학교건물에 있어서 비탄성해석 및 비선형 정적해석을 통한 내진성능 평가에 따른 보강 연구

The Study of Reinforcement through the Nonlinear Static Analysis and
Inelastic Seismic Performance Evaluation in School Building

이 호*

권 영 옥**

김 홍 도***

Lee, Ho

Kwon, Young-Wook

Kim, Hong-Do

요 약

본 연구는 학교 건물의 구조적 성능 평가를 통한 내진보강에 대한 연구이다. 본 연구의 목적은 학교 건물의 구조적 성능평가를 통하여 안전성과 사용성을 고려한 구조보강방안을 비교분석하고 합리적 내진 보강안을 제시하여 보다 지진에 안전한 건축물을 유지하는데 도움이 되고자 한다. 이 목적을 위해 기존의 학교건물을 연구 대상으로 선정하여 내진성능평가를 실시하고 내진 보강안을 제시하였다. 본 연구의 방법은 기존의 철근콘크리트 학교건물을 대상으로 1차 내진 성능평가와 2차 내진 성능평가를 실시하였다. 위와 같은 방법으로 내진성능평가를 하여 그 결과를 분석하고 내진보강방안을 제시(강제댐퍼, 탄소막대보강재)하였다. 제시된 내진 보강방안을 대상 건축물에 적용하여 내진보강 전, 후의 내진성능평가를 통해 종합적인 결과를 도출 하였다.

Abstract

This study is about earthquake-proof reinforcement through structural function evaluation of an school building. The purpose of this study is to comparatively analyze structure reinforcement measures in consideration of safety and usability through structural function evaluation of school building, to offer rational measures for earthquake-proof function and to provide help in maintaining safe structures against earthquake. For this purpose, was selected for this study as an existing school building, earthquake-proof function evaluation was conducted, and measures to reinforce earthquake-proof function was offered. As for the research method, the first and the second earthquake-proof function evaluations were conducted which is an existing reinforced concrete school building. Through the abovementioned methods, earthquake-proof function evaluations were conducted, the results were analyzed and the measure to reinforce earthquake-proof function were offered(Steel damper, Carbon plate stiffeners). The offered measure to reinforce earthquake-proof function was applied to the subject structure, and comprehensive results were derived from earthquake-proof function evaluation regarding before and after earthquake-proof function reinforcement.

키워드 : 내진 성능평가, 비탄성해석, 비선형해석, 강제댐퍼, 탄소막대보강재

Keywords : Earthquake-proof function evaluations, Inelastic analysis, Nonlinear analysis, Steel damper, Carbon plate stiffeners

1. 서 론

1.1 연구개요 및 목적

지진은 해마다 수천 명 이상의 인명을 빼앗는 재난으로 물적 피해뿐만 아니라 심적인 공포감 또한 무시할 수 없는 자연재해라 할 수 있으며, 전 세계적으로 지진으로 인한 인류의 피해는 엄청나다 할 수 있다. 특히 지진은 순간적이며, 사전에 예측하기

가 아주 힘든 자연현상이므로 경계의 필요성이 더욱 대두된다. 한편, 우리나라는 일본과는 달리 판 경계부에서 어느 정도 떨어져 있어 큰 규모의 지진이 잘 발생하지 않는 상황이라고 볼 수 있으나, 2008년 중국 쓰촨성 지진(규모7.8)에서 볼 수 있듯이 대륙의 내부에서도 대규모 지진이 발생할 가능성이 있어 이에 대한 경각심을 일깨워 주었고, 2010년 1월 아이티 강진(규모7.0)에 이후 2010년 2월 칠레강진(규모8.8)의 사례에서도 볼 수 있듯이 사회전체의 대비가 무엇보다도 중요함을 인식시켜 주었다. 한편 국내에서도 기상청에 따르면 2010년 한반도의 지진 발생횟수는 42회(내륙 24회, 해역 18회)로, 이중 경기 시흥, 울산(해역), 제주(해역, 2회), 충남 태안(해역) 등 5곳에서는 지진 규모가 3.0을 넘었다.

* 정회원, 교신저자, 경북대학교 건축도시환경공학부 교수
Tel: 054-530-1372 Fax:053-530-1379
E-mail : holee59@knu.ac.kr

** 정회원, (주) SNS 구조안전기술원 대표이사

*** 정회원, (주) 효상종합건설 대표이사

지진횡수가 증가함에 따라 보다 큰 규모의 지진에 의한 피해가 발생 할 가능성이 있으므로, 이에 대한 적절한 내진대책을 수립할 필요성이 있다. 국내에서는 1988년 처음으로 내진 규정이 제정되었기 때문에 그 이전에 건설된 건축물은 부족한 내진설계와 노후화로 인하여 지진이 발생할 경우 큰 피해가 발생할 것으로 판단된다. 교육과학기술부에서 2009년에 실시한 학교 시설 내진보강 우선도 조사에서 국내 대다수의 학교가 내진 성능이 낮은 것으로 평가 받은 사실은 현재 국내 학교 건축물의 위험성이 높다는 것을 이야기한다. 따라서 안전성 확보를 위한 기존 건축물에 대한 내진보강 역시 시급하다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 보통모멘트골조의 국내 학교건축물을 대상으로 내진성능을 평가하고, 이에 따른 합리적인 내진성능 보강방안을 제시한다. 내진보강 방법 중 이력댐퍼(Hysteretic damper)로 내진 성능을 향상 시킨 횡력 지지 시스템에 대해 정적 비탄성 해석(Pushover Analysis)을 통하여 구조물의 내진 성능을 평가하고, 기존 건물에 대한 해석결과와 비교하여 제진 장치가 구조물의 내진 성능에 미치는 영향을 비교 하였다. 또한, 정적 비탄성 해석과 함께 지진파(Ground acceleration record)를 사용한 비탄성 동적 해석(Nonlinear Time History Analysis)을 수행하여, 제진장치를 적용한 시간 이력 거동을 비교한다. 이러한 과정을 통하여 국내 철근콘크리트조 학교 건축물의 내진성능 향상을 통한 성능평가 및 보다 효율적인 보강방안에 관한 자료를 제시하고자 한다.

2. 연구의 범위 및 방법

2.1 대상건축물 개요

본 대상건축물은 보통모멘트골조의 학교 건물로써, 국내 학교 평면의 70%이상을 차지하고 있는 일자형 보-기둥 철근콘크리트 보통모멘트골조의 학교 건물이다. 콘크리트의 설계기준강도 21MPa, 철근강도 240MPa, 층고 3.5m인 편복도형 건물이다. 본 건축물은 3개동으로 구성되어 있으며, 건물 형상이 같

은 A, B동과 C동의 내진성능을 평가하였다.

2.2 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 1990년대에 건축된 철근콘크리트 라멘조(보통모멘트골조) 학교건축물을 대상으로 하였다. 내진성능에 대하여 1차 내진성능평가와 2차 내진성능평가로 크게 구분된다. 1차 평가에서는 도면과 육안조사, 현장조사를 근거로 선형탄성해석에 의한 성능평가를 통해 2차 평가의 여부를 결정하고 비선형 정적해석법에 의한 2차 평가를 통해 내진성능수준 만족여부를 평가한다. 2차 내진성능평가는 비선형 정적해석법의 해석기법인 Pushover 해석 및 N2 Method를 이용하여 성능수준의 달성여부를 확인하였다. 또한 A, B, C교사동의 보유 내진성능을 확인하기 위하여 범용 비선형 해석 프로그램인 MIDAS-Gen을 이용하여 해석 및 검증하였다. 2차 평가의 결과에 따라 구조체와 비구조체에 대한 내진보강 방법을 결정하고 내진보강이 적용된 구조물에 대한 내진성능평가 및 성능향상을 검증한다.

2.3 N2 Method

우리나라의 현행 내진설계는 건물이 위치한 지역에서 50년 동안 유효 최대지반가속도(EPA)를 초과할 확률이 10%인 설계지진(2400년 재현주기의 2/3)을 대상으로 인명안전수준을 확보하는 것을 목표로 하고 있다. 이 경우, 현행 내진설계에 적용하고 있는 설계코드가 철학적인 설계개념(작은 지진에 대해서는 즉시거주, 설계지진에 대해서는 인명안전, 최대지진에 대해서는 붕괴방지)을 지니고 있으나 이를 구현하기 위한 논리가 없고 오로지 설계지진만을 고려하도록 되어 있어 즉시거주 또는 붕괴방지수준에 대한 안전도를 확신하기 어려운 점이 있다.

Peter Fajfar가 제안한 N2 Method N은 비선형 해석(nonlinear analysis)을, 2는 두 가지 수학적 모델(two mathematical)을 각각 상징하는 말로서, 성능에 기초한 새로운 내진 설계 절차에 대한 방법론을 제시하고 있다. 비탄성 요구스펙트럼을 구하기 위한 연성계수(R_y)의 추정 방법과 성능점을 찾기

위한 절차는 아래와 같다.

- 1) Step 1 : 비선형 정적해석(pushover analysis)수행
- 2) Step 2 : 성능곡선의 등가 단자유도 모델변환
- 3) Step 3 : 가속도-변위(AD) 관계로 탄성 요구스펙트럼 전환
- 4) Step 4 : R_y 결정(R_y :연성계수)
- 5) Step 5 : 비탄성 요구곡선
- 6) Step 6 : 성능점

비탄성 요구스펙트럼과 가속도-변위관계로 치환된 단자유도계의 성능곡선과의 교차점이 성능점이 된다. 이 성능점에서의 실제 건축물의 층간변위비 혹은 부재의 항복여부를 판단하여 성능목표 달성 여부를 확인한다.

〈그림 1〉 A동 바닥 보복도

〈그림 2〉 B동 바닥 보복도

〈그림 3〉 C동 바닥 보복도

3. 2차 내진성능 평가결과

내진보강에 앞서 A, B, C동의 보강 전 기존골조에 대한 비선형 정적해석(Pushover)을 통한 성능점과 성능곡선을 도출하고 허용층간변위각 및 반응수정계수평가에 의한 성능평가를 수행한 후 평가 결과에 따라 내진방안 및 내진보강을 적용한다. 내진성능 해석 시 A, B동의 X, Y방향 거동양상 및 질량중심 등의 차이를 고려하여 양방향 모두에 대한 해석을 수행하고 성능평가 하였다.

〈그림 4〉 A,B동 Y방향 성능곡선 및 성능점

〈표 1〉 A, B 동 보강 각 성능점에서의 파괴부재

동 이름	해석 방향	지진 재현주기	보강 전 파괴부재
A, B 동	X방향	2400yr	보: 3개 기둥: 3개
	Y방향	2400yr	측정불가

각 동별, X/Y방향별 성능목표에 따른 층간변위비의 분석결과, A, B동 모두 인명안전수준(LS level)

과 붕괴방지수준(C.P level)에 대한 층간변위비 한계를 초과하지 않았으나, FEMA 356에 근거하여 성능수준별 성능점에 대한 부재의 소성힌지각을 분석하여 부재 파괴를 평가한 결과, 표 1과 같이 각 동별 X, Y방향에 대한 보 및 기둥부재의 파괴가 나타나 내진보강이 필요한 것으로 판단되었으며, 그림 4과 같이 A, B동 Y-dir 2400년 재현주기에 대해서는 성능곡선과 능력스펙트럼의 교차점에서 생성되는 성능점이 존재하지 않아 근본적으로 내진보강이 필요한 것으로 나타났다. 그림5, 6에서 2400년 재현주기의 성능점에서 소성힌지를 나타낸 것이다.

〈그림 5〉 성능점에서의 소성힌지(2400yr) - A,B동 X방향

〈그림 6〉 성능점에서의 소성힌지(2400yr) - A,B동 Y방향

〈표 2〉 A, B동 반응수정계수 평가

철근 콘크리트 보통모멘트 골조	반응수정계수 평가-보강전						비고
	Vd [kN]	Vy [kN]	Rs (Vy/Vd)	Rμ	R (RμRμ) [보유]	R [기준]	
KBC2009	-	-	-	-	-	3.0	
A,B동 X방향	3392	2515	0.74	2.0	1.48	3.0	N.G
A,B동 Y방향	3392	2734	0.81	2.2	1.77	3.0	N.G

표 2에서와 같이 (KBC2009)상의 보통모멘트 골조의 반응수정계수(3.0)에 이르지 못하여 지진 발생 시 예상 지진력의 저감이 효과적으로 실제 건축물의 거동에 반영되지 못하는 것으로 나타나 강성, 강도 증진뿐 만 아니라 연성을 증진시킬 수 있는 방안이 요구된다. A, B동은 내진보강과 아울러 연성도

증진을 위한 내진보강 방안이 강구되어야 할 것으로 사료되며, 경제성 및 안정성 확보와 더불어 학교 건축물의 특성상 공기단축과 시공성 및 유지관리에 효율적인 보강공법이 고려되어야 할 것으로 사료된다.

4. 보강방법

X 방향의 경우, 에너지 흡수에 의한 지진응답 감소에 효율적인 공법으로 기존 횡력 지지 시스템의 내진 성능을 일부 이용함과 동시에 설치가 비교적 용이하고, 유지 관리 비용이 적으며, 설치 및 제작 시 경제적인 이력 댐퍼(hysteretic damper), 즉 강재 댐퍼를 적용하여 검토한다.

〈그림 7〉 강재댐퍼의 구조성능

강재댐퍼는 탄소성댐퍼로 기존 구조물에 강성과 감쇠를 부가할 수 있는 댐퍼이다. Steel Damper에 의한 내진보강의 장점을 요약하면, (1)마감재에 의한 2차 피해를 줄일 수 있고, (2)기존 구조물의 보강을 최소화 할 수 있으며, (3)지진력 발생 후에도 댐퍼만이 소성변형에 의해 지진에너지를 흡수하고, (4)골조는 큰 손상 없이 탄성에 머물도록 설계할 수 있으며, (5)지진에 의해 손상된 댐퍼만을 교체하면 건물의 장수명화가 가능한 매우 경제적인 시스템이라 할 수 있고, (6)학교건축물의 보수에 필요한 시간과 비용을 절감할 수 있는 장점이 있다.

Y 방향의 경우, 탄소막대보강재를 이용하여 조적벽체의 대각방향으로 매립보강하여 조적체를 상호 긴결함으로서 인장균열을 제어하고 건전한 압축대를 보존하여 등가압축대의 허용내력을 증진시키는 방안을 고려하였다.

〈그림 8〉 등가대각압축 스트럿 개념도(FEMA274)

등가압축대는 프레임에 접하는 조적벽체의 유효 두께에 의해 아래의 식으로 표현될 수 있다.

$$a = 0.175(\lambda_1 h_{col})^{-0.4} r_{inf} \quad (1)$$

$$\lambda_1 = \left[\frac{E_{me} t_{inf} \sin 2\theta}{4 E_{fe} I_{col} h_{inf}} \right]^{1/4} \quad (2)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{h_{inf}}{L_{inf}} \right) \quad (3)$$

본 논문에서는 FEMA 306(1998)에 근거하여 철근 콘크리트 프레임 면내 조적메움벽의 등가압축대를 압축전담요소화한 압축트러스를 기존골조에 적용시켜 프레임의 내진성능을 판별한다.

정리하자면, X방향에 대해 제진보강공법 중 강재 댐퍼댐퍼보강을 고려하고, Y방향에 대해 조적메움벽의 강성효과를 이용하는 보강안을 고려하고 내진 보강이 적용된 구조해석모델의 목표성능수준에 대한 성능평가를 수행한다.

5. 비선형 해석기법을 통한 내진성능 평가

5.1 A, B동 X방향 성능평가

정적 비탄성 해석(Pushover Analysis)은 기존 건물 해석에서 가정한 동일한 조건에서 해석을 수행하되, 제진 댐퍼의 거동은 구조 해석 프로그램 MIDAS에서 제공하는 Elasto-Plastic 거동을 하는 Spring요소를 사용하여 구현하였다. 한편, 댐퍼를 적용한 모델의 거동을 보다 객관적으로 평가하기

위해 기본모델로 보강한 모델을 정적비탄성 해석을 통해 분석하고자 하였으나 일반 상용프로그램의 특성상 가새의 좌굴 등 강도저감 현상을 충분히 프로그램이 구현하지 못하므로 동적 시간이력해석에서 비교하는 것으로 하였다.

5.1.1 비탄성 해석 결과

Pushover 해석을 수행하여 댐퍼를 사용한 X방향 횡력 지지 시스템의 성능점을 그림 8과 같은 결과를 얻었다. 최대 밀면전단력이 기존 약 3,210kN에서 5,584kN으로 74% 증대되어 이력댐퍼를 설치한 건물의 성능이 크게 향상되었을 뿐 만 아니라, 연성능력이 향상되어 기존 건물의 관찰되었던 급격한 내력저하가 이력댐퍼의 설치로 완화되었음을 확인할 수 있다.

〈그림 9〉 댐퍼를 사용한 X방향 횡력지지시스템의 성능곡선

그림 9에서 보이는 댐퍼를 사용하여 내진 성능이 향상된 구조물의 성능점에서 밀면전단력이 5,584kN으로, 본 건물이 위치한 지역에 대하여 규준에서 정하고 있는 설계 지진력 3,901kN보다 큰 성능값을 나타내고 있다. 기존 구조물의 횡력 지지 시스템과 제진 장치를 사용한 구조물과의 성능점에 대한 비교를 표 3에 나타내었다.

〈표 3〉 X방향 횡력 지지 시스템의 내진 성능 비교

	기존횡력지지 시스템, A	제진 장치를 사용한 횡력 지지 시스템, B	Ratio, B/A
밀면전단력 (kN)	3262	5584	1.712
최상층변위 (mm)	35.53	37.27	-
유효 주기, T_{eff} (sec)	0.85	0.64	0.753
유효감쇠비, D_{eff}	18.57	11.62	0.626

Pushover해석 결과로부터 예상한 바와 같이, 성능점에서의 밀면 전단력에서는 2,322kN정도 증가하였다. 이와 마찬가지로, 제진 장치를 사용한 횡력 지지 시스템에서 제진 장치를 횡력 저항 요소로 추가함으로 인하여 유효 주기가 감소하였다. 성능 평가에서 계산된 유효 감쇠비에는 제진 장치의 에너지 소산 능력이 포함되지 않음을 고려할 때 유효 감쇠비의 감소는 기둥과 보의 소성 변형이 상당부분 줄어 들었음을 의미한다.

(a) Step 16, Droof = 168.0mm(1.6%)

(b) Step 20, Droof = 210.0mm(2.0%)

〈그림 10〉 각 Step별 제진 장치를 도입한 X방향 횡력 지지 시스템의 소성 힌지 발생 상황

그림 10과 같이 제진 장치를 도입한 구조물의 X방향 횡력 지지 시스템의 힌지 발생과 진행 과정을 조사한 결과, 주 횡력 저항 시스템인 기둥과 제진시스템 부분에서 힌지가 주로 발생하였다. 힌지의 발생 형태를 보면, 기존 건물의 경우와 달리, 제진시스템을 적용한 구조물에서는 힌지가 건물 전체에 걸쳐서 고르게 분포하고 있는 것을 확인할 수 있다. 즉, 기존건물에 제진장치를 보강함으로 인하여, 소

성힌지가 건물 전체적으로 균등하게 발생하게 되어, 건물 전체 구조가 횡력에 대하여 저항하고 있음이 확인되었다.

5.1.2 비선형 동적해석 결과

본 절에서는 댐퍼를 사용한 모델과 기존모델을 적용한 모델에 대하여 지진하중 작용 시 동적효과를 고려하여 비선형 동적해석(Nonlinear Time History Analysis)을 수행하여 지진에 대한 구조물의 댐퍼 효과를 확인하고자 한다. 댐퍼의 효과를 비교 검토하기 위하여, I.O, L.S 및 C.P 단계에 대한 동적해석을 수행하여 각 단계에 대한 거동을 비교, 분석하였다.

1) 최대응답변위(mm)

I.O수준에서 X방향으로 지진력이 작용한 경우, El-Centro NS 지진파에 대한 최대응답변위는 30.58mm 이고, Taft EW 지진파에 대한 최대응답변위는 21.53mm이며, Northridge EW 지진파에 대한 최대응답변위는 37.40mm로 나타났다.

〈표 4〉 El Centro NS 지진파에 따른 최대응답변위

Story	Height (m)	X 방향			Y 방향		
		El Centro NS(mm)			El Centro NS(mm)		
		I. O	L. S	C. P	I. O	L. S	C. P
Roof	10.5	30.58	45.87	68.81	23.78	35.67	53.50
3	7.0	22.21	33.32	49.97	16.25	24.38	36.57
2	3.5	10.72	16.09	24.13	8.10	12.15	18.22
1	0	0	0	0	0	0	0

〈표 5〉 Taft EW 지진파에 따른 최대응답변위

Story	Height (m)	X 방향			Y 방향		
		Taft EW(mm)			Taft EW(mm)		
		I. O	L. S	C. P	I. O	L. S	C. P
Roof	10.5	21.53	32.29	48.44	21.41	32.12	48.18
3	7.0	15.48	23.22	34.82	15.09	22.63	33.94
2	3.5	7.84	11.76	17.63	7.39	11.09	16.63
1	0	0	0	0	0	0	0

〈표 6〉 Northridge EW 지진파에 따른 최대응답변위

Story	Height (m)	X 방향			Y 방향		
		Northridge EW(mm)			Northridge EW(mm)		
		I. O	L. S	C. P	I. O	L. S	C. P
Roof	10.5	37.39	56.10	84.15	30.56	45.85	68.77
3	7.0	27.39	41.09	61.63	19.79	29.69	44.53
2	3.5	13.78	20.67	31.01	9.19	14.56	21.84
1	0	0	0	0	0	0	0

L.S 수준에서 X방향으로 지진력이 작용한 경우, El-Centro NS 지진파에 대한 최대응답변위는 45.87mm 이고, Taft EW 지진파에 대한 최대응답변위는 32.29mm이며, Northridge EW 지진파에 대한 최대응답변위는 56.10mm로 나타났다.

마지막으로 C.P 수준에서 X방향으로 지진력이 작용한 경우, El-Centro NS 지진파에 대한 최대응답변위는 68.81mm이고, Taft EW 지진파에 대한 최대응답변위는 48.44mm이며, Northridge EW 지진파에 대한 최대응답변위는 84.15mm로 나타났다.

2) 최대응답가속도(mm/sec²)

I.O수준에서 X방향으로 지진력이 작용한 경우, El-Centro NS 지진파에 대한 최대응답가속도는 4703mm/sec² 이고, Taft EW 지진파에 대한 최대응답가속도는 3588mm/sec²이며, Northridge EW 지진파에 대한 최대응답가속도는 6475mm/sec²로 나타났다.

L.S 수준에서 X방향으로 지진력이 작용한 경우, El-Centro NS 지진파에 대한 최대응답가속도는 7055mm/sec²이고, Taft EW 지진파에 대한 최대응답가속도는 5382mm/sec²이며, Northridge EW 지진파에 대한 최대응답가속도는 9686mm/sec²로 나타났다. 마지막으로 C.P 수준에서 X방향으로 지진력이 작용한 경우, El-Centro NS 지진파에 대한 최대응답가속도는 10580mm/sec²이고, Taft EW 지진파에 대한 최대응답가속도는 8072mm/sec²이며, Northridge EW 지진파에 대한 최대응답가속도는 14530mm/sec²로 나타났다.

〈표 7〉 El Centro NS 지진파에 따른 최대응답가속도

Story	Height (m)	X방향(mm/sec ²)			Y방향(mm/sec ²)		
		El Centro NS			El Centro NS		
		I. O	L. S	C. P	I. O	L. S	C. P
Roof	10.5	4703	7055	10580	4738	7108	10660
3	7.0	3621	5432	8147	3318	4977	7465
2	3.5	1910	2865	4298	2414	3621	5431
1	0	455.4	683.1	1025	455.4	683.1	1025

〈표 8〉 Taft EW 지진파에 따른 최대응답가속도

Story	Height (m)	X방향(mm/sec ²)			Y방향(mm/sec ²)		
		Taft EW			Taft EW		
		I. O	L. S	C. P	I. O	L. S	C. P
Roof	10.5	3588	5382	8072	4272	6408	9613
3	7.0	2770	4155	6233	3108	4662	6993
2	3.5	1976	2964	4446	2068	3102	4653
1	0	351.4	527.1	790.6	351.4	527.1	790.6

〈표 9〉 Northridge EW 지진파에 따른 최대응답가속도

Story	Height (m)	X방향(mm/sec ²)			Y방향(mm/sec ²)		
		Northridge EW			Northridge EW		
		I. O	L. S	C. P	I. O	L. S	C. P
Roof	10.5	6457	9686	14530	6114	9171	13760
3	7.0	4889	7334	11000	4247	6370	9555
2	3.5	3121	4682	7023	2967	4451	6676
1	0	847.7	1272	1907	847.7	1272	1907

3) 층간변위(mm)

I.O수준에서 X방향으로 지진력이 작용한 경우, El-Centro NS 지진파에 대한 층간변위는 11.49mm 이고, Taft EW 지진파에 대한 층간변위는 8.24mm로 이며, Northridge EW 지진파에 대한 층간변위는 14.04mm로 나타났다.

L.S 수준에서 X방향으로 지진력이 작용한 경우, El-Centro NS 지진파에 대한 층간변위는 17.08mm 이고, Taft EW 지진파에 대한 층간변위는 11.01mm 이며, Northridge EW 지진파에 대한 층간변위는 21.06mm로 나타났다.

마지막으로 C.P 수준에서 X방향으로 지진력이 작용한 경우, El-Centro NS 지진파에 대한 층간변위는 25.61mm이고, Taft EW 지진파에 대한 층간변위는 18.54mm이며, Northridge EW 지진파에 대한 층간변위는 31.59mm로 나타났다.

〈표 10〉 El Centro NS 지진파에 따른 층간변위

Story	Height (m)	X방향(mm)			Y방향(mm)		
		El Centro NS			El Centro NS		
		I. O	L. S	C. P	I. O	L. S	C. P
3	3.5	7.85	12.76	19.14	8.12	12.18	18.27
2	3.5	11.49	17.08	25.61	8.13	12.19	18.28
1	3.5	11.29	15.92	23.88	7.48	11.22	16.82

〈표 11〉 Taft EW 지진파에 따른 층간변위

Story	Height (m)	X방향(mm)			Y방향(mm)		
		Taft EW			Taft EW		
		I. O	L. S	C. P	I. O	L. S	C. P
3	3.5	6.31	9.47	14.20	7.34	11.01	16.51
2	3.5	8.24	12.36	18.54	7.28	10.91	16.37
1	3.5	7.78	11.67	17.51	6.86	10.29	15.43

〈표 12〉 Northridge EW 지진파에 따른 층간변위

Story	Height (m)	X방향(mm)			Y방향(mm)		
		Northridge EW			Northridge EW		
		I. O	L. S	C. P	I. O	L. S	C. P
3	3.5	11.45	17.17	25.76	10.65	15.97	23.96
2	3.5	14.04	21.06	31.59	10.75	16.13	24.20
1	3.5	13.71	20.57	30.86	9.15	13.73	20.59

층간변위의 경우 L.S 수준에서 구조물은 안전한 수준에 있는 것으로 사료된다. 또한, 본 건물의 경우 댐퍼의 항복강도 수준이 일반적인 댐퍼보강 건물에 비해 상대적으로 높아 가속도의 증폭이 일반 건물수준에 이르는 것으로 사료된다. 응답가속도는 4408mm/sec^2 로 나타났다.

5.2 A, B교사동 Y 방향 보강후 내진성능평가결과

A, B 교사동에 대한 Y방향 내진보강은 프레임 면 내 조적메움벽을 횡력저항 요소로 사용하기 위해 조적메움벽을 탄소막대보강재로 보강하여 전체 골조의 횡강성을 증진시키는 방법으로 보강이 적용된 조적메움벽의 등가압축스트럿을 압축전담요소화하여 골조모델에 적용하였다.

평가결과, A, B동의 Y방향의 경우, 재현주기별 및 목표성능에 대해 허용변위는 보강 전후에 관계없이 제한치를 만족하는 것으로 나타났으나, 밀면전 단력 값은 각 성능점에서 2400년 재현주기 목표성능에 대해서는 보강전의 경우, 성능곡선이 능력스펙트럼의 하부에 위치하여 성능점이 존재하지 않은 상태였으나, 보강 후 성능곡선이 상향되어 성능점 및 허용변위를 만족하는 것으로 나타났다. 또한 소성힌지 상태비교에서는 아래 그림과 같이 각 성능점에 대한 소성힌지 상태가 보강 후 대부분 탄성한계상태 및 LS(인명안전)상태 이하로 향상되어 나타났다. 반응수정계수 평가에서 보강전의 경우 건축구조기준(KBC2009)에서 정의하고 있는 보통모멘트골조의 3.0에 미달되는 것으로 나타났으나, 보강 후

표 13에서 나타난 것과 같이 연성도 및 항복강도가 3.36수준으로 증가하여 제안치를 만족하는 것으로 나타났다.

〈표 13〉 A, B동 반응수정계수 평가

철근 콘크리트 보통모멘트 골조	반응수정계수 평가-보강전						비고
	Vd [KN]	Vy [KN]	Rs (Vy/Vd)	Rμ (R/Rμ)	R (R/Rμ) [보유]	R [기준]	
KBC2009	-	-	-	-	-	3.0	
A,B동 Y방향	3392	5890	1.74	1.93	3.36	3.0	O.K

6. 결 론

본 연구에서는 학교건물에 대하여 리모델링 공사 및 내진보수/보강을 실시하여 지진에 대한 목표성능수준의 내진성능을 평가하고, 국내 학교 건축물의 내진설계기준에 적합한 안전도를 갖도록 보강설계안을 제시하였다. 각 검토항목 및 구조해석 결과는 다음과 같이 요약된다.

6.1 A, B교사동의 1,2차 내진성능 평가 결과

1) 1차 내진성능평가 결과, A, B동은 종합평가점수 0.83으로 평가되었다. 이는 “내진등급 D”에 해당하는 것으로 건축물의 내진성능을 파악하기 위한 2차 내진성능평가가 수행되었다.

2) Pushover 해석 및 N2 Method를 이용한 2차 내진성능평가 결과, 각 성능점에 대한 허용층간변위는 A, B동 X, Y방향 모두 기준치 이내로 나타났으나, 각 성능점에 대한 개재부재의 검토에서 <표 14>와 같이 보 및 기둥 개재부재에 대한 파괴를 나타내어 재현주기별 및 방향별 내진보강이 이루어져야 할 것으로 평가되었다. 특히 A, B동 Y 방향 개략재현주기 2400년의 경우, 성능곡선과 능력스펙트럼의 교차점에서 형성되는 성능점이 없어 근본적으로 연성 및 강성증진에 의한 내진보강이 이루어져야 할 것으로 평가 되었다.

6.2 A, B교사동의 내진보강 설계 후 결과

1) 내진보강이 적용된 해석모델에 대해, X 방향 횡력지지 시스템의 성능점은 대상 건축물이 위치한

지역에 대한 규준에서 정하고 있는 밑면전단력 보다 큰 최대 내력을 보여 주었으며, 힌지의 발생 형태가 기존 건물의 경우와 달리, 제진시스템을 적용한 해석모델에서는 힌지가 건물 전체에 걸쳐 고르게 분포하여 기존 건물의 제진장치를 보강함으로써 건물의 연성능력이 향상됨을 보여주었다.

2) 또한, 댐퍼를 적용한 모델의 지진 시의 효과를 확인하기 위해 비선형 동적해석을 수행 후 그 거동을 비교 분석한 결과, 기존 구조물의 강성과 강도가 약하여, 이력댐퍼의 항복강도가 상대적으로 높게 설계되어 입력지진파에 따른 증폭 비율이 일반 건물과 큰 차이가 없는 것으로 나타났으며, 인명안전상태(LS) 및 붕괴방지(C.P)상태에서 안정적인 탄성거동을 하는 것으로 나타나 설계지진하중에 안전한 것으로 평가되었다.

3) Y 방향의 경우, 구속프레임 면내 조적메움벽의 등가압축대를 압축전담요소화한 압축트러스를 기존 골조에 적용시켜 프레임의 내진성능을 판별한 결과, 전체 프레임의 강성증진의 효과를 나타내었으며, 허용층간변위 및 각 성능점에서의 파괴부재 검토에 대해 건축구조기준(KBC2009)에 의한 연성도 평가에서도 3.36 ~ 3.47로 기준치를 상회하는 것으로 평가되어 구속프레임 면내 조적벽체의 등가압축스트럿에 의한 Y방향 보강은 재현주기별 목표성능수준을 만족하고 있는 것으로 평가되었다.

감사의 글

이 논문은 2011년 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2011-0023211)

참고문헌

1. 건설교통부, “기존 건축물의 내진성능 평가요령”, 건설교통부, 2004.
2. 국토해양부, “소규모 건축물 내진보강 포인트 20”, 국토해양부, 2010.
3. 교육과학기술부, “철강재를 이용한 학교 건축물 내진보강 매뉴얼”, 교육과학기술부, RIST, 2010.

4. 교육과학기술부, “학교시설 내진설계 기준”, 교육과학기술부, 2009.
5. 대한건축학회, “건축구조기준 및 해설”, 대한건축학회, 2009.
6. 한덕전외 1명, “부재의 이력모델에 따른 건축구조물의 내진성능 평가, 2009, 한국공간구조학회 논문집 v.9 no.4
7. Morooka, Shigehiro외 2명, “정적해석에 의한 학교 체육관의 내진 성능 평가” 2009년, 한국공간구조학회 논문집 v.9 no.4
8. 전대한외 1명, “건축물의 내진설계에서 정적 비선형해석의 적용과 오차에 대한 고찰” 2005년, 한국공간구조학회 논문집 v.5 no.1
9. 성수진, “FEMA 273과 ATC 40에서 제안하는 내진성능 평가 방법”, 고려대학교대학원 석사학위 논문, 2001.
10. 정길수, “보통모멘트골조의 Pushover해석을 이용한 내진성능평가에 관한 연구”, 인제대학교대학원 석사학위 논문, 2007.
11. 신중학, “수평력을 받는 프레임면내 조적벽의 내력에 관한 실험적 연구”, 영남대학교 대학원 박사학위 논문, 1989.
12. 신중학 외 4명, “개구부를 갖는 철근콘크리트 프레임면내 조적벽체의 내진성능 평가 및 개선”, 2002, 대한건축학회 학술발표 논문집, 제21권 제1호 pp.163-166.
13. 송진규 외 4명, “N2 Method를 이용한 RC 중간모멘트 연성골조의 반응수정계수 및 내진성능평가”, 2002, 한국지진공학회 논문집, 제6권 제6호 pp.33-39.
14. MIDASIT, “Pushover 해석의 이해와 midas Gen의 활용”, MIDAS Information Technology Co., LTD.

(접 수 일 자 : 2012년 01월 11일)
(심사완료일자 : 2012년 06월 01일)
(게재확정일자 : 2012년 06월 04일)