

강재 슬래브 이력형 댐퍼(SSHD)를 이용한 중·저층 RC 격자 구조물의 내진성능 향상에 관한 연구

A Study on the Seismic Performance Improvement of Mid and Low -Rise RC Grid Structures Using Steel Slab Hysteretic Damper

김동백^{1*} · 이인덕² · 최정호³Dong Baek Kim^{1*}, In Duk Lee², Jung Ho Choi³¹Professor, Department of Civil, Safety & Environment Engineering/ Construction Engineering Research Institute, Hankyong National University, An Seong, Republic of Korea²Master's Course, Department of Civil, Safety & Environment Engineering, Hankyong National University, An Seong, Republic of Korea³Professor, Department of Civil, Safety & Environment Engineering, Hankyong National University, An Seong, Republic of Korea

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

ABSTRACT

Purpose: After analyzing the seismic capability of low-rise RC grid structures with insufficient seismic performance, the purpose of the project is to install steel slab hysteretic dampers (SSHD) to improve the seismic performance of beams and columns, and to suggest measures to minimize damage to the structure and human damage when an earthquake occurs. **Method:** The evaluation of the seismic performance of a structure is reviewed based on the assumption that the seismic performance is identified for the grid-type subway systems that are not designed to be seismic resistant and the installation of an SSHD system, a method that minimizes construction period, if insufficient, is required. **Result:** After the application and reinforce of structure with SSHD, and the results of eigenvalue analysis are as follows. The natural periodicity of longitudinal direction was 0.55s and that of vertical direction was 0.58s. **Conclusion:** As results of cyclic load test of structure with SSHD, the shear rigidity of damper is 101%, the energy dissipation rate is 108% and, plastic rotation angle of all column and beam is satisfied for I_o level and therefore it is judged that the reinforce effect is sufficient.

Keywords: Seismic Performance, RC Grid Structure, Steel Slab Hysteretic Damper (SSHD), Energy Dissipation, Plastic Rotation Angle

요약

연구목적: 내진성능이 부족한 중·저층의 RC 격자 구조물의 내진능력을 해석한 후, 보와 기둥의 내진성능 개선을 위해 강재 슬래브 이력형 댐퍼(SSHD)를 설치하고, 지진이 발생할 때 구조물의 손상 및 인적피해를 최소화 하는 방안을 제시하는 데 그 목적이 있다. **연구방법:** 내진설계가 되지 않은 격자 형태의 전철 역사를 대상으로 내진성능을 파악하고, 내진성능이 부족할 경우 공기를 최소화 할 수 있는 방법인 SSHD 시스템을 설치하는 것으로 가정하여 구조물의 내진성능 평가 및 보강을 검토한다. **연구결과:** SSHD를 적용하여 구조물을 보강한 후, 고유치 해석을 수행한 결과 장변방향으로는 0.548s의 고유주기를 나타내었으며, 단변방향으로는 0.593s의 고유주기를 가지고 있는 것으로 나타났다. **결론:** SSHD에 대하여 반복하중 실험을 수행 한 결과, 댐퍼의 전단강성은 103%, 에너지소산량은 111% 및 109%로 나타나고, 모든 기둥과 보 부재의 소성회전각은 I_o 수준을 만족하는 것으로 나타나 보강효과가 충분한 것으로 판단된다.

핵심용어: 내진성능, RC 격자 구조물, 강재 슬래브 이력형 댐퍼(SSHD), 에너지 소산, 소성 회전각

Received | 5 July, 2019

Revised | 15 July, 2019

Accepted | 30 September, 2019

 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.

서론

현재까지 적용되고 있는 내진성능 향상방법의 대부분은 내진 전단벽이나 내부 브레이싱(Han et al., 2015; Lee, 2013), 보 및 기둥 등 주요부재를 감싸 내력을 향상시키는 방법(Lee et al, 2010) 등, 주로 구조물의 강도 및 강성을 키우거나(Hur et al., 2015; Baek et al., 2013) 변형능력을 키우는 연성증진 방법(Lee, 2015)이 주를 이루고 있다. 하지만 최근에는 이에 대한 대안으로 구조물에 지진력의 작용을 직접 감소시키는 면진이나 제진(Lee et al., 2015; Woo et al., 2014; Hur et al., 2015)의 개념을 적용하는 경향이 늘어나고 있다.

제진공법의 경우 댐퍼의 형태 및 제작방법이 매우 복잡하고 시공 또한 번거로우면 경제적, 기술적인 부담으로 결국 그 실효성이 떨어질 우려가 있다. 특히, 유압장치를 이용한 제진공법은 상당수의 사례에서 유압유가 유출되거나 반복하중에 대해 즉각적인 대응을 하지 못하는 등의 문제가 있기도 하다(Fig. 1).

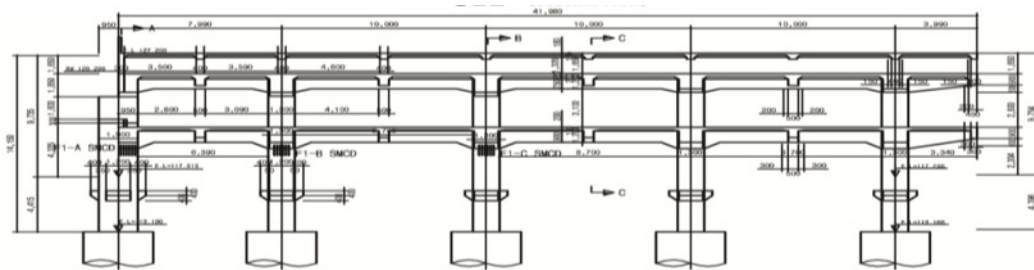


Fig. 1. Section Dimension of Structure

따라서 지진이 발생할 때 내진설계가 되지 않은 RC Grid 형태의 구조물에 대한 내진성능 평가 및 보강에 대한 경제성과 시공성이 향상된 내진성능 공법이 필요하다고 사료된다.

내진성능 검토

대상구조물

본 연구에서는 1980년 이전에 설계되고 현재도 사용 중인 서울시 소재의 중·저층의 RC 격자 구조물을 대상으로 내진성능에 대한 검토를 수행하고, 내진성능이 부족할 경우에는 강재 슬래브 이력형 댐퍼(Steel Slab Hysteretic Damper, SSHD)를 감쇠장치로 설치하여 지진하중을 저감시키는 방향으로 보강방안을 제안하고 그 성능을 평가하고자 한다.

강재 슬래브 이력형 댐퍼(Steel Slab Hysteretic Damper, SSHD)

강재 슬래브 이력형 댐퍼(SSHD) 시스템은 보의 중앙부에 높은 강성을 보유하고 있는 강재 슬래브 플레이트를 설치한 지진하중이 작용할 경우, SSHD가 설치된 프레임에 발생하는 소성변위가 구조물에 입력되는 지진에너지를 소산시키는 방법이다. 본 시스템은 방향성이 있는 구조물에 적용하기 좋은 편이지만 감쇠장치의 변위가 다른 형식의 댐퍼보다 적은 편이므로

초기에 큰 강성이 발현되는 장치가 필요하다. 본 연구에서 제안하는 SSHD는 Fig. 2와 같이 횡력에 대한 저항력이 부족한 기둥과 보 등의 골조를 형강으로 프레임을 구성하여 지진저항력을 증가시키고는 슬래브 타입의 감쇠장치를 구성한다. SSHD 시스템의 개략적인 형상은 Fig. 3과 같으며, 수치해석을 통하여 지진에 저항하는 성능에 대한 최적설계가 가능하다.

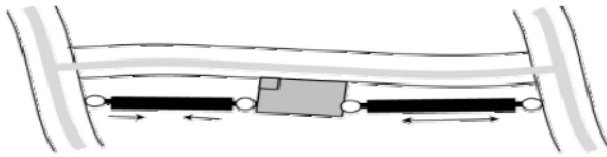


Fig. 2. Mechanism for SSHD

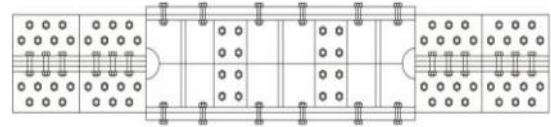


Fig. 3. Sketchy of SSHD

기존 구조물의 내진성능의 평가

대상구조물의 지반조건은 s_2 지반에 해당하며, 1000년 재현주기 2/3수준의 지진이 작용할 경우에 대하여 부재별 성능수준을 평가하였으며, 시설안전공단 평가요령에 규정된 기존 건축물 내진성능 평가 및 향상요령에 의해 내진성능 평가를 수행하고 1단계 및 2단계 상세평가를 수행하였다.

1단계 평가는 탄성영역에서의 해석 결과를 토대로 부재의 탄성강도 및 선형변형 능력에 대한 지진저항력을 평가하였는데, Table 1에 나타난 바와 같이 상층부의 보와 기둥에서는 모든 보가 I_o 수준을 만족하고 있는 것으로 나타났으며, 저층부에서는 보의 86.2%, 기둥의 54.78%만이 I_o 성능을 만족하고 있는 것으로 나타났고, 보의 경우 상층부에서 86.2% 정도가 I_o 수준을 만족하고 있는 것으로 나타났다.

평가기준에서 보의 경우는 80% 이상의 부재가 I_o 수준을 초과하면 성능수준을 만족하는 것으로 판정하므로, 대상 구조물은 I_o 수준을 만족하는 것으로 판단되었다. 기둥의 경우는 고층부에서는 I_o 수준을 만족하나 1층에서는 I_o 수준을 만족하는 부재의 비율은 54.78%로 나타났으며 80.1% 부재가 C_p 수준을 나타내고 있어 평가 기준에 따라 C_p 수준으로 나타났으므로 정확한 내진 성능을 판정하기 위해 2단계 상세평가가 필요한 것으로 판단되었다.

Table 1. 1st Seismic Performance Evaluation Result

| Member | | State | | | |
|--------|-------|-------|-------|-------|----------|
| Beam | Floor | I_o | L_s | C_p | Collapse |
| | RF | 100 | 100 | 100 | 0 |
| | 2F | 86.2 | 92.4 | 92.4 | 7.6 |
| | State | I_o | | | |
| Column | Floor | I_o | L_s | C_p | Collapse |
| | 2F | 100 | 100 | 100 | 0 |
| | 1F | 54.78 | 54.78 | 80.41 | 19.59 |
| | State | C_p | | | |
| Total | | C_p | | | |

2단계 상세평가는 비선형 정적해석을 통하여 Fig. 4 및 Fig. 5과 같은 성능곡선을 얻었는데 구조물이 지진력에 저항하는 보유성능을 나타내는 밀면 전단력(Base Shear Strength)은 장변방향의 경우, 약 1,100tf에서 일부 구조부재가 소성에 도달하여 강성이 저하되고 최상층 변위가 20cm에 도달한 후 건물의 내력이 감소되었다.

단변방향의 경우 약 850tf에서 일부 구조부재가 항복하여 소성 힌지가 발생하면서 강성이 저하되었으며, 최상층의 변위가 140m정도에 이르면 건물이 최대내력을 나타낸 후 서서히 내력이 감소되었다.

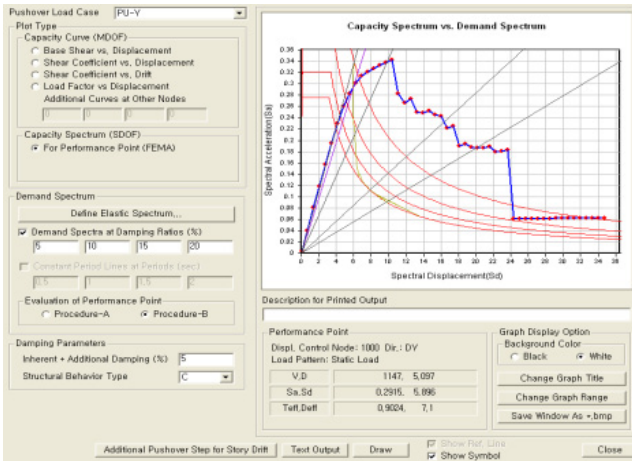


Fig. 4. Performance Point on X Direction

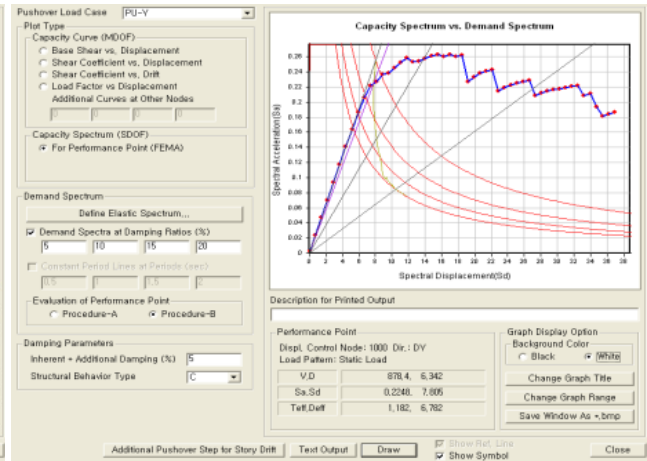


Fig. 5. Performance Point on Y Direction

강재 슬래브 이력형 댐퍼(SSHD)의 성능실험

재료의 특성시험

SSHD의 물리적 특성은 금속재료 인장시험편 규정인 KS B 0801에 따라 시편을 준비하고 금속재료 인장시험방법인 KS B 0802에 따라 시험을 실시한 결과는 Table 2와 같이 항복강도 368MPa, 인장강도 541MPa 값을 얻었으며 연신율은 31.5%로 측정되었다.

Table 2. Material Test Results for SSHD

| | Yielding Strength(N/mm ²) | Ultimate strength(N/mm ²) | Elongation ratio(%) |
|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|
| Test results | 368 | 541 | 31.5 |

구조성능 실험

SSHD 시스템을 현장에 적용하기 위한 기초 데이터를 얻기 위하여 기초성능실험은 비선형 동적해석 시 적용하기 위한 한 지속성 데이터와 설계 시 필요한 SSHD 시스템의 한지속성을 비교하기 위하여 계획하였으며, 가력은 변위제어 방법으로 수행하고 강재 슬래브 폭의 3% (±6mm)까지 하중을 가하여 그 결과를 분석하였다. 실험체는 Fig. 6과 같이 실험물의 크기로 총 3개의 SSHD 장치를 제작하여 성능실험을 실시하였는데, 시험체의 좌측에 지그(Zig)를 설치하며, 우측에 가력기와 로드 셀을

설치하고 실험체의 양단부에 각각 LVDT를 설치한 후 특성강도와 1차 강성 및 2차 강성, 전단강성, 에너지 소산율에 대한 설계치를 정하여 실험결과와 설계치를 비교하였다.



Fig. 6. Test Set-up of SSHD

실험결과

Fig. 7은 실험체 강제 판의 파괴양상을 나타낸 그림이며, 강제 판의 목 부분에서 인장-압축이 발생하면서 에너지를 소산한 것으로 나타났다. Table 3은 각 단계별 감쇠장치의 하중-변위 곡선의 값을 나타낸 것이며, Fig. 8은 각 실험체 별 하중-변위 이력곡선을 나타낸 것인데, 감쇠장치는 안정적인 이력 루프를 가지는 것으로 나타났다. Table 4는 실험결과와 설계결과를 비교한 것이며 튜닝 후의 전단강성은 103%로 나타났고 에너지 소산량은 111% 및 109%로 설계값과 유사한 결과를 나타내었다.



Fig. 7. Figure of SSHD

Table 3. Test Results of SSHD

| Specimen No. | | 1 Cycle | | 2 Cycle | | 3 Cycle | |
|--------------|------------------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| I | Displacement(mm) | 4.6 | -4.0 | 4.2 | -4.0 | 4.1 | -4.0 |
| | Load(kN) | 226.3 | -245.1 | 260.5 | -249.8 | 267.1 | -251.3 |
| II | Displacement(mm) | 5.9 | -5.2 | 5.6 | -5.2 | 5.6 | -5.2 |
| | Load(kN) | 183.6 | -197.2 | 212.6 | -202.7 | 215.7 | -203.8 |
| III | Displacement(mm) | 5.5 | -4.8 | 5.1 | -4.7 | 5.1 | -4.7 |
| | Load(kN) | 171.9 | -199.1 | 202.6 | -204.9 | 206.0 | -206.0 |

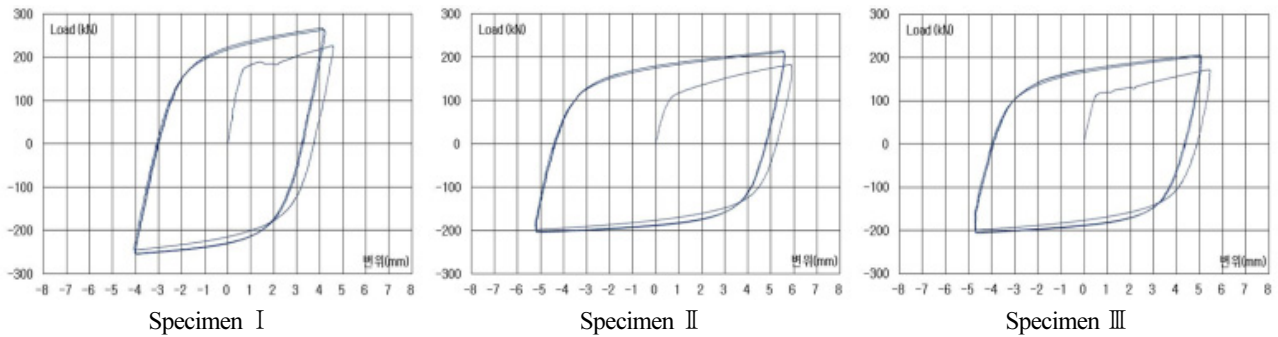


Fig. 8. Load - Displacement Diagram of Specimens

Table 4. Comparison of Experimental and Design Value

| Specimen No. | | First Stiffness (kN/mm) | Secondary Stiffness (kN/mm) | Shear Stiffness (kN/mm) | Energy Dissipation (kN·mm) |
|--------------|--------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| I | Test | 321.5 | 7.9 | 63.0 | 2810.0 |
| | Design ratio | 89% | 77% | 133% | 125% |
| II | Test | 234.7 | 4.6 | 38.8 | 3300.0 |
| | Design ratio | 65% | 46% | 103% | 111% |
| III | Test | 273.8 | 5.3 | 42.0 | 2918.4 |
| | Design ratio | 75% | 52% | 103% | 109% |

SSHD로 보강된 구조물의 해석에 의한 내진성능 평가

내진성능 평가의 결과에 따라 구조물에 3개의 SSHD를 각각 적용하여 비선형 동적 해석을 수행하였으며 그 과정은 다음과 같다.

감쇠장치의 강성

부재별 소성 힌지의 특성은 기존시설물 내진성능 평가요령 따라 보통 4개의 직선으로 모델링하며, 부재에 따라 변형량의 절대치가 규정된 경우 Fig. 9A, B와 같이 각 지점의 위치를 항복하중이나 항복변위의 비율로 나타낸다. 본 연구에서는 힌지

속성 및 기존시설물 내진성능 평가요령에서 제시하는 항복강도와 회전각은 부재별 항복 강도식과 내진성능별 회전각을 이용하여 입력하여 해석하였다.

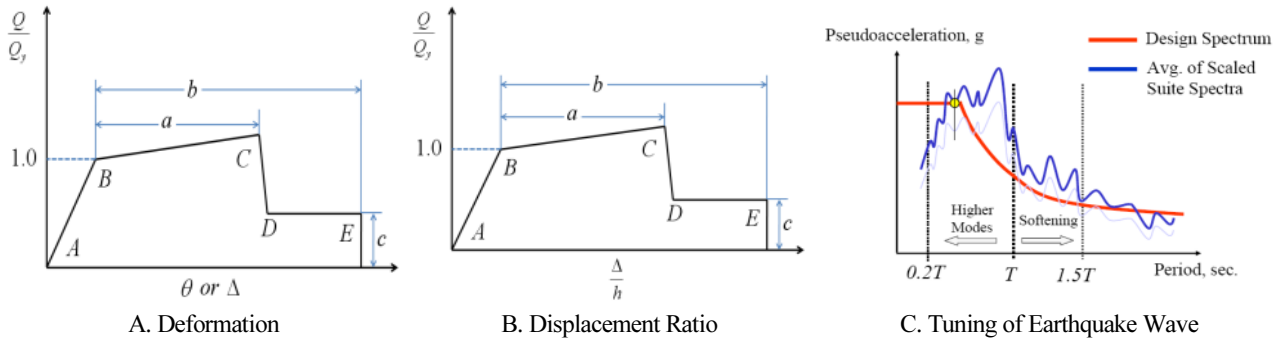


Fig. 9. Modeling of Plastic Hinge and Tuning of Earthquake Wave

설계 지진파의 생성

시간 이력해석에 필요한 입력 지진파는 최소 3개 이상의 지진파를 생성하고 이를 스케일링 하여 사용하여야 한다. 2차원 해석을 수행할 경우, 최소 3개 이상의 지진파 세트에 대한 감쇠의 응답 스펙트럼의 5% 평균값이 대상 구조물의 고유주기(T)에 대하여 0.2~1.5배 사이에서 취하되 설계스펙트럼에서 제시된 값보다 크도록 그 값을 조절하여 사용하며, 3차원 해석의 경우 서로 직교하는 2개의 지진파 한 쌍을 동시에 가진하고, 이것들을 설계스펙트럼과 비교 한다.

이러한 방법으로 직교하는 3개의 지진파 세트에 대한 응답 스펙트럼을 각각 구하고, 한 쌍의 응답 스펙트럼에 대해 SRSS 스펙트럼을 작성한다. 생성된 SRSS 스펙트럼들의 평균값을 설계스펙트럼과 비교하여 작지 않도록 스케일을 조절하는데, 본 연구에서는 Fig. 9C와 같이 설계스펙트럼으로부터 3개의 지반가속도를 생성하였다.

해석결과와 분석

SSHD를 적용하여 구조물을 보강한 후, 고유치 모드 해석을 수행한 결과 장변방향으로는 0.55s의 고유주기를 나타냈고, 단변방향으로는 0.58s의 고유주기를 가지고 있는 것으로 나타났으며, 단변방향으로는 2차 모드까지 고려하여야 86% 정도의 질량 참여율을 나타내고 있다(Table 5).

Table 5. Results of Mode Analysis for Retrofitted Structure

| Mode No | Period(sec) | TRAN-X | | TRAN-Y | |
|---------|-------------|---------|--------|---------|--------|
| | | MASS(%) | SUM(%) | MASS(%) | SUM(%) |
| 1 | 0.593 | 0.01 | 0.01 | 39.6 | 39.60 |
| 2 | 0.548 | 86.6 | 86.61 | 0.01 | 39.61 |
| 3 | 0.452 | 0.01 | 86.61 | 47.4 | 86.61 |
| SUM | | - | 86.61 | - | 86.61 |

구조해석을 수행하여 대상구조물의 부재별 I_o 수준, 성능만족 수준 및 검토 최종 성능을 검토하기 위해 최대 회전각의 비를 사용하는데, 비선형 시간 이력해석으로부터 계산된 부재의 최대회전각을 R_{max} , 성능수준에 따른 기준 회전각을 $R_{\leq vel}$ 이라 하면 최대회전각의 비 Usage ratio는 다음과 같다.

$$Usage\ Ratio = \frac{R_{max}}{R_{\leq vel}} \quad (1)$$

$R_{\leq vel}$ 를 부재별 I_o 수준의 회전각으로 산정하면 Usage ratio가 1.0 보다 작을 때 그 부재는 I_o 수준을 만족한다고 할 수 있으며, 각 지진과 세트에 대한 부재의 최대 회전각은 Table 6과 같이 각 기동별로 0.805~0.921을 나타내었다. 또한, 모든 기동에서 최대 부재회전각은 1 이하를 나타내고 있으므로 I_o 수준을 만족하고 있는 것으로 나타났는데, 이는 보강 전 하층부에서 I_o 수준을 만족하지 못하던 구조물이 I_o 수준을 충분히 만족하는 결과를 볼 때 SSHD는 내진성능이 향상되었음을 의한다고 사료된다.

Table 6. Usage Ratio on 1st Floor Columns

| Column No. | EQ 1 | | EQ 2 | | EQ3 | | Max. Ratio | I_o Level |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|-------------|
| | X axis | Y axis | X axis | Y axis | X axis | Y axis | | |
| 1 | 0.524 | 0.518 | 0.632 | 0.501 | 0.866 | 0.792 | 0.866 | OK |
| 2 | 0.497 | 0.520 | 0.548 | 0.505 | 0.821 | 0.758 | 0.821 | OK |
| 3 | 0.460 | 0.541 | 0.539 | 0.498 | 0.810 | 0.772 | 0.810 | OK |
| 4 | 0.534 | 0.572 | 0.609 | 0.546 | 0.876 | 0.831 | 0.876 | OK |
| 5 | 0.671 | 0.623 | 0.681 | 0.627 | 0.845 | 0.921 | 0.921 | OK |
| 6 | 0.556 | 0.474 | 0.680 | 0.499 | 0.883 | 0.742 | 0.883 | OK |
| 7 | 0.482 | 0.476 | 0.591 | 0.491 | 0.838 | 0.757 | 0.838 | OK |
| 8 | 0.440 | 0.469 | 0.498 | 0.479 | 0.805 | 0.788 | 0.805 | OK |
| 9 | 0.492 | 0.525 | 0.586 | 0.473 | 0.802 | 0.838 | 0.838 | OK |
| 10 | 0.626 | 0.576 | 0.691 | 0.531 | 0.826 | 0.870 | 0.870 | OK |

결론

내진성능 보강공법의 하나로 강재 슬래브 이력형 댐퍼(Steel Slab Hysteretic Damper, SSHD) 시스템을 내진설계가 적용되지 않은 격자형 RC 구조물에 적용하고, 댐퍼의 내진성능의 향상 정도를 확인하기 위하여 성능실험 및 구조 해석적 연구를 진행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 보강 전 구조물의 2단계 상세평가를 한 결과, 모든 부재가 설계 지진하중에 대하여 성능점과 허용 층간변위는 만족하는 것으로 나타났으나, 성능점 도달 시 소성힌지 분포를 만족하지 못하여 내진보강이 필요한 것으로 나타났다.
- (2) 강재 슬래브 이력형 댐퍼(SSHD)를 제작하고 반복하중 실험을 수행한 결과, 댐퍼의 전단강성은 103%, 에너지 소산량은 111% 및 109%로 이므로 댐퍼의 설계 시 계획한 값과 유사하게 나타났으므로 실험계획은 적정하다고 사료된다.

- (3) SSHD로 보강을 수행한 후 고유치 해석을 수행한 결과, 탄성해석의 결과와 유사한 주기를 나타냈으며 질량 참여율도 유사하게 나타났다.
- (4) 상세평가를 바탕으로 SSHD를 보강하고 비선형 동적해석을 수행한 결과, 보강 전에 보와 기둥에 집중되던 하중은 감쇠장치에서 효과적으로 흡수하였으며, 각 지진파에 의한 감쇠장치의 이력을 검토한 결과, 지진에너지가 충분히 감쇠장치를 소산되고 있는 것으로 나타났다.
- (5) 비선형 동적해석을 수행한 후 각 부재별 목표 수준인 I_s 레벨에 대한 성능 검토 결과, 모든 기둥과 보 부재의 소성회전각은 I_s 수준을 만족하는 것으로 나타나 댐퍼(SSHD) 보강효과가 충분한 것으로 사료된다.
- (6) 향후 인공 합성 지진파가 아닌 실제의 지진파를 적용한 연구가 필요하며, 반복적인 지진하중에 대하여 유효한 탄소성 댐퍼나 복합적인 Hybrid 형태의 댐퍼에 대한 추가적인 연구가 필요하고 사료된다.

Acknowledgement

이 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (No. 2018R1D1A1B07047803)이며 이에 감사드립니다.

References

- [1] Baek, E.L., Oh, S.H., Lee, S.H. (2013). "Performance of Seismic Retrofit According to the Stiffness and Strength Ratios of Steel Damper to Reinforced Concrete Frame." *Journal of Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 17, No. 43, pp. 172-177.
- [2] Han, S.W., Kim, J.Y., Moon, K.H., Lee, C.S. (2014). "Seismic Behavior of Reinforced Concrete Moment Frames Retrofitted by Toggle Bracing System with High Density Friction Damper." *Journal of Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 18, No. 3, pp. 135-138.
- [3] Hur, M.W., Chun, Y.S., Hwang, J.S., Lee, K.S. (2015). "Seismic Performance Evaluation of R/C Frame Apartment Strengthened with Kagome Truss Damper External Connection Method by Pseudo Dynamic Test." *Journal of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 19, No. 1, pp 24-29.
- [4] Hur, M.W., Lee, S.H., Chun, Y.S. (2015). "Seismic Capacity of Non-seismic Designed RC Framer Building Retrofitted by CBD System." *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 27, No. 6, pp. 626-628.
- [5] Lee, H.H. (2013). "Displacement and Velocity Dependence of Clamped Shape Metallic Dampers." *Journal of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 17, No. 2, pp. 63-66.
- [6] Lee, M.K., Lee, S.S., Park, J.Y., Woo, S.S. (2010). "Development of Lead Rubber Damper for High Seismic Performance." *Journal of Autumn Conference Architectural Institute of Korea*, pp 13-14.
- [7] Woo, S.S., Lee, S.H., Chung, L., Han, J.Y. (2015). "System Identification of a 39-Story Building Structure Using an Active Mass Damper." *Journal of Wing Engineering Institute of Korea*, pp. 95-97.