

# FOCUS

## 해외 강진에 의한 철근콘크리트 건물의 지진피해 유형



**김 승 직**  
계명대학교 교수



**이 한 선**  
고려대학교 교수

### 1. 서언

최근 발생한 일본 고베지진(1995), 뉴질랜드 Christchurch 지진(2011), 미국 Northridge 지진(1994), 아이티 지진(2010), 칠레 Maule 지진(2010), 파키스탄 Kashmir 지진(2005), 인도네시아 Yogyakarta 지진(2006)등과 같은 중·대형지진들에 의하여 세계 여러 나라에서 막대한 인명피해와 많은 구조물들의 붕괴 및 손상으로 인한 상당한 경제적 손실을 초래하였다. 특히 파키스탄과 아이티에서 발생한 지진의 경우 내진 설계되지 않은 구조물이 많아 그 피해가 막대하였으나 칠레의 지진규모가 아이티 및 파키스탄에서 발생한 지진보다 컸음에서 불구하고 내진 설계된 구조물이 많아 상대적으로 그 피해가 작았다. 이는 지진 하중하의 구조물의 성능에 대한 설계 및 이해가 얼마나 중요한지를 보여주는 예라고 할 수 있다.

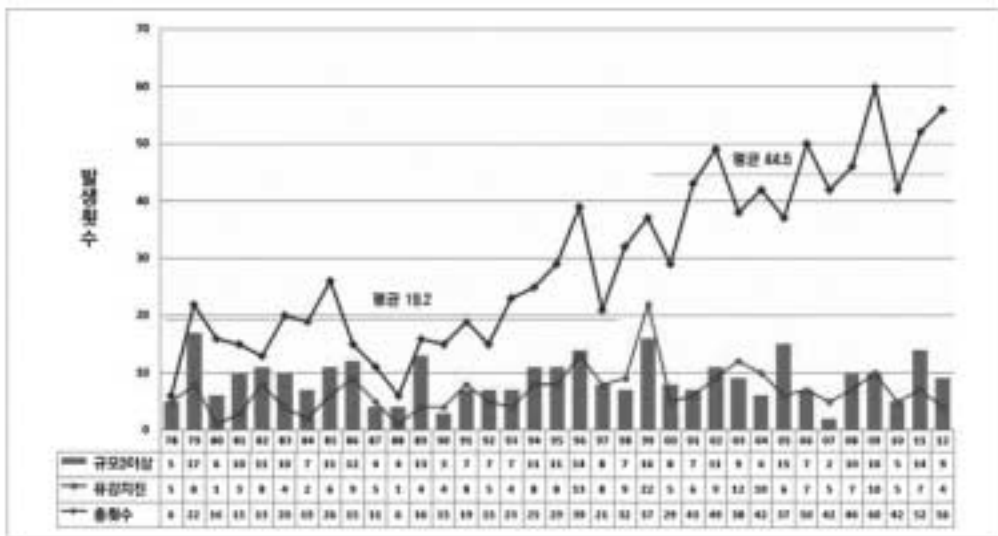


그림 1. 국내 연도별 지진 발생 추이(기상청)

포커스

FOCUS

우리나라는 그 동안 지진 안전지대로 평가되어 왔으나 한반도 영향권 내에서 발생한 홍성 지진(1978), 백령도 지진(1995), 영월 지진(1996), 경주 지진(1997)과 같은 20세기 이후의 중소규모 지진들과 그림 1과 같은 우리나라 연도별 지진발생 추이에서 볼 수 있듯이 최근 지진발생빈도가 증가하고 있어 우리나라에서도 구조물에 치명적인 손상을 줄 수 있는 지진이 발생할 가능성을 배제할 수 없는 현실이다. 하지만 우리나라의 경우 지진에 대하여 국내 건축물은 1988년 이후 단계적으로 내진설계 대상 및 기준이 강화되고 있으나 1988년 우리나라에서 건축물 내진설계기준이 처음 시행될 당시에는 국가적인 경제적 부담과 충격을 감안하여 6층 이상의 건물에만 이 기준이 적용되었으며 최근 2005년에야 3층 이상의 건물로 확대되었다. 따라서 국내에는 내진설계가 전혀 적용되지 않은 비내진 건물이 다수 존재한다. 또한 전체건축물중 85%는 내진설계 적용대상이 아니며 현재 기준에 의한 적용대상건물 중에서도 80%는 과거에 건축되어져 내진설계가 적용되지 않아 많은 건물들이 지진 안전성의 사각지대로 남아있어 이 건물들에 대한 피해 예상 및 그에 따른 대책이 시급하다.

본 글에서는 제 1필자가 참여한 세 개의 지진(파키스탄 Kashmir 지진(2005), 인도네시아 Yogyakarta 지진(2006), 칠레 Maule 지진(2010))의 피해 현장조사로부터 지진에 의한 철근 콘크리트 건물의 다양한 피해 사례를 보여줌으로써 우리나라 건축물의 내진 안전성 증진에 도움이 되고자 한다.

## 2. 조사대상 지진의 개요

### 2.1. 파키스탄 Kashmir 지진(2005)

파키스탄 북쪽 카쉬미르지역(그림 1)에서 2005년 10월 8일에 지진규모 7.6의 강진이 발생하였다(이하 파키스탄 지진). 이 강진으로 인하여 사망 10만명 이상, 부상 13만명 이상 등 총 350만명의 이재민이 발생하였다. 세계은행의 통계자료에 의하면 50억불이상의 경제적 손실이 발생하였다. 표 1에서 보이듯이 건물의 피해 또한 막대하였는데, 완전히 파괴된 건물이 27만동 이상이며 부분적으로 피해를 입은 건물이 18만동 이상이었다.



그림 2. 파키스탄 지진의 진원지

표 1. 2005년 파키스탄 지진에 의한 건물 피해 통계

건물용도	파괴정도		합 계
	전파	부분파괴	
주거	261,990	177,890	439,880
교육	3,424	2,751	6,175
의료	262	161	423
공공건물	341	238	579
기타	6,002	1,846	7,848
합계	272,019	182,886	454,905

진원지에서 39km 떨어진 아보타바드 지역에서 측정된 최대 지반가속도(PGA)는 0.23g이었으며 그림 3(a)에서 보이듯이 응답스펙트럼의 증폭비는 약 4.0으로서 일반적 값 2.5보다 상당히 크며 그 범위가 주기 2초까지 확장되어 중·장주기 구조물 즉 중·고층 건물의 피해가 컸음을 예측할 수 있다. 그림 3(b)에서 보이듯이 제한된 데이터를 이용하여 예측된 PGA 감쇠를 고려할 때 근단충지역에서는 최대지반가속도가 1g에 근접했을 것으로 예측할 수 있어 상당한 피해가 발생하였음을 알 수 있다.

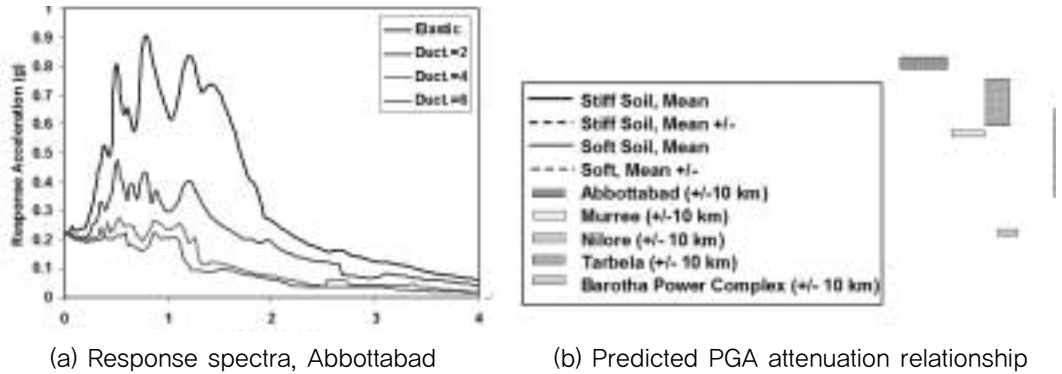


그림 3. 지진응답 및 예측된 PGA감쇠, 파키스탄 지진

## 2.2. 인도네시아 Yogyakarta 지진(2006)

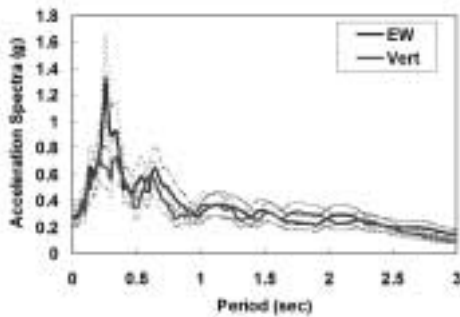
인도네시아 족자카르타 지역(그림 4)에서 2006년 5월 27일에 규모 6.3의 지진(이하 인도네시아 지진)이 발생하여 족자카르타의 반톨지역과 중앙 자바의 클레이튼 지역에 상당한 피해가 발생하였다. 이 지진으로 인하여 사망 6000명 이상과 부상 6만명 이상이 발생하였으며, 세계은행의 통계자료에 의하면 30억불 이상의 경제적 손실이 발생하였다. 건물의 피해 또한 막대하였는데, 완전히 파괴된 건물이 15만동 이상이며 부분적으로 피해를 입은 건물이 20만동 이상이었다. 약 2000동 이상의 교육시설과 17개의 병원이 완전히 파괴되거나 피해를 입었다. 진원지에서 10km 떨어진 요기(Yogi) 지역에서 측정된 최대 지반가속도(PGA)는



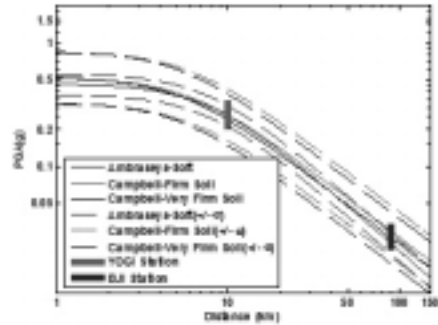
그림 4. 2006년 인도네시아 지진의 진원지

FOCUS

0.18g~0.30g로 추정되었으며 그림 5(a)에 응답스펙트럼이 나타나 있다. 그림 5(b)에서 보이는 예측된 PGA 감쇠로부터 피해가 심했던 반톨지역과 족자카르타 지역의 PGA가 각각 0.49g와 0.41g로 예측되어 상당한 피해가 발생하였음을 알 수 있다. 무엇보다도 이 지진의 경우 예측된 감쇠식과 피해현장 조사로부터 수직 지반운동의 영향이 컸다고 보고되었다.



(a) Response spectra, Abbottabad



(b) Predicted PGA attenuation relationship

그림 5. 지진응답 및 예측된 PGA감쇠, 인도네시아 지진

### 2.3. 칠레 Maule 지진(2010)

칠레 중앙에서 2010년 2월 27일에 지진규모 8.8의 강진(이하 칠레 지진)이 발생하였다. 진원지는 그림 6에서 보이듯이 칠레 해안으로부터 약 8km 떨어졌으며 추정된 파단 단층의 크기는 약 190km x 530km 로 강력한 지진이었다. 이 강진으로 인하여 521명이 사망하였으며 80만명 이상이 부상을 당했고, 수많은 이재민이 발생하였다. 약 37만동의 주거시설과 4000여개의 학교가 피해를 입었고 칠레 공공의료시설의 73%인 130여개의 병원이 피해를 입었다. 하지만 내진 설계된 건물의 경우 그 피해가 적었는데, 1985년과 2009년 사이에 준공된 9974개의 건물 중 단 4개의 건물이 완파되었고 50개의 건물의 손상이 컸다. 내진 설계된 건물의 약 2.5%만이 피해를 입었으며 그 건물에 있었던 20여명이 사망하였다고 보고되었다.

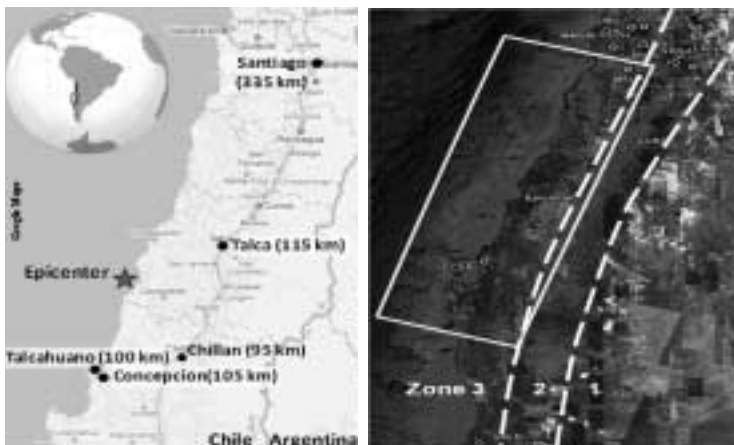
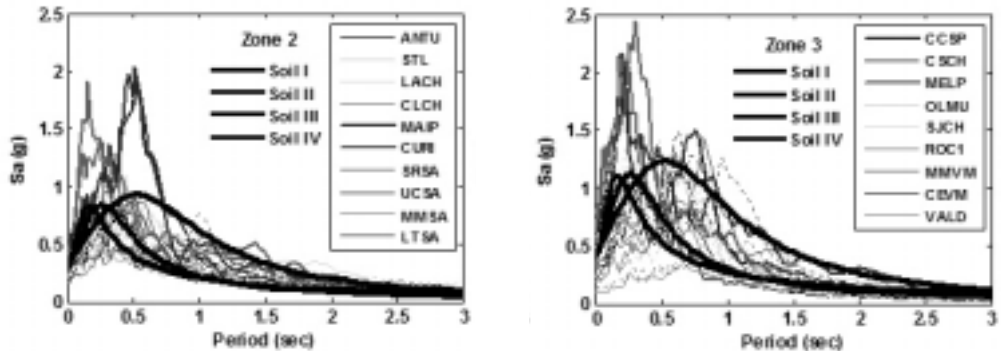


그림 6. 2010년 칠레 지진의 진원지와 파단된 단층지대



(a) Response spectra, Abbottabad

(b) Predicted PGA attenuation relationship

그림 7. 지진응답 스펙트럼, 칠레지진

그림 7은 지진피해 조사 중 얻은 지진동 데이터의 응답스펙트럼과 칠레 내진기준에서 제시하고 있는 설계 스펙트럼의 비교를 내진진도 구역 2와 3에 따라 분리하여 나타내고 있다. 그림 7에서 보이듯이 몇몇 지진파 관측소에서 측정된 데이터의 경우 내진기준에서 제시하고 있는 스펙트럼 보다 단주기 및 중주기영역에서 초과하는 것으로 나타난다. 따라서 이러한 특성으로 인하여 중·단주기 영역의 구조물의 피해가 컸음을 예측할 수 있다.

### 3. 철근 콘크리트 건물의 파괴 사례

철근 콘크리트 건물의 피해와 관련하여 가장 보편적이며 치명적인 부분은 기둥, 기둥과 보의 접합부, 전단벽(조적벽체) 그리고 전체건물이 될 수 있다.

#### 3.1. 기둥

건물골조 시스템 안정성에 중요한 역할을 하는 기둥의 지진에 의한 파괴모드는 크게 기둥의 단면 크기에 대한 높이의 비 즉 전단경간비( $\alpha=M/VH$ )와 부적절한 철근상세에 따라 결정될 수 있다. 여기서 M은 모멘트, V는 전단력, H는 기둥의 높이이다. 일반적으로 그림 8(a)에서 보이듯이 전단경간비가 2보다 작을 경우 단주효과 즉, 짧은 기둥에 일어나는 45° 방향 균열에 의한 전단파괴가 발생할 수 있다. 또한 설계 당시에 고려하지 못한 조적조벽체 등에 의하여 전단경간비가 짧아져 이러한 기둥파괴가 발생할 수 있다. 이러한 파괴를 방지하기 위하여 대각철근을 제공함으로써 기둥의 성능을 향상시킬 수 있다. 그림 8(b)에서 보이는 중간높이의 기둥( $2 < \alpha < 3.5$ )의 경우 길이방향 철근의 횡좌굴과 전단력에 저항하기 위한 횡철근이 충분히 제공되지 않을 경우 전단-휨파괴가 발생할 수 있어 이러한 기둥의 경우 횡철근량이 파괴모드를 결정하는 중요한 요소가 된다. 그림 8(c)에서 보이는 긴 기둥( $\alpha > 3.5$ )의 경우 마찬가지로 횡철근이 적절히 사용되지 않으면 콘크리트 피복이 벗겨지고 압축 콘크리트의 압괴와 주근의 좌굴 및 파단으로 이어지는 휨파괴가 발생할 수 있다.

FOCUS

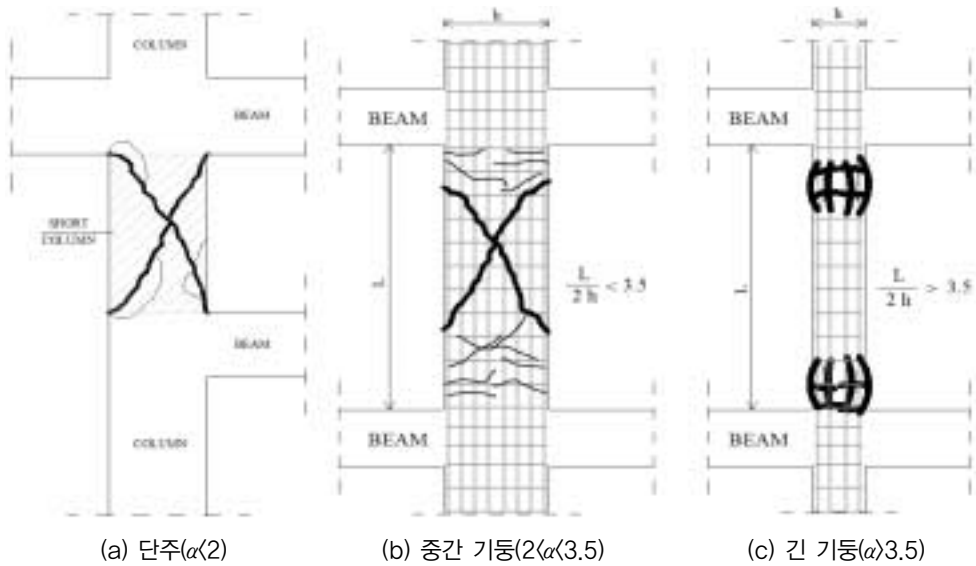


그림 8. 전단경간비에 따른 기둥의 파괴모드 (Elnashai and Sarno, 2008)

그림 9(a)에서 보이는 경영대학 건물의 기둥은 구조설계상에서 고려하지 못한 조적벽체로 인하여 기둥의 전단경간비를 줄여 단주효과로 인한 파괴가 발생하였다. 또한 그림 9(b)에서 보이는 칠레의 치과병원의 경우 개구부와 인접한 기둥이 단주효과에 의하여 손상을 입었음을 알 수 있다.

기둥의 피해의 중요한 원인 중의 하나도 이미 언급하였듯이 길이 방향 주철근의 좌굴을 방지하기에 부적절한 철근상세의 사용이다. 먼저 그림 10에서 보이듯이 인도네시아 미술대학 건물의 기둥은 횡철근 또는 띠철근의 부적절한 배치로 인해 기둥의 전단파괴와 함께 주근의 좌굴 및 콘크리트 압축 파괴가 발생하여 중국에는 수직하중에 대한 지지력을 상실하였다.



(a) 인도네시아지진

(b) 칠레지진

그림 9. 단주효과에 의한 기둥 파괴



그림 10. 부적절한 횡철근 사용에 의한 기둥 전단파괴 후 압축파괴, 인도네시아 지진

### 3.2. 보·기둥 접합부

지진피해의 많은 경우가 보와 기둥이 만나는 접합부의 파괴로 발생할 수 있다. 접합부의 파괴는 전체 횡 저항 시스템의 능력을 심각하게 감소시킬 수 있다. 부적절한 횡철근의 설치로 인한 보·기둥 접합부에서의 손상이 과거 지진피해현장에서 많이 관찰되고 있다. 이러한 예는 파키스탄의 아보타바드 지역과 칠레의 콘셉시온 지역에서 관찰된 보·기둥 접합부 파괴를 보여주는 그림 11에서 나타나고 있다.



(a) 파키스탄 지진

(b) 칠레 지진

(c) 칠레 지진

그림 11. 부적절한 전단철근으로 인한 보·기둥 접합부 파괴

### 3.3. 벽체

그림 12는 전형적인 전단벽의 파괴모드를 보여주고 있다. 전단벽과 인접한 부재가 부적절하게 설계될 경우 그림 12(a)와 같이 사인장 균열로 인한 전단파괴가 유도될 수 있다. 또 다른 경우는 그림 12(b)에서 보이듯이 부적절한 상세 및 불충분한 수직근의 사용으로 인한 시공이음에서의 균열 발생이다. 이 경우는 전체

FOCUS

구조물의 안정성에는 큰 영향을 미치지 않을 수 있다. 그림 12(c)의 경우는 과거 오래된 구조물에서 보여질 수 있는 드문 경우로서 휨파괴가 발생할 수도 있다. 지진피해현장에서 관찰된 벽체 피해사례는 그림 13과 14에서 보여지고 있다. 그림 13(a)는 파키스탄 무자파라바드 지역에 있는 군병원으로서 벽체에 발생한 사인장 균열을 보여주고 있으며 그림 13(b)는 인도네시아 IBIS 호텔의 벽체에서 발생한 전단파괴를 보여주고 있다. 그림 14는 조적벽체의 피해사례를 보여주고 있는데, 일반적으로 조적벽체의 파괴는 철근으로 보강되지 않은 경우 벽돌의 낮은 인장강도로 인하여 개구부 사이의 조적벽체에서 전단파괴가 주로 발생된다.

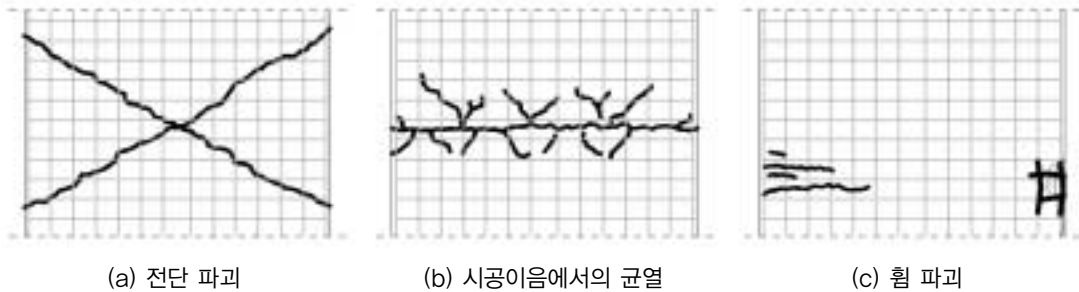


그림 12. 전형적인 전단벽 파괴 모드 (Elnashai and Sarno, 2008)



(a) 파키스탄 군병원



(b) 인도네시아 IBIS호텔

그림 13. 전단벽체 파괴

### 3.4. 골조(전체 시스템)

지진에 의한 골조의 피해는 크게 1) 과도한 층변위에 의한 외부벽체의 심각한 손상, 2) 1층 또는 중간층의 상대적으로 연약한 층(soft sotry)에 집중된 파괴, 3) 건물 전체의 비틀림에 의한 외부기둥의 과도한 변형, 4) 인접건물과의 충돌, 5) 부적절한 내진상세, 6) 전도모멘트에 의한 피해 등으로 나눌 수 있다.

지진피해 현장에서 자주 관찰된 파괴 형태는 1층 또는 중간층에 발생하는 상대적으로 연약한 층(연약층 :





그림 14. 조적벽체 파괴, 칠레 지진



그림 15. 연약층(soft story)에 의한 1층 붕괴, 파키스탄 발라코트 거리

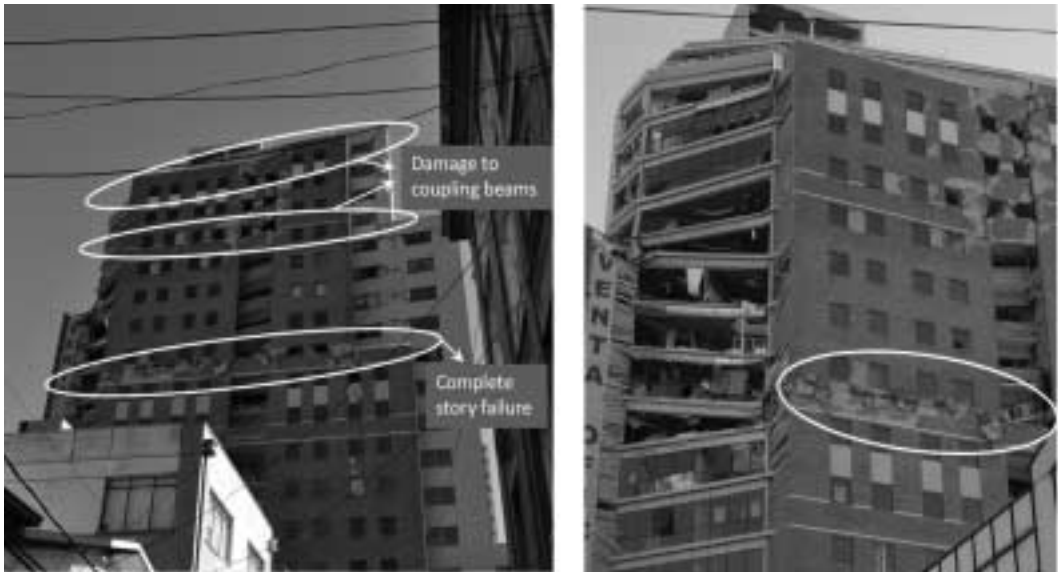


그림 16. 인방보 피해 및 연약층(soft story)에 의한 중간층 붕괴, 칠레 지진

soft story) 내 손상이 집중되는 현상이다. 연약층은 채움벽의 부재나 상대적으로 무겁고 강성이 큰 상부층으로 인하여 그 하부층에 발생할 수 있다. 그림 15는 파키스탄 발라코트시 거리에서 관찰된 연약층에 의

FOCUS

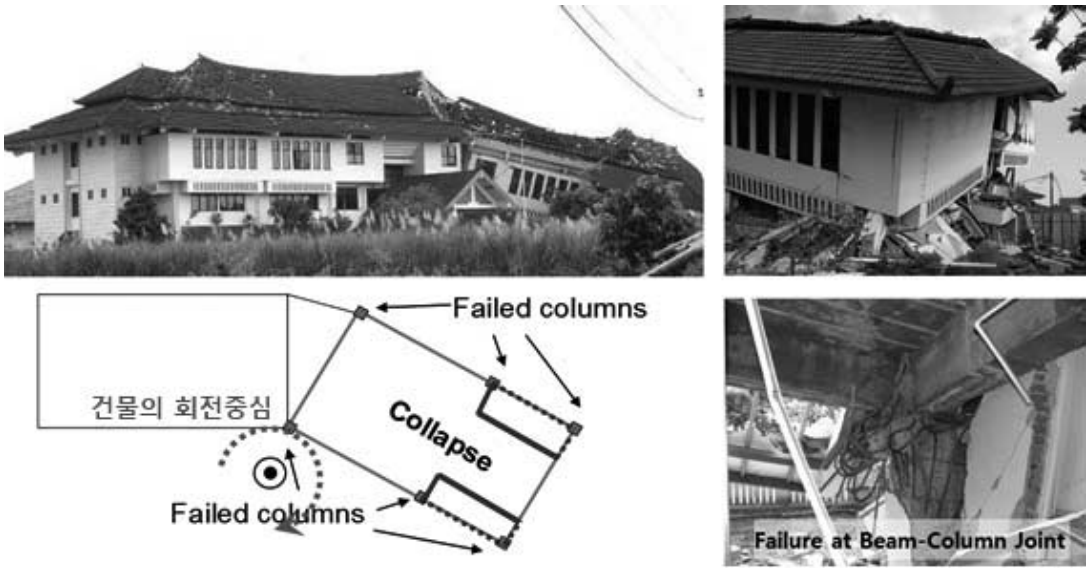


그림 17. 건물의 비틀림에 의한 피해, 인도네시아 지진

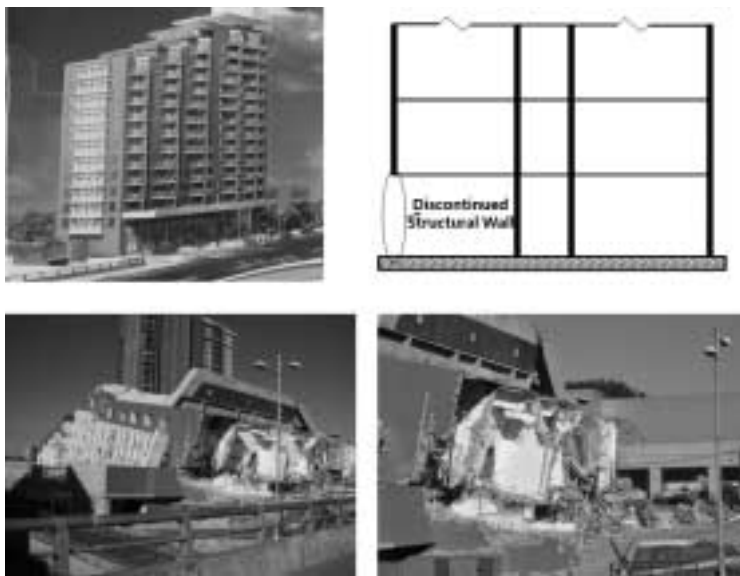


그림 18. 연약층에 파괴에 의한 건물붕괴(Alto Rio 콘도미니엄), 칠레 지진

한 층붕괴가 발생한 예이다. 양 길가의 기존 건물의 층수는 2층이었으나 그림에서 보이듯이 1층이 완전히 붕괴되었음을 알 수 있다. 그림 16에서 보이듯이 칠레 콘셉시온시에서 관찰된 고층건물의 피해는 중간층에서 연약층이 형성되어 층붕괴가 발생하였고 상부층에서는 인방보에서의 파괴가 관찰되었다. 평면이나 입면에서 모양이 정형이 아닌 비정형 건물의 경우 지진하중하에 비틀림으로 인하여 외부기둥에

큰 변형을 일으켜 구조물의 피해를 발생시킬 수 있다. 그림 17은 인도네시아의 한 공공기관 건물로서 건물이 평면상에서 비틀림으로 과도한 변형이 발생한 기둥이 파괴되었고, 이로 인해 건물의 오른쪽 부분이 완전히 파괴되었다. 그림 18에서 보이는 칠레 Alto Rio 콘도미니엄의 경우 일부 벽체가 지상층까지 연속되지 않는 불연속 구조체로 인하여 과도한 변형이 불연속 층에 집중하여 전체 구조물이 완전히 도괴되었다.

#### 4. 결론

이 글에서는 파키스탄(2005), 인도네시아(2006), 칠레(2010) 지진에 의하여 피해를 입은 철근콘크리트 건물의 피해사례를 분석하였다. 파키스탄과 인도네시아의 경우는 내진설계가 거의 이루어지지 않아 그 피해가 컸으며 칠레의 경우 강화된 내진설계기준이 있음에도 불구하고 일부 구조물의 경우 기준을 따르지 않아 피해가 발생한 경우가 있었다.

피해사례 분석을 통하여 관찰된 철근콘크리트 건물의 대표적인 피해형태는 1) 기둥 또는 보의 취성적 전단 파괴, 2) 횡철근의 부재나 부적절한 간격으로 인한 보-기둥 주근의 좌굴, 3) 조적채움벽과 같은 비구조재로 인하여 줄어든 기둥높이에 따른 전단파괴(단주효과) 4) 비틀림에 의한 코너기둥의 취성파괴, 5) 내부벽체 또는 비구조재의 과도한 피해, 6) 타 층에 비해 특별히 연약한 층에 피해가 집중되는 현상 등이다.

따라서 위에서 언급된 피해를 줄이기 위하여 내진설계가 적용되지 않은 국내 건물들에 대한 내진보강이 시급하며, 내진설계된 구조물의 경우도 조적채움에 의한 의도하지 않은 단주효과와 방지, 기둥의 횡철근 보강에 의한 취성파괴 방지, 구조체의 평면 및 수직 분포에서 비정형성의 개선을 유도해야 한다.

#### 참고문헌

Durrani, A., Elnashai A. S., Hashash, Y., Kim, S. J., and Masud, A., "The Kashmir Earthquake of October 8, 2005: A Quicklook Report", Mid-America Earthquake Center, Report No. 05-04.

Elnashai, A. S., Gencturk, B., Kwon, O-S., Al-Qadi, I. L., Hashash, Y., Roessler, J. R., Kim, S.J., Jeong, S-H., Dukes, J. and Valdivia, A., "The Maule (Chile) Earthquake of February 27, 2010: Consequence Assessment and Case Studies", Mid-America Earthquake Center, Report No. 10-04, 2011.

Elnashai, A., Kim, S. J., Yun, G., and Sidarta, D., "The Yogyakarta Earthquake of May 27, 2006", Mid-America Earthquake Center, Report No. 07-02, 2007.

Elnashai, A. S. and Sarno, L. D. "Fundamentals of earthquake engineering", A John Wiley & Sons, Ltd., 2008