

유전자 알고리즘을 이용한 비대칭 강성 구조물의 내진보강 최적설계

Optimal design of seismic reinforcement for structures with asymmetric rigidity plans using genetic algorithm

이 준 호*
Lee, Joon-Ho

김 유 성**
Kim, Yu-Seong

성 은 희***
Sung, Eun-Hee

Abstract

In this study, we propose an optimal design method by applying the Prefabricated Buckling Restrained Brace (PF-BRB) to structures with asymmetrically rigidity plan. As a result of the PF-BRB optimal design of a structure with an asymmetrically rigidity plan, it can be seen that the reduction effect of dynamic response is greater in the case of arrangement considering the asymmetric distribution of stiffness (Asym) than in the case of arrangement in the form of a symmetric distribution (Sym), especially It was confirmed that at an eccentricity rate of 20%, the total amount of reinforced PF-BRBs was also small. As a result of analyzing the dynamic response characteristics according to the change in eccentricity of the asymmetrically rigidity plan, the distribution of the reinforced PF-BRB showed that the larger the eccentricity, the greater the amount of damper distribution around the eccentric position. Additionally, when comparing the analysis models with an eccentricity rate of 20% and an eccentricity rate of 12%, the response reduction ratio of the 20% eccentricity rate was found to be large.

Keywords : Optimal design, Genetic Algorithm, Buckling Restrained Brace, Seismic Retrofit

1. 서론

사용 용도의 복잡성과 형태에 대한 미적 수준의 증가, 그리고 건설기술의 향상으로 최근 구조물은 다양한 형태의 평면을 갖게 되었다. 이러한 평면 형태는 수평 및 수직하중을 견딜 뿐만 아니라, 다양한 공간을 창출하기 위해 불균등한 강성 및 질량 분포를 가진 비대칭 구조를 채택하게 된다. 특히 이러한 구조물은 대칭 평면과는 달리 지진하중이나 풍하중이 구조물에 작용할 경우 편심에 의해 비틀림 회전이 발생하고, 수평 변위가 증폭될 수 있다.¹⁾

비대칭 강성 구조물의 내진 보강에 대한 기존 연구에서는 수동형 제진장치인 점성 감쇠기와 점탄성 감

쇠기²⁾ 및 다양한 종류의 TMD³⁾를 적용하여 내진성능을 확인하였고, 준능동 제어 감쇠기인 MR감쇠기를 이용하여 수동형 제어보다 준능동 제어가 더 효과적임을 확인하였다.⁴⁾ 일부 연구에서는 단일 비대칭 구조물의 내진보강 최적설계에 대한 연구가 수행되었으며, 감쇠기와 TMD 등을 이용하여 수평변위 또는 비틀림 회전을 최소화하기 위한 최적 용량 및 최적의 위치, 분포 등을 제안하였다.⁵⁾

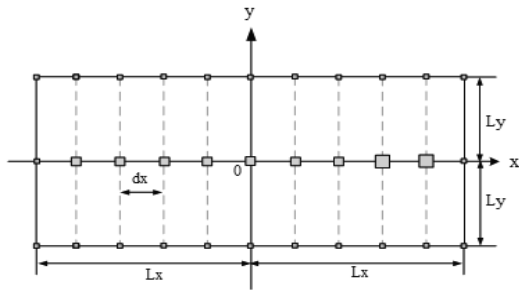
본 연구에서는 비대칭 강성 평면 구조물을 예제구조물로 선정하여 선행연구⁶⁾에서 제안된 조립식 좌굴 방지가새형 이력댐퍼(Prefabricated Buckling Restrained Brace, PF-BRB)를 최적설계기법인 유전자 알고리즘을 통해 내진보강 최적설계를 수행하였다. 최적설계 변수는 대칭 평면 구조물과 비대칭 강성 평면 구조물의 PF-BRB 평면위치상 보강분포 형태와 비대칭 강성에 따라 편심율에 변화를 주어 제어성능을 분석하였다.

* 정회원, 서일대학교 건축과 조교수, 공학박사
Department of Architecture, Seoil University
** 정회원, (주)허브구조엔지니어링 과장, 박사수료
*** 교신저자, 정회원, 서일대학교 건축과 조교수, 공학박사
Department of Architecture, Seoil University
Tel: 02-490-7427 Fax: 02-490-7808
E-mail: 20190075@seoil.ac.kr

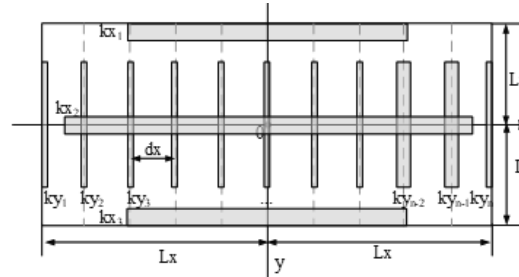
2. PF-BRB의 내진보강 최적설계

2.1 비대칭 강성 평면

본 연구에서 다룰 비대칭 강성 평면을 가진 해석모델은 <Fig. 1>와 같이 10층 보-기둥 골조에 질량중심 (Center of Mass, CM) 기준으로 내력벽을 한 쪽 측면에만 배치하여 질량 중심과 강성중심(Center of Stiffness, CS) 사이의 편심에 의해 Y방향으로만 비대칭 강성을 가지는 평면을 계획하였다.



(a) Uni-Asymmetric Stiffness Plan



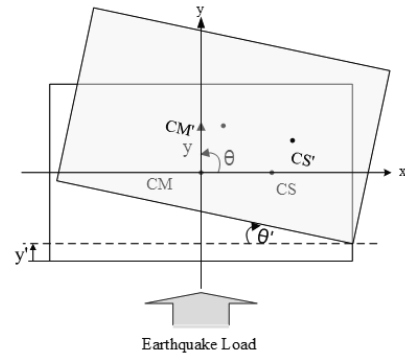
(b) Numerical Model of Uni-Asymmetric Stiffness Plan

<Fig. 1> Analytical Model

편심에 의해 비대칭 강성 평면을 가진 구조물의 경우 비틀림 회전의 자유도가 발생하여, 평면은 3개의 자유도(x, y, θ)를 가진다. <Fig. 2>와 같이 한방향 편심을 가지고 있는 구조물은 수평변위와 비틀림 회전은 편심에 의해 연계되어 발생하므로 Y방향 가진 시 수평변위와 비틀림 회전이 발생하여 변위가 증폭되는 응답 특성을 가지고 있으나, 편심이 없는 X방향으로 가진 시 수평 변위만 발생한다. 따라서 해당 평면에 대한 내진보강을 실시 할 경우 대칭 구조물의 응답을 나타내는 X방향에서는 기존의 대칭구조물의 내진보강기법을 적용하면 되나, 편심을 가진 Y방향은 비대

칭 특성을 고려한 내진보강이 필요하다.

그러므로 수치해석모델의 X방향 및 Y방향의 위치별 강성행렬과 위치좌표벡터, 위치좌표제공벡터는 식 (1) ~ (3)과 같고, 평면의 자유도를 모두 고려한 전체 강성행렬은 식 (4)와 같다. 그러나 단일 방향 편심(Y 방향)을 가지는 비대칭 강성 평면이므로 Y방향 자유도(y)와 회전 자유도(θ)만 고려하여 축소 적용할 수 있으며, 비틀림 회전에 대한 강성(k_θ)는 X방향의 횡강성(k_x)과 독립관계이므로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.



<Fig. 2> Simplified Response of Asymmetric-Stiffness Structure

$$K_x = \begin{bmatrix} k_{x1} \\ k_{x2} \\ \vdots \\ k_{xn} \end{bmatrix}, \quad K_y = \begin{bmatrix} k_{y1} \\ k_{y2} \\ \vdots \\ k_{ym-1} \\ k_{ym} \end{bmatrix}_{n \times 1} \quad (1)$$

$$ly_1 = [-Ly \ 0 \ Ly] \quad (2)$$

$$lx_1 = [-Lx \ -Lx + dx \ \dots \ 0 \ \dots \ Lx - dx \ Lx]_{1 \times n} \quad (3)$$

$$ly_2 = [Ly^2 \ 0 \ Ly^2] \quad (3)$$

$$K_p = \begin{bmatrix} k_x & 0 & -k_{x\theta} \\ 0 & k_y & k_{y\theta} \\ -k_{x\theta} & k_{y\theta} & k_{\theta\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum K_x & 0 & -ly_1 K_x \\ -ly_1 K_x & \sum K_y & lx_1 K_y \\ 0 & lx_1 K_y & ly_2 K_x + lx_2 K_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

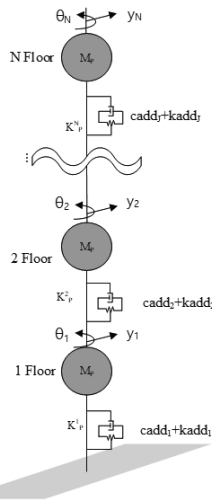
$$\bar{K}_p = \begin{bmatrix} \sum K_y & lx_1 K_y \\ K_y lx_1 & ly_2 K_x + lx_2 K_y \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2 좌굴방지가새형 PF-BRB를 이용한 내진 보강 시스템

2.2.1 보강시스템의 운동방정식

PF-BRB는 소성영역인 중앙 심재 모듈과 탄성으로

거동하는 접합부분으로 구성되어있으며, 구조물의 내진 보강에 적용될 경우 강성과 감쇠를 동시에 보강하는 효과를 나타낸다. 이에 따라, <Fig. 3>은 간략화된 다자유도 해석모델을 도식화한 것으로 PF-BRB로 보강된 수치해석모델의 운동방정식은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.



<Fig. 3> Damping Reinforcement System

$$M\ddot{X} + (C + C_{add})\dot{X} + (K + K_{add})X = -ME\ddot{x}_g \quad (6)$$

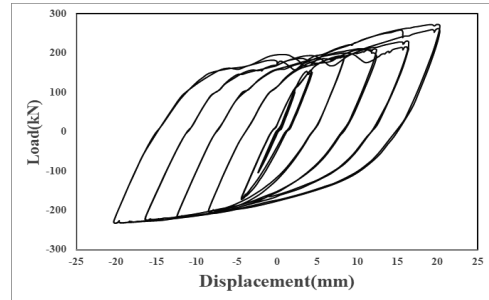
$$C_{add} = \begin{bmatrix} c_{add} \sum E_{add} & c_{add} l x_1 E_{add} \\ c_{add} E_{add} l x_1 & c_{add} \sum l x_2 E_{add} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$K_{add} = \begin{bmatrix} k_{add} \sum E_{add} & k_{add} l x_1 E_{add} \\ k_{add} E_{add} l x_1 & k_{add} \sum l x_2 E_{add} \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서, M , C , K 는 $2N \times 2N$ 크기의 질량, 감쇠, 강성 행렬이며, C_{add} , K_{add} 는 $2N \times 2N$ 크기의 추가되는 감쇠성분과 강성성분의 행렬이다. 기존의 수치해석모델의 강성행렬과 감쇠행렬에 PF-BRB에 대한 Y방향 감쇠성분과 PF-BRB의 횡방향 강성을 합산하여 산정 할 수 있다. \ddot{x}_g 는 지반가속도, 그리고 E 는 지진하중의 위치 벡터이며 Y방향으로 가진이 적용하므로 $E = [1010 \dots 10]^T$ 가 된다. 식(7), (8)는 평면에서 PF-BRB에 의해 추가되는 감쇠와 강성성분의 행렬로 c_{add} , k_{add} 는 PF-BRB의 감쇠용량계수와 강성계수를 나타낸다. E_{add} 는 $n \times 1$ 크기의 평면에서 감쇠기 설치되는 위치벡터이며, 감쇠기를 설치한 위치는 1의 값을 가지고, 설치하지 않은 위치는 0의 값을 가진다.

2.2.2 PF-BRB의 등가점성감쇠비

보강시스템의 PF-BRB는 선행연구에서 제안된 조립식 좌굴방지가새형 PF-BRB로 실험결과에 의한 하중-변위곡선과 물리적특성을 <Fig. 4>과 <Table 1>과 같이 나타내었다.

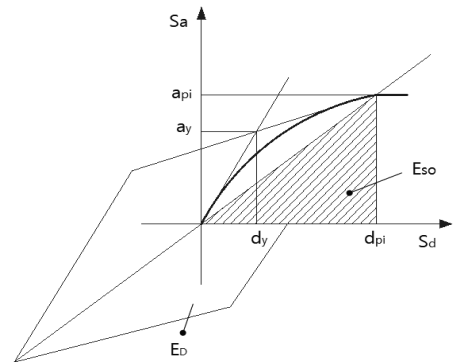


<Fig. 4> Load-Displacement Curve(PF-BRB)

<Table 1> PF-BRB Properties

Properties	Bi-linear (Comp)	Bi-linear (Ten)
Yield Strength(kN)	222.75	222.75
Yield Disp(mm)	8.07	8.07
Initial Stiff(kN/mm)	27.60	27.60
Post-Yield Stiff	4.49	4.49
Ratio(β)		
Max Strength(kN)	276.25	276.25
Max Disp(mm)	20	20

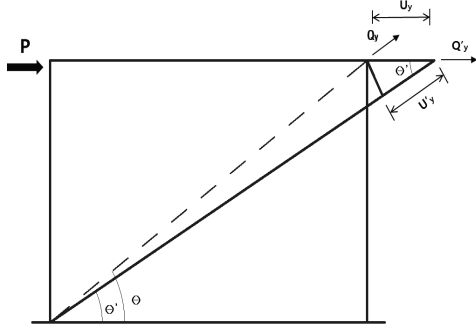
등가점성 감쇠비는 PF-BRB의 이력곡선을 기반으로 <Fig. 5> 및 식 (9)과 같이 이력거동에 의한 등가 감쇠비⁷⁾로 산정하였으며, PF-BRB의 이력거동을 이선형 곡선으로 이상화하여 이력곡선의 면적을 산정하였다.



<Fig. 5> Equivalent damping ratio

$$\beta_0 = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{SO}} = \frac{63.7(S_{ay}S_{dp} - S_{dy}S_{ap})}{S_{ap}S_{dp}} \quad (9)$$

수치해석모델과 보강시스템의 자유도를 일치시키기 위하여 PF-BRB의 축방향 자유도를 횡방향 자유도로 변환하여 산정하였다. 이 때 <Fig. 6>과 같이 미소변형의 가정으로 기하학적 원리에 따라 식 (10), (11)을 통해 강성행렬 및 감쇠행렬을 산정하였다.



<Fig. 6> Geometrical principles of brace stiffness

$$K' = K \cos^2 \theta \tag{10}$$

$$Q' = Q \cos \theta \tag{11}$$

여기서, K' 는 횡방향 강성, K 는 축방향 강성, Q' 는 횡방향 항복강도, Q 는 축방향 항복강도이다.

2.3 비대칭 강성 구조물의 PF-BRB 내진보강 최적설계

비대칭 강성 구조물의 PF-BRB를 이용한 내진성능 보강을 위하여 다음과 같이 최적설계방안을 제시하였다. 먼저 비대칭 강성 구조물의 최적설계를 위하여 강성분포의 비대칭성 고려하였으며, 이에 따른 영향성을 평가를 위하여 대상 구조물을 대칭강성분포 평면과 비대칭 강성분포 평면으로 나누어 최적설계를 실시하였다. 그리고 다양한 편심율을 적용하여 편심율에 따른 최적설계 영향성도 함께 평가하였다. 제시한 PF-BRB 보강시스템의 최적화는 층간변위를 기준으로 내진성능을 평가하였다. 이에 따라, 목적함수는 식 (12) ~ (14)와 같이 가진 지진 중 y방향의 최대층간변위(Δy_i)의 합이 최대인 값을 적용하였고, 이를 최소화되도록 하였다. 각각 식(12)은 구조물의 최대층간변위의 합을 나타내고 있으며, 식 (13)은 지진별 최대층간변위의 합이 최대인 것을 나타낸다.

$$Y_k = \sum_{i=1}^N \max(\Delta y_i) \tag{12}$$

k is numbers of earthquake loads, $k=1,2,\dots$

$$J = \max(Y_1, Y_2, \dots) \tag{13}$$

내진보강시스템의 최적 설계변수는 설치 층(f_{add})과 층별 설치 위치별 감쇠기 개수(N_{add})로 설정하였고, 이때 층별 설치되는 감쇠기의 개수는 층별 최대설치 개수(N_{add}^m)를 통해 제한하였다. 따라서 최종의 최적화식은 식 (14)과 같이 구성되며, 본 연구에서는 성능측면만을 고려하므로 단일 목적함수의 최적화기법으로 기존의 유전자 알고리즘을 채택하였다. 유전자 알고리즘은 해집단을 통해 여러 개의 설계 값을 동시에 평가할 수 있어 수행시간을 감축할 수 있으며, 교차, 변이, 대치를 통해 해집단의 다양성과 수렴성의 질을 조절할 수 있는 특징이 있다.⁸⁾ 따라서 본 연구에서는 해집단을 40개, 설계변수당 비트의 길이는 비대칭의 경우 4, 대칭의 경우 3으로 설정하였다. 그리고 2점 교차 적용하였으며, 교차율 0.85, 변이율은 0.2로 설정하였다.

Find design variables to minimize J

design variables: f_{add}^i, N_{add}^k

$$Y_{opt} = \min(J) \tag{14}$$

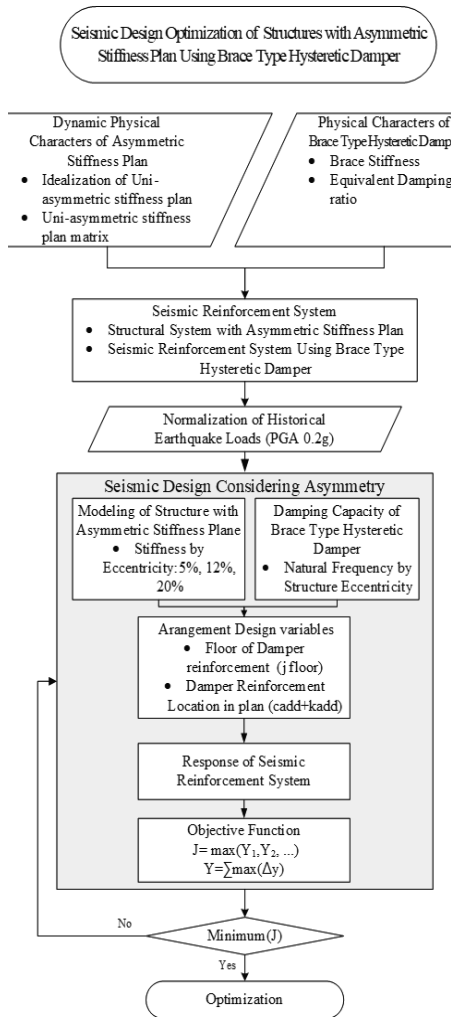
subject to $0 \leq N_{add}^k \leq N_{add}^m$

i is floor of reinforced damper $i=1,2,\dots$

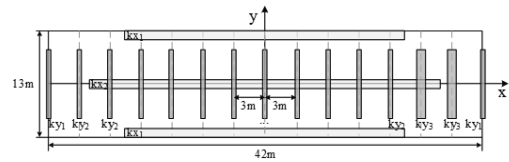
j is numbers of damper by reinforced location

$j=1,2,\dots$

본 연구의 최적설계 프로세스를 <Fig. 7>과 같이 나타내었다. 먼저 한방향 평면의 비대칭 강성분포 매트릭스와 실험을 통해 얻어진 이력담파의 값을 이용하여 내진보강시스템을 구성하였다. 수치해석을 위해 강성 편심율 5%, 12%, 20%를 가지는 10층 구조물을 모델링하였다. 그리고 0.2g로 정규화된 역사지진을 y 방향으로 가진하여 지진별 최대층간변위의 합이 최소가 되도록 최적설계를 실시하였다.



〈Fig. 7〉 Optimization Process of Structure with Asymmetric Stiffness Using Brace Type Hysteretic Damper



〈Fig. 8〉 Asymmetric-Stiffness Plan of Example Structures

〈Table 2〉 Physical Properties of the Example Structure

Story	mass (m_i , kg)	1st, 2nd mode damping ratio	X Directional Stiffness(N/m)	
			kx_1	kx_2
10	1.050×10^5	0.05	5.070×10^7	6.990×10^7

〈Table 3〉 Y Directional Stiffness by Eccentricity

ky_1 (10^6 N/m)	ky_2 (10^6 N/m)	ky_3 (10^7 N/m)		
		5%	12%	20%
7.331	12.90	1.910	2.940	4.410

〈Table 4〉 Historical Earthquake Load List

Earthquake Load	EQ 1	EQ 2	EQ 3
		El-centro	Mexico city

예제구조물에 적용된 PF-BRB의 감쇠와 감성계수는 〈Table 5〉와 같으며, 감쇠기의 등가점성감쇠용량 (c_{aad})은 식(15)을 이용하여 산출하였다. 여기서, ξ_i 는 앞 절에서 산정한 PF-BRB의 등가점성감쇠비이며, m 은 구조물의 1개 층의 질량을 나타낸다. 그리고 등가점성감쇠 용량은 가진 진동수와 구조물의 고유 진동수비($\frac{\omega}{\omega_n}$)가 1일 때, 최댓값을 가지므로, 구조물의 1차 고유진동수를 이용하였다. 본 연구의 수치해석 예제는 구조물의 질량은 고정이나, 편심율에 의해 강성이 변화하므로 ω_n 는 〈Table 3〉의 편심율별 $\sum ky$ 와 동일한 값을 가지는 대칭 강성 평면을 모델을 이용하여 산출하였다.

$$c_d = 2\xi_d m \omega_n \quad (15)$$

〈Table 5〉 Value of PF-BRB

	5%	12%	20%
ω_n (rad/sec)	6.439	6.770	7.216
c_{aad} (N-m/s)	3.469×10^7	3.467×10^7	3.888×10^7
k_{aad} (N/m)	2.119×10^7		

3. 수치해석

3.1 수치 예제

본 연구의 대상 구조물은 〈Fig. 8〉와 같이 Y방향 비대칭 강성평면을 가진 10층 구조물로, 평면의 질량과 감쇠비, K_x 는 〈Table 2〉와 같다. K_y 는 각각 5%, 12%, 20%의 편심율을 가지도록 하였으며, 그에 따른 K_y 의 값은 〈Table 3〉와 같다. 구조물의 응답을 구하기 위하여 총 3개의 역사지진파의 지반가속도를 이용하였고(〈Table 4〉), 최대 지반가속도(PGA)는 0.2g로 정규화 하였다.

ASCE 7-10에서는 설계밀면전단력의 최소 75%이상 이 지진력저항시스템이 단독으로 지지 할 수 있도록 댐퍼량이 요구되고 있으므로 PF-BRB의 보강량 제한조건은 <Table 6>와 <Table 7>과 같이 응답저감비(R_{ratio})가 25%인 값을 기준으로 보강량의 최댓값(N_{add}^m)을 제한하였다.

<Table 6> Design Conditions of Number Reinforced Damper

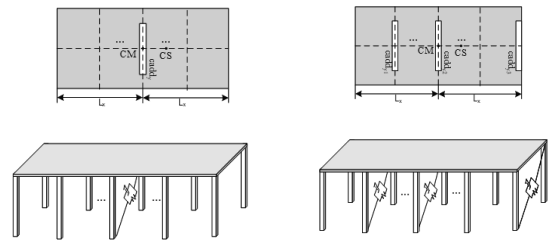
Design Variables Condition (ea)	
	$0 \leq N_{add}^j \leq N_{add}^m$
$c_d(N\text{-m/s})$	where N_{add}^m is maximum number of reinforced damper in floor

<Table 7> N_{add}^m by Eccentricity

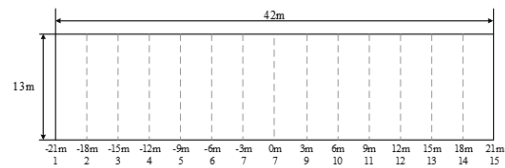
	5%	12%	20%
N_{add}^m (ea)	4	6	7
R_{ratio}	0.746	0.737	0.722

3.2 비대칭 강성 구조물의 내진보강 최적설계

비대칭 강성 평면을 가지는 구조물의 최적화설계를 위한 변수는 <Fig. 9>와 같이 PF-BRB를 질량중심에 위치 시킨 대칭분포(Sym) 모델과 최적설계 결과에 따라 배치시킨 비대칭분포(Asym)인 모델로 선정하였으며, 평면상 댐퍼가 보강될 위치는 <Fig. 10>과 같다.



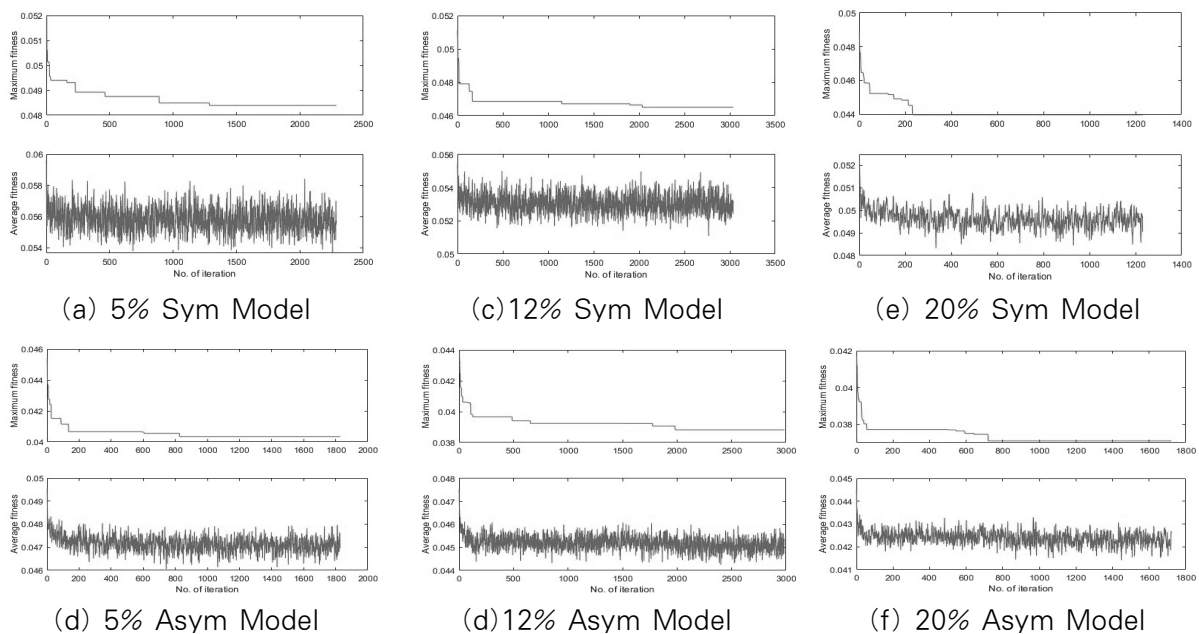
(a) Optimization of Symmetric stiffness plan (b) Optimization of Asymmetric stiffness Plan
<Fig. 9> Damper Reinforcement Location by Plan



<Fig. 10> Location of Reinforced Damper in plan

수치해석은 MATLAB(R2023b)을 통해 코딩하여 최적설계를 수행하였으며, Sym 모델과 Asym 모델의 동적응답을 비교하였다. 또한, 편심율의 영향성을 평가하기 위한 해석모델은 편심율을 5%, 12%, 20%로 변화시켜 분석하였다. 유전자알고리즘의 최적해의 수렴성은 동일해가 1000번 나올 경우 이를 수렴하는 것 설정하였고 <Fig. 11>은 편심별 최적화 수렴 결과이다.

비대칭 강성 평면 구조물의 PF-BRB 보강 후 최적



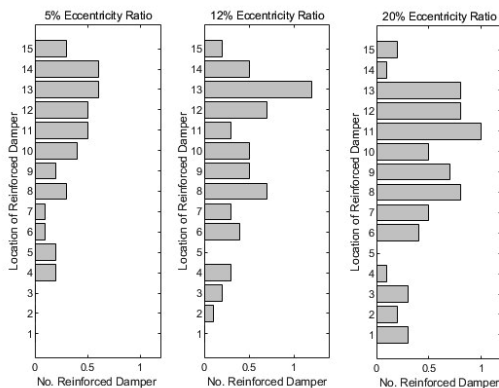
<Fig. 11> Optimized Convergence of Eccentricity

설계 결과 보강되는 PF-BRB의 총 개수($\sum_{i=1}^{10} N_{add}^i$)는 <Table 8>과 같이 편심율이 5%와 12%에서는 비대칭 분포(Asym)의 $\sum_{i=1}^{10} N_{add}^i$ 는 각각 40개, 59개로 동일한 값을 가지는 것을 확인할 수 있으며, 20%에서는 Asym에서 67개로 Sym에서 70개로 Asym이 총 개수가 작은 것을 확인할 수 있다.

<Table 8> N_{add}^j of optimal Design Result(ea)

	5%	12%	20%
Sym	40	59	70
Asym	40	59	67

층별 최대 설치개수(N_{add}^m)를 기준으로 Asym의 편심율별 댐퍼의 평균분포를 <Fig. 12>와 같이 그래프로 나타내었다. 편심율이 5%에서는 평면에서 강성분포가 큰 위치 13, 14번에 가장 큰 분포를 가지는 것을 확인할 수 있으며, 도심을 기준으로 대칭인 위치 2, 3에서는 댐퍼가 설치되지 않은 것을 확인할 수 있다. 편심율이 12%에서는 13번에서 가장 큰 분포를 가지는 것을 확인할 수 있으며, 편심율 5%와 달리 위치 2, 3에서 댐퍼가 설치되었고, 5번에서 설치되지 않은 것을 확인할 수 있다. 편심율 20%에서는 위치 11에서 가장 큰 분포를 가지는 것을 확인할 수 있으며, 편심율 12%와 같이 위치 5에서 댐퍼 분포가 없는 것을 확인할 수 있다.

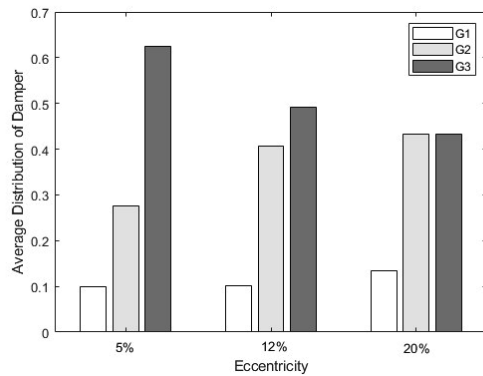


<Fig. 12> Damper Average Distribution of Optimal Design

편심율별 댐퍼 분포 영향성을 확인하기 위하여 댐퍼의 분포위치를 <Table 9>과 같이 3개의 그룹으로 나누었으며, 그에 따른 결과는 <Fig. 13> 같다.

<Table 9> Group of Reinforced Damper Location

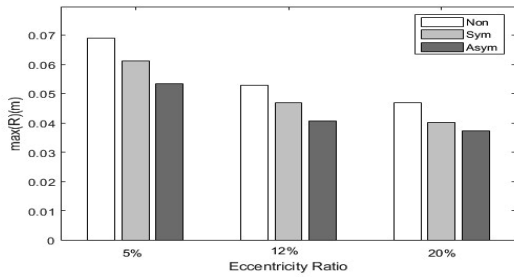
	G1	G2	G3
No.Location	1~5	6~10	11~15



<Fig. 13> Damper Distribution by Group

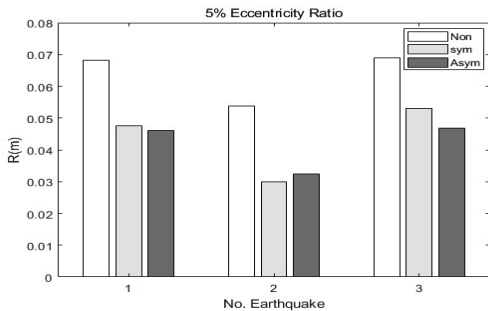
편심율이 5%에서는 G1 그룹의 경우 10.0%, G2 그룹은 27.5%, G3그룹은 62.5%의 분포율이 나타났으며, 편심율이 12%에서는 각각 G1, G2, G3 그룹 각각 13%, 41%, 49%로 나타났다. 또한, 편심율이 20%에서는 각각 G1, G2, G3 그룹 각각 13.4%, 43.3%, 43.3%로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 PF-BRB 보강 분포경향은 공통적으로 G1그룹에서 가장 작은 값을 가지나, 그 외의 G2그룹과 G3그룹의 분포율은 편심율이 작을수록 분포율 차이가 큰 것을 확인할 수 있다.

최적설계 시 구조물의 응답의 경우 3개의 지진파에 대해 최대 층간변위의 합 ($\max(R_{\Sigma}), R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{10} \max(dy_i)$)을 산정하여 이 중 최댓값으로 적용하였으며, PF-BRB의 분포형태 및 편심율에 따른 최적설계 결과를 <Fig. 14>과 같이 나타내었다. <Fig. 14>에서 Non은 보강하지 않은 해석모델 이며, Sym과 Asym은 각각 PF-BRB의 대칭형 분포와 비대칭 분포 형태로 배치했을 때의 응답 결과이다. 해석결과 편심율 5%, 12%, 20% 모두 Asym에서 가장 작은 응답을 가지는 것을 확인할 수 있다.

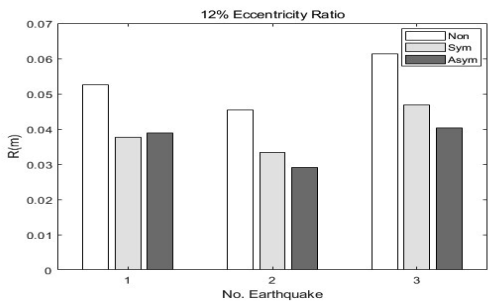


〈Fig. 14〉 Max(R) of Optimal Design

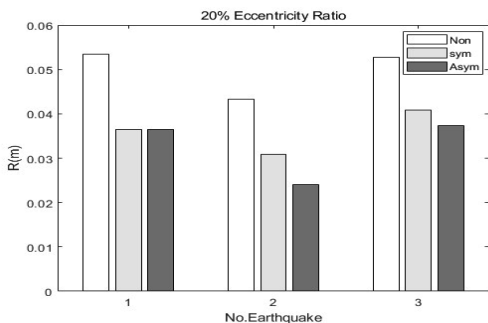
지진하중 별 최대 상대변위의 합은 〈Fig. 15〉와 같다. 편심율 5% 해석모델의 경우 지진하중 별 응답 〈Fig. 15〉(a)을 살펴보면 EQ 1과 EQ 3에서는 Asym의 응답이 작은 것을 확인할 수 있으며, 편심율 12% 과 20% 해석모델의 경우 〈Fig. 15〉(b), 〈Fig. 15〉(c) EQ 2, 3에서 Asym의 응답이 가장 작게 나타났다.



(a) Analytical Model of 5% Eccentricity ratio

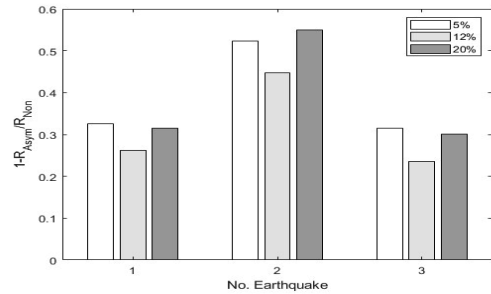


(b) Analytical Model of 12% Eccentricity ratio



(c) Analytical Model of 20% Eccentricity ratio
〈Fig. 15〉 Sum of Y-Directional Story Drift

편심별 응답 감소비($1 - R_{Asym}/R_{Non}$)는 〈Fig. 16〉과 같으며, 3가지 지진과 모두 12%의 편심율의 응답 감소비가 가장 작은 것을 확인할 수 있다.



〈Fig. 16〉 Response Reduction Rate by Eccentricity ratio

4. 결론

본 연구를 통해 비대칭 강성 평면을 가지는 구조물에 조립식 좌굴방지가새형 이력댐퍼 보강기법을 적용하여 유전자알고리즘을 이용한 최적설계를 수행하였으며, 그 결과는 아래와 같다.

1) 비대칭 강성평면을 가지는 구조물의 PF-BRB 최적설계 결과 강성의 비대칭분포를 고려하여 배치한 경우(Asym)가 대칭분포 형태로 배치한 경우(Sym)보다 응답의 감소효과가 큰 것을 확인할 수 있으며, 특히 20%의 편심율에서는 보강되는 PF-BRB의 총 개수 또한 작은 것을 확인하였다.

2) 비대칭 강성평면의 편심율 변화에 따른 동적응답 특성을 분석한 결과 보강되는 PF-BRB의 분포는 편심이 클수록 편심 위치 주변의 댐퍼 분포량이 증가하였으며, 편심율 20%와 편심율 12%의 해석모델을 비교하였을 때 편심율 20%의 응답감소비가 크게 나타났다.

추후 연구에서는 비대칭 평면형상을 가지는 구조물을 예제구조물로 선정하여 최적설계연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 신진연구자 지원 사업 과제

(NRF-2020R1C1C1005779)에 의해 수행되었습니다.

References

1. R. Hejal & A.K. Chopra, "Earthquake Analysis of a Class of Torsionally-Coupled Buildings", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 18, pp. 305-323, 1989, DOI:<https://doi.org/10.1002/eqe.4290180302>
2. L. Petti & M. De luliis, "Torsional Seismic Response Control of Asymmetric-Plan Systems by Using Viscous Dampers", *Journal of Engineering Structures*, Vol.30, No.9, pp.1089~1108, 2008, DOI:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.05.023>
3. S.V. Mevada & R.S. Jangid., "Seismic Response of Torsionally Coupled System with Magnetorheological Dampers", *Advances in Civil Engineering*, Vol.2012, No.4, pp.1~26, 2012, DOI:<https://doi.org/10.1155/2012/381834>
4. J.J. Aguirre et al, "Optimal Control of Linear and Nonlinear Asymmetric Structures by Means of Passive Energy Dampers", *Earthquake Engineering & Structural Dynamic*, Vol.42, pp.377-395, 2013, DOI:<https://doi.org/10.1002/eqe.2211>
5. Hong-Nan Li & Xiu-Ling Li, "Experiment and Analysis of Torsional Seismic Responses for Asymmetric Structures with Semi-active Control by MR Dampers", *Smart Materials and Structures*, Vol.18, No.7, pp.1-10, 2009, DOI:<https://doi.org/10.1088/0964-1726/18/7/075007>
6. Kim, Y. S. & Lee, J. H., "Structural Performance Test according to Initial shape design of PF-BRB", *Journal of Korean Association for Spatial Structures*, Vol.23 No.4 pp.71~72, 2023 DOI:<http://dx.doi.org/10.9712/KASS.2023.23.4.71>
7. Lee et al, "Optimal Design of Friction Dampers based on the Story Shear Force Distribution of a Building Structure", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.9 No.46 pp.21~30, 2005 DOI:<https://doi.org/10.5000/EESK.2005.9.6.021>
8. M. Gen & Cheng, "Genetic Algorithms and Engineering Design", John Wiley & Sons, Inc., 1997, DOI:<https://doi.org/10.1002/9780470172254>

- Received : April 08, 2024
- Revised : May 17, 2024
- Accepted : June 05, 2024