기존 학교 건축물의 내진성능평가 및 보강방안 제안

Proposed Seismic Performance Evaluation Enhancement for Existing School Building

황 지 훈*

Jang, Jeong-Hyun

장 정 현**

Hwang, Ji-Hoon

양 경 석***

Yang, Kyeong-Seok

최 재 혁****

Choi, Jae-Hyuk

Abstract

Recently large scale earthquake s are occurred around the world following the damage of buildings. So the interest of preparing for earthquake seismic design and seismic performance has becoming high. School buildings are though used for educational purpose; they are also used as emergency shelter for local residents during earthquake disaster. However, the current seismic design ratio of our country (Korea) is 3.7% and if massive earthquake is occurred it follows a serious damage. In order to overcome this situation, seismic performance evaluation is carried out for existing school building and an accurate and appropriate seismic retrofit is required based on performance evaluation to upgrade the existing school buildings.

In this paper, nonlinear static analysis on existing school buildings for ATC-40 and FEMA-356 are carried out using the capacity spectrum method to evaluate seismic performance and to determine the need for retrofitting. In addition, after reinforcement to verify the effect of retrofit enhance the seismic performance is applied the seismic performance evaluation is carried out to verify the effect of seismic retrofit time history analysis using nonlinear dynamic analysis is also performed and nonlinear behavior of earthquake load of seismic retrofit of structures was also investigated.

키워드 : 기존 학교 건축물, 내진성능평가법, 내진보강, 성능스펙트럼법, 시간이력해석법

Keywords : Existing School Building, Evaluating Seismic Capacity, Seismic Retrofit, Capacity Spectrum Method, Time History Analysis

1. 서론

최근 수년간 일본(1995), 이탈리아(2002), 알제리(2003), 모로코(2004), 터키(2004), 파키스탄(2005), 중국(2008) 등에서 대규모 지진발생에 따른 막대한 재산적·인명적 피해가 발생하여 큰 사회적 파장을 불러 일으켰다. 특히 1995년 일본 고베지진에서는 약 30%의 학교가 지진피해를 받았으며, 2005년 파키스탄 지진 때는 수많은 학교 건물이

붕괴하여 1만 7000여명 어린이가 사망하였다. 또한, 2008년 중국 쓰촨성 대지진에서도 초등학교 수백 명의 목숨을 앗아간 학교 붕괴 지진피해 사례는 국제사회에 큰 충격을 가져다주었다.

학교 시설물은 학생들이 하루 생활의 대부분을 보내는 교육생활의 터전임과 동시에 재난 시 지역주민들의 응급 피난장소로서의 역할을 담당하는 국가중요시설이다.(자연재해대책법-2004년 방재집행관리) 우리나라뿐만 아니라 각 국에서도 비슷한 입장을 견지하고 있음에도 불구하고, 현재 우리나라 학교관련 시설물 65,049동 중 건축법 시행령 제32조 규정에 의거 내진보강이 필요한 3층 이상, 1,000㎡ 이상인 건축물은 18,329동 중 내진 설계된 건물은 13.2%인 2,417동 뿐이며 이것은 전체 건축물의 3.7%에 불과한 수치이다.

우리나라 내진설계는 1962년 건축법 제10조에 “건축물

* 정회원, 조선대 건축공학과 석사과정

** 정회원, 조선대 건축공학과 박사과정

*** 정회원, 조선대 건축공학과 석사과정

**** 정회원, 조선대 건축학부 조교수, 교신저자

(jh_choi@chosun.ac.kr)

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2011-0003923, No.2011-0005818).

은 지진 등에 안전한 구조를 가져야 한다”고만 규정하다가 1988년에 「건축물의 구조기준 등에 관한 규칙」(건설부령 제432호 개정, 1988.1.6.)에서 처음으로 지진하중 및 지진구역을 명시하고 내진설계 대상구조물을 지정하였다. 현재 내진대상 건물로 논의되고 있는 학교 시설물의 대다수는 5층 이하의 규모로서 재난 발생 시 대피장소로 활용되고 있는 중요한 시설물임에도 불구하고 2005년까지 내진설계 대상 구조물에 포함되지 않아 내진설계가 이루어지지 않은 건축물이 대부분이다.

안전관리계획 측면에서, 인명피해를 줄이기 위한 재난대피시설인 학교건축물은 우선적으로 내진성능을 평가하고, 부족한 내진성능에 대해서 보강할 필요가 있다.

현재 국내에서는 기존 건축물에 대한 내진성능평가법 및 내진보강법에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

김상대는 ATC 40의 성능스펙트럼법을 소개하고, 이를 이용하여 국내 중·저층 RC건물의 내진성능평가를 실시하였다. 오상훈은 기존 철골건축물의 국내와 국외의 내진성능 평가기법에 대해 소개하고, 내진진단 기법에 대한 지식을 바탕으로 국내 적용 가능한 보강방법을 소개하였다. 이강석은 철근콘크리트 건물의 내진성능 평가방법을 소개하고, 국내 현존 RC건물 14동을 대상으로 일본의 내진진단 기준을 적용하여 그 내진성능을 평가하였다. 또한, 저층 RC건물의 내진성능을 단시간 내에 보다 효율적이며 실용적으로 평가 할 수 있는 간이 내진성능평가법을 제안하였다. 이원호는 기존 철근콘크리트의 국내와 국외의 내진성능 평가기법의 현황에 대해 소개하고, 내진보강법의 선정 시 참고자료로서 활용할 수 있는 기존 RC건축물의 내진보강방법의 종류를 소개하였다. 이상호는 국내·외의 내진성능평가방법을 소개하고, 각각의 특징과 문제점을 비교하였으며, 일본의 고베지진으로 피해를 입은 RC건축물의 자료를 바탕으로 새로운 내진성능 평가방법을 제안하였다. 또한, 앞에 소개한 내진 평가방법을 이용하여 국내의 내진대책 마련의 한 방안으로서, 부산에 소재한 재난대피시설로 지정된 RC조 학교건축물을 대상으로 내진성능보유정도를 파악하고 국내에 상정되는 지진으로 인한 건축물의 피해율을 예측하였다. 또한, 철근콘크리트 골조, 특히 학교건축물 등에서 허리벽을 가지는 프레임 구조에 적용하여 내진성능을 향상시킬 수 있는 제진공법의 일종으로 창호형 강재댐퍼시스템을 제안하여 구조적 성능을 파악하였으며, 정적 및 동적실험을 수행하여 보강 유무에 따른 RC골조의 내진성능을 파악하였다. 최호는 무보강 조적채움벽을 갖는 철근콘크리트 건물의 내진성능 및 잔존내

진성능 평가방법 개발을 주목적으로, 무보강 콘크리트블록(이하, 블록)을 칸막이벽체 및 외벽으로 많이 사용하고 있는 우리나라 학교건물을 대상으로 한 실험적, 해석적 연구를 수행하였다. 윤태호는 기존 학교건물 중 내진설계가 되지 않은 건물을 표본으로 정하여 국내 기준에 제시된 내진성능 평가방법과 내진성능평가가 발달한 일본의 내진성능평가방법을 적용하여 기존의 학교 건물에 대해서 지진 발생시 내진성능평가를 국내·외 기준별로 검토하고 비교함으로써 보강방향을 제시하였다. 송진규는 준공 후 30년 이상 경과되고 내진설계가 반영되지 않은 학교 건축물에 대하여 노후도를 고려하여 내진성능을 평가하고, 건축물의 내진설계기준에 적합하도록 보강하는 방안을 제시하였다. 박천석은 기존 대학교 건물들 중에서 내진 설계가 적용되지 않은 저층 건물을 대상으로 재해 시 피난구조물로서의 기능을 확보하기 위해 기존에 제시된 내진보강기법들을 대상으로 연구 대상 건물에 적용하여 그에 따른 구조해석 결과를 이용해 각각 내진보강 기법들에 대한 보강 효과에 대해 비교·분석하였다.

본 논문에서는 기존 연구를 바탕으로 기존 학교 건축물에 비선형정적해석을 실시하여 내진성능평가 후, 비선형 시간이력해석을 통해 지진하중에 의한 구조물의 비선형 거동을 규명하고 제진 장치를 이용한 내진 보강 효과를 검증하고자 한다.

2. 성능스펙트럼법(Capacity Spectrum Method)을 이용한 내진성능평가

2.1 성능스펙트럼법 및 성능목표

비선형 정적해석은 일방향 가력해석(Pushover Analysis)라고도 하며, 다양한 구조요소가 단계적으로 하중이 증가함에 따라서 연속적으로 항복하는 구조물의 비선형 응답해석에 효과적으로 사용할 수 있는 방법이다. 가장 많이 사용되는 형태는 일정한 분포를 가지고 증가하는 정적하중을 사용한 정적 일방향 가력해석이며 이는 변위 증가에 따른 구조물의 거동을 표현한다. 구조물이 보유한 성능산정에 있어 선형(탄성)해석은 구조물의 탄성능력과 처음으로 발생되는 항복을 예측할 수 있으나, 항복이 진행되는 동안의 붕괴기구에 예측이나 하중의 재분배 등을 고려할 수 없다. 따라서 비선형 해석의 결과를 이용한 보유능력을 평가할 필요가 있다. 성능 목표는 지반운동수준에 대하여 건물의 성능수준을 정의하는 것이며 설계 시 보통 한 가지 이상의 성능목표의 조합을 사용한다. 성능 목표는 지진위험도, 피해발생시 보수

Table 1. Performance-based seismic design objectives (FEMA 356)

분류		성능단계			
		완전기능 (Elastic)	즉시거주 (IO)	인명안전 (LS)	붕괴방지 (CP)
지진 재현 주기	50%/50year	a	b	c	d
	20%/50year	e	f	g	h
	10%/50year	i	j	k	l
	2%/50year	m	n	o	p

비용과 기능마비로 인한 손실비용 등을 고려하여 경제성을 만족하도록 설정한다. 성능수준은 발생 가능한 일련의 지진 피해 스펙트럼에서 일정한 폭을 가지는 각각의 피해상태를 말한다. 성능수준은 구조 부재의 손상과 비구조 부재의 손상 정도로 나누어지며, 성능수준은 Table 1과 같이 완전기능, 즉시거주, 인명안전, 붕괴방지 네 가지이며 건축물의 성능수준과 지반운동 수준을 고려함으로써 성능목표를 평가한다.

FEMA 356[3]에서는 기존 건축물의 내진성능을 개선할 때, 재현주기에 따른 지반 가속도의 크기에 따라 건축물이 각각 다른 성능목표를 가질 수 있도록 규정하고 있으며, 내진 안전성 검토도 주어진 성능목표에 따라 수행된다. 예를 들어, 기본안전 목표(Basic Safety Objective, BSO)는, 50년에 10% 초과 발생확률의 지진에 대하여는 인명안전수준(Life Safety Level, LS)이 되도록 하고(k점), 50년에 2% 초과 발생확률의 지진에 대하여는 붕괴방지노준(Collapse PreVention Level, CP)가 되도록 규정하고 있다(p점).

KBC 2009[5]에 따른 지진하중 즉, 2400년 재현주기 지진의 2/3수준의 지진 작용 시 KBC 2009에 정의된 내진 특등급 건물, 내진 1등급 건물, 내진 2등급 건물은 각각 거주가능, 인명안전, 붕괴방지의 성능을 발휘할 수 있어야 한다. 각 내진등급의 건축물에 요구되는 성능수준은 Table 2와 같다. 또한 Table 3은 우리나라 내진설계 기준의 변천을 나타내었다.

대상건축물의 내진성능평가는 성능스펙트럼법(CSM)을 이용하여 장변과 단변에 대하여 수행되었으며 단변의 경

Table 2. Performance Level (KBC2009)

2400년 지진의 2/3수준 지진작용 시 성능목표	KBC 2009의 내진등급	허용 층간변위(Δ_x)
거주가능	내진 특등급	0.010 h_{sx}
인명안전	내진 1등급	0.015 h_{sx}
붕괴방지	내진 2등급	0.020 h_{sx}

h_{sx} : x층 층고

우 조적 채움벽을 고려하였다. 비선형 정적해석에서 비선형 구조물 구축을 위해서 필요한 각 주요 구조부재의 비선형 이력모델 특성은 FEMA 356에서 정의하고 있는 이력형상을 근거로 하여 모델링 하였으며, 조적벽체의 특성값은 FEMA 356을 준용하였다.

2.2 대상 건축물 개요

대상건축물은 1975년에 신축된 국내에 현존하는 연면적 3,961 m^2 의 RC조 3층 건물이다. Figure 1에 대상구조물 1층 평면도를 나타내었다. 콘크리트 설계기준강도(fck)는 18MPa이며, 철근 항복강도(f_y)는 240MPa (SD240)이다. 구조형식은 철근콘크리트 라멘구조이며, 지반은 단단한 토사지반(SD), 지진구역 2에 해당되는 지역 계수(S)는 0.14이다.

2.3 대상 구조물의 내진성능평가

Figure 2는 예상될 수 있는 지진하중에 대한 구조물의 요구수준을 나타내는 요구스펙트럼과 해당 건축물의 보유하고 있는 성능을 나타내는 성능곡선을 변환시킨 성능스펙트럼을 이용하여 성능점을 산정하였으며, Table 4에 정리하였다.

Figure 3은 해당 건물의 성능점에서의 소성힌지분포를 나타내었다. Table 5와 같이 대상 건축물에서 장변 방향 2400년 재현주기 2/3 수준 성능점에서의 요구성능 불만족 부재는 2층 보/기둥에서 148개소, 2층 보/기둥에서 4개소가 존재, 단변 방향에서 1층 조적벽 17개소가 파괴되었으나 주구조체에서 요구성능 불만족 부재는 존재하지 않았

Figure 1. 1st Floor Plan

Table 3. Transition of Korea's seismic design criteria

년도	법령	주요 제정 내용																																	
1962	건축법 제10조	• “건축물은 ~지진 등에 안전한 구조를 가져야 한다”고 규정되어 있음.																																	
1988.1	건축법 제10조, 건축법시행령 제 16조 「구조기준 등에 관한 규칙」 제 14조	<div>① 지진구역 (1,2)에 따라 지역계수 적용.</div> <table><tr><th>구분</th><th>해당 지역</th><th>지역계수 (A)</th></tr><tr><td>지진구역 1</td><td>광주직할시, 강원도(화천군 제외), 전라북도 고창군, 전라남도 (곡성군, 구례군, 광양군을 제외), 경상북도 울진군, 제주도</td><td>0.08</td></tr><tr><td>지진구역 2</td><td>지진구역 1을 제외한 지역</td><td>0.12</td></tr></table> <div>② 중요도 (1,2,3)에 따라 중요도계수 구분 적용.</div> <table><tr><th>중요도</th><th>1</th><th>2</th><th>3</th></tr><tr><td>건축물의 용도 및 규모</td><td>바닥면적의 합계가 1,000㎡ 이상인 종합병원 · 병원 · 통신 관망집회시설 중 방송국 및 전신전화국, 발전소, 공공업무시설</td><td>바닥면적의 합계가 5,000㎡ 이상인 관람집회시설, 바닥면적의 합계가 10,000㎡ 이상인 판매시설, 6층 이상의 아파트, 6층 이상의 숙박시설</td><td>중요도 1 및 2에 해당하는 건축물을 제외한 건축물</td></tr><tr><td>도시계획구역</td><td>1.5</td><td>1.2</td><td>1.0</td></tr><tr><td>이외의 구역</td><td>1.2</td><td>1.0</td><td>0.8</td></tr></table> <div>③ 지반종별 (1,2,3)에 따라 지반계수 적용</div> <table><tr><th>지반종별</th><th>지반 1</th><th>지반 2</th><th>지반 3</th></tr><tr><td>지진계수 (S)</td><td>1.0</td><td>1.2</td><td>1.5</td></tr></table>	구분	해당 지역	지역계수 (A)	지진구역 1	광주직할시, 강원도(화천군 제외), 전라북도 고창군, 전라남도 (곡성군, 구례군, 광양군을 제외), 경상북도 울진군, 제주도	0.08	지진구역 2	지진구역 1을 제외한 지역	0.12	중요도	1	2	3	건축물의 용도 및 규모	바닥면적의 합계가 1,000㎡ 이상인 종합병원 · 병원 · 통신 관망집회시설 중 방송국 및 전신전화국, 발전소, 공공업무시설	바닥면적의 합계가 5,000㎡ 이상인 관람집회시설, 바닥면적의 합계가 10,000㎡ 이상인 판매시설, 6층 이상의 아파트, 6층 이상의 숙박시설	중요도 1 및 2에 해당하는 건축물을 제외한 건축물	도시계획구역	1.5	1.2	1.0	이외의 구역	1.2	1.0	0.8	지반종별	지반 1	지반 2	지반 3	지진계수 (S)	1.0	1.2	1.5
구분	해당 지역	지역계수 (A)																																	
지진구역 1	광주직할시, 강원도(화천군 제외), 전라북도 고창군, 전라남도 (곡성군, 구례군, 광양군을 제외), 경상북도 울진군, 제주도	0.08																																	
지진구역 2	지진구역 1을 제외한 지역	0.12																																	
중요도	1	2	3																																
건축물의 용도 및 규모	바닥면적의 합계가 1,000㎡ 이상인 종합병원 · 병원 · 통신 관망집회시설 중 방송국 및 전신전화국, 발전소, 공공업무시설	바닥면적의 합계가 5,000㎡ 이상인 관람집회시설, 바닥면적의 합계가 10,000㎡ 이상인 판매시설, 6층 이상의 아파트, 6층 이상의 숙박시설	중요도 1 및 2에 해당하는 건축물을 제외한 건축물																																
도시계획구역	1.5	1.2	1.0																																
이외의 구역	1.2	1.0	0.8																																
지반종별	지반 1	지반 2	지반 3																																
지진계수 (S)	1.0	1.2	1.5																																
1992.2	건축법 제38조, 건축법시행령 제32조, 「구조기준 등에 관한 규칙」 제7조, 제14조	• 6층 이상이거나 연면적 10,000㎡ 이상 건축물 등은 지진에 대한 안전여부 확인 명시.																																	
1995.12	건축법 제38조, 건축법시행령 제32조, 「구조기준 등에 관한 규칙」 제7조, 제14조	• 중요도 (1, 2)에 따라 안전여부 확인대상 분류 ㄱ) 중요도 1 : 위험물저장 및 처리시설, 노유자시설 ㄴ) 중요도 2 : 운수시설, 전시시설 및 판매시설, 오피스텔, 기숙사 5층 이상인 아파트																																	
2000.5 (건설교통부령 제 235호 개정)	건축법 제38조, 건축법시행령 제32조, 「건축물의 구조기준 등에 관한 규칙」 제6조	<div>• 건축물 하중기준, 2000.6</div> <div>① 지진구역 (1,2)에 따라 지역계수 적용</div> <table><tr><th>지진구역</th><th>해당 지역</th><th>지역계수(A)</th></tr><tr><td rowspan="2">I</td><td>시 서울특별시, 인천광역시, 대전광역시, 부산광역시, 대구광역시, 울산광역시, 광주광역시</td><td rowspan="2">0.11</td></tr><tr><td>II 경기도, 강원도남부, 충청북도, 충청남도, 경상북도, 경상남도, 전라북도, 전라남도북동부</td></tr><tr><td>도</td><td>강원도북부, 전라남도남서부, 제주도</td><td>0.07</td></tr></table> <div>② 중요도 (특,1,2)에 따라 중요도계수 구분 적용 - 건축물의 용도 및 규모 추가 및 변경사항 (특등급:15층 이상 아파트 추가, 1등급:5층 이상인 숙박시설, 오피스텔, 기숙사 및 아파트)</div> <div>③ 지반종류 : 1~4(4종류)에 따라 지반계수 적용 - 지반종류(지반계수) : 지반 1(1.0), 지반 2(1.2), 지반 3(1.5), 지반 4(2.0)</div>	지진구역	해당 지역	지역계수(A)	I	시 서울특별시, 인천광역시, 대전광역시, 부산광역시, 대구광역시, 울산광역시, 광주광역시	0.11	II 경기도, 강원도남부, 충청북도, 충청남도, 경상북도, 경상남도, 전라북도, 전라남도북동부	도	강원도북부, 전라남도남서부, 제주도	0.07																							
지진구역	해당 지역	지역계수(A)																																	
I	시 서울특별시, 인천광역시, 대전광역시, 부산광역시, 대구광역시, 울산광역시, 광주광역시	0.11																																	
	II 경기도, 강원도남부, 충청북도, 충청남도, 경상북도, 경상남도, 전라북도, 전라남도북동부																																		
도	강원도북부, 전라남도남서부, 제주도	0.07																																	
2005.4 (건설교통부령 제433호)	건축법 제38조, 건축법시행령 제32조, 「건축물의 구조기준 등에 관한 규칙」 제6조	<div>• KBC2005</div> <div>① 3층 이상이거나 연면적 1,000㎡ 이상 건축물 등은 지진에 대한 안전여부 확인</div> <div>③ 내진등급 (특, I, II)에 따라 중요도계수 구분 적용 - 건축물의 용도 및 규모 추가 및 변경사항 (특등급: 연면적 1,000㎡ 이상 국가 또는 지방자치단체의 청사, 외국공관, 아동관련시설, 노인복지시설 및 근로복지시설, 15층 이상 오피스텔 추가, 1등급: 3층 이상의 학교)</div> <div>④ 지반종류 : S_A~S_E (5종류)로 분류</div>																																	
2009.12 (국토해양부고시 제2009-1245호)	건축법 제38조, 건축법시행령 제32조	<div>• KBC2009</div> <div>① 지진구역 (1,2)에 따라 지역계수 변경 (1등급 : 0.11 -> 0.22, 2등급 : 0.07 -> 0.14)</div> <div>② 내진등급 (특, I, II)에 따라 중요도계수 구분 적용</div> <table><tr><th>중요도</th><th>내진등급</th><th>용도 및 규모</th><th>중요도 계수(IE)</th></tr><tr><td>(특)</td><td>특</td><td>• 수술시설이나 응급시설이 있는 병원 • 15층 이상 아파트 및 오피스텔 제외</td><td>1.5</td></tr><tr><td>(1)</td><td>I</td><td>• 연면적이 1,000㎡ 미만인 위험물 저장 및 처리시설 • 연면적이 1,000㎡ 미만인 국가 또는 지방자치단체의 청사, 외국공관, 소방서, 발전소, 방송국, 전신전화국 • 운수시설(화물터미널과 집배송시설은 제외함) • 학교 • 수술시설이나 응급시설이 없는 병원, 기타 연면적 1,000㎡ 이상인 의료시설로소 중요도 (특)에 해당하지 않는 건축물</td><td>1.2</td></tr><tr><td>(2)</td><td rowspan="2">II</td><td>• 중요도 (특), (1), (3)에 해당하지 않는 건축물</td><td rowspan="2">1.0</td></tr><tr><td>(3)</td><td>• 농업시설물, 소규모 창고 • 가설구조물</td></tr></table>	중요도	내진등급	용도 및 규모	중요도 계수(IE)	(특)	특	• 수술시설이나 응급시설이 있는 병원 • 15층 이상 아파트 및 오피스텔 제외	1.5	(1)	I	• 연면적이 1,000㎡ 미만인 위험물 저장 및 처리시설 • 연면적이 1,000㎡ 미만인 국가 또는 지방자치단체의 청사, 외국공관, 소방서, 발전소, 방송국, 전신전화국 • 운수시설(화물터미널과 집배송시설은 제외함) • 학교 • 수술시설이나 응급시설이 없는 병원, 기타 연면적 1,000㎡ 이상인 의료시설로소 중요도 (특)에 해당하지 않는 건축물	1.2	(2)	II	• 중요도 (특), (1), (3)에 해당하지 않는 건축물	1.0	(3)	• 농업시설물, 소규모 창고 • 가설구조물															
중요도	내진등급	용도 및 규모	중요도 계수(IE)																																
(특)	특	• 수술시설이나 응급시설이 있는 병원 • 15층 이상 아파트 및 오피스텔 제외	1.5																																
(1)	I	• 연면적이 1,000㎡ 미만인 위험물 저장 및 처리시설 • 연면적이 1,000㎡ 미만인 국가 또는 지방자치단체의 청사, 외국공관, 소방서, 발전소, 방송국, 전신전화국 • 운수시설(화물터미널과 집배송시설은 제외함) • 학교 • 수술시설이나 응급시설이 없는 병원, 기타 연면적 1,000㎡ 이상인 의료시설로소 중요도 (특)에 해당하지 않는 건축물	1.2																																
(2)	II	• 중요도 (특), (1), (3)에 해당하지 않는 건축물	1.0																																
(3)		• 농업시설물, 소규모 창고 • 가설구조물

Figure 2. Demand-Capacity Spectrum

Figure 3. Plastic hinge distribution in the performance point

Table 4. Performance Point

건물	지진재현주기	해석방향	성능점		보유성능
			Sd	Sa	
대상건축물	2400년 재현주기 2/3	장변	34.44	0.1096	CP(붕괴방지) 이하
		단변	15.13	0.1853	IO(즉시거주)

다. 내진성능평가 결과 대상 건축물 장변 방향에 시스템의 감쇠 향상을 위한 제진시스템 설치 등의 내진보강이 필요하며, 단변 방향에서는 요구성능 기준을 만족하여 별도의 내진보강이 필요하지 않았다.

3. 마찰댐퍼를 이용한 대상구조물 내진보강

3.1 마찰댐퍼를 이용한 보강방안 제안

대상 구조물에 비선형정적해석을 이용한 내진성능평가를 실시하여 소성힌지 분포를 확인한 결과 장변방향에 대

한 내진성능이 부족한 것으로 판단되었다. 이를 보강하기 위해 Figure 4와 같이 대상 건축물에 대한 제진시스템 설치를 1층에 8개, 2층에 4개 프레임을 설치하였으며 각각의 프레임에는 100kN의 내력을 갖는 3개의 마찰댐퍼가 설치되어 총 36개의 마찰댐퍼를 설치하는 내진보강을 실시하였다. 마찰댐퍼는 일반강재 댐퍼에서 나타나는 반복거동에 따른 내력 상승 현상이 없어 마찰거동 이후 설정된 내력 값으로 일정하게 나타남으로서 설계 신뢰도가 높은 장점이 있다. Figure 5는 대상구조물인 OO고등학교에 제진시스템 실제 적용사진을 나타내었고, Figure 6는 시공순서를

Table 5. Performance Level dissatisfaction element in the performance point

Load Case	Story	Element Type	Number of Hinge Status							
			Elastic	B	IO (즉시거주)	LS (인명안전)	CP (붕괴방지)	C	D	E,Failure (부재파괴)
Push-X	1F	Beam/Column	426	148	0	0	0	0	0	0
	2F	Beam/Column	577	105	0	0	0	0	148	0
	3F	Beam/Column	747	0	79	0	0	0	4	0
	Roof	Beam/Column	256	0	0	0	0	0	0	0

Load Case	Story	Element Type	Number of Hinge Status							
			Elastic	B	IO (즉시거주)	LS (인명안전)	CP (붕괴방지)	C	D	E,Failure (부재파괴)
Push-Y	1F	Beam/Column	428	146	0	0	0	0	0	0
		Masonry wall	0	0	0	0	0	0	0	17
	2F	Beam/Column	797	0	33	0	0	0	0	0
		Masonry wall	0	17	0	0	0	0	0	0
	3F	Beam/Column	826	0	4	0	0	0	0	0
		Masonry wall	17	0	0	0	0	0	0	0
	Roof	Beam/Column	256	0	0	0	0	0	0	0

Figure 4. Retrofit location

Figure 5. Retrofit Application

Figure 6. Construction Procedure

Figure 7. Cyclic Behavior and Model of Steel Hysteretic Damper

나타내었다. 제진보강에 사용 된 강재이력댐퍼의 이력형상 및 모델을 Figure 7에 나타내었다.

3.2 성능스펙트럼법을 통한 보강효과 검증

Figure 8는 댐퍼 보강 전·후 성능점을 산정하였으며, Table 6에 정리하였다. 요구 성능 스펙트럼의 비교, 분석을 통해 댐퍼 적용 후 철골 프레임에 의한 강성이 증가함에 따라 대상 건축물의 성능 역시 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 댐퍼에 의해 시스템의 감쇠력이 증가됨에 따라 소성 변형률 역시 증가함을 확인할 수 있었다.

Figure 9은 내진 성능 향상 여부를 판단하기 위해 댐퍼 적용 전, 후 성능점에서의 소성힌지 분포를 비교하여 나타내었다. Table 7과 같이 댐퍼 적용 전 대상 건축물에서 장변 방향 2400년 재현주기 2/3수준 성능점에서의 요구성

능 불만족 부재는 2층 보/기둥에서 148개소, 2층보/기둥에서 4개소가 존재하였으나, 댐퍼 적용 후 요구 성능 불만족 부재는 존재하지 않아, 대상 건축물의 내진성능이 즉시거주(Immediate Occupancy) 수준으로 보강되었음을 확인할 수 있었다.

3.3 비선형 시간이력해석을 통한 보강효과 검증

Figure 10은 본 연구에서 비선형 시간이력해석을 수행할 때 사용된 지진파이다. 주파수 성분이 서로 다른 EI Centro, Taft, California 지진파를 이용하여 KBC 2009에 따라 대상건축물의 지역과 지반을 고려하여 설계스펙트럼과 비슷하게 SCALE을 조정한 후 해석을 실시하였다. 댐퍼 설치 전, 후 각 지진파별 층간 변형각을 Figure 9에 나타내었다. KBC2009에서는 내진등급 특등급의 경우 설계

Figure 8. Demand-Capacity Spectrum

Table 6. Performance Point (With Damper)

건물	지진재현주기	해석방향	성능점		보유성능
			Sd	Sa	
대상건축물	2400년 재현주기 2/3	장변	18.13	0.1723	IO(즉시거주)

Figure 9. Plastic hinge distribution in the performance point

Table 7. Number of hinge status (with Damper)

Load Case	Story	Element Type	Number of Hinge Status							
			Elastic	B	IO (즉시거주)	LS (인명안전)	CP (붕괴방지)	C	D	E,Failure (부재 파괴)
Push-X	1F	Beam/Column	574	0	0	0	0	0	0	0
	2F	Beam/Column	729	20	77	0	0	0	0	0
	3F	Beam/Column	729	0	97	0	0	0	0	0
	Roof	Beam/Column	252	0	0	0	0	0	0	0

(a) El Centro

(b) Taft

(c) California

Figure 10. Using seismic waves

(a) 댐퍼 미보강

(b) 댐퍼 보강

Figure 11. Nonlinear time history analysis result (story deformation angle)

허용 층간변위 1/100, 내진등급 I 등급 건축물인 경우
1/67, 내진등급 II 등급은 1/50로 규정하고 있다. 사용성
기준에 대한 성능 목표는 즉시거주(IO)수준과 붕괴방지

Figure 12. Nonlinear time history analysis result (The top floor displacement)

(CP)수준으로 구분하고 있으며 본 논문에서는 성능수준에 따라 Bertero[4]가 제안한 층간변위비 제한값(IO Level : 0.6%, LS Level : 1.5%, CP Level : 2.0%)을 사용하였다.

Figure 11은 각 지진파별 층간변형각을 나타내었다. 댐퍼 설치 전 Taft와 California 지진파에 대하여 1층과 3층에서 제한 층간변위비의 즉시거주(IO) 수준을 초과하였으나 댐퍼 설치 후 적용된 모든 지진파에 대하여 즉시거주(IO) 수준을 만족하고 있음을 알 수 있다.

댐퍼 설치 전, 후 각 지진파별 최대 최상층 변위를

Table 8. Nonlinear time history analysis result(The top floor displacement) (mm)

	El Centro	Taft	California
보강 전	43.21	49.04	58.58
보강 후	32.86	41.89	31.71

Figure 12에 나타내었으며 정확한 수치는 Table 8에 나타내었다. 댐퍼 설치 후 최대 최상층 변위는 El Centro 지진파 10.35mm 감소, Taft 지진파 7.15mm 감소, California 지진파 26.87mm 감소하여 내진 보강 효과를 확인 할 수

1층 댐퍼의 이력 거동

2층 댐퍼의 이력 거동

Figure 13. Nonlinear time history analysis result (Hysteretic behavior of the damper)

있었다.

Figure 13과 같이 각 지진파에 의한 댐퍼의 이력 거동을 검토한 결과, 모든 댐퍼가 안정적인 이력거동을 하고 있어, 지진 에너지를 충분히 소산시킴을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 대상 건축물에 내진성능평가를 실시한 후 부족한 내진성능을 보강하기 위해 제진시스템을 1층에 8개, 2층에 4개 프레임을 설치하였다. 각각의 프레임에는 3개의 댐퍼가 설치되어 총 36개의 댐퍼가 설치되며 비선형 시간이력해석을 수행하였다.

- 1) 댐퍼 적용 전, 대상건축물에서 장변 방향 2400년 제현주기 2/3수준 성능점에서의 요구성능 불만족 부재는 2층 보/기둥에서 148개소, 2층 보/기둥에서 4개소가 존재하였으나, 댐퍼 적용 후 요구성능 불만족 부재가 존재하지 않아, 대상 건축물의 내진성능이 즉시거주(Immediate Occupancy) 단계로 내진보강 되었음을 확인하였다.
- 2) 비선형 시간이력해석결과 내진 보강된 대상 건축물의 층간 변형각은 즉시거주(IO) 단계 이하의 결과를 나타내어 2400년 2/3 수준의 지진 발생 시 구조물이 안정적으로 거동함을 알 수 있었다.
- 3) 각 지진파에 의한 댐퍼의 이력 거동을 검토한 결과, 각 층에 적용 된 모든 댐퍼가 안정적인 이력거동하고 있어, 대상건축물에 지진 에너지를 충분히 소산시킴을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. ATC, "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings (ATC-40)", Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996
2. BSSC, "NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 273).", Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., 1997
3. BSSC, "NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 356).", Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., 2000
4. Bertero, R. D., Bertero, V. V., "Performance-based seismic engineering : the need for a reliable conceptual comprehensive approach", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 627-650, 2002

5. 대한건축학회, 건축구조설계기준, 2009
6. 김상대, 성수진, 주영규, "FEMA273에서 제안하는 내진성능평가법 소개와 적용", 대한건축학회 논문집, 구조계 제21권 제2호, 111-114, 2001
7. 오상훈, 김종성, 김영주, 윤명호, 문태섭, "철골 접합부의 붕괴형에 따른 내진 성능 비교 평가를 위한 실험적 연구", 대한건축학회 논문집, 구조계 제22권 제1호, 239-242, 2002
8. 이강석, 최 호, 이원호, "현존 철근콘크리트 건물의 내진성능 평가 및 지진피해율 상정", 대한건축학회 논문집, 구조계 제18권 제1호, 11-20, 2002
9. 이강석, 김용인, 위정두, "저층 철근콘크리트 건물의 실용적인 간이 내진성능 평가법 제안 및 적용가능성 검증", 대한건축학회 논문집 구조계, 제25권 제9호, 47-57, 2009
10. 이원호, "기존 철근콘크리트 건축물의 내진성능평가 및 보강", 대한건축학회 건축, 제48권 제8호 63-75, 2004
11. 이상호, 전태권, "국내 철근콘크리트조 학교건축물의 내진성능평가 및 피해율 예측에 관한 연구", 대한건축학회 논문집 구조계, 제22권 제9호, 67-74, 2006
12. 이상호, 오상훈, 백은림, "철근콘크리트 골조의 내진성능 향상을 위한 강재댐퍼시스템의 제안", 대한건축학회 논문집 구조계, 제27권 제9호, 21-28, 2011
13. 최 호, "우리나라 학교건물의 내진성능 및 손상도 평가", 대한건축학회 논문집 구조계, 제27권 제1호, 183-186, 2007
14. 윤태호, 김성렬, 김정민, "국내 및 일본 내진규준에 따른 학교건물의 내진성능평가", 대한건축학회 학술발표대회 논문집 구조계, 제28권 제1호, 271-274, 2008
15. 송진규, 황재승, 김건우, 송호범, 이재혁, "노후도를 고려한 학교건물의 내진성능평가 및 내진보강에 관한 연구", 대한건축학회 논문집 구조계, 제26권 제8호, 3-10, 2010
16. 박천석, 안재혁, 송우영, "기존 저층 대학건물의 내진보강을 위한 내진보강기법 비교연구", 대한건축학회연합논문집, 제13권 제2호, 175-182, 2011

접수 2012. 4. 10
1차 심사완료 2012. 5. 17
2차 심사완료 2012. 7. 6
게재확정 2012. 7. 19