

기존 국내 학교 건물의 내진성능 취약도 평가 Evaluation Seismic Fragility for Korean Existing School Building



문 기 훈^{1)*}

Moon, Ki Hoon



한 상 환²⁾

Han, Sang Whan



이 강 석³⁾

Lee, Kang Seok

1. 서 론

최근 들어 1995년에 발생한 일본 고베(神戸) 지진(M=7.2, 사상자: 약 6,310명), 1999년에 발생한 터키 이즈미트 지역지진(M=7.4, 사상자: 약 15,657명), 2001년에 발생한 인도 구자라트 지진(M=7.7, 사상자: 20,085명), 2005년에 발생한 파키스탄지진(M=7.6, 사상자: 86,000명), 2008년에 발생한 중국 쓰촨성지진(M=7.9, 사상자: 68,712명) 등의 한반도 주변을 포함한 세계각지에서 막대한 인명 및 재산의 피해를 유발한 대규모 지진이 빈발하고 있으며, 학교건물, 일반주택을 포함한 각종 건축물에 큰 피해가 발생하였다(Fig. 1 참조).

지진에 의한 피해는 단일 재해로는 가장 큰 물

적/인적 손실을 유발할 수 있으며, 광범위한 지역에 걸쳐서 피해를 불러일으킬 수 있는 국가적 재난이라는데 그 심각성이 있다. 해외의 피해사례에서 나타나듯이 지진발생으로 인해 발생한 경제적 손실과 복구 비용은 아이티의 경우 GDP의 120%에 달하는 피해비용이 발생하였으며, 일본 고베지진과 중국 쓰촨성 지진은 대략 140조원의 피해비용이 발생하였다.

우리나라는 지금까지 지진피해의 경험이 적은 나라로서 인식되어졌기 때문에 지진피해의 위험성에 대한 인식이나 내진에 대한 연구가 국외에 비교하면 부족한 실정이다. 그러나, 기상청 통계 자료에 의하면 지난 34년(1978-2011년)간 총 970회의 지진이 관측되어, 연평균 29회(=970회/34년)의 빈도를 보이고 있으며, 이중 유감지진횟수가 234회이며, 지진규모(M) 3이상의 지진발생이 303회로 빈발하고 있다. 또한, 역사지진 및 계기지진에 관한 연구결과에 의하면 국내에도 과거 막대한 인명 및 재산의 피해를 준 지

1) 한양대학교 대학원 건축공학과 박사후 과정

2) 한양대학교 건축공학과 교수

3) 전남대학교 건축학부 부교수

* E-mail : acttr@daum.net



(a) 1995년 고베지진



(b) 1999년 터키 코카에리지진



(c) 2008년 쓰촨성 지진



(d) 2010년 아이티 지진

Fig. 1 건축물의 지진피해 사례 (국외지진)

Table 1 국내 비내진설계 학교 건물 현황(동수)(2010년 소방방재청 내진실태 현황자료 참고)

건설 년대	~1960	1960	1970	1980	1990	2000	합계
합계	85	742	2,532	3,268	4,565	7,137	18,329
내진	-	1	3	27	166	2,220	2,417
비내진	85	741	2,529	3,241	4,399	4,917	15,912

진이 발생하였으며, 가까운 미래에 인명 및 재산 피해를 줄 수 있는 지진이 발생할 가능성이 있으며, 이러한 대규모의 지진에 대한 대책(내진보강)의 중요성이 점차 고조되고 있다.

지진에 의한 일반주택 건축물뿐만 아니라 내진설계가 미비한 학교 건물에도 지진피해가 막대하며, 최근 수년간 이탈리아, 알제리, 모로코, 터키, 파키스탄, 중국 등에서 지진에 따른 학교 건물 붕괴로 수많은 어린학생이 희생되어 큰 사회적 파장을 불러 일으켰으며, 특히 2005년 8월

발생한 파키스탄 지진 때는 수 많은 학교 건물이 붕괴하여 1만 7000여명 어린이가 사망하였다. 2008년 중국 쓰촨성 대지진에서도 어린 학생 수 백명의 목숨을 한꺼번에 앗아간 학교 붕괴 현장들은 가장 참혹한 피해가 발생하여 중국사회에 큰 충격을 주었다.

우리나라의 경우, Table 1에 나타낸바와 같이, 2010년 기준 전국 학교 수는 18,329개교로 1988년 내진설계법 적용이후 건립된 학교는 전체 학교 수의 약 13%이며, 약 87%의 학교는 내

진기준 제정 전에 설립되어 내진설계가 되어 있지 않다. 내진설계가 안 된 학교는 지진하중과 같은 횡하중에 대한 저항성이 전무하기 때문에 지진재난 시 대규모 인명피해가 우려되어 내진 대책이 시급하다고 판단된다.

2. 기존 학교 구조물의 구조 특성 및 문제점

2.1 일본 RC 학교 건물의 피해 특성

현재까지 지진 발생으로 많은 구조물이 붕괴로 인한 인명 피해 및 재산 피해가 발생하였다. 특히 2008년 중국의 쓰촨성 지진으로는 6898 곳의 학교가 붕괴되었으며, 1900명 이상의 학생이 매몰된 것으로 보도되고 있다 (유한국 등, 2009). 이상호와 정태권 (2006)에 연구에서는 1995년 일본의 고베 지진으로 피해를 입은 RC 학교건축물에 대한 피해 상황을 분석한 바 있다. 이 연구에 따르면 고베 지진으로 피해를 입은 학교 건축물 중 15개 동의 학교 건축물의 피해상황을 평가하고 있다. 그 결과 모든 학교 구조물들이 지진으로 인해 1층에서 파괴가 발생하였으며, 독립기둥의 전단 및 휨 파괴 또는 전단기둥의 전단 파괴로 발생하고 있다고 언급하고 있다. 여기에서 전단 기둥은 조적 등의 허리벽으로 인하여 유효 높이가 낮아져서 전단파괴 되는 기둥이라고 정의하고, 허리벽 등의 영향이 작은 기둥을 독립기둥이라 정의하고 있다. (이상호와 정태권, 2006)

이와 같이 기존연구결과로부터 국내의 학교 구조물의 내진 성능은 내진 설계 기준이 적용되지 않은 구조물인 경우 심각한 지진 피해가 발생할 수 있는 것을 알 수 있으며, 이러한 지진 피해는 독립기둥의 전단 또는 휨 파괴나 전단기둥의 전단파괴[Fig. 1 (a)]에 의해 발생할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 기존 학교 구조물의 내진 성

능 평가를 위해서는 내진 성능 평가 시 기둥의 전단 파괴 및 휨 파괴를 구현할 수 있어야 하며 조적 허리벽으로 인한 기둥의 단주 효과를 반영하여 성능 평가를 수행하여야 한다.

2.2 단주효과 및 극단주 전단 파괴

기존 학교 구조물과 같은 철근콘크리트 건축물에서는 내외부의 칸막이벽이나 허리벽에 조적조를 이용한 비내력벽을 사용하고 있다. 대부분의 경우에 비내력벽은 비구조체이며 구조물의 거동에 유리하게 작용할 것이라는 가정 하에 비내력벽의 영향을 무시하여 건물의 구조설계 수행하게 되며 그에 따른 구조물의 시스템 응답의 영향 및 변화 또한 무시하게 된다. 하지만 일본 학교 구조물의 지진 피해에서 보듯이 실제구조물의 거동에서 비내력벽의 강도 및 강성은 무시할 수 없으며 구조물이 지진하중을 받을 경우에 비내력벽은 골조와 상호작용을 하게 된다. 이러한 비내력벽과 골조의 상호작용이 구조물의 성능에 미치는 영향은 최근의 몇십년 간 많은 논의의 대상이 되었다. (Fiorato et al., 1970; Mehrabi et al., 1994, 1996; Dolsek and Fajfar, 2002)

비내력벽과 RC 골조의 상호작용을 살펴보면, 구조물에 작용하는 횡하중의 크기가 작은 상태에서는 비내력벽과 RC 구조물은 일체화와 되어 횡력 저항시스템으로 동일하게 거동하게 된다. 횡하중이 증가함에 따라 비내력벽의 손상으로 부분적 또는 전체적으로 RC 골조와 분리되고 압축 스트럿 메커니즘이 나타난다. 이와 같이 비내력벽이 손상되기 까지 기여하는 횡 강성과 강도는 RC 골조에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 기존 학교 구조물에서는 RC 골조 기둥 설계 시 조적조 비내력벽인 허리벽의 영향을 무시하고 기둥 상 하부에서 소성형지가 발생한다는 가정으로 모멘트와 전단력을 검토하지만 실제 횡거동

시 허리벽이 횡강성을 유지하고 있기 때문에 기둥의 순경간이 극히 작아져 골조-비내력벽의 상호작용에 의하여 의도치 않은 RC 기둥의 취성적인 전단파괴와 단주파괴 현상을 유발하게 된다. 그리고 이러한 영향은 내진설계가 되어 있지 않은 기존 학교 구조물과 같이 횡력 저항 시스템의 횡강성과 강도가 작은 구조물일수록 비내력벽과의 횡강성과 강도 차이가 작기 때문에 단주 파괴에 의한 전단 파괴가 발생할 가능성이 높아지게 된다.

RC 기둥의 전단파괴는 수평하중에 의해 생기는 경사균열이 원인이 되어 콘크리트의 손상을 받은 부분이 확대되어 점성이 없는 취약적 파괴를 일으켜 구조물의 결정적 붕괴를 초래하는 위험성을 내포하고 있기 때문에 구조물 성능 평가 시 전단 파괴에 대한 영향을 반영해야 한다.

3. 국내 연구소개

국내에서도 허리벽이 있는 국내 골조 실험들이 수행된 바 있다. 이영학 등 (2010)의 연구에서는 국내 비내진 철근콘크리트 조적조로 되어 있는 학교 구조물을 대상으로 철근콘크리트 프레임을 제작하고 반복하중 실험을 수행한 바 있다. 시험체는 Fig 2와 같이 학교설계 표준도서에

준하여 실제 학교 내부의 1경간을 선정하여 1/2 축소한 비모강 철근콘크리트 프레임을 조적조의 유무, 내진 보강 유무에 따라 총 4개를 제작하였다.

이 시험체 중 조적조가 없이 철근콘크리트 골조만 있는 RNN 실험체와 조적조가 있는 철근콘크리트 골조인 RMN 실험체의 실험 결과를 살펴보면 Fig. 3과 같이 RNN 시험체인 경우 층간 변위비가 2.0%에서 최대하중에 도달하여 우측 기둥에서 사인장 균열이 진행됨에 따라 기둥의 콘크리트가 박리, 파괴되었으며 순간적으로 내력이 저하되어 하중의 17%가 감소하였다. RMN 시험체인 경우 좌측 상부 기둥에서 사인장 균열에 의한 콘크리트의 박리가 발생하였지만 조적벽의 파괴 현상이 발생하지 않았다. 이는 조적벽이 최대하중에 도달하기 전에 콘크리트 기둥의 파괴가 먼저 일어났기 때문으로 평가하고 있다. (이영학, 2010) 이와 같은 실험 결과에서 알 수 있듯이 내진 설계가 되지 않은 국내 기존 학교 구조물인 경우 지진 하중과 같은 횡하중이 작용할 경우 기둥에서 전단 파괴로 인한 취약한 연성능력을 보일 뿐만 아니라 조적조 내력벽에 의하여 예기치 않은 단주 효과로 인한 갑작스런 취성파단을 야기 할 수 있음을 알 수 있다. 본 기사에서는 이러한 해석 결과를 바탕으로 Fig. 4에서와 같이 실험 결과를 반영할 수 해석 모델링을 개발

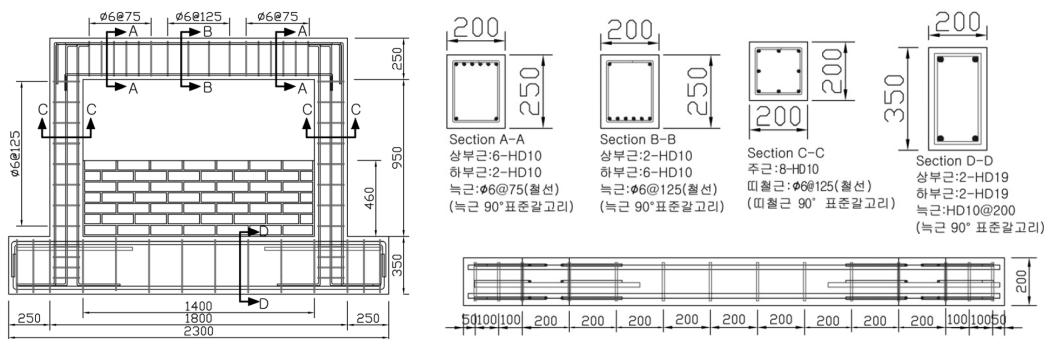


Fig. 2 시험체 단면도 및 배근도 (이영학 등, 2010)

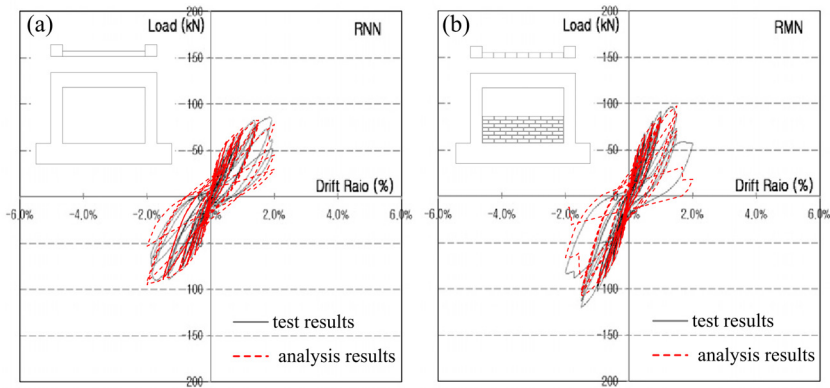


Fig. 3 시험체 실험 결과 및 해석 결과 비교: (a) RNN 시험체 (b) RMN 시험체

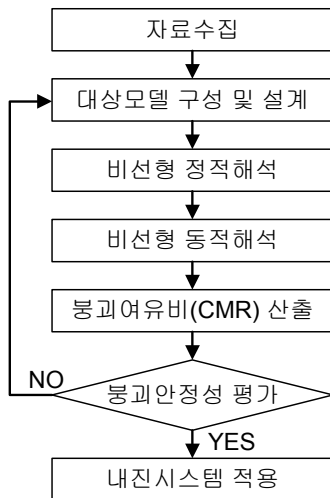


Fig. 4 ATC-63 성능평가 절차

하고 기존 학교 구조물에 지진하중이 작용할 경우 내진 성능이 얼마나 취약한지 살펴보았다.

4. 국내 학교 건물 ATC 63에 따른 내진성능 평가

4.1 ATC 63에 따른 성능평가방법 소개

ATC-63(2009) 프로젝트는 비선형 시간 이력 해석을 이용하여 붕괴 안정성을 평가하는 방

법을 고안하였다. 이 방법은 적절한 내진성능을 통하여 최대고려지진하중이 작용할 때 내진시스템이 허용할 수 있는 낮은 붕괴확률을 갖도록 함으로서 건물 붕괴방지를 통한 인명보호를 최우선의 목표로 하고 있다. ATC-63 내진성능방법은 예상되는 지진하중에 대한 대상 건물의 붕괴여유비(collapse margin ratio, CMR)가 요구수준에 도달하는지 여부를 통하여 건물의 내진성능을 평가하게 되는데 이를 위해 대상 시스템의 비선형 동적해석과 해석의 신뢰성을 바탕으로 평가가 요구된다.

ATC-63 내진성능평가의 주요 절차는 (1) 구조물 이력거동을 결정하는 주요 구조 특성, 시공 방법, 설계 요구 사항 및 제한 사항, 구조 실험 및 재료 실험 결과 등과 같이 평가하고자 하는 대상 구조 시스템의 주요 자료 수집이 수행되어야 한다. (2) 이러한 자료 분석을 토대로 구조 시스템을 결정하는 주요 설계 변수 및 형상을 결정하게 된다. 구조물 시스템의 특성을 반영할 수 있는 archetype을 결정하고 각 archetype에 따라 성능그룹을 구분하여 내진 성능 해석을 수행하게 된다. (3) 설계 되어진 archetype 성능그룹의 대상 건물 내진 성능을 평가하기 위해서는 구조물의 붕괴성능을 반영하는 비선형 해석 모

델을 개발하여야 한다. 비선형 해석 모델은 실험 결과와 비교하여 그 정확도를 검증하게 되며, 이 정확도 정도에 따라 해석 모델의 불확실성 정도를 부여하게 된다. (4) 개발한 비선형 해석 모델을 사용하여 비선형 정적해석 및 동적해석을 수행하게 된다. 비선형 정적 해석으로부터 초과강도계수(Ω)와 주기 기반의 연성비(μ_T)를 평가한다, 비선형 동적 해석은 지진 하중의 크기를 구조물이 탄성거동에서 붕괴에 이르기 까지 크기를 증가시켜 가며 수행함으로써 (Incremental Dynamic Analysis, IDA) 구조물의 붕괴에 이르는 지진 하중의 가속도 크기인 붕괴 성능, \hat{S}_{CT} 을 구하게 된다. (5) 구조물의 붕괴성능, \hat{S}_{CT} 은 최대고려지진 하중, S_{MT} 의 값으로 나누어 붕괴여유비(Collapse Margin Ratio, CMR) 값을 구한다. (6) 붕괴여유비 (CMR) 값은 스펙트럼의 형상에 따른 영향 계수 (Spectra Shape Factor)를 고려하여 수정된 붕괴여유비 (Adjusted Collapse Margin Ratio, ACMR) (=CMR \times SSF)를 구하고, 해석 및 지진 하중의 불확실성을 반영한 허용 붕괴여유비(ACMR10%, ACMR20%)를 계산한다. 허용 붕괴여유비는 최대고려지진 하중에서 구조물이 붕괴될 확률이 10%에 이를 때

(ACMR10%)와 20%에 이를 때(ACMR20%)의 붕괴여유비로써 구조물의 수정된 붕괴여유비(ACMR)가 이 값보다 높은 값으로 만족하도록 제안하고 있다. 이 때 개별 구조물인 경우 붕괴 확률이 20%보다 작도록 (ACMR>ACMR20%), 성능 그룹의 평균에 대해서는 붕괴 확률이 10%보다 작도록 (average of ACMR>ACMR10%) 구별하여 적용하고 있다.

이를 간략하게 나타내면 Fig. 4와 같다.

4.2 학교건물 내진성능평가 결과 소개

기존학교 구조물의 내진 성능 취약성을 평가하기 위하여 Fig. 5와 같은 80년도 학교 교사 표준 설계도에 따라 지어진 기존 학교 구조물을 대상으로 내진 성능 평가를 수행하였다. 대상 기존 학교 구조물의 평면 및 입면은 Fig. 5와 같이 동서 방향으로 7경간 남북 방향으로 3 경간의 평면을 갖고 있는 3층 구조물이다. 대상 기존 학교 구조물의 내진 성능 평가는 Fig. 5 (a)에서 동서 방향 횡력저항 골조인 Y0, Y1, Y2 열 골조를 대상으로 평가를 수행하였다. 지진구역 2에 지반 조건은 S_D와 S_E로 가정하여 평가하였다.

Table 2는 대상 기존 학교 구조물의 내진성능

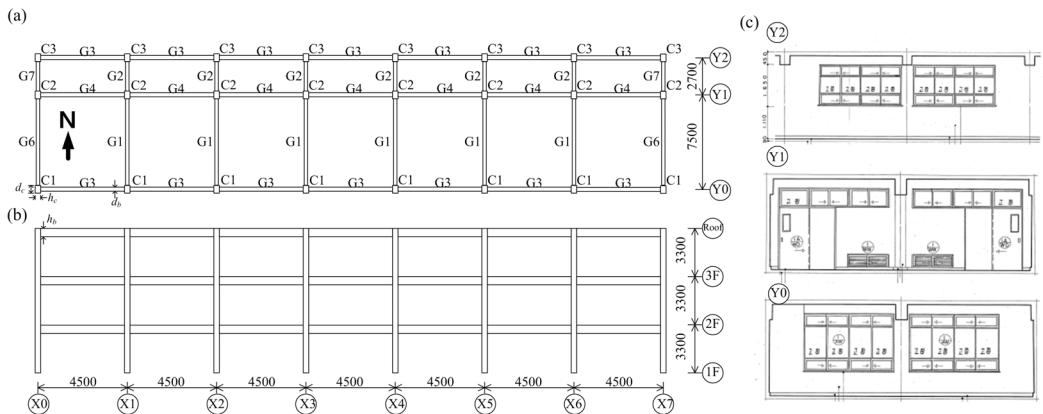


Fig. 5 대상 기존 학교 구조물의 (a) 평면도 및 (b) 입면도, (c) Y열 전개도

Table 2 대상 기존 학교 구조물의 내진성능 평가 결과

지진구역	지반종류	Ω	μ_T	S_{MT}	S_{CT}	CMR	ACMR	β_{TOT}	ACMR20%	Pass/Fail	$P(C)$
2	S_D	1.68	2.11	0.344	0.136	0.394	0.421	0.681	1.774	Fail	0.898
	S_E	1.13	2.32	0.553	0.143	0.259	0.301	0.691	1.789	Fail	0.959

평가 결과로써 모든 지역에서 ATC 63에서 제시하고 있는 내진 성능을 만족하지 못하는 것을 알 수 있다. 또한 최대고려지진에서 구조물의 붕괴확률 [$P(C)$ or $P(Collaspe|S_{MT})$]이 지반 조건 S_D 와 S_E 에서 각각 89.8%과 95.9% 값으로 ATC 63에서 제시하고 있는 내진성능 목표 값이 20% 값에 크게 못 미치고 있어 내진성능이 매우 취약한 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 기사에서는 국내 기존 학교 구조물에 지진에 대한 위험도 평가 결과를 소개하였다. 내진성능 평가 방법으로는 ATC 63 (2009)의 내진성능 평가 방법을 사용하였다. 또한 해외의 학교 건물의 지진피해 사례를 조사하였다. 대상 기존 학교 구조물의 내진 성능 평가 결과 조적조 비내력벽에 의한 단주효과로 인하여 기둥에서 전단 파괴가 구조물의 강도 및 회전성능과 같은 내진 성능을 크게 저하시켰다. 대상 학교 건물들이 최대고려지진 하중에서 구조물의 붕괴확률이 지반 조건 S_D 와 S_E 에서 각각 89.8%과 95.9% 값으로 높게 평가되어 지진이 발생 시 큰 피해가 발생할 수 있음을 예상할 수 있다.

감사의 글

본 기사는 중소기업청의 지원으로 수행한 2011년도 산학연공동기술개발사업(No. 00045373-1)의 연구 내용중 일부를 소개한 것입니다.

참고문헌

- 소방방재청, 시설물별 내진실태 현황, 2010.
- 유한국, 박태원, 이상현, 정란, 조승호, "상세해제지도를 고려한 경기지역 학교건축물의 내진성능평가", 안국안전학회지, 제24권 4호, 2009, pp.66-73.
- 이상호, 정태권, "고베지진으로 피해를 입은 RC 학교 건축물을 이용한 효율적인 내진성능 평가방법의 제안", 대한건축학회 논문집, 제22권 4호, 2006, pp.83-93.
- 이영학, 김민숙, 변은혁, 김희철, "CFRP Sheet를 이용한 철근콘크리트 프레임면내 조적벽체의 전단 내력 평가에 관한 실험적 연구", 한국지진공학회 논문집, 제14권 1호, 2010, pp.63-70.
- ATC, "Quantification of building seismic performance factors", ATC 63, Applied Technology Council, Redwood City, CA, 2009.
- Dolsek, M. and Fajfar, P., "Mathematical modelling of an infilled RC frame structure based on the results of pseudo-dynamic tests", Earthquake Engineering and Structure Dynamic, No. 31, 2002, pp.1215-1230.

담당 편집위원: 이강석
(전남대학교 건축학부 부교수)
kslnist@jnu.ac.kr