

곡률이 있는 이력형 스트립 댐퍼의 감쇠 성능 평가

Damping Performance Evaluation of Hysteretic Strip Damper with Curvature

이재원¹ · 김동백^{2*} · 김용곤³ · 최정호⁴ · 김종훈⁵Jae Won Lee¹, Dong Baek Kim^{2*}, Yong Gon Kim³, Jeong Ho Choi⁴, Jong Hoon Kim⁵¹Ph D Course, Department of Civil & Environment Engineering, Hankyong National University, Anseong, Republic of Korea²Honorary Professor, Construction Engineering Research Institute/ Department of Civil & Environment Engineering, Hankyong National University, Anseong, Republic of Korea³Professor, Construction Engineering Research Institute/ Department of Social Safety System Engineering, Hankyong National University, Anseong, Republic of Korea⁴Professor, Construction Engineering Research Institute/ Department of Civil & Environment Engineering, Hankyong National University, Anseong, Republic of Korea⁵Ph D Course, Department of Civil & Environment Engineering, Hankyong National University, Anseong, Republic of Korea

*Corresponding author: Dong Baek Kim, dbkim@hknu.ac.kr

ABSTRACT

Purpose: The purpose of this study is to improve the irregularity of the stress-strain curve and to ensure accuracy when calculating the damping effect by preventing members from moving in the off-plane direction due to eccentricity when loads are applied. **Method:** The specifications of the steel strips used in this study are the same, but the curvature of the strips to constitute each damper is different. Each steel strip with different curvature was arranged in an triangle, three dampers with different curvature were made, and repeated load tests were conducted, and the amount of energy dissipation was calculated to measure the performance of the damper. **Result:** The amount of energy dissipation significantly decreases compared to the case where there is no initial curvature, and the change in the test energy dissipation amount according to the size of the curvature is not large, and the presence or absence of the hyperbolic rate is considered an important variable. **Conclusion:** The period is about 78.7% longer from $T=0.3$ to $T=0.536$ sec, and the response spectrum acceleration is reduced from $S_a=0.54$ g to $S_a=0.229$ g, so the damping effect of the damper is sufficient.

Keywords: Energy Dissipation, Curvature, Period, Response Spectrum Acceleration, Damping Effect

Received | 21 July, 2023

Revised | 5 September, 2023

Accepted | 7 September, 2023

 OPEN ACCESS


This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in anymedium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

요약

연구목적: 이력형 댐퍼에 하중이 작용할 때 편심에 의해서 부재가 면외 방향으로 거동하는 것을 방지하여 응력-변형률 곡선의 불규칙성을 개선하고 감쇠효과의 계산 시 정확성을 기하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다. **연구방법:** 본 연구에서 사용하는 강재 스트립의 제원은 동일하게 하되 각각의 댐퍼를 구성할 스트립의 곡률은 다르게 한다. 곡률이 다른 각각의 강재 스트립을 댐퍼 1개당 3개씩 정삼각형으로 배치하여 곡률이 다른 5개의 댐퍼를 제작한 후 반복하중 실험을 수행하고, 에너지 소산량을 계산하여 댐퍼의 감쇠능을 측정하였다. **연구결과:** 시험 결과, 댐퍼 중에서 초기곡률이 조금이라도 있는 경우는 없는 경우보다 에너지 소산량은 상당히 감소하지만, 곡률의 크기에 따른 에너지 소산량의 변화는 크지 않으며, 곡률의 유무가 중요한 변수로 사료된다. **결론:** 댐퍼를 적용한 해석적 검토에서 주기는 $T=0.3$ sec에서 $T=0.536$ sec로 약 78.7% 정도 장주기화 되었고, 응답 스펙트럼 가속도는 $S_a=0.54$ g에서 $S_a=0.229$ g로 줄었으므로 댐퍼의 감쇠효과는 충분히 존재한다.

핵심용어: 에너지 소산, 곡률, 주기, 응답 스펙트럼 가속도, 감쇠효과

서론

내진이란 지진력을 이겨내는 역학적 특성을 의미하며 내진설계는 지진력을 견딜 수 있도록 구조물을 이루고 있는 각 구성 요소를 역학적으로 보강하는 방법이고, 제진이란 지반 가속도로 인한 수평력이 구조물에 전달되는 파동에 대응하는 파동을 반대 방향으로 작용시켜서 건물의 진동을 제어하는 방법이다(Lee et al., 2009). 또한, 면진은 지반으로부터 구조물에 전달되는 파동 자체를 줄이거나 거의 없애는 데 중점을 둔 지진의 제어방법이다(Lee et al., 2019). 본 연구에서는 경제적 이유로 내진 또는 제진설계 및 시공이 어려운 저층 콘크리트 구조물에 적용하기 편리하고 시공성 및 경제성이 탁월한 댐퍼를 제안하고자 한다. 곡률이 있는 강재 스트립 댐퍼(Steel Strip Damper with Curvature)를 제작하여 이론적인 배경을 확립하고 실험적 및 해석적인 검토를 통하여 그 가능성을 파악하며 강재 이력형 댐퍼에 대한 타 연구의 기초자료로 사용하고자 한다.

연구동향

면진 재료로 빈번히 사용되는 납층이나 고무층은 하중이 한곳으로 집중될 때 재료의 손괴로 인하여 효과가 떨어지는 단점이 있는데, 최근 일본의 구마모토에서는 납이나 고무 대신 강철구와 스테인리스 강판을 일체화한 장치를 7층 건물과 지반 사이에 삽입한 면진장치를 적용하였으며, 규모 7.4의 강진이 발생했을 이 구조물은 건물 피해가 거의 없었다고 알려져 있다. 우리나라에서는 Lee et al.(2019)은 콘크리트 볼 기초를 이용하여 기초분리의 개념을 적용한 면진방법을 제안했으며, Lee et al. (2009)은 ER 댐퍼의 동적 모델링의 연구에서 유체의 압축성을 고려하여 ER 유체와 MR 유체를 이용한 감쇠장치의 가능성을 제기하였고, Chang et al.(2017)은 MR 댐퍼해석을 위한 유압회로 모델에 대한 연구에서 변위-감쇠력의 관계와 속도-감쇠력의 실험적 예측가능성을 제기하였다. 또, Hur et al.(2015)은 CBD 시스템으로 보강된 비내진 RC 골조의 내진성능 평가방법을 제안하였으며, Lee et al.(2015)은 강재 이력형 감쇠장치와 회전 마찰형 감쇠장치를 결합한 복합-마찰 감쇠장치를 제안하였다.

연구내용 및 방법

CBD 시스템 등의 강재 이력형 스트립 댐퍼에서는 편심좌굴로 인한 “하중-변위 이력곡선의 불규칙성” 때문에 에너지 소산량의 정확한 계산이 어려운 문제가 발생하는데, 이를 해결하기 위한 방편으로 본 연구에서는 강재 스트립에 곡률을 부여하여 강재 이력형 댐퍼를 제작한다. 강재 스트립의 제원은 기본 길이 220mm, 폭45mm, 두께 4mm로 동일하게 하되 곡률은 0부터 5단계로 나누어서 스트립을 제작하는데, 스트립의 중앙에 처짐을 부여하는 방법으로 곡률을 유발하였다(Fig. 1). 곡률이 있는 강재 스트립을 정삼각형으로 배치하고 상하에 25mm 강판으로 용접하여 강재 스트립이 조합된 시험체(댐퍼)를 5개 만

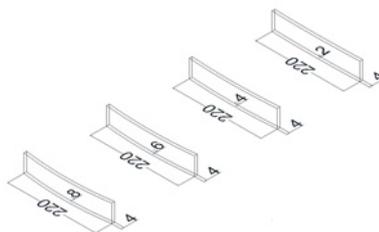


Fig. 1. Dimension and kinds of steel strip

들고, 각각의 댐퍼에 대한 반복 동하중 시험을 수행한 후 하중-변위 이력곡선을 이용하여 에너지 소산량을 계산하고 댐퍼의 성능을 확인하며, 댐퍼를 저층의 RC 예제 구조물에 적용하여 해석적 검증을 수행한다.

시험체의 제작

초기 곡률을 가진 강재 스트립 댐퍼를 제작하는 과정을 설명하면 다음과 같다. 스트립의 중앙에 0, 2mm, 4mm, 6mm, 8 mm까지 각각의 초기 처짐을 가진 폭 45mm, 길이 220mm, 두께 4mm인 강재 스트립을 제작한다. 제작된 strip을 제원 250 mm×250mm×25mm의 상판과 하판의 중심에 반지름 100mm의 원을 그리고, 원주상에 등간격으로 3개씩 배치한 후 용접하여 각기 다른 곡률을 가진 강재 스트립 댐퍼를 총 5개를 제작하게 되는데, 상판 및 하판의 제원과 조립된 시험체(댐퍼)의 개략적인 외형은 Fig. 2와 같다.

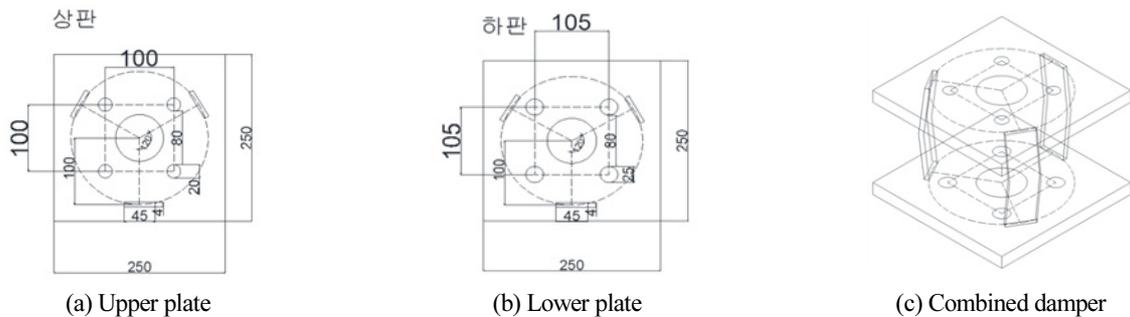


Fig. 2. Dimension of steel plate and combined specimen (Damper)

시험체의 재하시험

5개의 댐퍼(시험체)에 대한 에너지 소산능력을 파악하기 위해 각각 동하중 반복 재하시험 수행하였고, 하중의 재하는 변위제어 방식으로 진행하였으며, 재하속도는 0.1mm/sec하고 변위는 최소에서 최대까지 6단계로 나누어 진행하였다. 동하중 반복시험에 사용된 재하장치는 최대하중 50ton 용량의 액츄에이터(actuator)를 상하로 작용하게 하였으며, 시험체와 재하용 지그(zig)를 연결하고 변위제어를 실시하였는데, 중앙 처짐이 0mm인 CSSD00 시험체부터 CSSD08 시험체 까지 차례대로 재하시험을 수행하였다(Fig. 3).

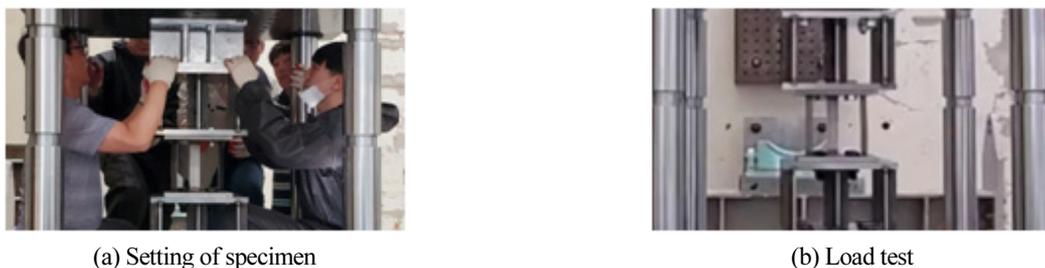


Fig. 3. Strain control test of specimen CSSD02

또한, 각 시험체별 재하의 사이클(cycle)은 변위의 단계를 0.5mm씩 증가하면서 각 변위에 해당하는 압축하중을 가한 후 다시 원점(변위 0)으로 돌아가는 것을 1 사이클로 하여 시험체가 좌굴할 때까지 계속 진행 하다가 이 상황을 표시하고, 다음 변위 단계의 시험을 수행할 때도 좌굴이 발생했는지를 확인한 후 변위단계를 증가하여 재하를 했을 때 하중의 증가 없이 변위가 커지면 시험을 종료하는 방법으로 실시하였다.

실험결과와 분석 및 고찰

Fig. 4를 참고로 할 때 최종 처짐은 초기 곡률의 크기에 관계없이 무한히 커지며, 5종류의 시험체의 시험결과에서 볼 때 초기곡률이 작은 시험체의 좌굴하중은 해석적인 좌굴하중보다 약간 크게 나타나지만(Table 1), 초기 곡률이 커지면(처짐이 6mm 이상) 시험체의 좌굴하중은 해석적인 좌굴하중과 유사한 값을 갖는다. 이러한 현상은 초기 곡률(처짐)이 작은 시험체는 축력의 작용 시 3개 스트립이 하중의 편심을 상호 보완한 효과로 판단되며, 이에 대한 사항도 추가적인 연구가 필요하다. 또한, 초기 곡률이 조금이라도 있는 경우는 없는 경우보다 시험적 및 해석적 에너지 소산량이 상당히(30% 이상) 감소하지만, 초기 곡률이 크고 작음에 따른 따른 시험적 에너지 소산량의 변화는 크지 않으므로 결국, 곡률(처짐)의 유무가 에너지 소산량에 중요한 변수로 사료된다.

기호 P_E 는 $P_E = P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(kL)^2}$ 인 Euler의 하중이며, 이때의 유효계수는 스트립과 상판 및 하판의 강판이 용접으로 연결되었으므로 유효계수는 AISC 추천치인 $k = 0.65$ 를 취할 때, 곡률이나 편심 등의 결함이 있는 압축부재의 좌굴하중은 초기처짐이 $v_0 = a \sin(\frac{\pi x}{L})$ 일 때 편미분 방정식(1)의 해에서 구한 식 (2)와 이를 변형한 식 (3)를 이용하면 각각의 곡률(처짐)에 대한 좌굴하중 P 를 계산할 수 있다.

$$Ekv'' + P(v + v_0) = 0 \tag{1}$$

$$\delta_{max} = \frac{a}{1 - P/P_E} \tag{2}$$

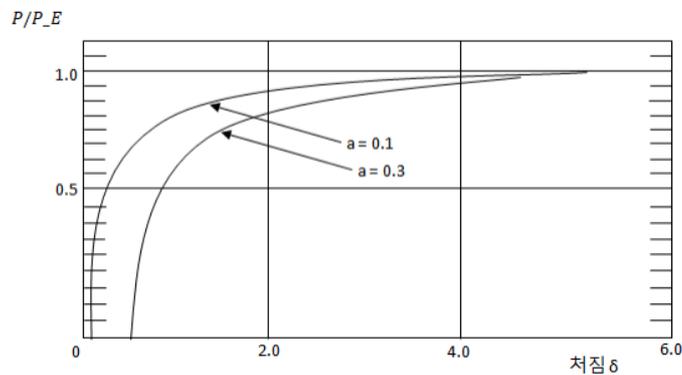


Fig. 4. Load-deflection diagram with initial curvature

$$P = \left(1 - \frac{a}{\delta}\right) P_E \tag{3}$$

또한, 식(2) 또는 식(3)과 Fig. 4를 이용하면 해석적 에너지 소산량(E_{bh})을 계산할 수 있으며, 각 시험체(댐퍼)의 하중-변위 이력곡선에서 시험적 에너지 소산량(E_{bt})을 계산할 수 있다. 이러한 방법으로 해석적인 좌굴하중과 에너지 소산량을 계산하고, 각 재하 사이클 시험에서 탄성좌굴이 발생할 때의 최대변위와 좌굴하중을 바탕으로 하여 에너지 소산량을 계산한 후 댐퍼의 감쇠성능을 파악할 수 있으며 그 결과를 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1. Coparision of analytical results and test results of specimen CSSD

| Specimen | Dimension (mm) | Curvature Radius r (mm) | Central Angle θ (rad) | Bent Length L_c (mm) | Euler Load P_e (kN) | Calculated Load P (kN) | Test Load P_t (kN) | P/P_e | P/P_t | ΔL (mm) | E_{bh} (kN.mm) | E_{bt} (kN.mm) | E_{bt}/E_{bh} |
|----------|----------------|---------------------------|------------------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------|---------|---------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|
| | | | | | | | | | | | | | |
| CSSD00 | 220×45×4 | | | 220.00 | 69.4 | 69.4 | 81.2 | 1.00 | 0.85 | 2.52 | 349.8 | 409.2 | 1.17 |
| CSSD02 | 220×45×4 | 3,026 | 0.0363 | 220.01 | 69.4 | 65.9 | 73.4 | 0.95 | 0.90 | 2.02 | 266.2 | 296.5 | 1.11 |
| CSSD04 | 220×45×4 | 1,514 | 0.0727 | 220.02 | 69.4 | 62.5 | 65.0 | 0.90 | 0.96 | 1.49 | 186.3 | 193.7 | 1.04 |
| CSSD06 | 220×45×4 | 1,011 | 0.1089 | 220.32 | 69.4 | 59.0 | 58.2 | 0.85 | 1.01 | 1.11 | 131.0 | 129.2 | 0.99 |
| CSSD08 | 220×45×4 | 760 | 0.1451 | 220.70 | 69.4 | 55.5 | 52.8 | 0.80 | 1.05 | 0.60 | 66.6 | 63.4 | 0.95 |

댐퍼(시험체)의 감쇠성능 분석

댐퍼의 감쇠성능을 분석하기 위한 예제 구조물은 길이 30m, 폭15m, 높이9m인 3층의 철근콘크리트 구조물을 선택하였으며, 전체 자중(W) 약 2,120ton이다. 철근콘크리트 구조물의 주기는 일반적으로 $T=0.3\text{sec}$ 로 할 때 구조물의 강성(K_b)은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{gK_b}} = 0.3(\text{sec}), \quad W = 21,200(\text{kN})$$

$$K_b = \left(\frac{2\pi}{0.3}\right)^2 \times \frac{21,200}{9.8} = 947,952(\text{kN/m}) = 948(\text{kN/mm})$$

곡률이 없는 CSSD00 시험체의 강성(K_{strip})은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$K_{strip} = 3 \times \frac{EA}{L} = 3 \times \frac{2 \times 10^5 \times (45 \times 4)}{220} = 491(\text{kN/mm})$$

CSSD00 시험체의 이론적 좌굴하중은 $P_{cr} = 69.4(\text{kN})$, 시험하중에 의한 댐퍼의 탄성 수축량(Δ_{cr})은 다음과 같다.

$$\Delta_{cr} = P_{cr} / K_{strip} = 69.4 / 491 = 0.14(\text{mm})$$

또, 시험체 CSSD00의 시험결과에서 좌굴 시 변위가 2.52mm이므로 하중-변위 이력곡선을 이상화하면 (Fig. 5)와 같으며, 동일한 방법으로 나머지 4개의 시험체에 대한 에너지 소산량을 해석적으로 계산할 수 있다.

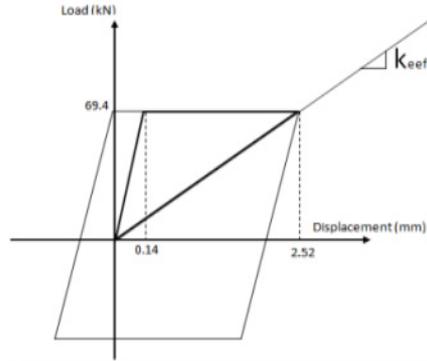


Fig. 5. Load - displacement hysteretic graph

또, 구조물과 댐퍼는 직렬로 연결되어 있으므로 등가강성을 K_{eq} 라 하고 예제 구조물에 CSSD02 시험체를 댐퍼로 사용할 경우 50개의 댐퍼를 구조물의 측면에 일정 간격으로 배치한다면, 전체의 등가 강성(K_{eq})는 다음과 같다.

$$K_{strip50} = 491 \times 50 = 247,550 (kN/mm)$$

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_b} + \frac{1}{K_{strip50}} = \frac{1}{948} + \frac{1}{247,550}$$

따라서 3층 RC 구조물과 댐퍼를 조합한 경우의 전체 강성은 다음과 같다.

$$\therefore K_{eq} = 916 (kN/mm) \cong K_b$$

또, 선택한 댐퍼(CSSD02시험체)가 좌굴되는 시점의 변위로 하면 댐퍼 1개의 유효 강성(K_{eff})은 다음과 같다.

$$K_{eff} = \frac{P_{cr}}{\Delta_e} = \frac{73.4(kN)}{2.02(mm)} = 36.3 (kN/mm)$$

댐퍼가 좌굴을 일으킨 후 1 사이클 에너지 소산량은 하중-변위 이력 곡선 전체의 면적이므로 에너지 소산량은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$E_{bt} = 2 \times (73.4kN \times 2.02mm) = 296.5 (kN \cdot mm)$$

또, 좌굴을 일으키기 직전까지의 변위는 2.02mm이므로 탄성 에너지(E_{so})는 다음과 같다.

$$E_{so} = \frac{1}{2} P_{cr} \Delta_e = \frac{1}{2} \times 73.4kN \times 2.02mm = 74.13(kN \cdot mm)$$

또한, 이때 댐퍼(CSSD02시험체) 1개의 등가 감쇠비(β_2)는 다음과 같다.

$$\beta_2 = \frac{1}{4\pi} \frac{E_{bt}}{E_{so}} = \frac{1}{4\pi} \times \frac{296.5}{74.13} = 0.318 = 31.8\%$$

댐퍼 50개의 전체 등가강성(K_{eff})은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$K_{eff} = K_{eff1} \times 50 = 36.3 \times 50 = 1,815(kN/mm)$$

구조물 전체 유효 등가강성(K_{eq})은 댐퍼와 건물은 직렬연결 되어 있으므로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_b} + \frac{1}{K_{eff}} = \frac{1}{948} + \frac{1}{1,815}$$

$$\therefore K_{eq} = 296.5(kN/mm)$$

댐퍼가 좌굴된 후 건물의 주기는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{g \cdot K_{eq}}} = 2\pi \sqrt{\frac{21,200}{9,800 \times 296.5}} = 0.536(sec)$$

따라서, 3층 RC 구조물의 주기는 0.3(sec)에서 0.536(sec)로 장주기화 되었다.

또, 이때의 설계 응답 스펙트럼 가속도(S_a)는 다음과 같다.

$$S_a = \frac{F_v \cdot S}{T} = \frac{1.45 \times 0.154}{0.536} = 0.417g$$

RC 구조물 기본 감쇠비(β_1)는 5%, 댐퍼 등가 감쇠비(β_2)는 31.8%이므로 건물에 댐퍼가 설치되었을 때의 등가 감쇠비는 $\beta = 5\% + 31.8\% = 36.8\% = 0.368$ 이다.

또한, 스펙트럼 저감계수(c_D)는 일본 도로교 설계 시방서의 케이블 교량 설계지침에 따르면 $c_D = \sqrt{\frac{10}{\beta_1 + \beta}} \geq 0.55$ 이어야 하는데, $c_D = \sqrt{\frac{10}{5 + \beta}} = \sqrt{\frac{10}{5 + 36.8}} = 0.489 < 0.55$ 이므로 $c_D = 0.55$ 를 취하면, 저감된 스펙트럼 가속도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$S'_a = 0.55 \times S_a = 0.55 \times 0.417 = 0.229(g)$$

해석적으로 검토한 3층 예제 구조물의 경우는 주기가 $T=0.3\text{sec}$ 에서 $T=0.536\text{sec}$ 로 약 78.7% 정도 장주기화 되었다. 또한, 응답 스펙트럼 가속도가 $S_a=0.54g$ 에서 $S_a=0.229g$ 로 줄었으므로 댐퍼(CSSD02)의 감쇠효과는 충분히 존재하며 지진력은 $0.229g/0.54g = 42.4\%$ 즉, 초기 지진력의 42% 정도로 줄었다. 따라서 본 연구에서 선택한 댐퍼를 폭15m, 길이30m, 높이 9m 인 3층의 예제 구조물에 적용한 결과, 지진이 발생했을 때 그 거동이 충분히 안전하다고 할 수 있다.

예제 구조물의 동적거동 해석

길이 30m, 폭 15m, 높이 9m, 자중 2120ton인 3층 철근콘크리트 구조물에 댐퍼를 설치한 후 지진하중(EQ)이 작용할 때 댐퍼의 성능을 파악하기 위하여 동적해석을 실시한다. 예제 구조물의 각 층을 Element1, Element2, Element3로 하고 각 층의 상단을 Node3, Node4, Node5 로 모델링하였다. 시간-이력 해석에 필요한 입력 지진파는 ASCE 7-10의 규정에 따라 최소 3 개 이상 사용하였고, 설계 스펙트럼을 대상으로 스케일링 하여 사용하였다. 2차원 해석의 경우 대상 지진파 세트에 대해서 철근콘크리트의 기본 감쇠율 5% 감쇠비와 응답스펙트럼의 평균값이 대상 구조물의 고유주기(T)를 기준으로 하여 고유주기의

Table 2. Dynamic analysis results of CSSD02 specimen and CSSD00 specimen

| 입력지진운동 | 해석모델 | 1층 | | 2층 | | 3층 | | 댐퍼 | |
|------------------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|----------|-----------|
| | | 최대층간상대변위(mm) | 최대전단력(kN) | 최대층간상대변위(mm) | 최대전단력(kN) | 최대층간상대변위(mm) | 최대전단력(kN) | 최대변위(mm) | 최대전단력(kN) |
| EQ1 | CSSD02(A) | 1.98 | 4,200 | 3.17 | 2,945 | 3.29 | 1,019 | 11.39 | 4,200 |
| | CSSD00(B) | 4.3 | 6,673 | 4.94 | 7,043 | 4.43 | 3,536 | | |
| | A/B | 46.0% | 62.9% | 64.2% | 41.8% | 74.3% | 28.8% | | |
| EQ2 | CSSD02(A) | 1.97 | 3,894 | 3.1 | 2,019 | 3.31 | 508 | 9.49 | 4,200 |
| | CSSD00(B) | 4.23 | 7,024 | 5.24 | 5,736 | 4.77 | 3549 | | |
| | A/B | 46.6% | 55.4% | 59.2% | 35.2% | 69.4% | 14.3% | | |
| EQ3 | CSSD02(A) | 1.97 | 3,985 | 3.17 | 1,347 | 3.33 | 1,389 | 11.13 | 4,200 |
| | CSSD00(B) | 3.92 | 5,563 | 4.78 | 4,347 | 4.45 | 2,430 | | |
| | A/B | 50.3% | 71.6% | 66.3% | 31.0% | 74.8% | 57.2% | | |
| 3개의 입력 지반운동중 최댓값 | CSSD02(A) | 1.98 | 4,200 | 3.17 | 2,945 | 3.33 | 1,389 | 11.39 | 4200 |
| | CSSD00(B) | 4.30 | 7,024 | 5.24 | 7043 | 4.77 | 3,549 | | |
| | A/B | 46.0% | 59.8% | 60.5% | 41.8% | 69.8% | 39.1% | | |

0.2배(0.2T)에서 고유주기의 1.5배(1.5T) 사이에서 설계 스펙트럼보다 작지 않도록 지진파의 스케일을 조절한다. 본 연구에서는 인공지진 생성 소프트웨어인 SIMQKE를 사용하여 설계 스펙트럼으로부터 지반 가속도를 생성하였으며 생성된 SRSS 스펙트럼들의 평균값이 설계 스펙트럼과 비교하여 작지 않도록 스케일을 조절하여 동적거동(MIDAS) 해석을 수행하였다.

3차원 해석의 경우에는 서로 직교하는 2개의 지진파 한 쌍을 동시에 가진 해야 하며, 2개의 직교하는 지진파를 설계 스펙트럼과 비교해야 한다. 생성된 인공 지진하중 EQ1, EQ2, EQ3가 각각 작용할 때, 본 연구의 예제 구조물에 곡률이 작은 댐퍼(CSSD02 시험체)를 적용하여 각 층에 대한 Node의 상대변위와 층간 상대변위를 측정하고, 그 결과를 실험결과와 비교·분석하였다.

본 연구에서 곡률이 없는 댐퍼(CSSD00)와 선택한 댐퍼(CSSD02)를 예제 구조물에 적용하여 생성된 인공지진파 3세트에 대한 동적해석을 실시한 결과, 최대값 비교에서 응답변위는 46~70%로 나타났고, 전단력은 39~60% 수준으로 감소하였으므로 내진 안전성(Safety)은 확보되었다고 판단되며 이 결과를 정리하면 Table 2와 같다.

결론

본 연구에서는 이론적 규명이 용이하고, 저층 또는 소형 구조물을 위한 경제적인 감쇠장치를 고안하고, 해석적 결과와 실험적인 결과를 비교 및 검토하여 저층 또는 소형의 RC 구조물을 위한 감쇠장치의 이론적 배경 제공하고자 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 곡률의 크기에 관계없이 최종 처짐은 무한히 커지며, 곡률이 작은 시험체(초기 처짐 2mm)의 시험적 좌굴하중은 해석적인 좌굴하중보다 10% 이상 크다.
- (2) 곡률이 커지면(초기 처짐 6mm 이상) 시험체의 좌굴하중은 해석적인 좌굴하중과 거의 같은데, 이러한 현상은 곡률이 작은 시험체는 축력의 작용 시 3개 스트립이 하중의 편심을 상호보완하는 것으로 판단된다.
- (3) 에너지 소산량은 시험적인 경우가 해석적인 경우보다 크게 나타나며 곡률이 커질수록 그 경향은 탁월하다.
- (4) 곡률이 작은 경우(초기 처짐 2mm)라도 없는 경우(초기 처짐 0)보다 시험적 및 해석적 에너지 소산량은 상당히(30% 이상) 감소하지만, 곡률의 증가에 따른 시험적 에너지 소산량의 변화는 크지 않으므로 곡률의 유무가 중요한 변수로 사료된다.
- (5) 예제 구조물에 댐퍼(CSSD02)를 적용하고 수행한 감쇠성능의 계산결과, 주기는 $T=0.3\text{sec}$ 에서 $T=0.536\text{sec}$ 로 약 78.7% 정도 장 주기화 되었고, 응답 스펙트럼 가속도는 $S_a=0.54g$ 에서 $S_a=0.229g$ 로 줄었으므로 댐퍼의 감쇠효과는 충분히 존재하며, 지진력 또한 초기 지진력의 42%로 감소했으므로 댐퍼는 지진이 발생했을 때 그 거동이 충분히 안전하다고 할 수 있다.
- (6) 동적해석을 실시한 결과, 최대값 비교에서 응답변위는 46~70%로 나타났고, 전단력은 39~60% 수준으로 감소하므로 내진의 안전성은 확보되었다고 판단된다.

Acknowledgement

이 논문은 2022년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2018R1D1A1B07047803)이며 이에 감사드립니다.

References

- [1] Lee, I.D., Kim, D.B. (2019). A Study on the Elasto-Plastic Damper for the Stability of Low-Rise RC Structures Isolated by Concrete Ball Foundation. Ph. D. Thesis, Hankyong National University, pp. 34-45.
- [2] Lee, S.H., Sung, M.S., HA, S.H., Koo, H.H., Choi, S.B. (2009). "Dynamic modeling of ER dampers considering compressibility of fluid." *Journal of the Korean Society of Noise and Vibration Engineering*, Vol. 19, No. 7, pp. 569-666.
- [3] Chang, M.S., Byun, W.J. Kim, S.T., An, C.H. (2017). "A study on the hydraulic circuit model for MR damper analysis." *Journal of Drive and Control*, Vol. 14, No. 1, pp. 8-13.
- [4] Hur, M.W., Lee, S.H., Chun, Y.S. (2015). "Seismic performance evaluation of unseismic RC frames reinforced by CBD system." *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 27, No. 6, pp. 625-632.
- [5] Lee, J.H., Choi, Y.H., Naeem, A., Kim, J.G. (2015). "Experimental test of the hybrid slit-friction dampers." *Journal of Korea Society of Earthquake Engineering 2015 Academic Presentation*, Seongnam, pp. 155-156.