

강재댐퍼를 적용한 역사 건물의 내진 응답

Seismic Resistance Response of Railway Station Building Retrofitted by Metallic Dampers

이 현 호^{1)*}

Lee, Hyun Ho

Abstract

The purpose of this research is a seismic capacity evaluation and strengthening of existing railway station buildings, which were constructed before the seismic design code activated. The seismic capacity of 2nd story RC station building is evaluated by using nonlinear time-history analysis. Analysis results are checked by story drift ratio and story shear, which are described in design code. As a result, the story shears are exceeding the base shear of the design code, the appropriate seismic strengthening methods are needed. To improve the seismic capacity, metallic dampers are used. Evaluation parameters are metallic damper shape and damper installation methods. Dampers are installed in four places in X and Y directions of station buildings. By reviewing of time-history analysis results, the metallic damper, which is installed inverted K-brace type, shows a better seismic performance than other damper shape and installation methods.

Keywords : Metallic Damper, Railway Station Building, Slit Damper, Honeycomb Damper

1. 서론

하루 이용객이 6백만 명에 이르는 서울 지하철의 내진 성능 예비평가결과, 뚝섬, 성수, 건대입구, 구의, 강변, 성내, 대림, 구로디지털단지, 신대방, 당산, 지축, 당고개, 상계, 노원, 동작역 등 15개역사 건물의 내진보강이 필요한 것으로 평가되었다. 이는 예비평가로 보다 정밀한 상세 평가가 필요하지만, 최근 국내외에 발생하는 지진피해사례로부터, 규모 6.0 이상의 강진이 국내 지하철에 발생할 경우 수많은 인명 및 재산피해가 예상된다. 하지만, 이에 대한 내진보강은 2010년 이후에야 이루어질 예정이어서 지하철 및 역사의 안전에 심각한 문제가 있음을 유추할 수 있다. 본 논문에서는 내진설계기준 이전에 지어진 지상 2층 RC 역사건물의 내진성능을 평가하고, 평가결과 부족한 내진성능을 현재 국내에서 많이 사용되고 있는 강재댐퍼(metallic damper)를 적용하여, 가능성을 평가하고자 한다. 보강 변수로는 2 종류의 강재댐퍼 형상 및 3 종류의 설치 방법이다.

2. 역사 성능 평가

2.1 대상 건물

평가 대상은 1977년 준공된 지상 2층 역사 건축물로 Fig. 1과 같다. 대상건물의 지진위험도는 0.11g이며, 지반조건은 Sc이다. 대상건물은 철근콘크리트 라멘조로, 사용된 콘크리트 압축강도 f_{ck} 는 18 MPa이며, 철근의 항복강도 f_y 는 300MPa이다. 주요 평면 및 단면을 Fig. 2에, 주요 배근사향을 Table 1에 나타내었다. Fig. 1에 보이는 바와 같이 대상 건물골조가 계단실과 연결되어 있어 수평강성을 일정부분 확보하고 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 철도역사는 공공시설로서의 기능 때문에 설계기준(응답스펙트럼 해석)에 의한 내진성능 평가와 아울러 실제 지진기록을 이용한 내진성능 평가도 필요한 것으로 판단된다.

본 연구에 사용한 지진기록은 Sc지반에서 수집된 지진



Fig. 1 Target railway station building

1) 정희원, 동양대학교 건축소방행정학과 교수, 공학박사

* Corresponding author : hhlee@dyu.ac.kr 054-630-1165

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2010년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

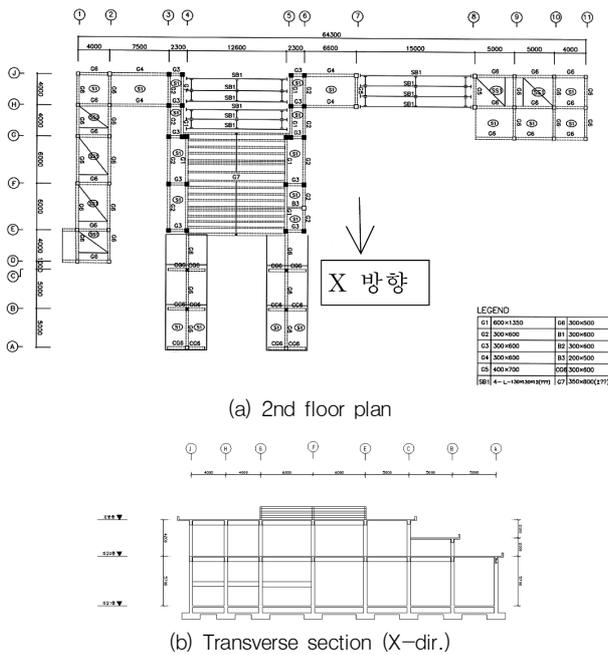


Fig. 2 Plan and section of railway station building

Table 1 Member list

부재명	배근상세	부재명	배근상세
C1 400×400	주 근 8-D25 띠철근 D10@150	2G6 300×500	상부근 3-D25 하부근 3-D25 스터럽 D10@200
C2 600×600	주 근 12-D25 띠철근 D10@150	2G7 300×500 RG1, RB1	상부근 4-D25 하부근 8-D25 스터럽 D10@200
C3 600×600	주 근 12-D25 띠철근 D10@150	2CG6 300×600 RCG3	상부근 6-D25 하부근 2-D25 스터럽 D10@200
C4 350×470	주 근 6-D25 띠철근 D10@150	RG3 300×500	상부근 3-D25 하부근 2-D25 스터럽 D10@200
C6 500×900	주 근 10-D25 띠철근 D10@300	mG1 250×400	상부근 2-D25 하부근 2-D25 스터럽 D10@200
2G1 600×1350	상부근 4-D25 하부근 4-D25 스터럽 D13@300	mG2 200×400	상부근 2-D25 하부근 2-D25 스터럽 D10@200
2G1 300×600 2G4, RG2	상부근 5-D25 하부근 3-D25 스터럽 D10@200	mG3 300×600	상부근 3-D25 하부근 3-D25 스터럽 D10@200
2G3 300×600 RG1A	상부근 3-D25 하부근 3-D25 스터럽 D10@250		
2G5 400×700	상부근 4-D25 하부근 4-D25 스터럽 D10@300		

기록(이현호, 2008)으로 KBC 2005의 응답스펙트럼과 응답이 유사한 것을 선정하였다. Table 2에 사용 지진기록의 특성을 나타내었다.

Table 2 Earthquake records list

지진기록명	Date D/M/Y	Comp.	PGA cm/sec ²
Loma Prieta	18/10/89	EW	106
Loma Prieta	18/10/89	NS	69
San Fernando	09/02/71	EW	112
San Fernando	09/02/71	NS	119
Cape Mendicino	25/04/92	EW	112
Cape Mendicino	25/04/92	NS	114

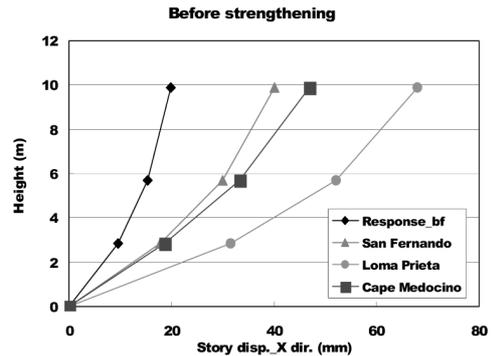


Fig. 3 Comparison of story disp.

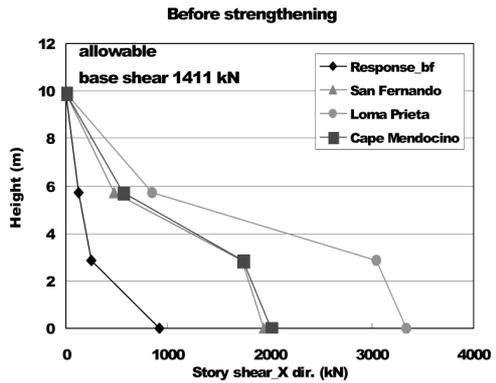


Fig. 4 Comparison of story shear

2.2 보유 내진성능 평가

Fig. 3에 KBC 2005 설계기준의 응답스펙트럼에 의한 수평 변위를 X방향에 대하여 정리하였다. 이에 의하면 설계기준에 의한 층간변위비(1.5%)를 초과하지 않는 것으로 평가되었다. 이는 높이 5.7m의 2층과 지반사이 중간에 위치한 높이 2.85m의 1층 중간보가 외부에 설치된 통로계단과 연결되어, 이에 의한 횡변위 구속 효과에 기인한 것으로 판단된다. 본 논문에서 나타내지 않았지만 전반적으로 Y방향보다 X방향의 응답이 큰 것으로 평가되었으며, 지반 높이 2.85m의 1층 중간보 및 5.7m 2층부분의 수평 변위가 크음을 확인할 수 있었다. 국내기준에서 포함되지 않았지만, 미국 내진기준에서 채택하고 있는 재현주기 2400년의 붕괴방지 수준의 최대가능지진에 대한 층간변위비를

검토한 결과, Cape Mendocino 지진기록 사용시 규준에 의한 층간변위비를 초과하는 것으로 또한 평가되었다.

KBC 2005에 의한 허용 밀면전단력(base shear)은 1411kN으로 산정할 수 있으며, 이를 Fig. 4에 지진기록 사용에 따른 각 층 전단력과 같이 정리하였다. 이에 의하면 설계기준의 응답스펙트럼에 의한 밀면전단력은 KBC 2005의 허용 밀면전단력을 하회하여 안전한 것으로 평가되었다. 그렇지만 지진기록에 의한 밀면전단력은 설계기준보다 크게 나타나 기둥의 전단내력이 부족한 것으로 평가할 수 있으며, 특히 본 논문에서 나타내지 않은 Y 방향 대비 X방향에 많은 전단력이 작용됨을 확인할 수 있었다. 결과적으로 설계수준 지진기록사용에 따른 대상 역사의 보유 층전단력은 부족한 것으로 평가되어, 적절한 내진보강이 필요한 것으로 판단된다. 따라서 변위 보강보다는 강도보강에 중점을 두어 제진설계를 수행하였다. Y방향 보강은 필요 없는 것으로 평가되었으나 X방향 보강시의 상대강성을 고려하여, 최소한의 보강을 적용하였다. 따라서 X방향을 중심으로 댐퍼를 보강하였으며, Y방향도 최소한의 댐퍼를 설치하였다.

3. 댐퍼 선정 및 해석 변수

3.1 강제댐퍼 선정

강제댐퍼는 강재의 소성변형을 이용한 이력 댐퍼(hysteretic damper)의 한 종류로서 지진으로 인하여 건축물에 발생하는 관성력을 흡수하기 위한 제진장치이다. 가새 형태로 층 사이에 설치되는 강제댐퍼의 강성은 설치될 층의 강성보다 크고, 항복점은 낮도록 설계되어 주요 구조부재들이 항복하기 전에 소성 변형에 들어가서 이력에너지로 입력에너지를 소산시켜 구조 요소들이 항복하지 않거나 혹은 피해를 줄일 수 있도록 고안된 장치이다. 따라서 본 연구 대상처럼 사용이 빈번하며, 많은 사람들이 이용하는 역사의 경우, 제진 댐퍼를 적용하여 내진보강을 하면 고가의 마감재 피해를 줄일 수 있고, 기존 구조물의 보강을 최소화 할 수 있으며, 지진 발생 후에도 댐퍼만의 소성변형에 의해 지진에너지를 흡수하고, 골조는 큰 손상 없이 탄성에 머물도록 설계할 수 있으며, 지진에 의해 손상된 댐퍼판을 교체하면 건물의 장수명화가 가능한 매우 경제적인 시스템이라 할 수 있다.

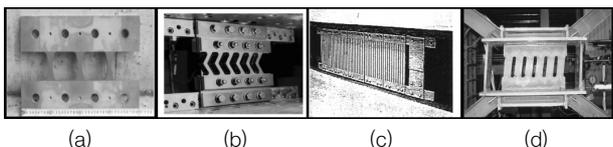


Fig. 5 Metallic damper (a) Honeycomb damper (b) Okumuragumi damper (c) Mitsui slit damper (d) Domestic slit damper

이러한 강제댐퍼중 실용화는 일본을 중심으로 많이 이루어졌으며, 국내에서도 일본의 댐퍼형상을 개량한 댐퍼 등이 사용되고 있다. Fig. 5에 개발된 이력댐퍼의 형상을 정리하였다.

이중 국산제작 슬릿댐퍼 설계 강도(오상훈, 2006)는 아래 식(1)과 같이 산정할 수 있다.

$$Q_u = n \times \min\{Q_{yb}, Q_{yds}\} \quad (1)$$

여기서, n =플레이트 1장에 포함된 댐퍼의 개수

$$Q_{yb} = \frac{t \cdot B^2 \cdot \sigma_y}{2H'} \quad (2)$$

Q_{yb} = 전소성모멘트에 의한 항복내력

$$Q_{ys} = \frac{2}{3} \frac{t \cdot B \cdot \sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

Q_{yb} =전단력에 의한 항복내력

t =댐퍼의 두께, B =댐퍼의 폭, H =댐퍼 높이

$$H' = H + 2 \cdot \frac{r^2}{H + 2r} \quad (4)$$

허니컴댐퍼의 국내 적용 사례는 없지만, 해석적 연구(박지형 외 3인, 2006)가 진행되었으며, 설계절차는 아래와 같다.

$$Q_1 (kN) = \text{전소성모멘트에 의한 항복내력} \\ = 0.005b_0 t f_y \quad (5)$$

$$Q_2 (kN) = 1.6 Q_1 \quad (6)$$

여기서 b_0 =댐퍼소성변형부의 최소폭(mm)

t =댐퍼판 두께(mm)

σ_y =강재 항복점(N/mm²)

본 연구에서는 국내에서 적용가능한 슬릿댐퍼와 허니컴댐퍼를 사용하였으며, Fig. 4의 평가결과와 같이 부족한 전단력을 위의 식 (1)~(6)을 적용하며 강제댐퍼의 주요 제원을 산정하였다. 주요 제원은 Table 3과 같으며, 형상은 Fig. 6 (a)와 같다. 주요 보강사항은 아래와 같다.

- X방향(선로방향) : 스트럿 높이 200 mm, 개수 12개인 이력댐퍼 2개소 보강
- Y방향(직각방향) : 스트럿 높이 200 mm, 개수 3개인 이력댐퍼 2개소 보강

여기서 허니컴댐퍼는 슬릿댐퍼와 유효강성이 동일하도록 댐퍼의 특성치를 조정하였으며, 형상은 Fig. 6 (b)와 같다.

Table 3 Material properties of slit damper

재료 특성		이력댐퍼 제원	
항복강도 σ_y (N/mm ²)	240	두께 t (mm)	13
인장강도 σ_t (N/mm ²)	410	폭 B (mm)	60
탄성계수 E (kN/mm ²)	210	높이 H (mm)	200
		곡률반경 r (mm)	20
		스트럿 높이 H ^T (mm)	240
		유효높이 H' (mm)	203.3

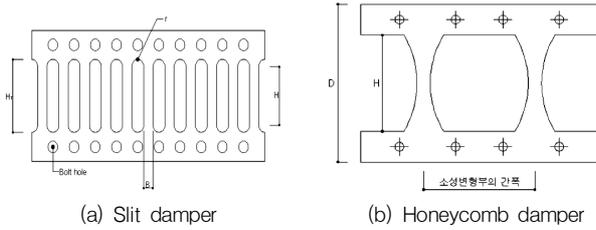


Fig. 6 Considering metallic damper

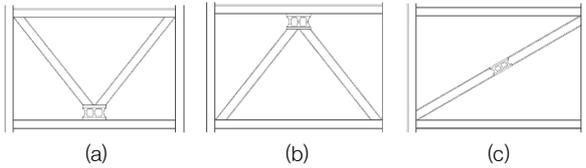


Fig. 7 Installation methods of damper (a) Inversed K type brace (b) K type brace (c) Inclined brace

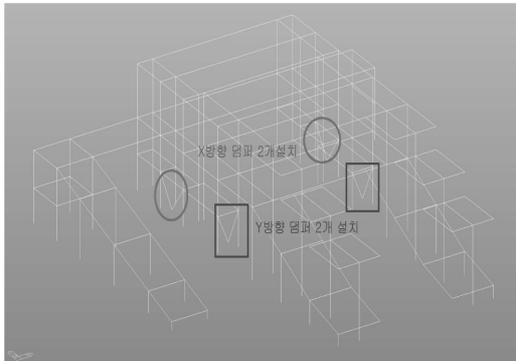
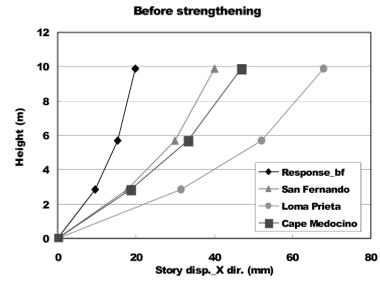


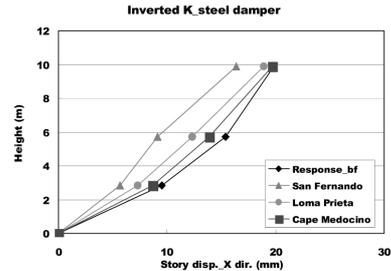
Fig. 8 Damper installation layout

3.2 해석 변수

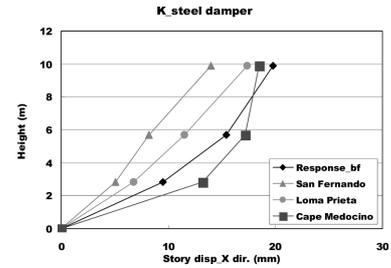
탄소성 구조해석 전용프로그램(MIDAS 및 SNAP)을 이용하여 지진기록을 사용한 비선형 동적해석을 수행하였으며, 본 연구에서 적용한 해석변수는 아래와 같다. 여기서 댐퍼는 설치방법을 변수로 역 K형 브레이스(브레이스가 하부 중앙으로 모임)를 기준으로, K형 브레이스(브레이스가 상부 중앙으로 모임), 비교대상으로 경사 브레이스 중간에 댐퍼를 설치하는 댐퍼 설치 방법도 해석 변수로 고려하였다. 자세한 내용은 Fig. 7과 같으며, Fig. 8에 댐퍼 배치도를 나타내었다.



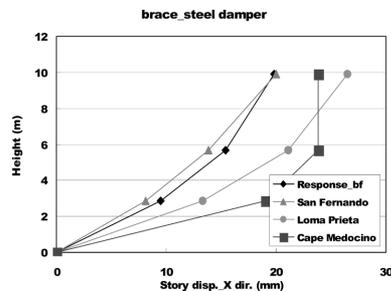
(a) Before strengthening



(b) Inversed K type brace strengthening



(c) K type brace strengthening



(d) Inclined brace strengthening

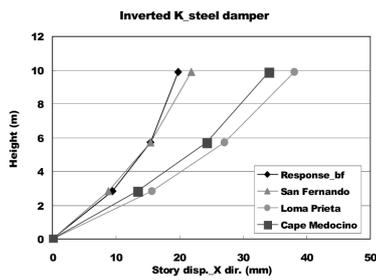
Fig. 9 Story disp. comparison of slit damper

- 댐퍼 종류 : 슬릿댐퍼, 허니컴댐퍼
- 지진 기록 : San Fernando(1971), Loma Prieta(1989), Cape mendocino(1992)
- 댐퍼 설치 방법 : K형 브레이스, 역 K형 브레이스, 경사 브레이스

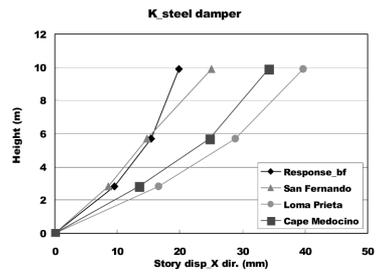
4. 댐퍼 보강효과 평가

4.1 수평 변위

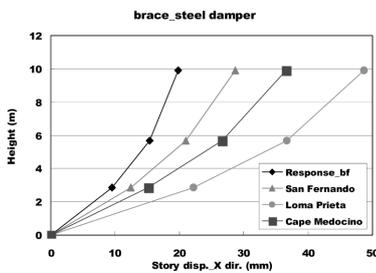
Fig. 9 및 Fig. 10에 슬릿댐퍼 및 허니컴댐퍼를 적용한



(a) Inverted K type brace strengthening



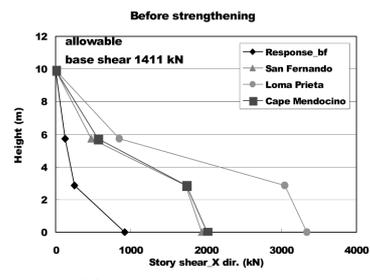
(b) K type brace strengthening



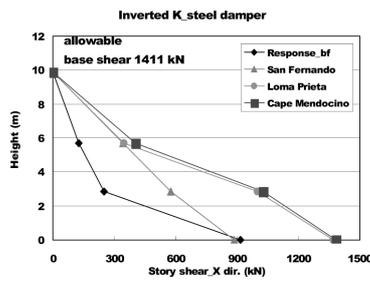
(c) Inclined brace strengthening

Fig. 10 Story disp. comparison of honeycomb damper

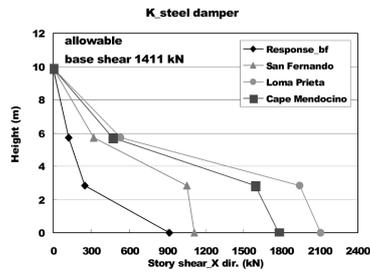
구조물의 X 방향 수평변위를 나타내었다. 그래프에서 5.7m가 이층이며, 일층높이는 2.85m이다. Fig. 9 (a)의 보강전 층변위를 보면, 설계기준 응답스펙트럼해석에 의한 층변위를 3개 지진기록 사용시 층변위가 초과하는 것으로 나타났으나, Fig. 9 (b)의 역 K형 브레이스는 보강 후 3개 지진기록사용에 의한 층변위가 설계 응답스펙트럼해석보다 작게 나타나 명확한 댐퍼보강효과를 확인하였다. Fig. 9 (c)의 K형 브레이스는 1개 지진기록 응답이, (d)의 경사 브레이스는 2개 지진기록 응답이 설계 응답스펙트럼해석의 층변위보다 크게 나타나 역 K형 브레이스보다 보강효과가 다소 떨어지는 것으로 평가되었다. 즉 역 K형 브레이스는 2개 지진기록에 의한 층변위가, K형 브레이스는 및 경사 브레이스는 3개 지진기록에 의한 층변위가 설계 응답스펙트럼의 층변위보다 크게 나타나, 댐퍼 보강효과가 미흡함을 확인할 수 있었다. 하지만 이는 허니컴댐퍼 선정시 댐퍼의 유효강성을 슬릿댐퍼와 똑같도록 조정한 결과이므로, 향후 이에 대한 보완연구가 필요하다.



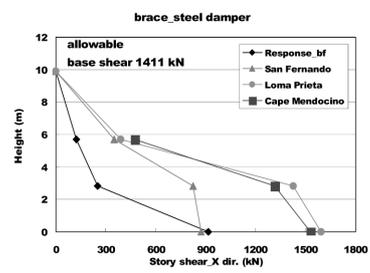
(a) Before strengthening



(b) Inverted K type brace strengthening



(c) K type brace strengthening

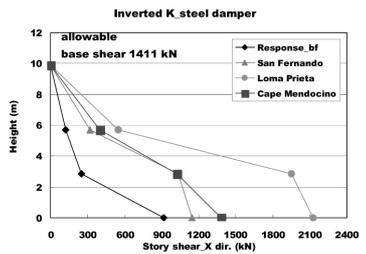


(d) Inclined brace strengthening

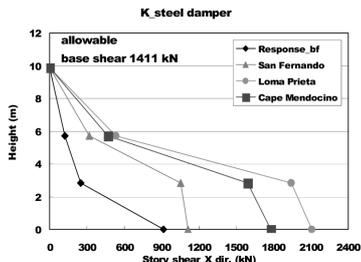
Fig. 11 Story shear comparison of slit damper

4.2 층전단력

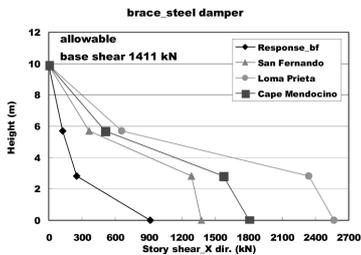
Fig. 11 및 Fig. 12 에 슬릿댐퍼 및 이력댐퍼를 적용한 X 방향 역사구조물의 층전단력을 나타내었다. Fig. 11 (a)의 보강전 결과를 살펴보면, 응답스펙트럼 해석에 의한 밀면전단력은 설계기준의 1411 kN을 하회하여 안전한 것으로 나타났으나, 지진기록사용에 의한 밀면전단력은 설계기준을 월등히 초과하는 것으로 평가되었다. 부족한 전단력을 댐퍼로 보강한 결과, 역 K형 브레이스 및 K형 브레이스는 3개 지진기록 보강에 대하여 충분한 전단 보강성을 발휘하는 것으로 평가되었다. 반면 경사 브레



(a) Inverted K type brace strengthening



(b) K type brace strengthening



(c) Inclined brace strengthening

Fig. 12 Story shear comparison of honeycomb damper

이스는 2개의 지진기록에 대하여 전단내력이 부족한 것으로 나타났다. Fig 12의 허니콤댐퍼 적용 경우, 역 K형 브레이스는 1개의 지진기록에, K형 및 경사 브레이스는 2개의 지진기록 응답이 설계기준 1411 kN을 초과하는 것으로 평가되었다.

이상의 결과로부터 슬릿댐퍼를 역 K형 브레이스로 보강한 결과가 설계기준을 만족하는 충분히 안전한 방법으로 판단된다.

4.3 댐퍼 및 기둥 거동

이상의 연구결과로부터 슬릿댐퍼 및 역 K형 보강 방법의 내진보강효과를 확인할 수 있으며, Fig. 13에 Cape Mendocino 지진기록을 사용한 역 K형 브레이스 슬릿댐퍼의 이력거동을 나타내었다. 이에 의하면 안정된 댐퍼의 이력거동을 나타내었는데, 댐퍼 항복후 충분한 소산 거동을 확인할 수 있었다. 또한 역사 1층 중앙 기둥의 비탄성 거동특성을 Fig. 14에 각 지진기록에 대하여 나타내었다. 이에 의하면 슬릿댐퍼 제진보강에 의하여 기둥에 작용하는 모멘트와 회전변형이 현저히 저감됨을 확인할 수 있었다.

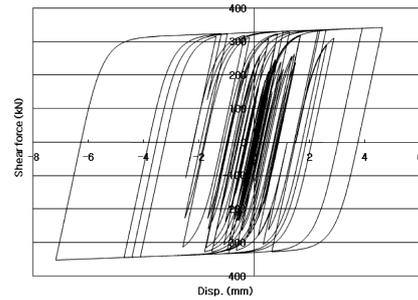
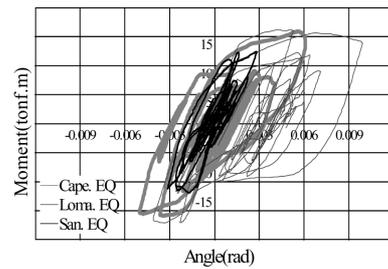
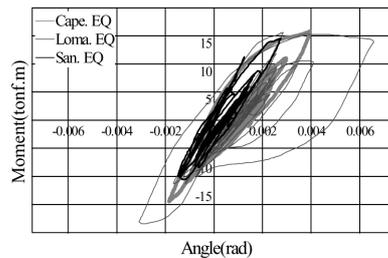


Fig. 13 Hysteretic behavior of slit damper by Cape Mendocino EQ.



(a) Before Strengthening



(b) After Strengthening

Fig. 14 Hysteretic behavior of middle column

5. 결론

내진설계 이전에 건설된 저층 RC 역사의 내진성능을 지진기록을 사용한 비선형 시간이력해석으로 평가한 결과, 부족한 밀면전단력을 국내에서 사용량이 증가하고 있는 강재댐퍼로 보강하였다. 댐퍼 보강효과를 평가하기 위하여 지진기록을 이용한 비선형 시간이력해석을 수행하였으며, 해석변수로는 댐퍼 종류, 보강공법, 지진기록이다. 이에 의하면 슬릿댐퍼를 역 K형 브레이스로 보강하는 방법이 가장 효율적인 것으로 평가되어 적절한 보강공법으로 평가되었다.

또한 같은 지반조건이라도 지진기록 종류에 따라 응답 특성이 많이 차이가 있으므로, 지진기록을 선정하는 절차의 체계화가 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2009년 국토해양부 도시철도표준화 3단계 연구개발 사업의 연구비지원에 의해 수행되었습니다. 이

에 감사드립니다.

참고문헌

1. 대한건축학회, 건축구조설계기준(KBC 2005), 기문당, 2005.
2. 박지형외 3인, “강재 이력댐퍼의 특성과 댐퍼적용효과 평가방법에 관한 연구”, 대한건축학회 2006년 학술발표대회 논문집, 26권, 1호, 2006, pp.33-3
3. 오상훈, 강재댐퍼를 이용한 제진구조의 성능 및 내진설계법, 한국면진제진협회 기술강습회 자료집, 2006, pp. 11-35.
4. 오상훈외 4인, “탄소성 이력댐퍼를 부착한 기둥-보 접합부의 이력거동”, 대한건축학회 2005년 학술발표대회 논문집, 25권, 1호, pp.635-638.
5. 이현호, “지진기록 사용에 따른 고층 면진건물의 동적 응답”, 한국콘크리트학회, Vol. 10, No.5, 2008, pp.643-651.
6. 泰雅史 외 3인, “極低降伏点鋼用いたエネルギー吸収ダンパーに関する研究(その1 基本特性)”, 日本建築學會大會學術講演概要集, 1997, pp.853-854.
7. T.T.Soong, G.F.Dargush, Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, John Wiley & Sons, 1997

(접수일자 : 2009년 9월 22일)
(심사완료일자 : 2009년 11월 11일)

요 지

본 연구의 목적은 내진규준이 적용되기 이전에 건설된 역사건물의 내진성능 평가 및 내진보강이다. 이를 위하여 2층 RC 역사건물의 내진성능이 평가되었다. 동적해석에 의한 층간변위비 및 층전단력 평가결과, 층전단력이 설계기준의 밀면전단력을 초과하는 것으로 평가되어 적절한 내진보강이 필요한 것으로 평가되었다. 내진성능 향상을 위하여 총 4개의 강재댐퍼가 사용되었다. 해석 변수는 강재댐퍼 형상 및 설치 방법이다. 동적해석결과 역 K가새로 설치되는 슬릿댐퍼가 다른 댐퍼 형상 및 설치 방법보다 우수한 내진성능을 가진 것으로 평가되었다.

핵심 용어 : 강재댐퍼, 역사 건물, 슬릿댐퍼, 허니컴댐퍼
