

학교 건축물의 내진성능평가 및 보강설계 사례

Seismic Performance Evaluation and Rehabilitation of RC School Building



이중권*
Jong-Kweon Lee



조남철**
Nam-Cheul Jo



김시범***
Si-Bum Kim

1. 개요

본 내진보강설계 대상구조물은 철근콘크리트 기둥과 보로 구성된 전형적인 모멘트저항 시스템을 갖는, 내진상세가 적용되기 전의 구조물로 연성능력이 매우 작고 구조연한이 오래되어 강도 저하의 문제도 있는 것으로 판단된다<그림 1>. 특히, 학교건물인 경우 지진재해가 발생할 경우 학생들의 안전을 담보할 뿐만 아니라 해당지역의 방재거점으로 활용이 가능하므로 실제 설계 지진하중 작용 시 기존의 하중 기반 설계법에 의한 보강이 아닌 구조물의 성능을 평가하여 보강하는 성능기반설계를 할 필요가 있다<표 1>.

2. 내진 성능 평가

2.1 내진화 우선도 평가 및 결과

표 1. 건물 개요 및 내진 설계 변수

건물 개요		내진 설계 변수	
건물의 위치	전라남도○○시	반응수정 계수 R	3.0
건물의 규모	지상 4층(13.2 m)	시스템초과강도계수 Ω_o	3.0
기준층 높이	3.3 m	변위증폭계수 C_d	2.5
구조 시스템	RC모멘트골조	중요도계수 I	1.2
용도	중학교	단주기지반계수 F_a	1.0
1층 스패닝	4.5 m × 7.5 m	장주기지반계수 F_v	1.0

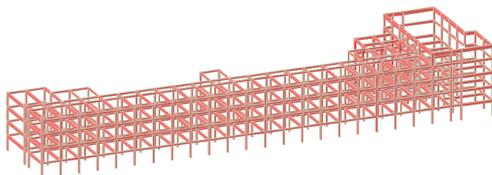


그림 1. 기존 건축물 모델링

* 정희원, CMR기술연구원(주) 연구소장
** CMR기술연구원(주) 대표이사, 구조기술사
*** CMR기술연구원(주) 기술이사

대상 구조물은 1988년 이전에 신축되었으며 콘크리트 설계강도 $f_{ck} = 21$ MPa, 철근 항복강도 $f_y = 240$ MPa를 사용하였다. 해당지역은 지진지역 1, 지역계수 0.11, 지반종류 SC를 이용하여 평가용 최대 입력 지진가속도(α)를 산정한다. KBC 2005에 근거하여 2400년 재현주기 지진의 유효지반가속도를 평가용 최대 입력지진 가속도(α)로 정의하며, 약산식으로 산정하여 0.175 g라는 값을 얻었다. 또한 건물의 총중량은 79,460.4 kN이며 장변방향(이하 X방향) 및 단변방향(이하 Y방향)에 대해 횡과괴형 부재와 전단과괴형 부재의 내력을 산정하였다. 이상에서 산정한 값들로부터 최종지진피해 판정결과는 X, Y 방향 모두 '대규모 피해'라는 결과를 얻었다.

1차, 2차 성능판정 및 수정을 통하여 내진성능 우선도 평가 결과에 대한 보강량을 산정하였다<표 2>.

2.2 기존 구조물의 내진 성능 평가(Push-over 해석)

기존 구조물의 내진성능을 평가하는 방법으로 정적 비탄성 해석방법(static non-linear analysis 또는 monotonic push-over analysis)을 사용하여 횡력 저항 성능을 평가하였다. push-over 해석 시 외력분포 형태는 각 방향에 대한 기본 모드 형태를 사용하여 해석을 수행하였다.

내진 성능(seismic performance)을 평가하기 위한 성능평가지표(seismic performance index)를 <표 3>과 <그림 2>에 표시하였다. 구조물의 특성과 요구 조건에 따라 목표 성능점을 정한 후, push-over 해석을 통하여 구조물의 성능 수준

표 2. 댐퍼보강에 필요한 보강량

층		ΔQ_v (kN)	ΔQ_v (kN)	
X 방 향	4	2,025.13	Y 방 향	2,008.28
	3	4,970.54		4,777.56
	2	8,685.33		8,313.54
	1	14,388.35		13,970.70

* 목표내진성능 $I_{so} = 0.4$ * 연성지표 $F = 2.0$

과 비교함으로써 구조물의 전반적인 내진성을 평가할 수 있다. 본 구조물은 내진 상세가 되어 있지 않으므로 push-over 해석 시 각 횡력 지지 부재 즉, 기둥, 전단벽 등에 대해 항복 내력은 상용 구조해석 프로그램의 자동 계산 방법 사용하고 부재의 강성은 FEMA 273을 준용하여 결정하였다.

X방향 횡력지지 시스템의 동적 특성은 모드 해석(modal analysis)를 통해 구하여 <표 4>에 표시하였다(T_m = 모드별 주기, W_i = 내진 설계에 고려해야 할 층 중량, $\phi_{i,m}$ = 모드 형

표 3. 횡력 지지 시스템의 성능 수준

시스템 상태	성능수준			
	완전기능수준	기능수행	인명안전	붕괴방지
전체건물피해상태	무시할 정도	경미함	보통	심함
허용단기충간변위	0.3%		1.5%	
허용영구충간변위	무시할 정도	무시할 정도	< 0.5% +/-	< 2.5% +/-

표 4. X방향 횡력 지지 시스템의 동적 특성

Modes	Mode 1				Mode 2		
T_m , sec	0.4				0.364		
Floor	wi, kN	$\{\phi_1\}$	$W_i\phi_1$	$W_i\phi_1^2$	$\{\phi_2\}$	$W_i\phi_2$	$W_i\phi_2^2$
Roof	11,543.5	1.00	11,544	11,544	1.00	11,544	11,544
4F	10,639.9	0.86	9,148	7,864	-0.23	-2,483	579
3F	98,52.06	0.62	6,143	3,830	-1.16	-11,454	13,316
2F	10,920.2	0.32	3,479	1,109	-1.04	-11,328	11,750
1F	0	0.00	0	0	0.00	0	0
Sum	15621.2		30,313	24,347		-13,721	37,189
Wm, kN			37,742	87.9%		5062	11.8%
Gm			1.245			-0.369	

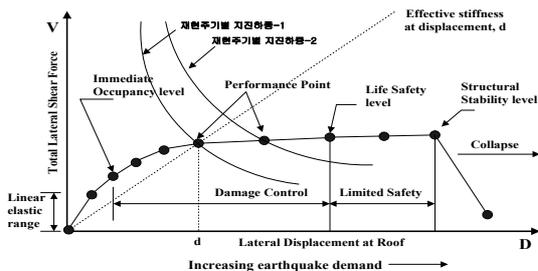
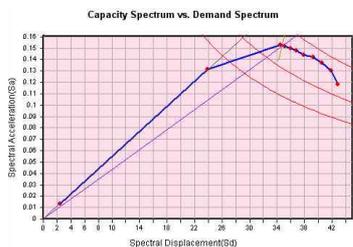
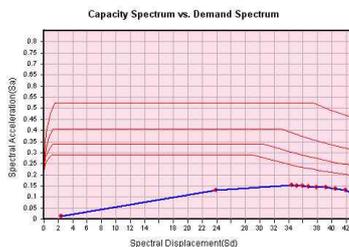


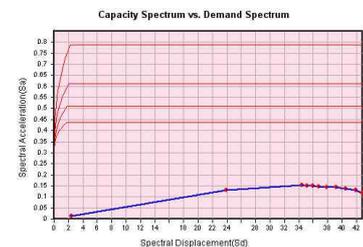
그림 2. 성능수준 단계에 따른 구조물의 성능평가



(a) I.O 성능곡선



(b) L.S 성능곡선



(c) C.P 성능곡선

그림 3. X방향 횡력 지지 시스템의 성능 곡선

상 벡터, W_m = 모드 총 중량, F_m = 모드 참여 계수).

X방향 횡력지지 시스템의 초기 2개의 모드(1차, 2차 모드)의 모드 총 중량이 전체 중량의 약 99.7%를 차지하므로 응답스펙트럼(response spectrum) 해석 시 2차 모드까지만 고려하더라도 충분함을 알 수 있다.

내진 기준에 정하고 있는 인명 안전 레벨(Life Safety Level)을 만족하기 위한 설계 밀면 전단력을 등가정적해석법을 이용하여 구하면 5,570 kN을 얻게 되며, 이를 push-over 해석으로 얻게 될 성능점과 비교함으로써 구조물의 설계수준을 판단하게 된다.

Push-over 해석을 수행하여 횡력지지 시스템의 내진성을 평가한 결과를 <그림 3> 및 <표 5>에 표시하였다. 지진레벨 I.O(즉시거주)의 경우 구조물의 최대 내력이 설계 밀면 전단력보다 큰 값이 산출되나 지진레벨이 L.S(인명안전)와 C.P(붕괴방지)인 경우 중간 변위가 인명안전 레벨을 만족하지 못하므로 X방향 횡력지지 시스템에 대해 보강이 필요함을 알 수 있다.

Y방향 횡력지지 시스템의 동적 특성 또한 초기 2개의 모드 총 중량이 전체 중량의 약 95.4%를 차지하고, push-over 해석을 수행한 결과가 X방향과 유사하게 취성거동 양상을 보이고 있다.

<그림 4>에 Y방향의 성능점을 각 지진레벨별로 나타내었다. 성능이 요구 밀면전단력에 미치지 못하여 보강을 통해 강성 증대와 연성 확보가 필요함을 알 수 있다.

본 구조물의 목표성능수준은 인명안전 레벨 이상이어야 하므로 전술한 내용을 고려한 내진 성능 향상 방안이 요구된다. 소성 힌지의 발생과 분포가 저층부에 집중하는 현상이 나타나지만

표 5. X방향 횡력 지지 시스템의 내진 성능

구분	밀면전단력 (kN)	최상층 변위 (mm)	유효 주기 Teff (sec)	유효 감쇠비 Deff
내진성능(I.O)	5,808	48.82	0.9582	12.33
내진성능(L.S)	성능점을 찾을수 없음			
내진성능(C.P)	성능점을 찾을수 없음			
등가정적해석	5,570	-	-	0.05

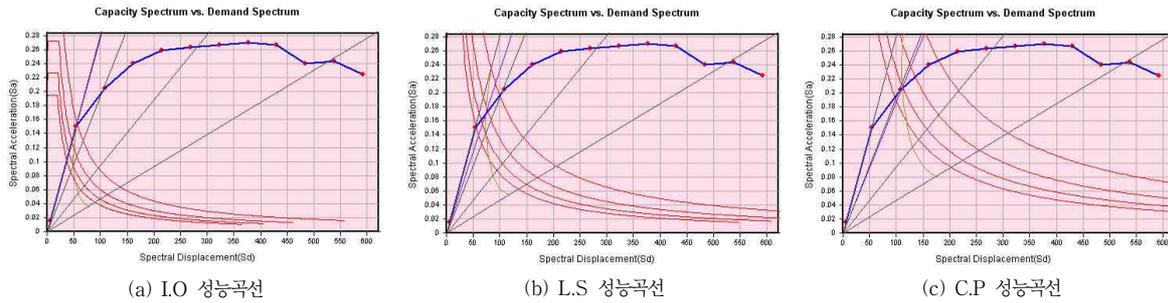


그림 4. Y방향 횡력 지지 시스템의 성능 곡선

전체적인 건물의 거동에 근거하여 판단할 때 설계 지진력에 대하여 양방향 모두 취성파괴의 양상을 보이므로 이에 대한 구조적 성능 향상이 요구된다.

3. 내진 보강 설계

3.1 제진장치를 이용한 보강 설계

설치가 비교적 용이하고, 유지관리 및 제작비용이 적게 드는 이력 댐퍼(hysteretic damper)를 본 구조물에 적용하였다. 댐퍼는 설계지진(L.S) 발생 시 소성변형에 의해 에너지를 흡수 하여야 하고, 최대고려지진(C.P) 시에도 입력되는 에너지에 충분한 안전성을 발휘할 수 있도록 설계되어야 한다.

이러한 성능을 구현하기 위해 가세형태로 설치되는 이력 댐퍼의 강성 K_s 는 설치될 층의 강성 K_j 보다 크고, 항복점은 낮도록 설계되어 주요 구조 부재들이 항복하기 전에 먼저 항복 구간에 들어가서 이력거동으로 소산시켜 피해를 줄일 수 있도록 고안된 장치이다. 댐퍼의 강성과 층 강성의 비를 의미하는 강성비 (K_s/K_j), 그리고 소성감쇠기의 항복강도는 에너지 소산을 결정짓는 중요한 변수이다.

본 구조물과 같은 학교의 경우 댐퍼를 적용하여 내진보강을 하면 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 있다. 또한 댐퍼에 토글의 작동원리를 적용하여 변위증폭을 통한 댐퍼의 효율을 극대화 할 수 있다.

3.2 댐퍼의 설계 과정

댐퍼의 항복내력은 아래의 식과 같이 휨에 의한 항복 내력과 전단에 의한 항복 내력 중에서 작은 값을 사용한다.

$$dP_y = n \times \min\{bP_y, sP_y\},$$

$$bP_y = \frac{tB^2\sigma_y}{2H}, \quad sP_y = \frac{2}{3} \frac{tB\sigma_y}{\sqrt{3}}$$

여기서, n = 스트럿의 개수, t = 댐퍼의 두께,
 H = 스트럿 직선부의 높이이다.
 H' 는 다음 식으로 구한다.

$$H' = n \times 2 \frac{r^2}{H + 2r}$$

댐퍼의 특성치 계산에 필요한 변수는 <그림 5>에서와 같이 이상화시켜 산정한다.

항복 변위는 다음의 식으로 산정된다.

$$\delta_y = b\delta_y + s\delta_y = \frac{1.5P_y H_T}{nEtB} \left[\left(\frac{H'}{B} \right)^2 + 2.6 \right]$$

여기서, $HT = H + 2r$, E = 탄성계수,
 G = 전단 탄성계수이다.

이 결과를 바탕으로 댐퍼를 설치한 기준층 개요도를 <그림 6>에 나타내었다. 모든 댐퍼는 강성 및 연성률이 가급적 비슷한 값을 가지도록 설계하였으며, 슬릿개수를 조정하여 설계 시 요

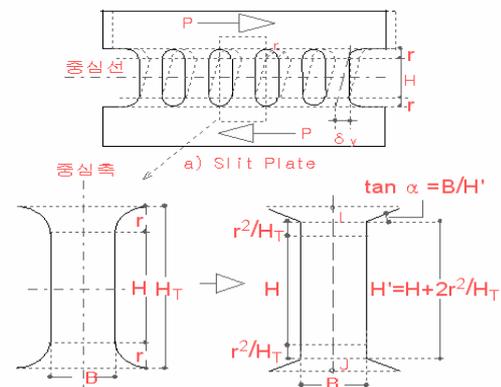


그림 5. 이력댐퍼 형상

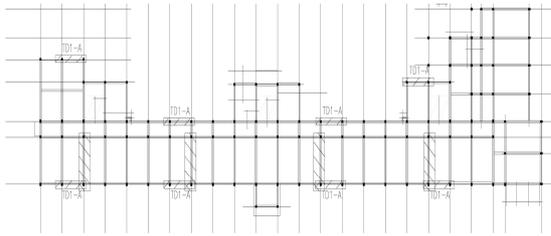


그림 6. 댐퍼 설치 배치도

구되는 항복강도를 구현할 수 있다. 건물의 비틀림 현상을 방지하고 적용 댐퍼의 성능을 최대한 발휘할 수 있도록 댐퍼를 배치하였다.

4. 보강 후의 내진 성능 검토

4.1 비탄성 해석

정적비탄성 해석은 기존 건물과 동일한 조건에서 해석을 수행하되 제진댐퍼의 거동은 구조해석 프로그램에서 제공하는 elasto-plastic 거동을 하는 spring요소를 사용하여 구현하였다.

4.2 댐퍼로 보강한 횡력 지지 시스템의 성능 평가

push-over 해석을 수행한 X방향 성능점을 <그림 7>에 표시하였다. 최대 밀면전단력이 기존 약 5,570 kN에서 9,593 kN으로 172% 정도 증대되어 이력댐퍼를 설치한 건물의 성능이

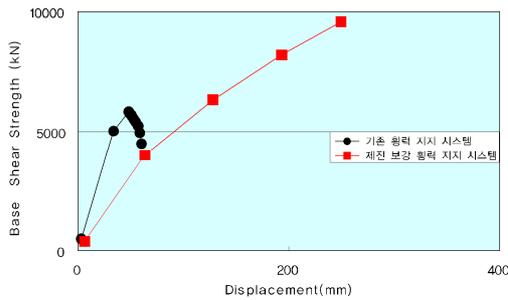
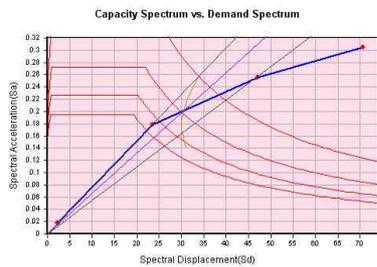
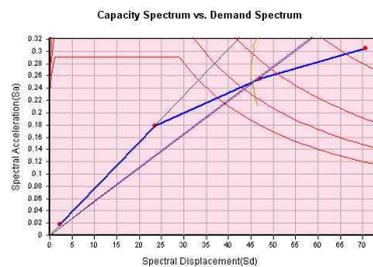


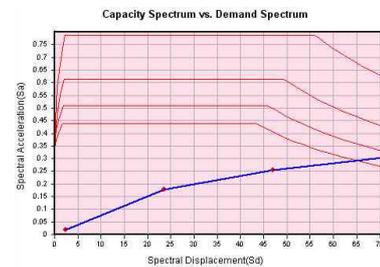
그림 7. 댐퍼를 사용한 X방향 Push-over Curve



(a) I.O 성능곡선



(b) L.S 성능곡선



(c) C.P 성능곡선

그림 8. 댐퍼를 사용한 X방향 성능 곡선

크게 향상되었을 뿐만 아니라 연성 능력이 향상되어 급격한 내력저하가 제거되었음을 확인할 수 있다.

내진 성능이 향상된 구조물의 I.O 레벨에서는 성능점이 elastic 영역으로 들어와 안정적인 거동을 보이며, C.P 레벨의 경우에는 밀면전단력이 6,099 kN으로 규준에서 정하고 있는 설계 지진력 5,570 kN보다 큰 값을 나타내고 있다<그림 8>. 성능점에서의 밀면 전단력은 증가하였고, 최상층 변위도 상당히 줄어들었으며, 유효 주기도 감소하였다<표 6>.

push-over 해석을 수행한 Y방향 성능점을 <그림 9, 10>에 나타내었다. X 방향과 유사하게 최대밀면전단력이 최대 지진력

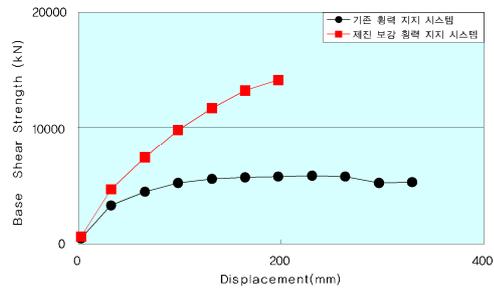


그림 9. 댐퍼를 사용한 Y방향 push-over Curve

표 6. X방향의 내진 성능 비교

		밀면전단력 (kN)	최상층 변위(mm)	유효 주기, T _{eff} (sec)	유효 감쇠비, D _{eff}
I.O	기존 횡력 지지 시스템, A	5808	48.82	0.9582	12.33
	제진 장치를 사용, B	6643	42.95	0.7812	9.49
	Ratio, B/A	1.14	0.88	0.82	0.77
L.S	기존 횡력 지지 시스템, A	성능점을 찾을수 없음			
	제진 장치를 사용, B	8204	63.46	0.8545	13.20
	Ratio, B/A	-	-	-	-
C.P	기존 횡력 지지 시스템, A	성능점을 찾을수 없음			
	제진 장치를 사용, B	성능점을 찾을수 없음			
	Ratio, B/A	-	-	-	-

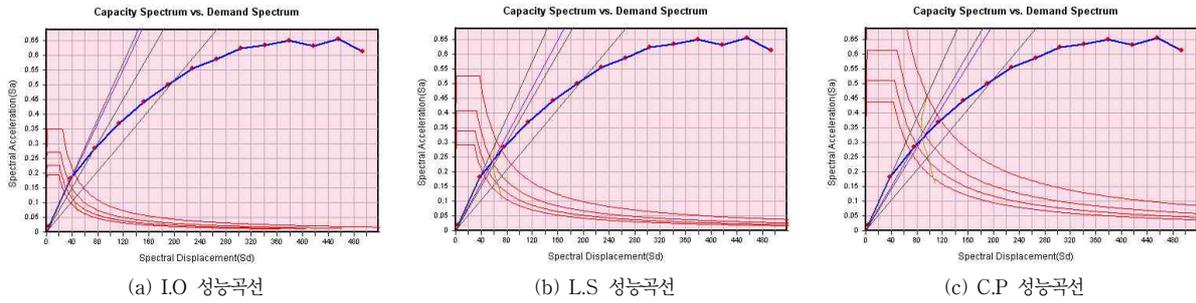


그림 10. 댐퍼를 사용한 Y방향 성능 곡선

(C.P) 시에도 충분한 성능을 확보하는 것으로 나타났다.

4.3 풍하중에 대한 성능검토

일반적으로 풍하중이 작용 시 이력댐퍼는 항복변위를 허용하지 않으며, 기존 모델의 경우와 같이 댐퍼 적용 모델도 충분한 강성을 유지하여야 한다.

<표 7>에 의하면 풍하중에 의한 기존 모델의 변위보다 댐퍼를 적용한 모델의 변위가 X, Y방향 모두 작게 산정되었다. 이는 댐퍼보강 모델이 탄성범위 이내인 풍하중에 대해서 충분한 안정적인 거동을 보여주는 것으로 판단할 수 있다.

4.4 지진하중에 대한 성능검토

댐퍼를 이용한 내진설계시 등가정적해석에 의한 설계 밀면전 단력을 산정하였다. 그러나 댐퍼를 이용한 내진설계는 응답계어 설계의 일종으로 비선형 동적해석을 통하여 댐퍼의 에너지소산 효과를 분석하였다.

본 비선형 동적해석에 사용된 지진파는 주파수 성분이 서로 다른 지진파와 지반성분이 비교적 안정된 지반에서 관측된 기록파(EI-Centro NS, Taft EW, Northridge EW)를 이용하여 KBC2005에 따라 본 구조물의 지반조건인 S_c 지반의 설계스펙트럼의 EPA에 적합하게 스케일을 조정한 후 I.O 수준, L.S 수준 및 C.P 수준의 해석을 실시하였다.

4.4.1 최대응답변위(mm)

<그림 11 ~ 13>은 I.O, L.S, C.P 수준별로 EI-Centro NS

표 7. 풍하중 변위

구분	X 방향(mm)		Y 방향(mm)	
	기준모델	댐퍼적용모델	기준모델	댐퍼적용모델
Roof	2.0937	1.5923	4.9299	4.2443
4F	1.6276	1.1386	4.5083	3.8455
3F	1.2093	0.8145	3.5207	2.9662
2F	0.6441	0.4263	1.9497	1.6289
1F	0	0	0	0

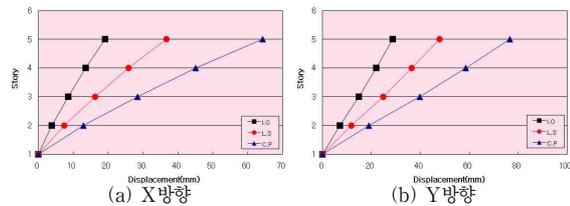


그림 11. EI-Centro NS 지진파에 대한 최대응답변위

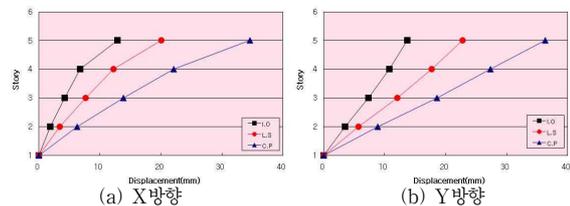


그림 12. Taft EW 지진파에 대한 최대응답변위

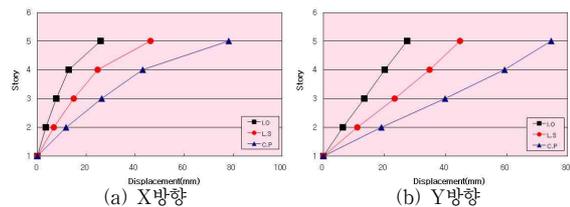


그림 13. Northridge EW 지진파에 따른 최대응답변위

지진파, Taft EW 지진파, Northridge EW 지진파에 대한 최대응답변위를 X, Y방향으로 보여준다.

4.4.2 최대응답가속도(mm/sec²)

<그림 14 ~ 16>은 I.O, L.S, C.P 수준별로 EI-Centro NS 지진파, Taft EW 지진파, Northridge EW 지진파에 대한 최대응답가속도를 X, Y방향으로 보여준다.

4.4.3 층전단력(kN)

<그림 17 ~ 19>는 I.O, L.S, C.P 수준별로 EI-Centro NS 지진파, Taft EW 지진파, Northridge EW 지진파에 대한 층전단력을 X, Y방향으로 보여준다. 지진파 수준에 따라 차이는

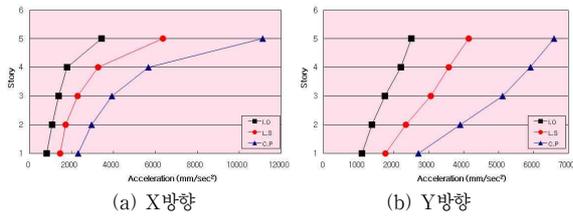


그림 14. El-Centro NS 지진파에 대한 최대응답가속도

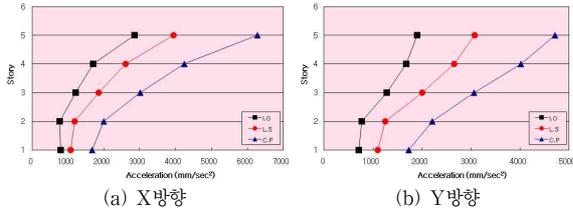


그림 15. Taft EW 지진파에 대한 최대응답가속도

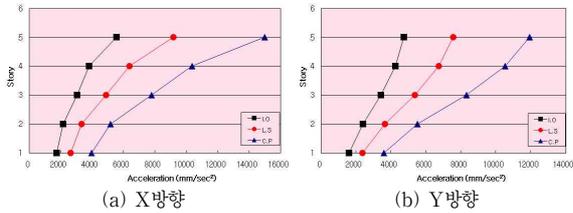


그림 16. Northridge EW 지진파에 대한 최대응답가속도

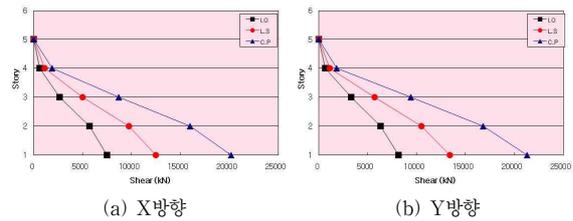


그림 17. El-Centro NS 지진파에 대한 층전단력

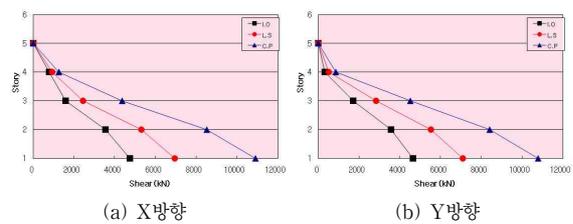


그림 18. Taft EW 지진파에 대한 층전단력

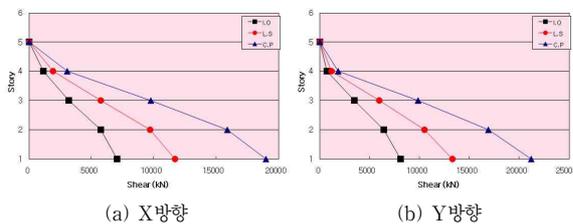


그림 19. Northridge EW 지진파에 대한 층전단력

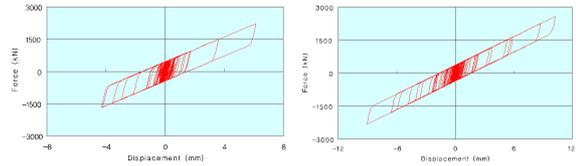


그림 20. EL Centro NS 지진파(C.P)에 대한 댐퍼의 이력거동

있으나 댐퍼로 보강할 경우 I.O에서는 28.60 mm, L.S에서는 47.79 mm, C.P에서는 78.21 mm 정도의 변위를 일으키고 있어, C.P수준의 지진에서도 본 구조물은 기능수행 수준에 있는 것으로 판단되었다.

4.4.4 각 지진파에 따른 댐퍼의 이력곡선(kN-mm)

<그림 20>은 C.P 수준의 El-Centro NS 지진파에 대한 1층 댐퍼의 방향별 이력거동을 나타낸다. 입력되는 지진 에너지가 댐퍼의 안정적인 이력거동으로 충분히 소산되고 있음을 알 수 있다.

5. 맺음말

1980년대에 내진설계가 적용되기 전에 준공된 본 건물은 X, Y방향 모두 최대내력 이후에 급격한 내력저하와 더불어 파괴에 이르는 것으로 나타나 내진성능을 만족시키지 못하는 것으로 판정되었다. 강제 이력댐퍼를 사용한 결과 규준에서 정하고 있는 밀면 지진력 보다 큰 내력을 나타냈으며, 힌지가 건물전체에 고르게 발생하여 연성능력을 향상시키는 것으로 나타났다.

주요 역사 지진파에 대한 비선형 동적해석 수행결과, C.P수준의 지진에 대해서도 기능수행 수준에 머물러 안전한 것으로, 댐퍼는 안정적으로 에너지를 소산하고 있는 것으로 나타나 댐퍼에 의한 보강성능을 확인할 수 있었다. ▣

담당 편집위원 : 양인환(군산대학교) ihyang@kunsan.ac.kr