=VIII: 진한 주황색, MMI=IX: 빨간색).

Joint Technical Report
M7.8 and M7.5 Earthquakes
in Türkiye and Syria
JRC Scientific Analysis: Update#3 10
Feb 2023 19:00 UTC
European commission

4.2 댐

■ 댐 몸체 균열: 술탄슈유댐

술탄슈유댐의 중심축을 따라서 균열이 발생함



(Source: ntv.com)

- 진앙지 인근 120여개 댐 긴급점검 실시 (농림임업부)
- 6개 댐에서 균열 발생 확인 ⇨ 안전에는 문제 없는 것으로 확인
- 댐의 구체에 균열이 발생한 댐의 경우에는, 댐 수위를 조절하여 방류함

Sultansuyu Dam

- 흙댐, 댐높이 60m
저수용량 53백만m³
- 위치 : 진앙지 인근 (튀르키예 최대 댐 Ataturk댐으로부터 170m 이격)
- 카라마라쉬 지진으로 몸체 축에 균열이 생긴 말라티아(Malatya)의 술탄슈유 댐(Sultansuyu Dam)
- 말라티아 주지사는 술탄슈유 댐은 예방 조치로 점진적으로 대피할 것으로 발표함
- 댐 하류에 있는 시민들에게 주의
- 그 외 댐에는 문제가 발생하지 않음

4.2 댐

- 술탄슈유댐의 몸체 균열



<https://ilkha.com/guncel/malatyadaki-sultansuyu-baraji-govde-aksindaki-catlaklar-nedeniyle-tahliye-ediliyor-313589>

4.2 댐

▪ 댐의 붕괴가 마을의 침수로 이어짐

- Idlib지역 인근의 흙댐 붕괴로 하류지역 침수하자, 시리아인들이 침수된 북서부 마을에서 탈출
- 카라만마라슈를 중심으로 발생한 규모 7.7과 7.6의 지진은 수년간 계속된 내전으로 인해 취약한 사회가 살아가는 시리아에 더욱 큰 어려움을 끼침



<https://yesilgazete.org/suriyede-depremin-yiktigi-baraj-nedeniyle-bir-koyu-sel-basti/>

4.2 댐

▪ 댐 마루 균열 발생: Afrin Dam



longitudinal and transverse cracks in the Afrin dam (Source: Syrian Television via misbar.com)

Afrin Dam (또는 Maydanki 댐)

- Aleppo시에서 70km북서쪽
- 시리아 북서부 위치
- 흙 댐 (earth-filled dam)
- 수력 발전
- 마루 균열 발생
- 댐 높이 73m, 저수용량 1억9천만m³
- 25MW의 수력 발전을 공급
- 거의 200,000명에게 식수 제공
- 대략 30,000헥타르(74,000에이커)의 올리브, 과일나무 및 농작물 관개

4.2 댐

- 제방 도로 파괴



(Source: Reuters via Washington Post)

Koseli 마을의 제방 도로 파괴,
이는 Ad ı yaman 지방의 Ad ı yaman-Sanlıurfa-Gaziantep 고속도로를 통과
Failure of the embankment road in the village of Koseli, which passes over the
Ad ı yaman-Sanlıurfa-Gaziantep Highway in the Ad ı yaman province

4.3 항만·공항 시설

- 항만시설



이번 지진으로 지중해 연안 도시 이스켄데룬 (Iskenderun)의 주요 항구가 피해를 입고 수십 개의 컨테이너가 무너졌다. 갠트리 크레인은 지진의 영향을 받지 않는 것처럼 보이지만 지진 후 화재로 1차 및 2차적인 피해가 발생하여, 이스켄데룬 항구 운영이 중단되었다. (Source: Odessa Journal).

4.3 항만·공항 시설

- 공항시설



튀르키예 남동부의 하타이 공항(Hatay Airport)은 지진의 여파로 활주로가 손상되어서 운영이 중단되었었다.

2023년 2월 8 활주로 복구작업이 이뤄지고 있음

4.4 교량

- **교량** 튀르키예 남부지역의 교량 피해를 조사한 결과, 대규모 지진에 대해서 구조적 피해와 인명사고가 매우 컸던 주거 건축물들의 피해와는 달리 심각한 수준으로 피해를 입은 교량은 없었다고 보고되었다.



교량 1 (the Nurdag Viaduct)

- 5경간, 프리스트레스트 거더/ 강 거더
- 곡선 수로교
- 원형 철근 콘크리트 기둥 (직경: 3.05 m; 높이: 24.4 m)

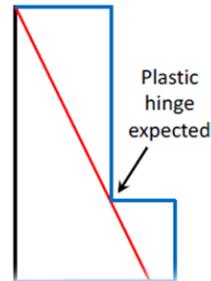


4.4 교량

교량의 소성힌지



— Moment Capacity
— Moment Demand



- 소성힌지가 기둥의 하단으로부터 높이 1/4지점에서 발생함
- 철근의 cutoff 위치에서 요구강도가 저항강도를 초과한 것으로 유추됨



- 소성힌지구간의 수직 철근과 횡 철근 모두 힘 발생



4.4 교량

▪ 교대 손상

- 교량 1의 교대가 손상된 모습



4.4 교량

▪ 횡 방향 움직임에 의한 피해



종방향 교량의 약축 방향의 하단에서 소성힌지 발생함

교량 2 (2개의 나란한 교량)

- GPS좌표 N 36.255050 E 36.204300
- 6경간, 프리캐스트/프리스트레스트 I 거더 9개
- 철근 콘크리트 기둥
- 직선교



중앙 경간의 내부 거더에서 수평/수직 힘 변형 발생

4.4 교량

- 외측 전단 키 파괴



교량 2의 외측 전단 키 파괴



파괴된 전단 키의 자세히 보기

4.4 교량

- 프리캐스트 거더의 단부 손상



교량 2의 단부 손상



단부 철근의 휨 변형



내측 거더의 단부 손상이 심각함

4.4 교량

- 접속구간의 침하



교량 2의 양측 접속구간에서 침하 발생으로 자동차가 교량의 진출입시 주행 속도 감소

4.4 교량

내·외부 전단 키 파손



교량 3의 단부 파손

교량 3 (2개의 나란한 교량)

- GPS좌표 N 36.240600 E 36.214060
- 6경간, 프리캐스트/프리스트레스트 I 거더 11개
- 철근 콘크리트 기둥



교량 3의 내부 거더의 단부 파손

4.5 산업시설

- 에너지 시설의 피해

서쪽으로 약 430km 떨어진 곳에 건설되고 있는 아쿠유 원전 (the Akkuyu nuclear power plant) 과 아다나 지방의 Hunutlu 화력 발전소 모두 피해를 입지 않았다.



시공중 아쿠유 원전 (the Akkuyu nuclear power plant)



아다나 지방의 Hunutlu 화력 발전소

4.5 산업시설

- 저장시설의 피해



지진의 여파로
지붕이 무너지면서
강재 저장 구조물도
피해를 입음

(Source: Mustafa Kerem Koçkar via LinkedIn)

4.5 산업시설

▪ 연결 구조 및 연결부의 손상

건축물의 높이가 다른 두 건물 사이에 놓인 연결 다리들이 주기가 서로 다른 구조물의 진동영향뿐만 아니라, 연결부가 취약하여 피해를 입었다.



지진 피해를 입은 강제
사일로들

4.5 산업시설

▪ 맨 상층부 구조물의 전도



- 화학공장의 맨 상층부의 시설물들이 전도되었음
- 반면에 하부 구조시스템은 변형 없이 제 위치에 있음
- 지진의 수직 성분의 영향을 받은 것으로 추정함 (NCREE)

4.5 산업시설

- 지지구조의 손상

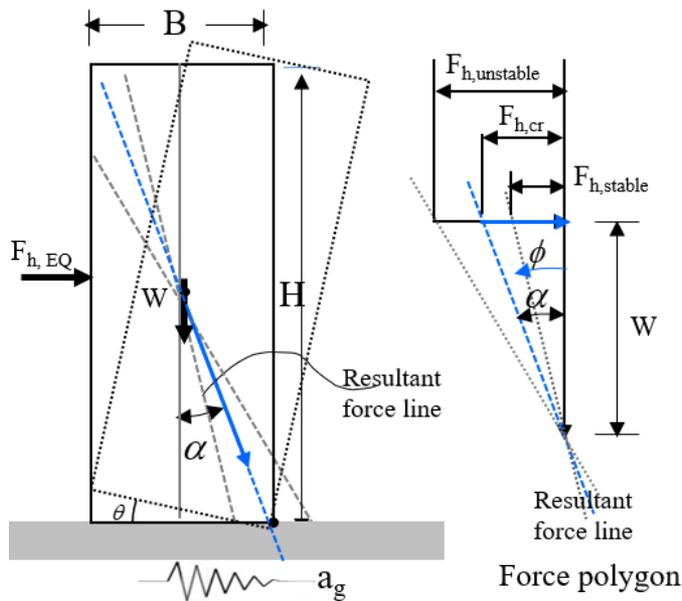
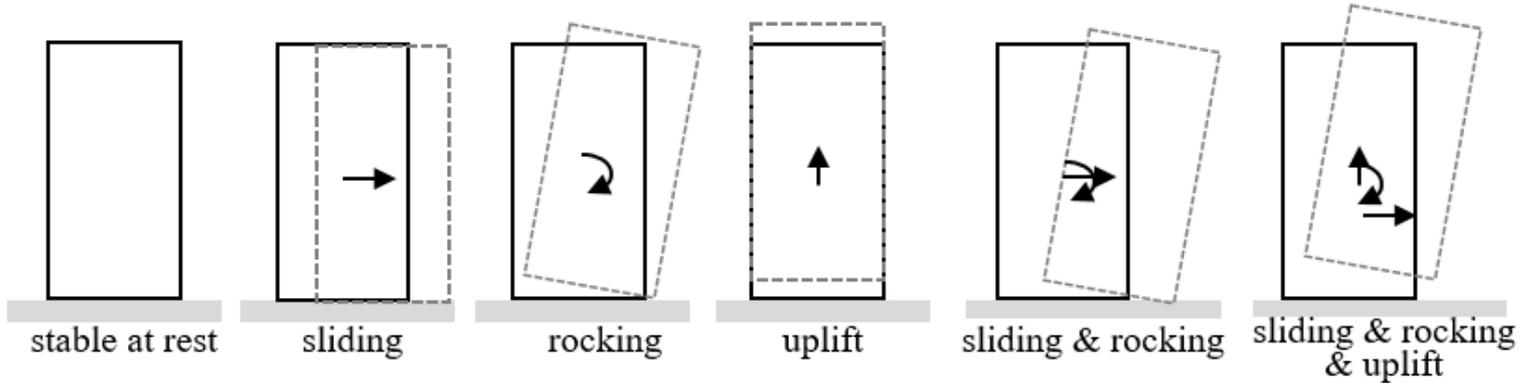


베이스 플레이트에 정착 볼트가 누락되어 있음
슬롯 형식의 오프닝
Break in the Pedestal

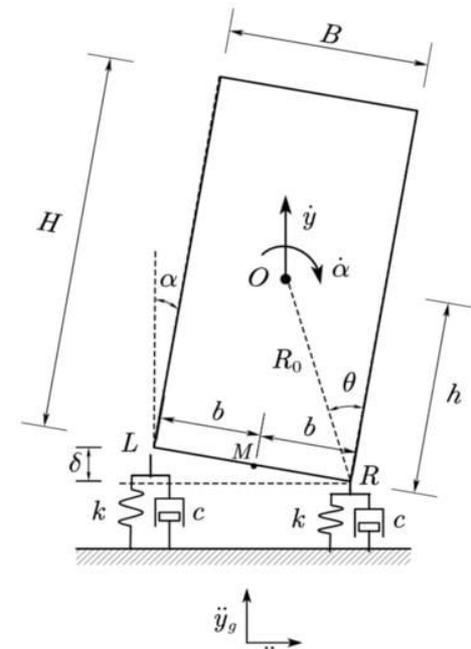


세장한 사일로의 전도

4.5 산업시설 - 세장한 구조물의 지진에 대한 거동



세장한 구조물들의 내진거동은 강체 거동으로 유추해 볼 수 있음



[Ref] 적층 석탑의 내진성능 평가요소
 김남희 · 구인영 · 홍성걸
 한국지진공학회 논문집 23권 1호 2019년 1월

[Ref] Analysis of a Simplified Model of a Rigid Rocking Block on Winkler Foundation by Dongyi He , Peizhen Li * and Zhen Zhang
 Sustainability 2023, 15, 5095. <https://doi.org/10.3390/su15065095>

4.5 산업시설

▪ 정유공장의 손상

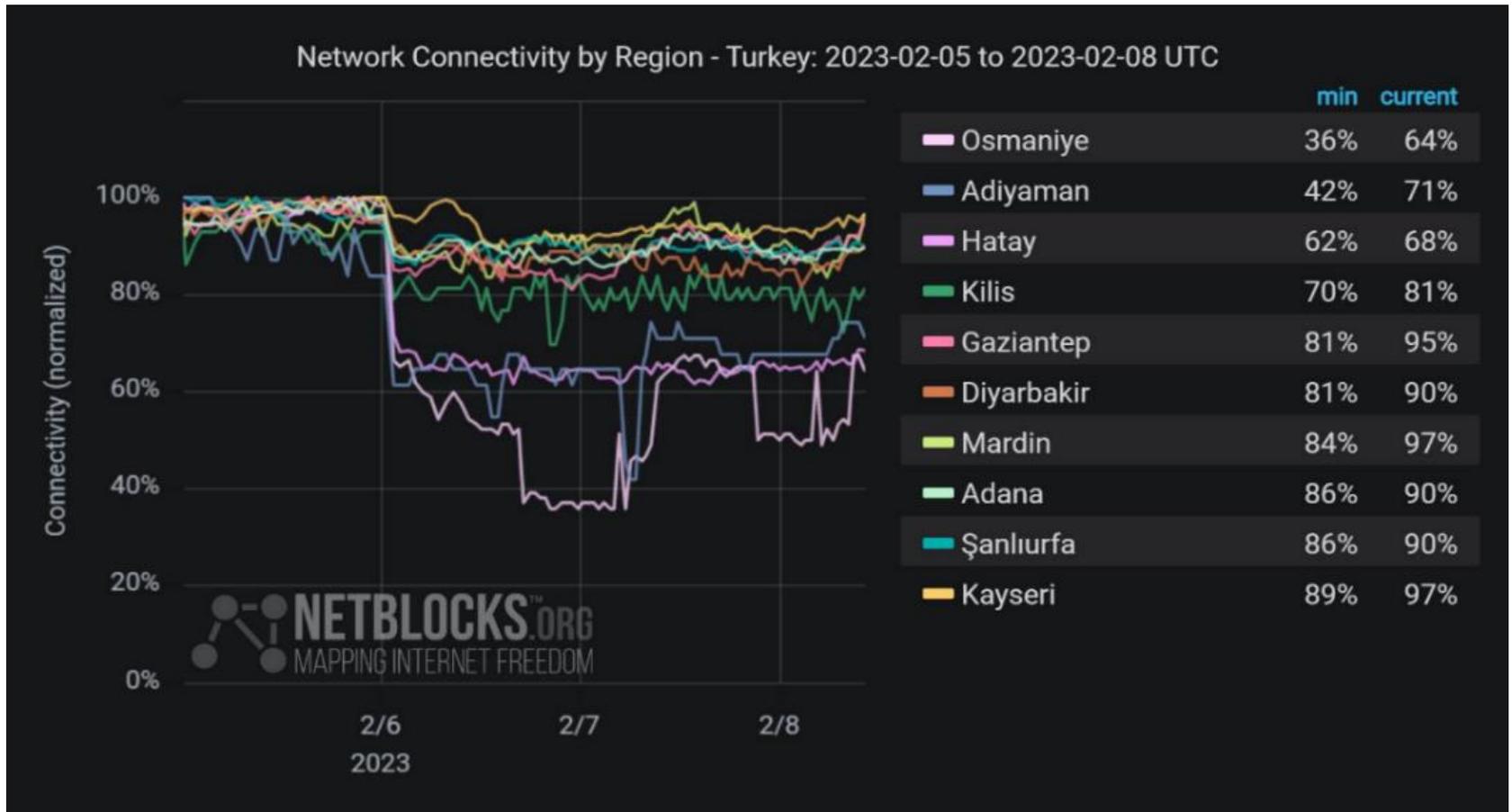


시리아의 바니아스(Banias) 정유공장은 지진으로 인해 부분적으로 손상되었다.
주요 피해 요소: 장비의 콘크리트 바닥, 용광로 라이닝의 분리 및 파손, 가솔린 반응기 중심의 이동, 동력 장치의 주요 굴뚝



4.6 라이프라인

- 튀르키예의 지진으로 도시에서 인터넷 연결은 대부분 끊겨서, 2023년 2월 8일 당시 아직 완전히 복구되지 않은 것을 알 수 있다.
- Antep, Hatay, and Kilis 지역에서 30개 이상의 변전소가 지진으로 피해를 입어서 정전 발생 (The Telegraph, 2023)
- 발전기와 이동식 발전소는 병원, 무료 급식소, 일반 서비스 등 필수 전력 시설에 공급함
- 당국은 가스 누출과 화재 가능성이 우려되는 지역에 대해서는 화재 예방을 위해서 가스를 차단함



4.7 문화재



• 가지안테프(Gaziantep) 캐슬

• 알레포 (Aleppo) 성채

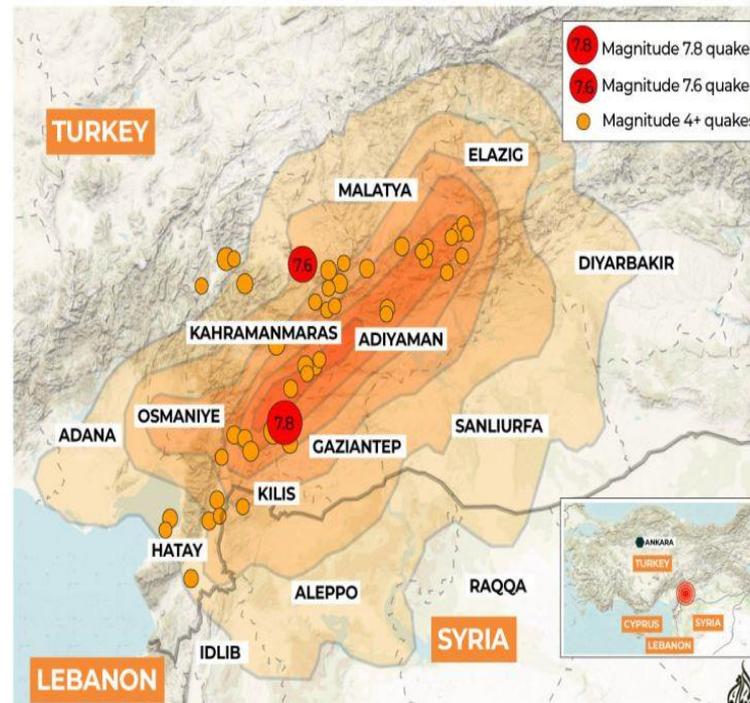


주요한 문화유산들이 위치한 곳에 강진이 발생하여 문화재에 대한 피해가 컸다.

EARTHQUAKE

Thousands dead in Turkey, Syria earthquakes

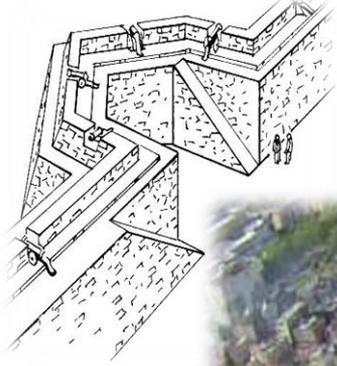
Two large earthquakes - a magnitude 7.8 quake followed by a 7.6 tremor - struck southeastern Turkey along its border with Syria. The quakes were also felt across Lebanon and Cyprus.



• 디야르바키르(Diyarbakir)



4.7 문화재 - 가지안테프 캐슬



A **bastion or bulwark** is a structure projecting outward from the curtain wall of a fortification, most commonly angular in shape and positioned at the corners of the fort.

치성 雉城



- 언덕의 최상부는 히타이트 제국이 정찰 위해 처음 사용
- **2~3세기 로마 제국이 성으로 확장**
- 기원후 527년~ 565년에 유스티니아누스 1세가 대대적으로 성을 확장하고 보수
- 원 형태를 띤 성의 둘레는 1,200 미터 (3,900 ft)
- 성벽은 돌로 지어졌으며 성에는 12개의 보루(towers).

The structure is regarded for its unusual circular shape—spanning a diameter of about 328 feet(117m)—and its 12 towers. Most recently, the castle has been used to house the Gaziantep Defense and Heroism Panoramic Museum

4.7 문화재 - 가지안테프 캐슬

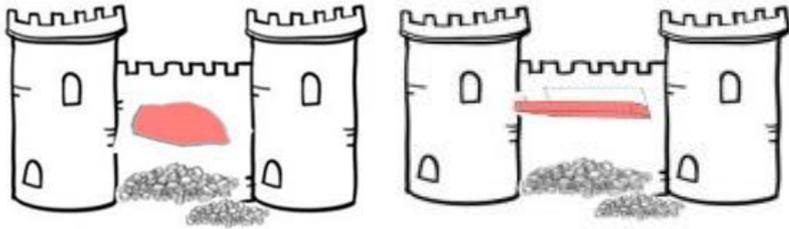


SERDAR MURAT GURSEL
HISTORICAL SITES PROTECTION AND SUPERVISION, GAZIANTEP

EARTHQUAKE
TURKEY/SYRIA

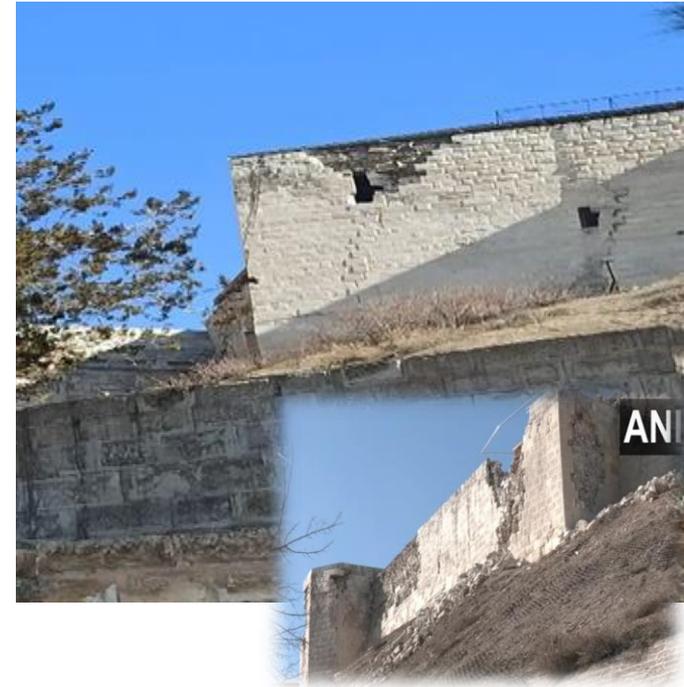
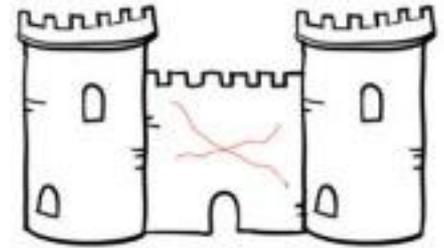
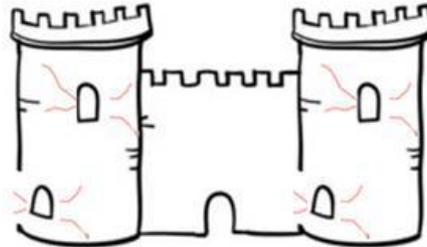
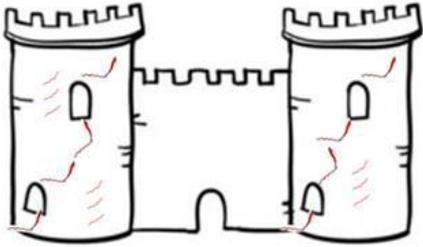
4.7 문화재 - 표면재의 박리 (Delamination of Cladding)

Ref: A systematic method for post-earthquake damage assessment: Case study of the Antep Castle, Türkiye by Lale Karataş, Tahir Ateş, Aydın Alptekin, Murat Dağ, Murat Yakar. *Advanced Engineering Science*, 2023, 3, 62-71

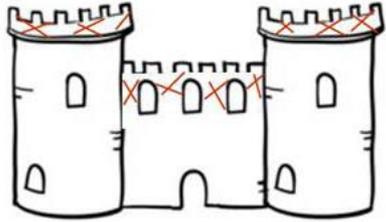


4.7 문화재 - 균열: 수직 및 사방향

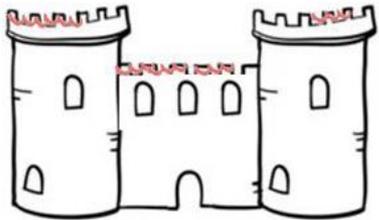
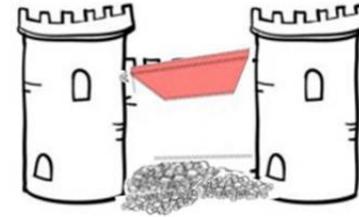
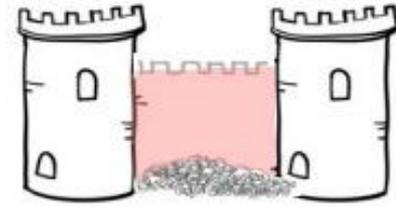
- 개구부 주변으로 균열 확산



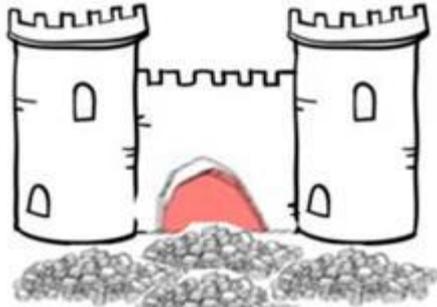
4.7 문화재 - 면외 변형



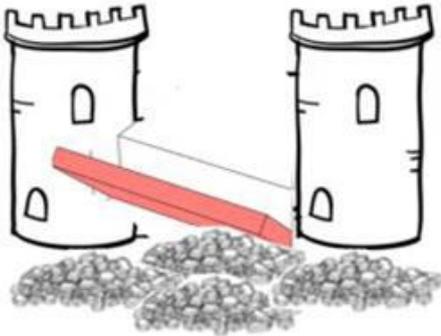
A view of damaged Gaziantep Castle in Turkey on February 6, 2023.



4.7 문화재 - 기초 암석의 빠져나감



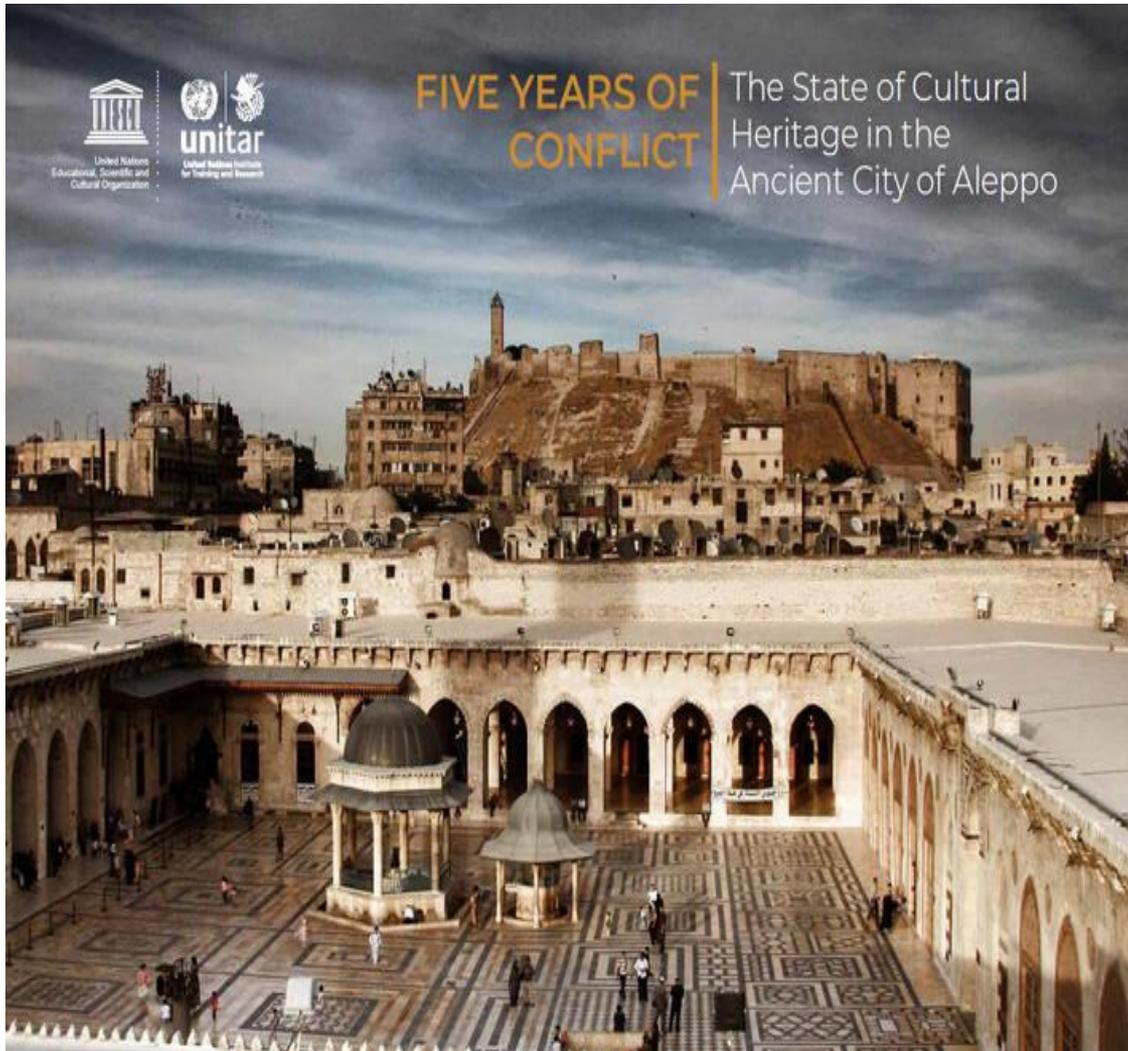
fall of the foundation rock or settlements of the soil



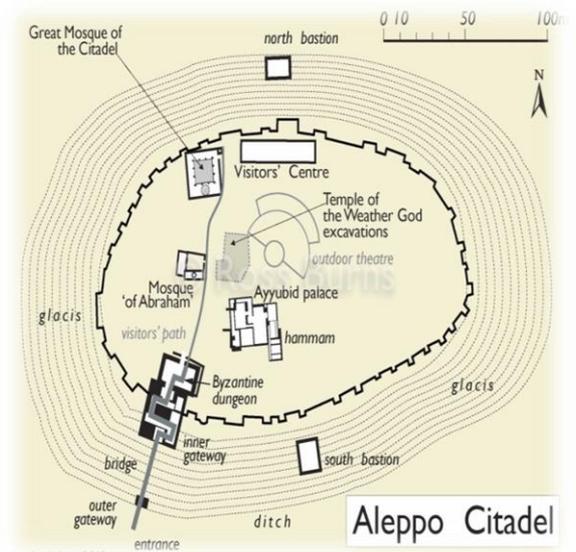
overturning of walls caused by the dynamic thrust of the earth



4.7 문화재 - 알레포 성채



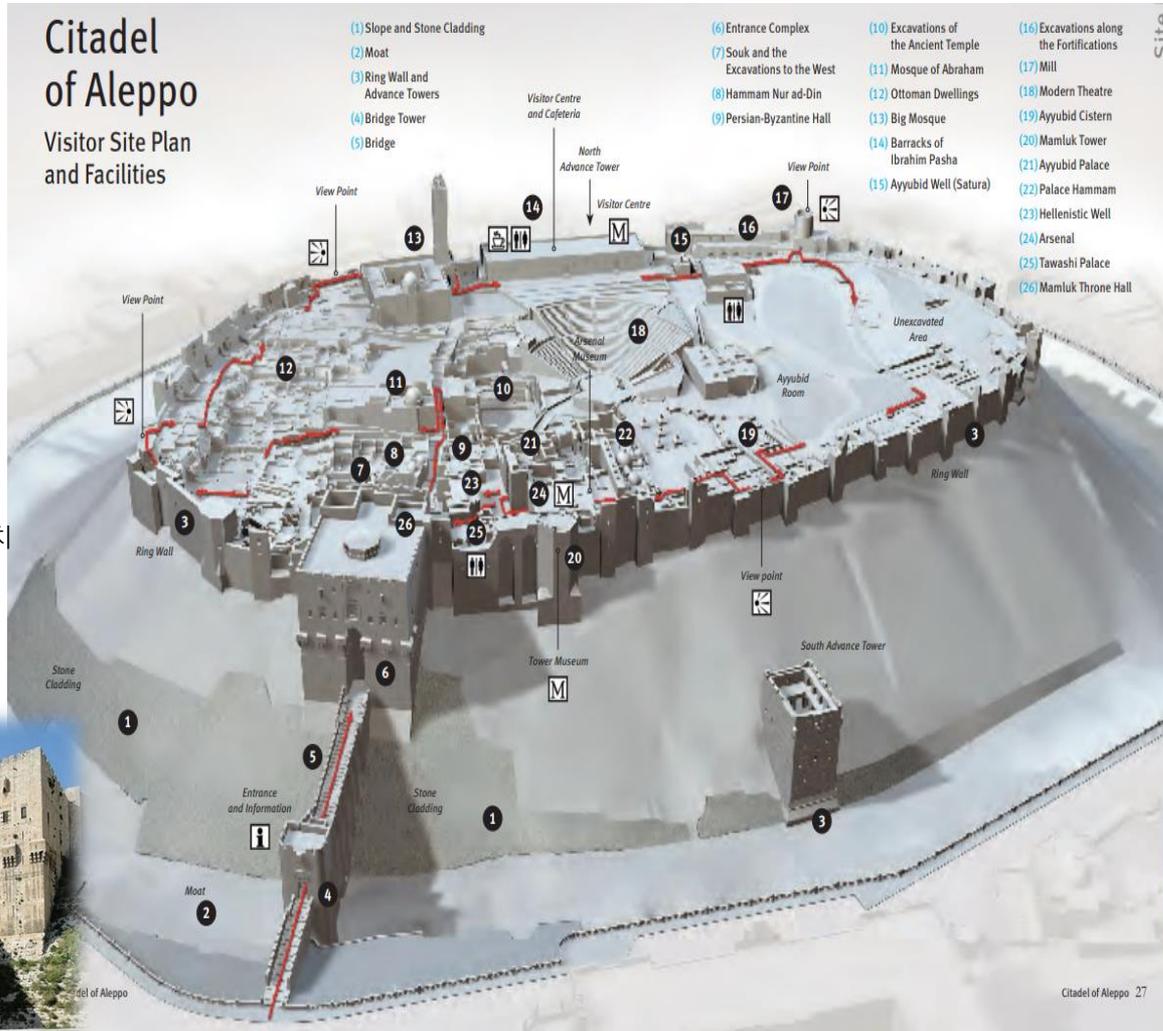
시리아 알레포의 중심가 언덕에 있는 거대한 요새. 알레포 성채는 기원전 16세기에 처음 지어졌고 서기 12세기에 이르기까지 보강된 순수 아랍 성채



4.7 문화재 - 지진 피해를 입은 알레포 성채의 주요 구조물



Big Mosque의 첨탑
성채의 가장 높은 곳에 위치
높이 21m
군사 망루로도 사용



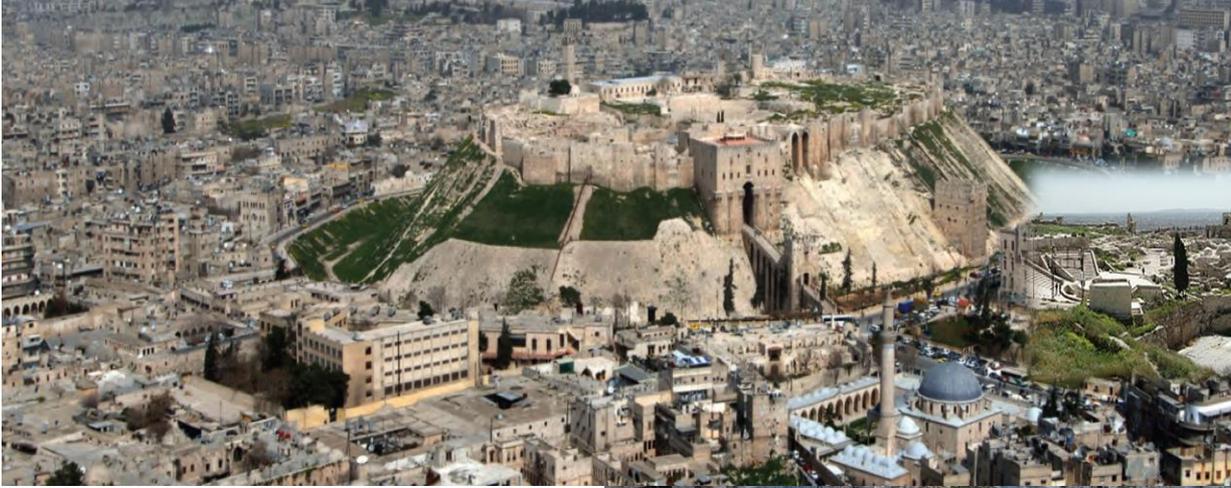
Mill
이브라힘 바샤(Ibrahim Basha)가 세운 공장, 성채에 밀가루 공급



남측 망루
South Advance Tower
맘루크(Mamluk) 군대의 대표물



4.7 문화재 - 알레포 성채의 Big Mosque



4.7 문화재 – 알레포 성채의 Big Mosque

- 지진 피해 이전 vs. **지진 피해 이후**



4.7 문화재 - 알레포 성채의 제분 공장

- 지진 피해 이전 vs. **지진 피해 이후**



4.7 문화재 - 튀르키예 남동부의 모스크의 피해

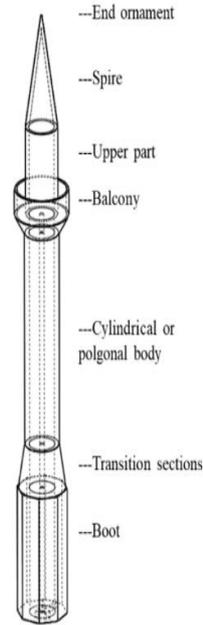
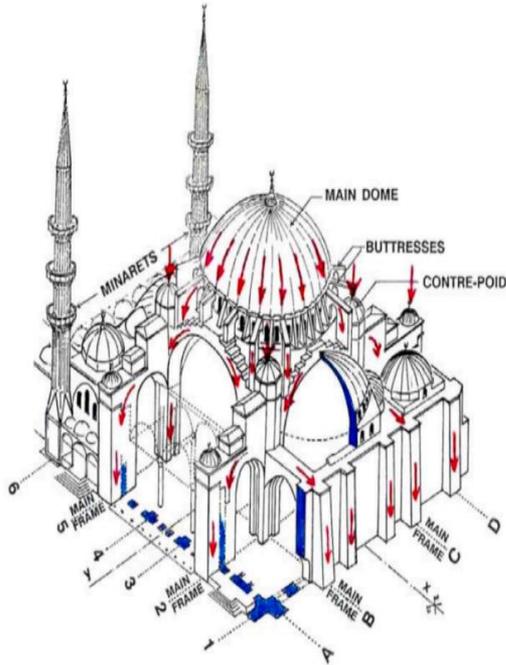
An aerial view taken in the evening of on March 5, 2023 shows a destroyed mosque in Kahramanmaraş, one month after a massive earthquake struck south-east Turkey.



<https://www.kuwaittimes.com/nobody-warned-us-turkey-struggles-to-rebuild-month-after-earthquake/>

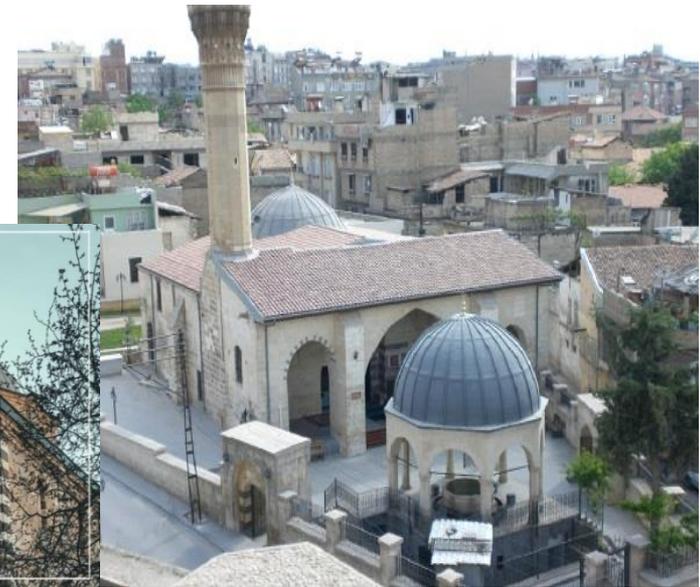
4.7 문화재 - 역사적 조적 모스크와 침탐의 피해

- 조적 모스크와 침탐의 구조적 요소



• 가지안테프의 시르바니 (Sirvani) 모스크

- 2023년 3월 6일
- 가지안테프의 쿠르툴루스(Kurtuluş) 모스크

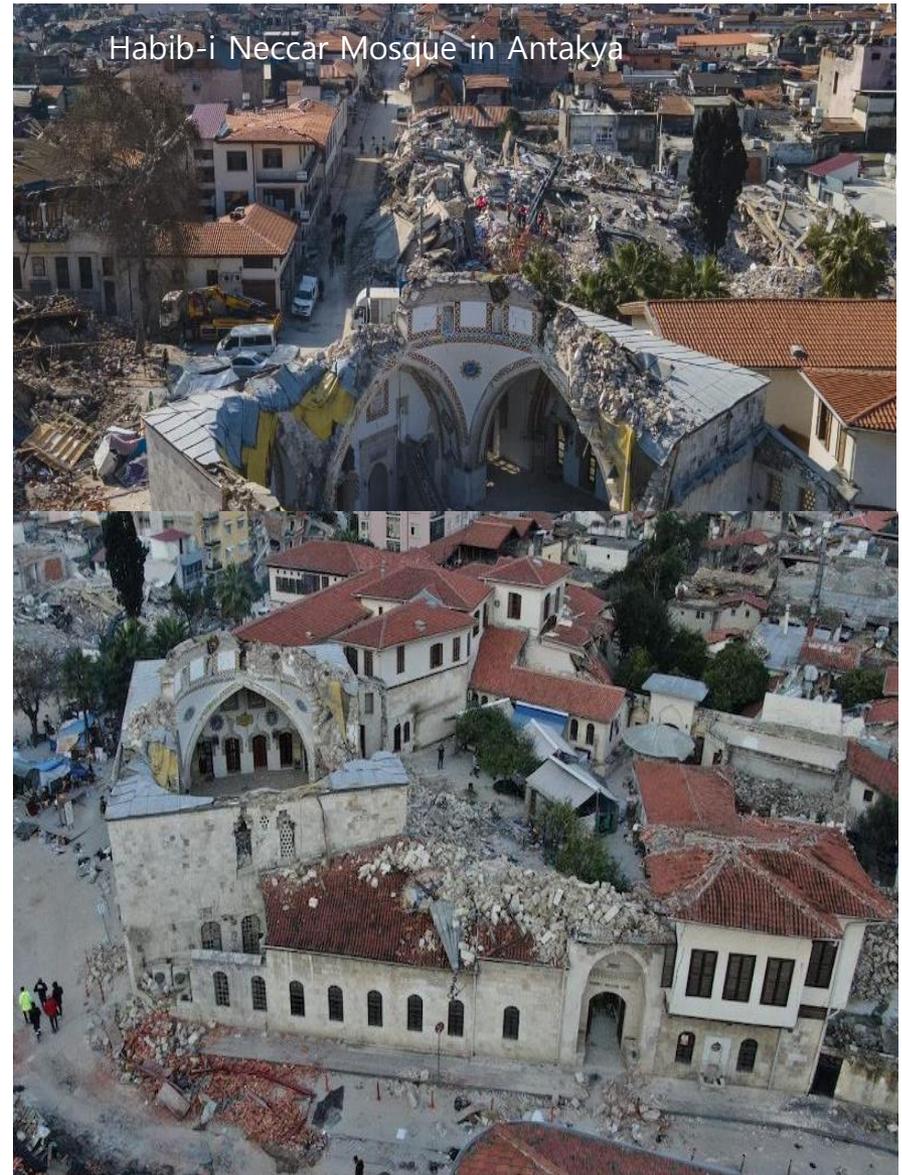


4.7 문화재 - 모스크 돔 지지구조의 약함



2023년 3월 3일 이스켄데룬 지역에 있는 침탑을 제외하고 무너진 하치 메메트 카라토유크 (Haci Mehmet Karatoyuk) 모스크 안뜰에서 금요일 기도를 수행하고 있다.

4.7 문화재 - 모스크 돔과 주 구조와의 연결부의 취약성



4.7 문화재 - 그리스 정교회 건축물의 피해

•안타키아 (Antakya)의 그리스 정교회



• 이스켄데룬(Iskenderun)에 위치한 로마 카톨릭 교회



St. Nicholas Church



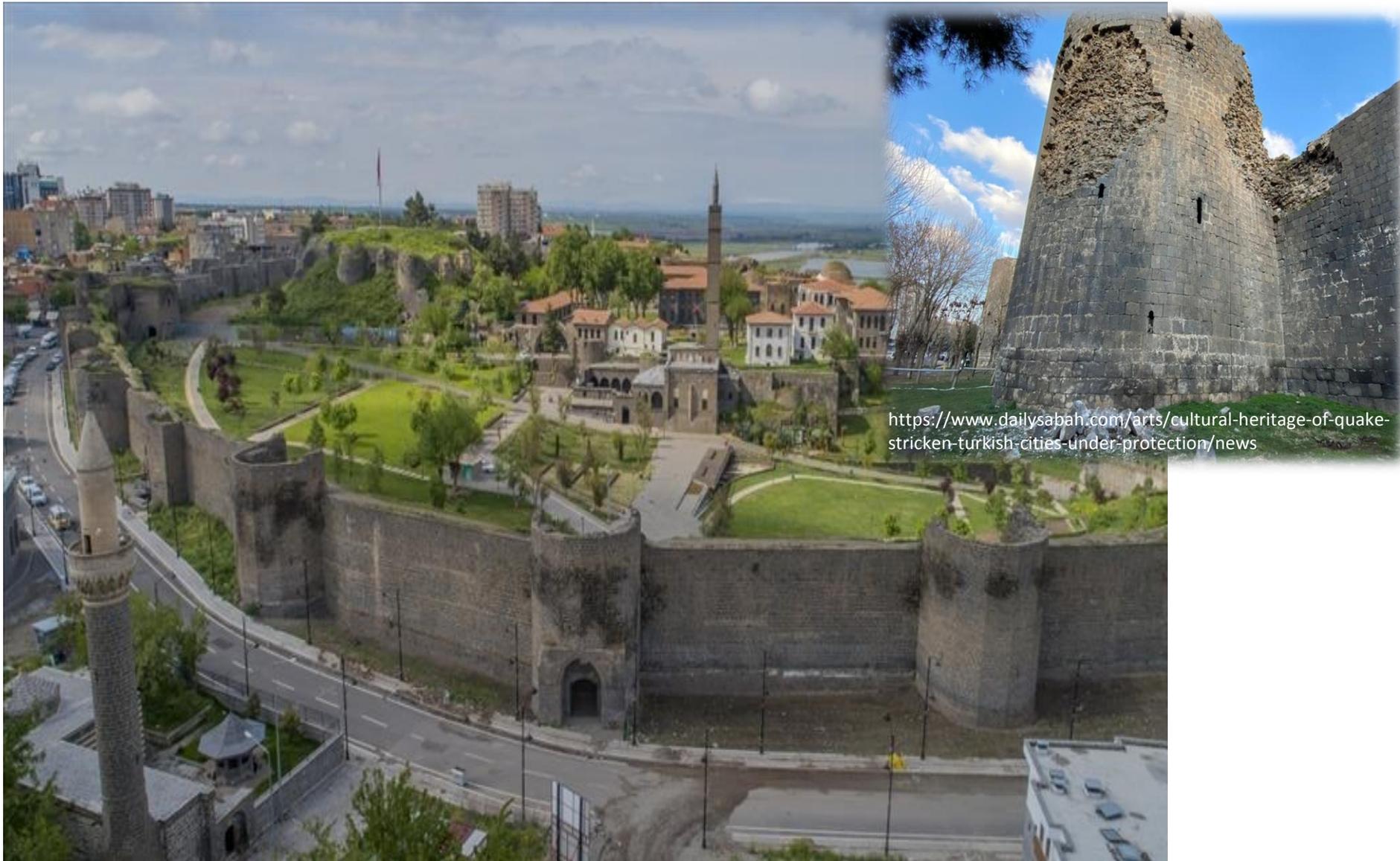
4.7 문화재 - 지진 발생할 때 마다 피해를 입은 모스크

- 하시 유수프 타스 (Hacı Yusuf Taş) 모스크; 지진 피해 이전 vs. 지진 피해 이후



The **New Mosque** ([Turkish](#): *Yeni Cami*, pronounced [[jeni dʒami](#)]) originally named the **Hacı Yusuf Taş Mosque**) is a mosque in [Malatya, Turkey](#). The original mosque was burned down in a fire in Malatya Bazaar in 1889, and was subjected to another fire in 1890 before it was repaired.^[1] Reconstruction began in 1893 and was damaged by an earthquake on March 3, 1893. It took until 1913 to complete the construction.^[1] The rebuilt mosque was damaged by a 1964 earthquake and badly damaged in the [2023 Turkey–Syria earthquake](#).

4.7 문화재 - 디야르바키르 요새 (Diyarbakir Fortress)



4.7 문화재 - 문화재 구조물의 지진 피해 요약



Gaziantep



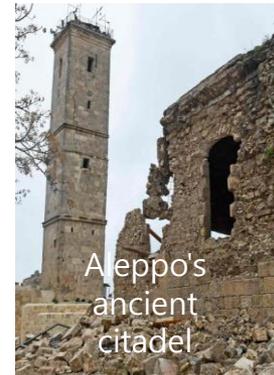
Gaziantep

지진피해의 원인

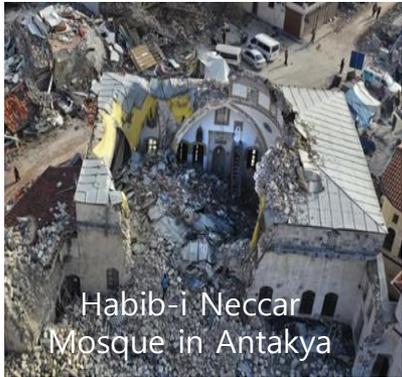
- (1) 지역적 위치
 - (2) 구조시스템의 형식 (대칭과 비대칭)
 - (3) 재료의 성능과 열화,
 - (4) 시공방법
 - (5) 과거 지진피해
 - (6) 구조물 변형 등
- 여러 가지가 복합적으로 작용



Aleppo's ancient citadel



Aleppo's ancient citadel



Habib-i Neccar Mosque in Antakya



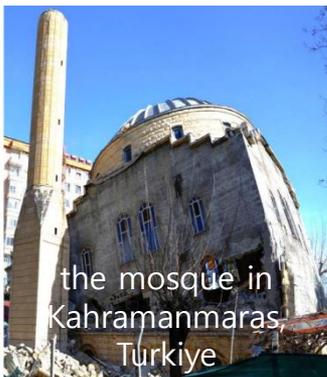
the catholic church of the Annunciation in Iskenderun



Sirvani mosque in Gaziantep



Yeni Cami mosque in Malatya



the mosque in Kahramanmaraş Türkiye



Adiyaman Ulu Grand Mosque in Adiyaman



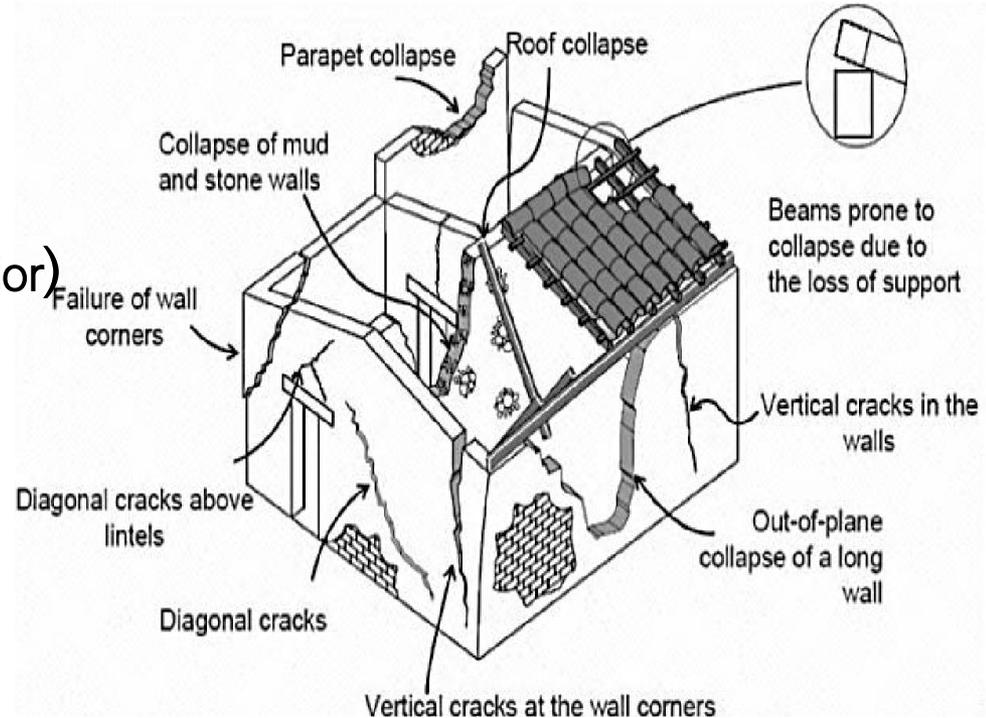
the Hadî Mehmet Karatoyuk Mosque



the Antioch Greek Orthodox Church

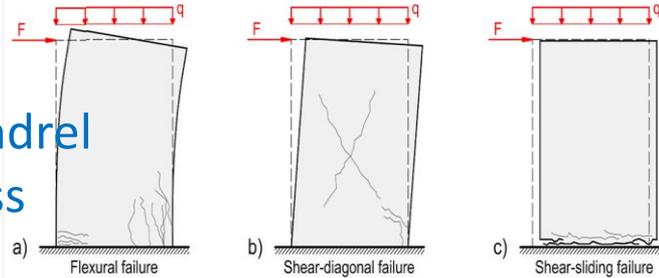
4.7 문화재 - 비보강 조적조의 지진피해 유형

- 면내 거동(In-Plane Behavior)
 - Aspect ratio
 - Weak/strong spandrel
 - Compressive stress
 - Soft Story
- 면외 거동(Out-of-Plane Behavior)
 - Diaphragm
 - Story location
 - Boundary condition
 - Wall size
- 하중경로의 불연속성
- 외장재

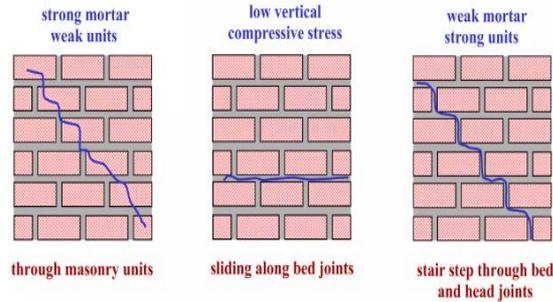


4.7 문화재 - 비보강 조적조의 면내 방향 피해 양상

- Aspect ratio
- Weak/strong spandrel
- Compressive stress
- Soft Story

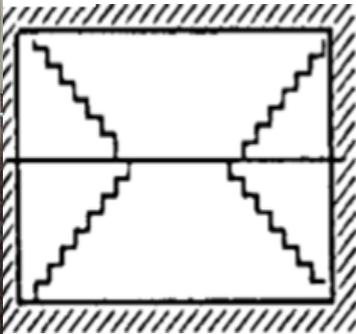
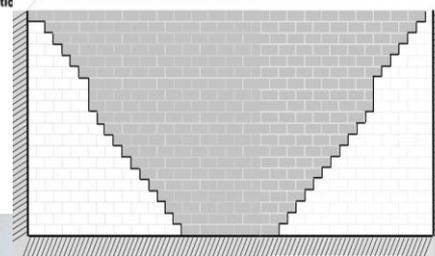
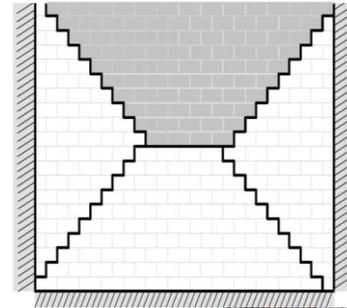
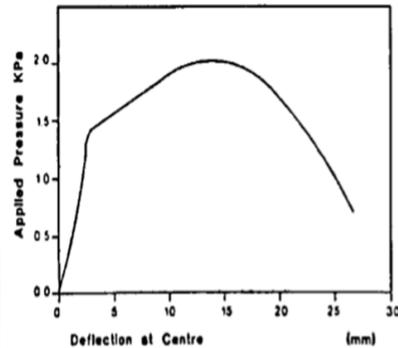
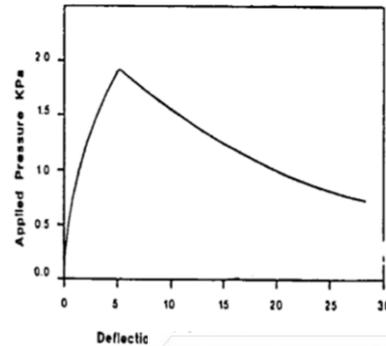


Possible shear cracking modes.



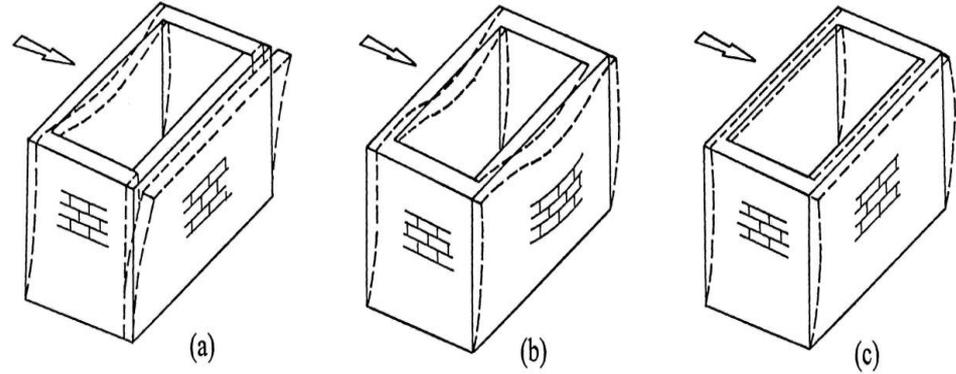
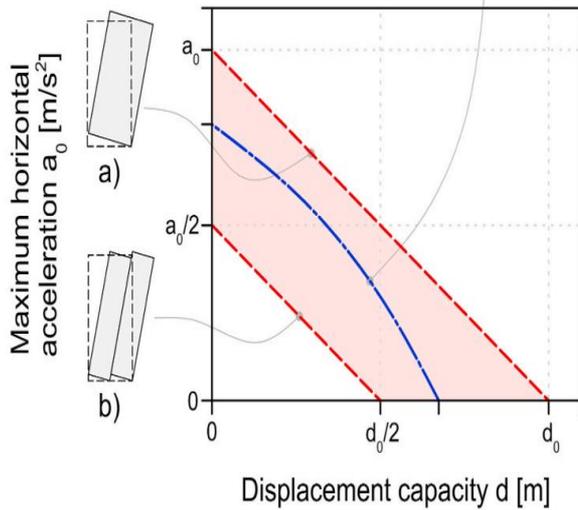
4.7 문화재 - 비보강 조적조의 면외 방향 피해 양상

- Diaphragm
- Story location
- Boundary condition
- Wall size



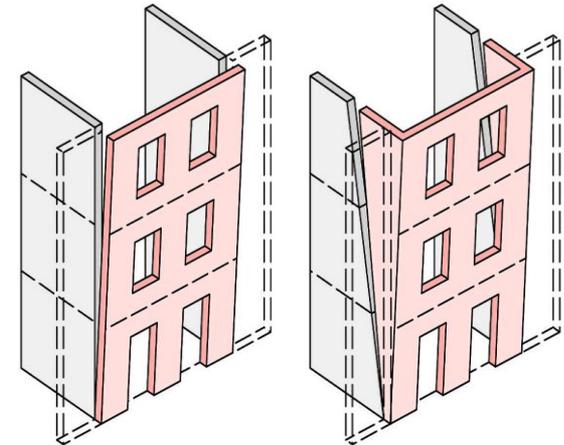
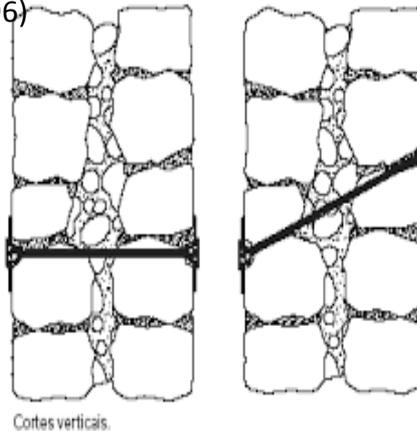
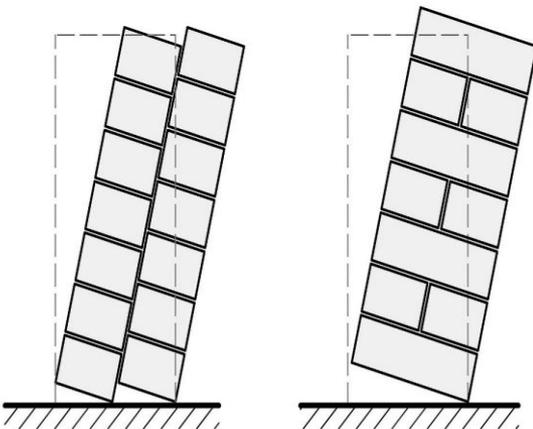
4.7 문화재 - 비보강 조적조의 내진거동에 대한 영향을 주는 요소

Typical masonry not satisfying the 'rule of art'



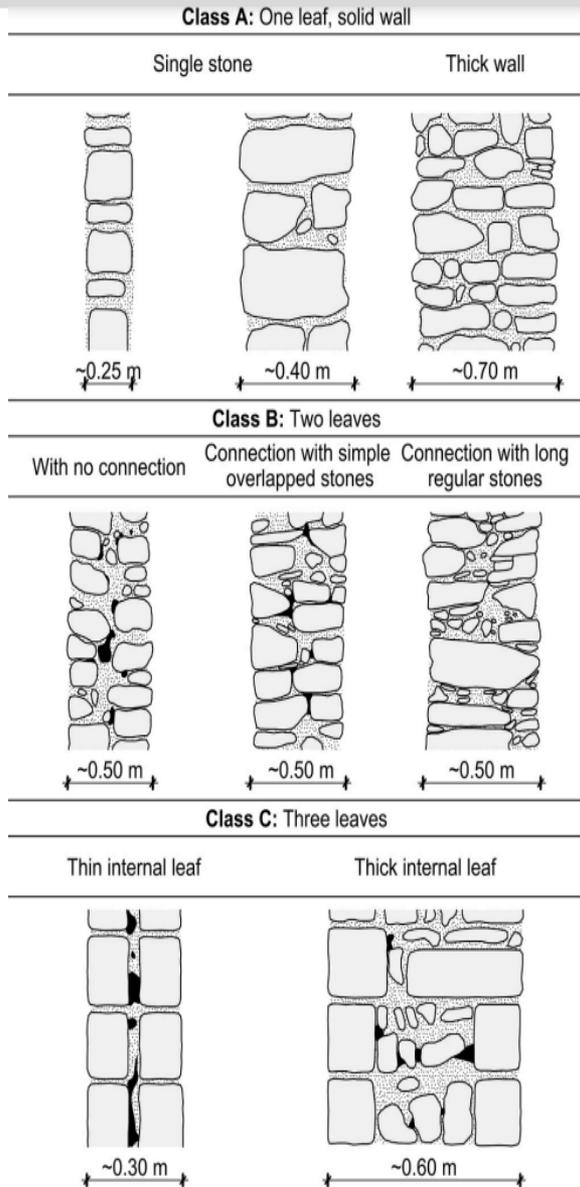
- Effect of Diaphragm

Capacity curves for out-of-plane overturning depending on the connection of leaves (Giuffr e, 1996)

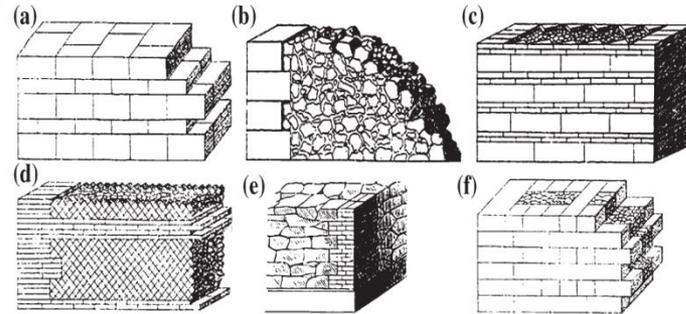


- Effect of In-plane pattern on OOP failure mechanism

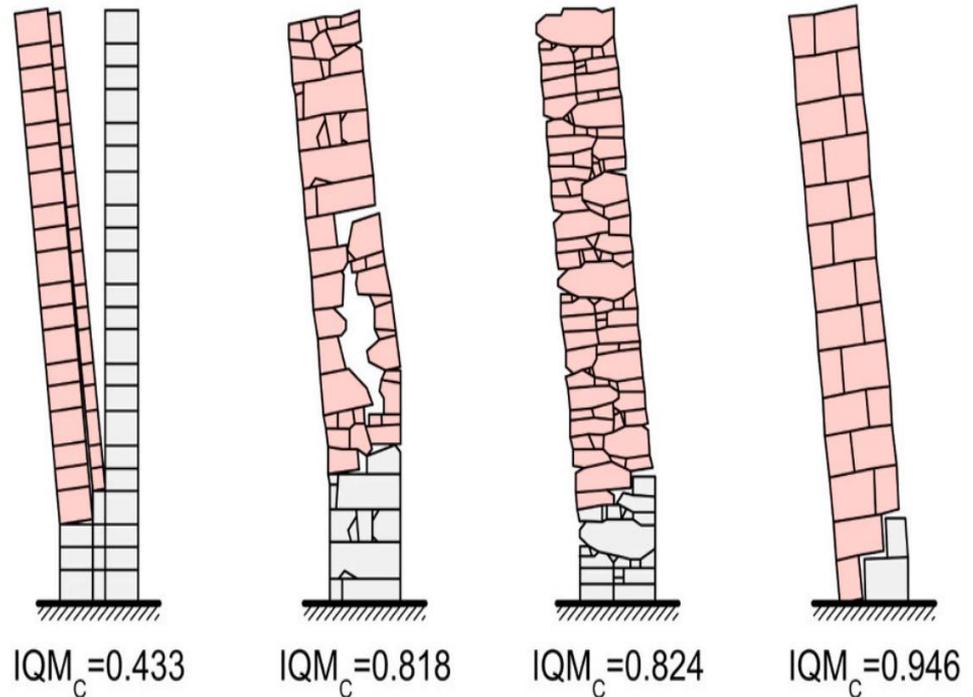
4.7 문화재 - 비보강 조적조의 내진거동에 대한 영향을 주는 요소



Classification of masonry wall sections (Binda L)



Examples of the main Roman stone masonry typologies: (a) opus pseudoisodomum; (b) Roman concrete; (c) infill wall (emplecton); (d) opus reticulatum with infill; (e) opus incertum; (f) opus mixtum



Index of Masonry Quality

4.7 문화재 - 비보강 조적조의 내진거동에 대한 영향을 주는 요소

Disintegration of multi-leaf rubble masonry walls due to lack of transversal connections (Vlachakis et al., 2020).

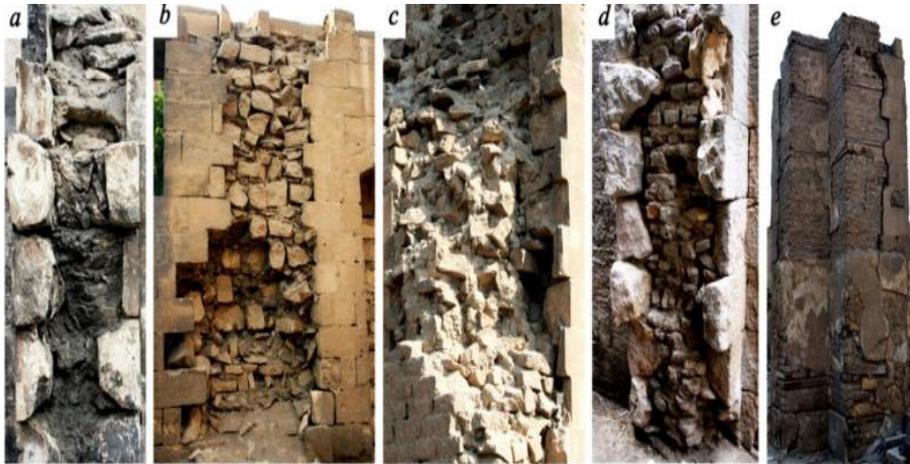
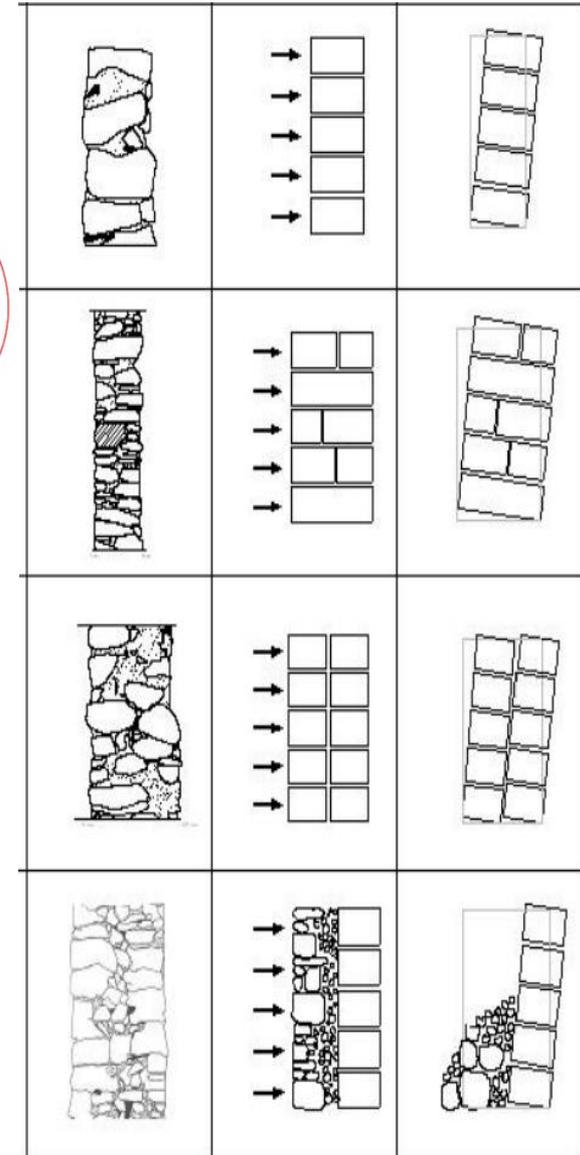
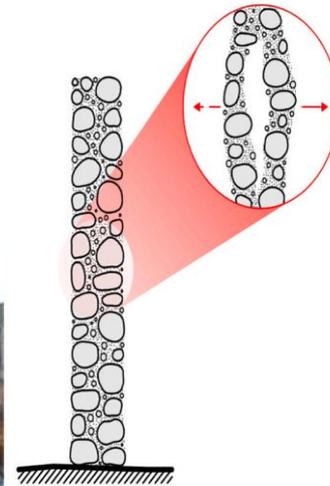


Figure 7. Different core infill materials of multiple-leaf masonry walls: (a-c) stone-rubble infill—Complex of *Sultan al-Ashraf Barsbay*, (d,e) brick rubble infill, (a,b) Complex of *Sultan al-Ashraf Barsbay*, (c) *Khanqat Khawand Umm Anuk*, (d) *Sabil Ibrahim Agha Mustahfizan*, (e) *Saray Al-Musafir khana Zawiya of 'All al-Maghrabi*.



4.8 소고

국내 지진 피해의 조사 목적:

피해를 최소화하고 사회적, 경제적 안전성을 증진시키는 것

- 구호 및 구조 활동 지원: 인명 피해 최소화하고 생존자 구조에 기여
- 인프라 복구 지원: 지진으로 인한 주요 인프라(전기, 수도, 도로, 다리 등)의 손상 복구하여 사회적 및 경제적 안정 회복



국외 지진 피해의 조사 목적:

- 지진 예방 및 대응 계획 개발을 위한 정보 획득
- 유사 사례에 대한 구체적인 대응책 마련
- 국제 협력 강화로 국제 지진 대응 능력을 향상시키고 세계적으로 더 안전한 환경 조성



참고문헌

1. 2023 Türkiye Earthquake Sequence, Structural Extreme Events Reconnaissance, Joint Preliminary Virtual Reconnaissance Report (PVRP), EERI
2. SDSU STRUCTURAL ENGINEERING RESEARCH PROJECT Report No. SERP – 23/03 March 2023, Reconnaissance Report of Observed Structural Bridge Damage, Mw 7.8 Türkiye (Turkey) Earthquake of 2023, Robert K. Dowell, Ph.D., P.E.
3. European commission, Joint Technical Report M7.8 and M7.5 Earthquakes in Türkiye and Syria JRC Scientific Analysis: Update#3 10 Feb 2023 19:00 UTC
4. Dongyi He , Peizhen Li * and Zhen Zhang. Analysis of a Simplified Model of a Rigid Rocking Block on Winkler Foundation by Sustainability 2023, 15, 5095. <https://doi.org/10.3390/su15065095>
5. 김남희 · 구인영 · 홍성걸. 적층 석탑의 내진성능 평가요소 한국지진공학회 논문집 23권 1호 2019년 1월
6. <https://twitter.com/ragipsoylu/status/1622484958211088386>
7. <https://nationalpost.com/news/world/turkey-syria-earthquake-fault-line>
8. Lale Karataş, Tahir Ateş , Aydn Alptekin, Murat Dal, Murat Yakar. A systematic method for post-earthquake damage assessment: Case study of the Antep Castle, Türkiye *Advanced Engineering Science*, 2023, 3, 62–71
9. Kemal Önder Çetin, Makbule Ilgaç, Gizem Can and Elife Çak ır, Preliminary Reconnaissance Report on February 6, 2023, Pazarc ık Mw=7.7 and Elbistan Mw=7.6, Kahramanmaraş–Türkiye Earthquakes, Report no. METU/EERC 2023–01, METU, 2023.
10. Simon Szabo, Marco Francesco Funari b, Paulo B. Lourenço. Masonry patterns’ influence on the damage assessment of URM walls: Current and future trends. *Developments in the Built Environment* 13 (2023)



2023 튀르키예-시리아 지진피해 분석 및 사례 모음집

발행일 2023년 10월 31일

발행처 한국지진공학회

편집인 한국지진공학회 여성위원회

ISBN 979-11-985225-0-4(95060)