

# 고감쇠고무와 강재슬릿의 복합 댐퍼로 보강한 건축물의 해석적 성능평가

## Analytical Performance Evaluation of Structure Reinforced with HRS Damper

김 유 성\*  
Kim, Yu-Seong

이 준 호\*\*  
Lee, Joon-Ho

### Abstract

In this study, an incremental loading test of the HRS(Hybrid Rubber Slit) damper was additionally performed to define the physical characteristics according to the incremental test results, and an analytical study was performed according to the damping design procedure by selecting an example structure. As a result of performing seismic performance evaluation before reinforcement by selecting a RC structure similar to an actual school structure as an example structure, the story drift ratio was satisfied, but some column members collapsed due to bending deformation. In order to secure the seismic performance, the damping design procedure of the HRS damper was presented and performed. As a result of calculating the amount of damping device according to the expected damping ratio and applying it to the example structure, the hysteresis behavior was stable without decrease in strength, and the story drift ratio and the shear force were reduced according to the damping effect. Finally the column members that had collapsed before reinforcement satisfied the LS Level.

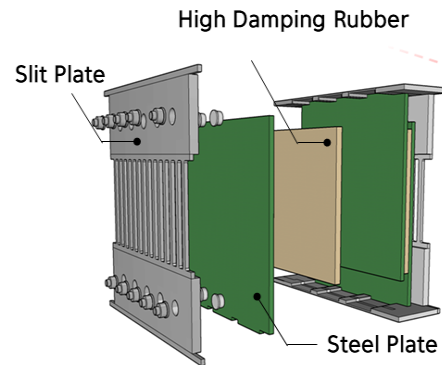
*Keywords : Hybrid Damper, Damping Design, Steel Hysteretic damping device, High damping rubber*

## 1. 서론

국내·외 대형지진이 증가되면서 지진으로 인한 피해를 감소시키고자 내진설계의 의무화와 더불어 추가적인 면진 및 제진시스템이 대다수 적용되어지고 있다. 특히, 제진시스템은 지진에 의해 발생된 외력을 감쇠장치를 통해 저감시켜 주요 구조 부재의 손상을 최소화 할 수 있는 내진보강대책이다.

하지만, 기존의 감쇠장치는 단일 재료 형태로 개발되었으며 이는 다양한 진동원에 동시에 대응할 수 없는 단점이 발생한다. 강재슬릿댐퍼의 경우 강진에 맞춰 설계되는 경우 소성메커니즘을 통한 에너지소산량이 풍부하며 약진 발생시 에너지 소산량이 미미하여 별도의 감쇠장치를 결합해서 단점을 보완하는 복합감쇠장치가 효율적<sup>1)</sup>이다. 이전 연구에서 <Fig. 1>과 같이 고감쇠고무와 강재슬릿이 병렬결합된 HRS 하이브리드 댐퍼(Hybrid

Rubber Slit Damper, HRS Damper)를 제안하였으며, 구조성능실험과 2층 실물골조실험을 통해 실험적 연구를 진행하였다.



<Fig. 1> Shape of HRS Damper

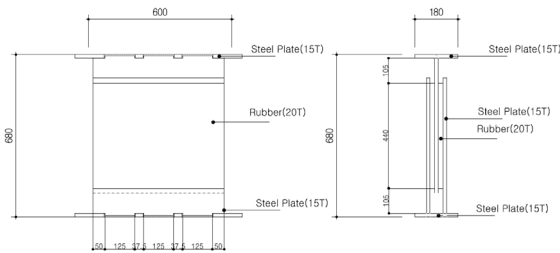
본 연구에서는 HRS 댐퍼의 증분기력실험을 추가수행하여 성능실험 결과에 따른 이력특성을 정의하였으며, 예제구조물을 선정하여 제진설계 절차에 따른 해석적 연구를 수행하였다.

\* 주저자, (주)플러스구조 과장, 박사수료  
Plus Structural Engineers & Associates Manager  
\*\* 교신저자, 정회원, 서일대학교 건축학부 조교수, 공학박사  
School of Architecture, Seoil University  
Tel: 02-490-7427 Fax: 02-490-7808  
E-mail: 2019022@seoil.ac.kr

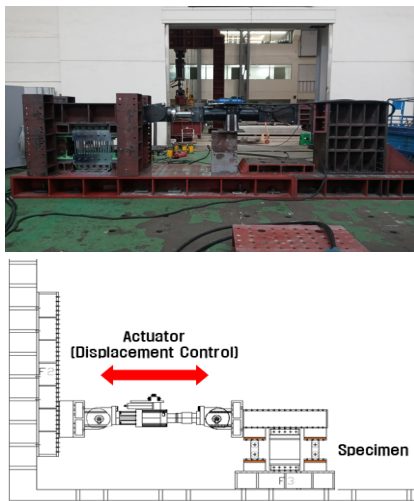
## 2. HRS댐퍼 구조성능시험

### 2.1 실험 계획

HRS 댐퍼의 이력특성을 분석하기 위해 증분가력실험을 수행하였으며, 실험체의 도면을 <Fig. 2>과 같이 나타내었다. 증분가력실험에 사용된 실험체는 SS275 ( $F_y = 275Mpa$ )의 슬릿플레이트에 고감쇠고무를 가황 접착하여 제작하였다. 가력기는 1000kN 유압 서브 액츄에이터를 사용하여 수평방향으로 반복가력하였으며, 실험체의 변위는 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 설치하여 변위를 확인하였다. 실험체 전경사진 및 셋팅도면은 <Fig. 3>과 같다.



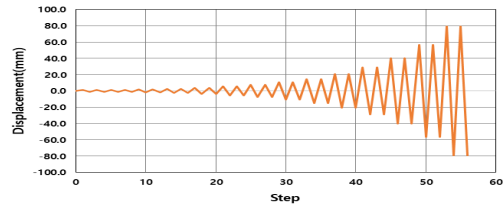
<Fig. 2> Shape of Specimen



<Fig. 3> Incremental Loading Test Setup

증분가력실험의 경우 ‘FEMA-461, Interim Testing Protocol for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components’(이하 FEMA-461)<sup>2)</sup>을 기준으로 하였으며 실험에서는 최소변형량( $\Delta_0$ )을 1mm로 하여 각 사이클

마다 1.4배씩 변위를 증폭하였으며, 2주기씩 가력을 주어 목표변위( $\Delta_m$ ) 40mm에 도달할 수 있도록 설정하였다.

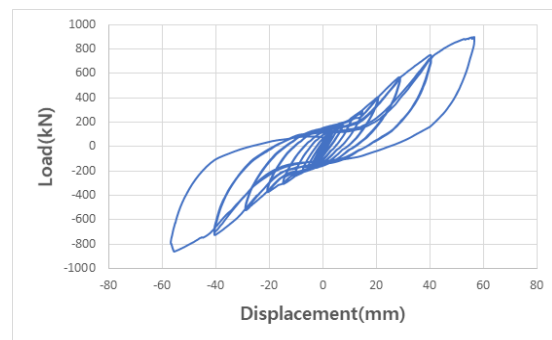


<Fig. 4> Load Protocol for Incremental Loading Test

### 2.2 실험결과

#### 2.2.1 하중-변위선도

증분가력실험 결과 하중-변위 선도에 대한 그래프를 <Fig. 5>과 같이 나타내었으며, 실험결과에 따른 물리적 특성을 <Table 1>과 같이 정의하였다. 실험체는 목표변위 40mm에 도달하였을 때 까지 내력저하 없이 안정적인 이력거동이 나타났으며, 정가력과 부가력에서의 최대 강도는 각각 751.25kN, 722.57kN으로 부가력에 비해 정가력에서 약 4% 높게 나타났다.



<Fig. 5> Load-Displacement Curve

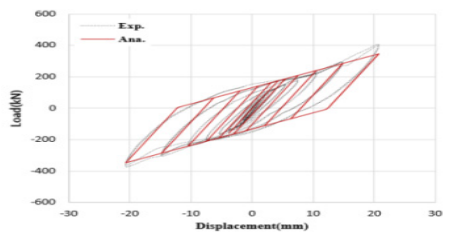
<Table 1> Properties of HRS Damper

Properties	Load(+)	Load(-)
Yield Strength (kN)	174.74	174.74
Yield Displacement (mm)	7.19	7.19
Initial Stiffness (kN/mm)	24.30	24.30
Post-Yield Stiffness (kN/mm)	16.84	14.75
Post-Yield Stiffness Ratio ( $\beta$ )	0.7	0.60
Max Strength (kN)	405.13	372.59
Max Displacement (mm)	20.76	20.60

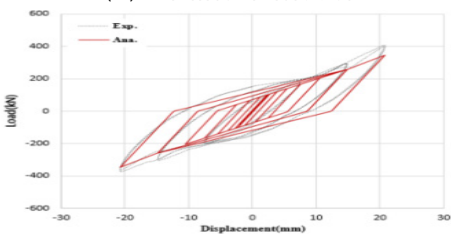
2.2.2 HRS 댐퍼 이력특성

성능실험 결과 이력곡선은 기존의 강재이력 댐퍼의 이력곡선 결과에 비해 강성이 급격히 증가되는 구간이 발생하였다. 이는 적층고무의 이력특성으로 전단변형을 점차적으로 증가시키면 일정변위 이상에서 강성이 급격히 증가되는 초탄성 거동으로 인한 것으로 판단된다.

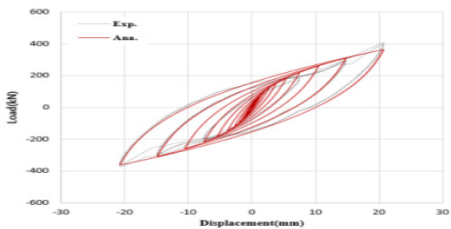
실험결과에 대한 유효성평가는 3차원 정밀구조해석프로그램인 Seismostruct(v2020)를 이용하였으며 가력조건인 경우 실험과 동일하게 변위제어 방식으로 Static Time History Analysis를 수행하여 결과를 비교·분석하였다. HRS 댐퍼의 감쇠요소는 세 개의 해석요소(스프링요소, 이력감쇠요소, 점성감쇠요소)를 병렬로 연결한 해석모델을 사용하였으며 스프링요소는 HRS 댐퍼의 강성, 감쇠요소는 강재이력댐퍼, 점성감쇠요소는 고감쇠고무요소로 이력거동을 구현하였다. HRS 댐퍼의 이력양상은 Bilinear, Tri-Linear, Ramberg-Osgood로 각각 모델링하여 중첩시켜 <Fig. 6>과 같이 비교하였다. 세가지 이력특성에 대해 유사하게 나타났으며, 실험결과를 잘 묘사한 것으로 확인되었다. 예제구조물에 적용되는 HRS 댐퍼의 해석모델은 Bilinear를 적용하여 모델링하였다.



(a) Bi-linear Model



(b) Tri-linear Model



(c) Ramberg-Osgood Model

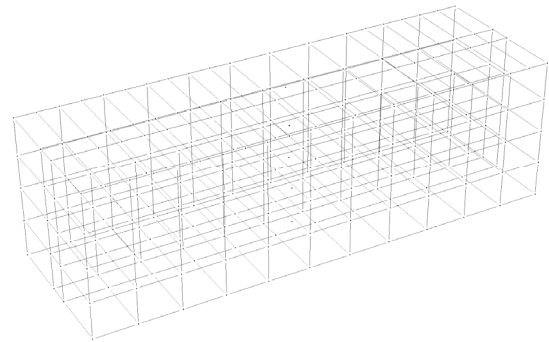
<Fig. 6> Analytical Model

3. 보강 전 구조물의 내진성능평가

3.1 해석개요

3.1.1 예제구조물

보강 전 구조물의 해석모델은 지상 3층 규모의 철근 콘크리트 모멘트 골조로 상용 구조해석프로그램인 Perform 3D을 통해 <Fig. 7>과 같이 모델링하였다.



<Fig. 7> Analytical Model(Non-model)

재료강도는 콘크리트의 경우 설계기준 압축강도( $f_{ck}$ ) 21Mpa를 사용하였으며, 철근은 설계기준항복강도( $f_y$ ) 값으로는 300Mpa를 적용하였다. 예제구조물은 중요도 (1)로 분류하여 건축구조기준(KDS 41 17 00)<sup>3)</sup>에 따라 지진하중 산정을 위한 지진계수 및 상세조건을 <Table 2>과 같이 제시하였다.

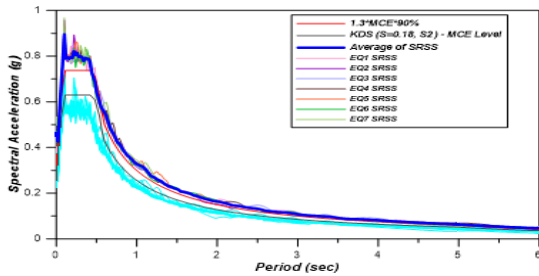
<Table 2> Condition of Seismic Load

Condition	Value
Seismic zone factor(s)	0.18
Site Class	S2
Seismic use group	1
Importance Factor ( $I_E$ )	1.2
Response Modification Factor (R)	3.0
Fundamental Period (T)	0.587 sec
Seismic Response Coefficient( $C_s$ )	0.145
Effective Weight (W)	34215.6
Base Shear (V)	4961.9kN

3.1.2 해석방법

대상 건축물의 내진성능평가를 위해 직접적분법(Direct Integration)에 따른 비선형 시간이력해석방법

을 적용하였다. 입력지진파는 <Table 3>과 같이 7쌍의 지진파를 선정하였으며, 건축구조기준(KDS 41 17 00)에 따라 주요모드에 대해 1.3배의 MCE Level 설계응답 스펙트럼에 90% 이하의 수준으로 지진파를 스케일링 (<Fig. 8>)하여 X, Y방향으로 동시 가력하였다.



<Fig. 8> Scaling of Response Spectrum

<Table 3> Earthquake data

Case	Number	Earthquake	Max. Acc(gal)
Case 1	EQ1	SanFernando(X-dir)	0.22
	EQ2	SanFernando(Y-dir)	0.22
Case 2	EQ3	Northridge(X-dir)	0.32
	EQ4	Northridge(Y-dir)	0.29
Case 3	EQ5	Kobe(X-dir)	0.26
	EQ6	Kobe(Y-dir)	0.20
Case 4	EQ7	Kocaeli(X-dir)	0.29
	EQ8	Kocaeli(Y-dir)	0.24
Case 5	EQ9	Chi-Chi A(X-dir)	0.24
	EQ10	Chi-Chi A(Y-dir)	0.33
Case 6	EQ11	Chi-Chi B(X-dir)	0.24
	EQ12	Chi-Chi B(Y-dir)	0.28
Case 7	EQ13	Loma Prieta(X-dir)	0.37
	EQ14	Loma Prieta(Y-dir)	0.29

### 3.2 해석결과

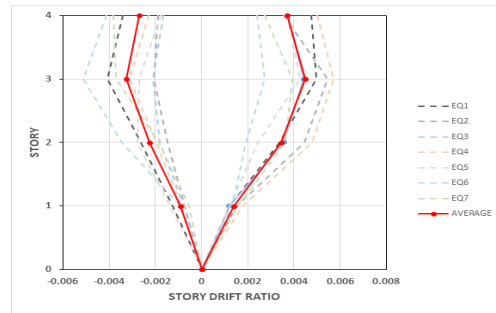
#### 3.2.1 층간변형률

학교시설 내진성능평가 및 보강매뉴얼<sup>4)</sup>에 따라 비내진 설계된 구조물의 성능수준별 허용 층간변형각을 <Table 4>에 나타내었으며 대상건축물은 내진등급 1등급으로 2400년 재현주기의 지진하중에 대한 목표성능은 CP Level로 2.1%를 만족하여야 한다.

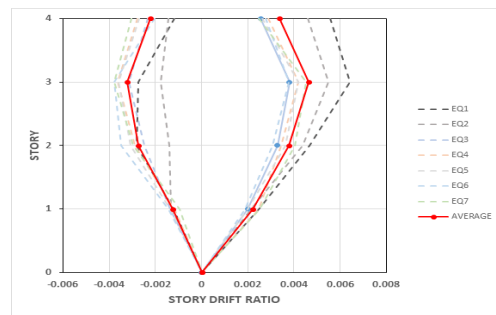
<Table 4> Target of Story Drift Ratio for Seismic Performance

Structure Type	Seismic Design			Non-Seismic Design		
	IO	LS	CP	IO	LS	CP
RC-Moment Frame	0.7	2	3	0.49	1.4	2.1

층간변형률은 구조물의 우측하단을 기준으로 산정하였으며 7개 지진파의 평균 층간변형률을 <Fig. 9>과 같이 나타내었다. 해석결과 X,Y 방향의 층간변형률은 3층에서 최대로 나타났으며 각각의 평균층간변형률은 0.44%, 0.46%로 목표성능수준인 CP Level을 만족하였다.



(a) X-Dir Story Drift Ratio



(b) Y-Dir Story Drift Ratio

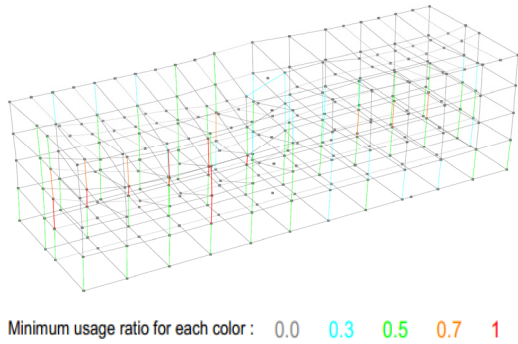
<Fig. 9> Story drift ratio of None-model

#### 3.2.2 부재별 성능수준 검토

7쌍의 지진파에 대한 기둥의 평균 전단력 및 회전각을 평가하여 <Table 5>과 같이 나타내었으며 Collapse가 발생된 기둥(1C2)의 휨변형에 대한 성능수준을 <Fig. 10>과 같이 나타내었으며, CP Level이 초과하는 부재는 빨간색으로 표시하였다. 평균 전단력에 대한 내력비 검토결과 3축의 전단 내력비가 초과하였고, 7쌍의 지진파 중 Case 1에 대한 전면부 기둥에서 기둥 회전각이 CP Level 이상으로 나타나 Collapse로 평가되었다.

<Table 5> Performance Level of Column

Column	Rotation / Criteria of CP Level	Shear Force(kN)			Performance Level
		Force	Strength	Ratio	
1C2 (2Axis)	0.0105 / 0.0079	87.75	101	0.86	Collapse
1C2 (3Axis)	0.0063 / 0.0079	104.40	101	1.03	

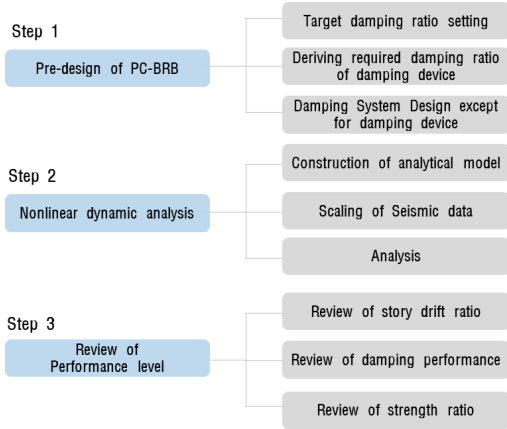


(Fig. 10) Performance Level of None-Model(Case 1)

## 4. 보강 후 내진성능평가

### 4.1 HRS 댐퍼 제진설계 절차

기존 건축물 해석모델에 대해 내진성능을 검토한 결과 층간변형률과 일부 기둥부재가 내력을 만족하지 못하였다. 내진보강이 필요한 건축물의 HRS 댐퍼 적용을 위한 제진설계 절차를 (Fig. 11)과 같이 나타내었다.



(Fig. 11) Process of damping design<sup>5)</sup>

### 단계 1 : 목표감쇠설정

감쇠장치는 지진하중을 저감시킬 수 있으며, 감쇠장치를 제외한 지진력 저항시스템은 설계지진하중의 최소 75% 이상을 부담해야한다. 예제구조물은 기존 건축물로 가정하였으므로 감쇠장치가 적용된 구조물은 보강전 및 면전단력의 75% 수준을 만족할 수 있도록 목표를 설정하였다. 이에 따라 KDS 41 17 00에서 제시하고 있는 유효감쇠에 따른 감쇠계수를 (Table 6)과 같이 나타내었다. 구조물의 감쇠 보정계수를 0.75로 설정한 경우 감쇠계수는 1.33으로 유효감쇠는 약 14.4%가 요구된다.

(Table 6) Condition of Seismic Load

Effective Damping( $\beta_D$ )	Damping coefficient( $B_D$ )
$\leq 2$	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
$\geq 50$	2.0

\* 주어진 유효감쇠 이외의 유효감쇠에 해당하는 감쇠계수는 선형보간으로 구한다.

### 단계 2 : 목표 감쇠에 따른 감쇠장치 설계

FEMA 356에서는 변위/속도-의존 감쇠장치가 적용된 구조물의 유효감쇠비는 식 (1)과 같이 원 구조물의 감쇠비와 감쇠장치에 의한 추가감쇠비의 합으로 산정하고 있다.

$$\xi_{eff} = \xi_0 + \frac{\sum W_j}{4\pi W_k} \quad (1)$$

(Table 7) Effective damping ratio of HRS Damper

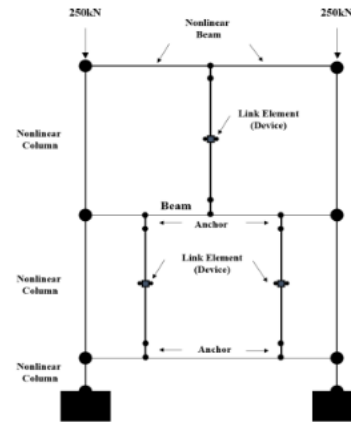
Story	Story Force(kN)	Story Drift(m)	$F_i \times D_i$ (kN·m)	Seismic Device Displacement(m)	Energy dissipation (kN·m)	Number of installation
4F	2212.455	0.0087	19.2483585	0.0087	9.9853326	4ea
3F	1258.834	0.0092	11.5812728	0.0092	23.8561068	4ea
2F	901.9256	0.0111	10.01137416	0.0111	23.8561068	4ea
1F	497.7442	0.0123	6.12225366	0.0123	34.91833394	4ea

$$\xi_{eff} = \frac{\sum W_j}{4\pi W_k} = \frac{92.61}{590.158} = 0.1569$$

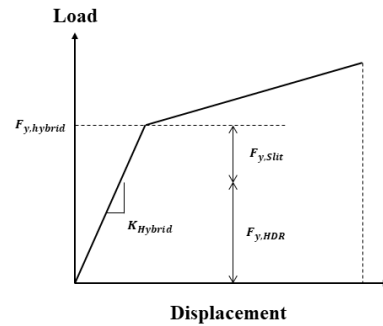
여기서,  $\xi_0$  은 원구조물의 감쇠비로 KDS 41 17 00에 따라 감쇠시스템이 적용된 구조물의 지진력저항시스템에 적용하는 원 감쇠비인 3%로 설정하였다.  $W_k$ 는 최대 탄성에너지로 식 (2)과 같이 표현된다.

$$W_k = \frac{1}{2} \sum_i F_i d_i \quad (2)$$

여기서  $F_i$ 는 I층의 관성력이며,  $d_i$ 는 관성력이 작용할 때 I층에 발생하는 층변위이다. <Table 7>은 보강 전 구조물의 등가정적해석을 수행하여 Y방향에 대한 층별 지진하중 및 층간변위를 통해 예상되는 감쇠비에 따른 보강개소를 나타내었으며, 감쇠장치의 예상변위에 따라 각 층에 4개소씩 분배 설치하여 예상 요구감쇠비를 15.69%로 계획 하였다. 보강 전 해석 결과에 따라 보강 위치는 <Fig. 12>와 같이 내력비가 최저로 나타난 최외측의 기둥에 대해 Y방향으로 보강하였다. 보강 후 구조 해석모델에 적용되는 HRS 댐퍼의 해석모델은 범용연결 요소를 사용하여 실험결과를 기반으로 <Fig. 13>과 같이 Bilinear 모델을 적용하였다.



(a) Analytical Model of HRS Damper

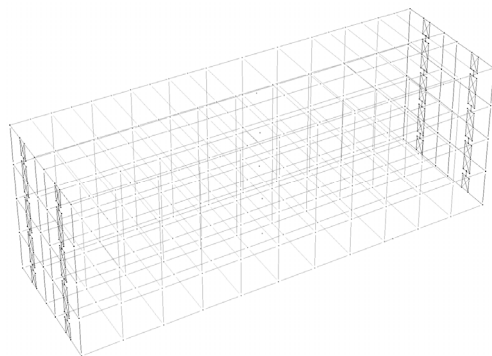


(b) Property of HRS Damper

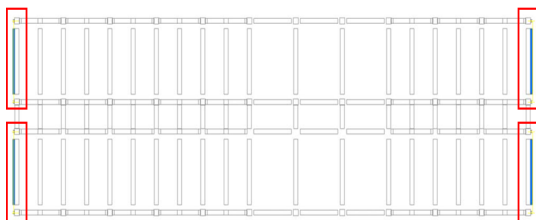
<Fig. 13> Application of HRS Damper

단계 3 : 감쇠장치를 제외한 감쇠시스템 설계

감쇠장치를 제외한 연결프레임은 탄성상태로 설계되어야 된다. HRS 연결프레임은 강재 SS275의 H-200x200x9/10을 사용하였으며, 해석결과 연결프레임의 각 부재의 단면력에 대한 최대내력의 비율이 1.0 미만으로 탄성상태를 만족하였다.

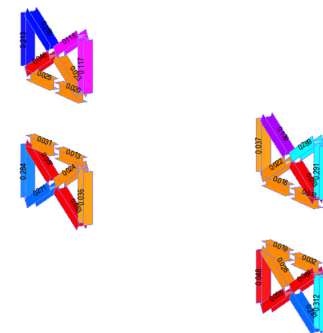


(a) Analytical Model(HRS Model)



(b) Reinforced Location of HRS Damper

<Fig. 12> Analytical model applied with HRS Damper

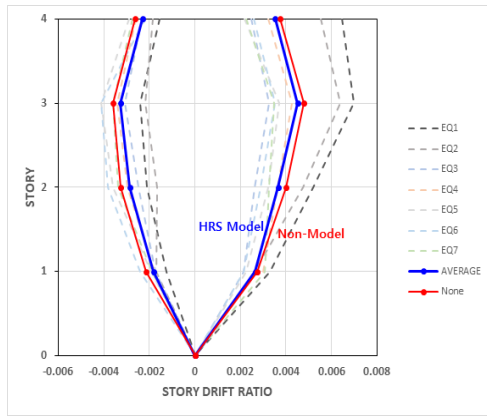


<Fig. 14> Strength Ratio of Steel Frame

## 4.2 보강 후 해석결과

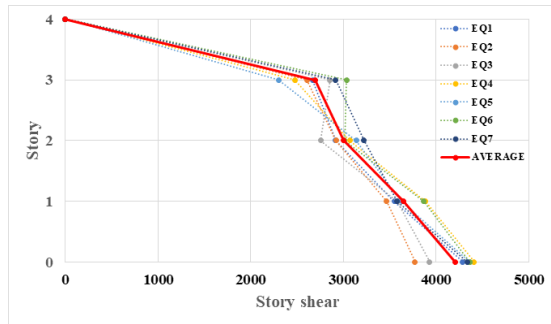
### 4.2.1 층간변형률

보강 후 예제구조물에 대한 층간변형률 그래프를 <Fig. 15>와 같이 나타내었다. 목표성능인 CP Level을 만족하였으며, 보강전 구조물에 비해 7개 평균 지진파에 대한 평균 층간변형률은 3층에서 최대 8.8% 감소하였다.

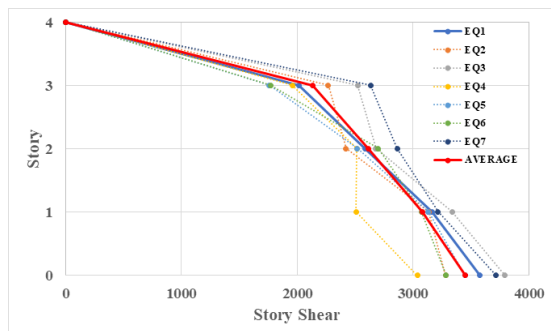


<Fig. 15> Story drift ratio of None-model

### 4.2.2 층전단력



(a) None-model



(b) HRS Model

<Fig. 16> Story Shear Graph

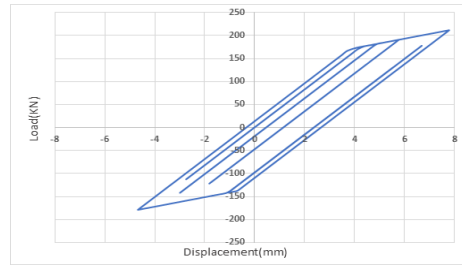
보강 전 구조물과 보강 후 구조물의 7개 지진파에 대한 평균 층전단력을 <Fig. 16>, <Table 8>과 같이 나타내었다. 보강 후 층별 평균 층전단력이 보강 전에 비해 감소하였고 총 밀면전단력은 보강전에 비해 약 20% 저감되어 감쇠장치 초기설계단계에서 가정한 감소비율과 유사하였다.

<Table 8> Base Shear of Structure

Base Shear of None-Model	Base Shear of PC-BRB Model
4209.11kN	3448.24kN

### 4.2.3 HRS 댐퍼 이력거동

<Fig. 17>은 7쌍의 지진파 Case 중 최대 변형이 일어난 HRS댐퍼의 이력거동을 나타낸 그래프이다. 해석이 진행되는 동안 내력저하 없이 이력거동이 안정적이며, 설계변위 이내로 예제구조물에 요구되는 하중에 따라 감쇠장치의 용량이 적절하게 설계된 것으로 판단된다.



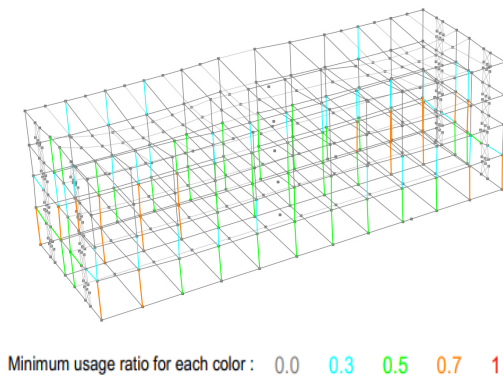
<Fig. 17> Hysteretic Behavior of HRS Damper

### 4.2.4 부재별 성능수준 검토

해석모델에 대해 7쌍의 지진파에 대한 기둥의 평균 전단력 및 회전각을 평가하여 <Table 9>과 같이 나타내었으며 부재별 휨변형에 대한 성능수준을 <Fig. 18>과 같이 나타내었다. 평균 전단력에 대한 내력비 검토결과 전단내력비는 1 이내로 만족하였고 보강전 Collapse가 발생한 Case 1에 대한 전면부 기둥에서 기둥 회전각은 LS Level로 평가되었다.

<Table 9> Performance Level of Column

Column	Rotation / Criteria of CP Level	Shear Force(kN)			Performance Level
		Force	Strength	Ratio	
1C2 (2Axis)	0.0051 / 0.0079	83.64	101	0.82	LS
1C2 (3Axis)	0.0039 / 0.0079	98.04	101	0.97	LS



(Fig. 18) Performance Level of None-Model(Case 1)

## 5. 결론

HRS 댐퍼는 슬릿플레이트에 고감쇠고무를 결합한 복합감쇠장치로 저변위에서 초탄성 거동에 대해 슬릿플레이트가 보완할 수 있다. 이전 연구에서는 내진성능에 대한 실험적연구를 진행하였으며, 본 연구에서는 예제구조물을 선정하여 HRS 댐퍼의 제진설계 절차에 따라 내진성능을 해석적으로 평가한 결과는 아래와 같다.

1) HRS 댐퍼의 해석모델을 구축하기 위해 증분가력 실험 결과에 따른 물리적특성을 정의하였고 정밀구조해석을 통해 Bilinear, Tri-Linear, Ramberg-Osgood로 비교한 결과 유사하게 나타났으며 해석에 사용된 이력 특성은 Bilinear Curve를 사용하였다.

2) 지상 3층 규모의 철근콘크리트 모멘트 골조를 예제구조물로 선정하여 보강 전 내진성능평가를 수행한 결과 층간변형률은 만족하였지만, 일부 기둥부재에서 휨 변형에 의한 Collapse가 발생하였다.

3) 내진성능의 확보를 위해 HRS 댐퍼의 제진설계 절차를 제시하여 해석을 수행하였으며, 예상 감쇠비에 따른 감쇠장치의 물량을 산정하여 예제구조물에 적용한 결과 이력특성이 내력저하없이 안정적으로 나타났고 감쇠효과에 따라 층간변형률과 밀면전단력이 저감되었다. 또한 보강 전 Collapse가 발생한 기둥 부재가 LS Level 을 만족하였다.

4) 본 연구를 통해 도출된 결과를 통해 향후 HRS 댐퍼를 활용한 기존 건축물의 제진설계시 기초자료로 활용이 가능할 것으로 판단되며 추후 연구에서는 정확한

제진설계를 위해 HRS 댐퍼 요소의 상세모델을 확립할 필요가 있다.

## 감사의 글

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(NRF-2020R1C1C1005779)에 의해 수행되었습니다.

## References

1. Roh, J. E., Lee S. H., "Experimental Evaluation of a Multi-action Hybrid Damper under Cyclic Loading", Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol.32, pp.3~9, 2016, doi: 10.5659/JAIK\_SC.2016.32.11.3
2. FEMA, "Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components(FEMA-461)", pp.21~23, 2007.
3. Architectural Institute of Korea, "Seismic Building Design Code and Commentary : KDS 41 17 00", pp.136~139, 2019.
4. Ministry of Education, "Seismic Performance Evaluation and Reinforcement Manual for School Facilities", pp.97, 2021
5. S.H. Lee, "Damping system applied structure design according to KBC 2016", MIDAS Technical Leader's Group, 2015.

- Received : August 16, 2022
- Revised : September 5, 2022
- Accepted : October 2, 2022