

응답스펙트럼을 활용한 감쇠장치 예비 설계절차 제시

Preliminary Design Procedure for Practical Application of Dampers Using Earthquake Response Spectrum

노지은¹⁾ · 이상현^{2)*}

Roh, Ji Eun¹⁾ · Lee, Sang Hyun^{2)*}

¹⁾단국대학교 리모델링연구소 박사후연구원, ²⁾단국대학교 건축공학과 교수

¹⁾Post-doc Researcher, Seismic Retrofit and Remodeling Research Center, Dankook University, ²⁾Professor, Department of Architectural Engineering, Dankook University

/ A B S T R A C T /

In this study, a design procedure for the practical application of the dampers to building structures under earthquake loads was presented by using earthquake response spectrum. Nonlinear time history results using a 10 story building structure installed with damper verified the effectiveness of the proposed procedure by showing that the structural response could be reduced to the target performance level for seismic loads. Since the proposed design procedures are based on response spectrum seismic analysis result of the original structure, the capacity, location and the number of damper and the consequent response reduction effects can be preliminarily determined without performing the nonlinear time history analysis.

Key words: Damper design procedure, Response spectrum, Seismic design

1. 서론

점성형, 마찰형, 금속항복형 등의 수동형 감쇠장치는 구조물의 지진응답을 감소시키기 위한 목적으로 자주 사용되고 있다. 지진응답을 최소화하기 위한 감쇠장치의 최적용량과 배치는 감쇠장치가 설치되는 구조물의 규모, 구조형식, 주기 등의 특성이 다르기 때문에 결정하기가 복잡하며, 실제 현장에서는 감쇠장치의 설계 변수마다 비선형 시간이력해석을 수행하여 도출된 해석결과를 통해 감쇠장치를 설계하고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 수동형 감쇠장치의 최적설계에 대한 많은 연구가 진행되었다. Kasai et al은 0.2~3.0초 주기의 구조물을 대상으로 총 31개의 지진파 해석을 수행하여 마찰감쇠기가 적용된 구조물의 지진응답 감소계수를 제안하였다[1]. Filiatrault and Cherry는 지진의 진폭, 진동수 및 마찰감쇠기의 슬립하중에 대한 변수연구를 진행하였으며 변형에너지 측면에서 평가되는 상대성능지수(RPI)를 도입하여 RPI의 최소값에 상응하는 슬립하중을 산정하는 마찰감쇠기 설계절차를 제시하였다[2]. 이상현 외는 지진하중을 받는 탄성구조물을 대상으로 충전단력 분포에 기초한 마

찰감쇠기의 설치 층수와 위치 및 슬립하중의 분배를 결정하는 설계방법을 제시하였다[3]. Miguel et al.은 역추적탐색 알고리즘(BSA, Backtracking Search optimization Algorithm)을 적용하여 반복적인 해석을 수행함으로써 감쇠장치의 설치 위치와 슬립하중의 크기를 동시에 최적화시키는 방법을 제시하였다[4]. Nabid et al은 슬립하중의 분포를 변수로 하여 3, 5, 10, 15, 20층 RC구조물의 7개 지진파에 대한 비선형 시간이력해석을 수행하여 최적의 슬립하중 분포값을 도출하였으며, 이를 바탕으로 마찰형 벽식담퍼의 실용적인 설계법을 제시하였다[5]. 또한 지진하중에 대한 구조물의 최대응답을 예측하고자 하는 연구가 수행되었는데 Ben-Haim and Elishakof의 전역 에너지 제한 컨벡스 모델(Global energy bound convex model, GEB) [6], Wu and Soong의 적분 에너지 제한 컨벡스 모델(Integral energy bound convex model, IEB) [7], Shinozuka의 푸리에 모델(Fourier envelope bound convex model, FEB) [8] 등이 있다.

감쇠장치 최적설계 및 지진하중응답 간략 예측에 대한 기존 연구는 특정 지진파에 의해 도출된 설계계수인 경우가 많으며, 마찰감쇠기가 적용된 구조물을 대상으로 대부분 연구되었기 때문에 구조물이 이선형 거동하는 경우에만 적용하도록 한정하는 단점이 있다.

본 연구에서는 적용하려는 지진파 및 감쇠장치 이력의 제한이 없으며, 상당한 시간이 소요되는 비선형 시간이력해석의 수행 없이 지진파의 탄성 응답스펙트럼과 감쇠장치 설치 전 구조물의 응답스펙트럼 해석결과만을

*Corresponding author: Lee, Sang Hyun

E-mail: lshyun00@dankook.ac.kr

(Received July 23, 2018; January 23, 2019; Accepted January 23, 2019)

바탕으로 감쇠장치의 용량 및 설치 층과 개수를 예비 설계하는 절차를 제안 하였다. 우선 단자유도 구조물의 선형해석을 통해 7쌍 지진파의 탄성 변위 응답 스펙트럼을 작성하며 응답스펙트럼 상에서 감쇠장치가 설치된 구조 물의 응답이 어떤 과정으로 결정되는지 나타낸다. 이를 바탕으로 탄성 응답 스펙트럼을 활용한 감쇠장치 설계절차를 제시하며, 실제 10층 철골구조물 을 대상으로 제시된 설계절차를 따라 감쇠장치를 설계한 이후 비선형 시간 이력해석을 수행하여 설계절차를 통해 설계한 결과가 목표 성능수준까지 감소하는지 확인하는 절차를 거쳐 설계절차의 타당성을 검증한다.

2. 응답스펙트럼을 활용한 응답저감계수 산정

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = -\ddot{x}_g \quad (1)$$

지진하중을 받는 구조물의 운동방정식은 식(1)과 같이 표현될 수 있다. 이와 같이 구조물의 응답(\ddot{x}, \dot{x}, x)은 감쇠비(ξ)와 고유진동수(ω_n)에 의해 결정되며, 구조물에 감쇠장치를 적용할 경우 감쇠비는 증가하며 강성의 증가로 인해 고유진동수는 감소하게 되는 결과를 보인다.

일반적으로 지진파를 이용하여 구조물의 3차원 해석을 수행하는 경우에는 서로 직교하는 2성분의 쌍으로 구성된 7개의 지진파를 사용한다. 단자유도 구조물의 지진파 해석을 통하여 각 지반운동에 대한 구조물의 주기 (T) 및 감쇠비(ξ)에 따른 탄성 응답스펙트럼을 작성할 수 있으며, 이러한 응답스펙트럼을 활용하여 특정 주기(T_0)와 감쇠비(ξ_0)를 가지는 구조물에 대해서 주기 및 감쇠비 변화에 따른 응답 감소율을 예측할 수 있다.

Fig. 1은 본 논문에서 사용한 지진파 원파의 응답스펙트럼으로 0~1.0초 사이의 주기 성분이 증폭되는 7쌍 지진파를 선정하였다. 적용한 지진파는 설계 시 일반적으로 사용되는 El Centro (1940), Taft (1952), Hachinohe (1968), San Fernando (1971), Northridge (1994), Loma Prieta (1989), Kobe (1995)로 각 지진파에 대한 탄성 응답스펙트럼을 이용하여 구조물의 주기 및 감쇠비 변화에 따른 응답변화를 예상하였다.

Fig. 2와 같은 주기 0.5초, 감쇠비 2%인 단자유도 구조물에 감쇠장치를 설치할 경우 원 구조물에 강성이 추가되어 주기는 짧아지며, 감쇠는 증가하게 된다. 그러므로 감쇠장치가 설치된 단자유도 구조물은 주기 0.15~0.5초, 감쇠비 2~30% 사이 구간에서 어느 하나의 특성을 가지고 거동할 것이라 예측할 수 있다. Fig. 3은 El Centro (1940) 지진파의 단자유도 해석을 통해 산정한 탄성 변위 응답스펙트럼 중 주기 0.15~0.5초, 감쇠비 2~30% 구간을 추출한 그래프이다. 이렇게 추출한 그래프를 원 구조물의 특성인 주기 0.5초, 감쇠비 2%일 때의 값을 기준으로 정규화 할 경우 Fig. 4와 같이 원 구조물에 대한 주기, 감쇠비 변화에 따른 변위 응답저감계수를 산정할 수 있다.

이러한 방식으로 각 지진파의 변위 응답저감계수를 산정하였으며, 7쌍 지진파에 대한 평균 그래프는 Fig. 5와 같다. 0.15~0.5초 주기 구간에서는 구조물의 주기가 짧아질수록 변위응답은 감소하며, 감쇠비가 클수록 변위 응답이 감소하는 경향을 보여 감쇠장치 설치 시 구조물의 변위응답은 감소할 것으로 예측할 수 있다.

응답스펙트럼을 활용하여 감쇠장치 추가에 의한 구조물의 응답감소율을 산정하기 위해선 먼저 감쇠장치에 의해 추가되는 감쇠비(ξ_d)와 감쇠장

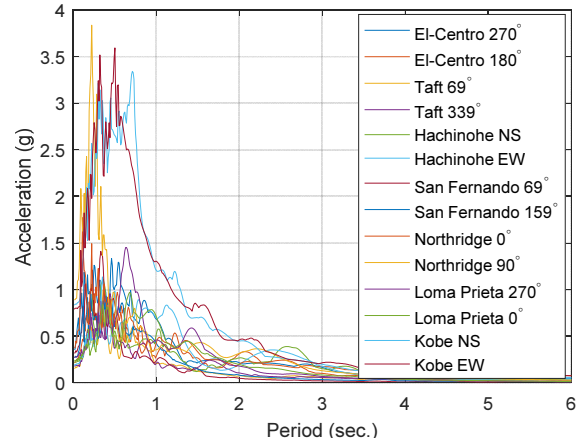


Fig. 1. Response spectrum of seismic waves

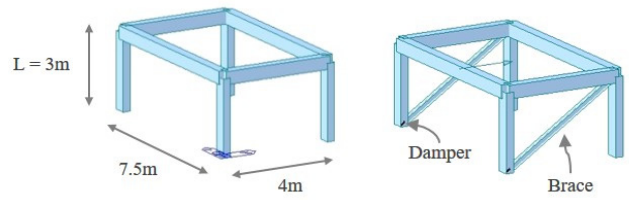


Fig. 2. Modeling of SDOF system with damper

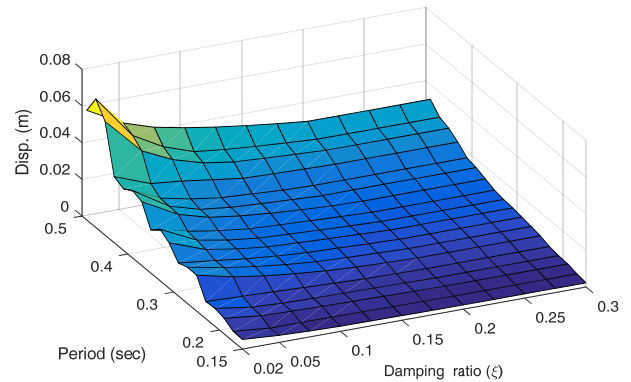


Fig. 3. Displacement response spectrum of El Centro earthquake (T:0.15~0.5 sec)

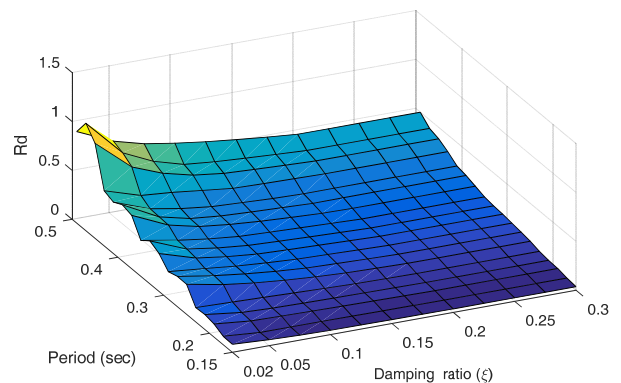


Fig. 4. Displacement response reduction factor by El Centro earthquake (T:0.15~0.5 sec)

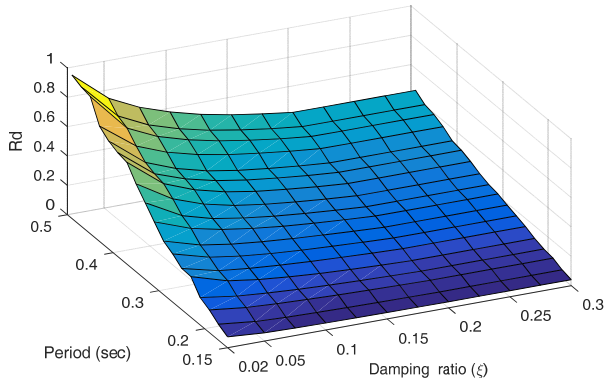


Fig. 5. Mean response reduction factor by 7 pairs of seismic waves (T:0.15~0.5 sec)

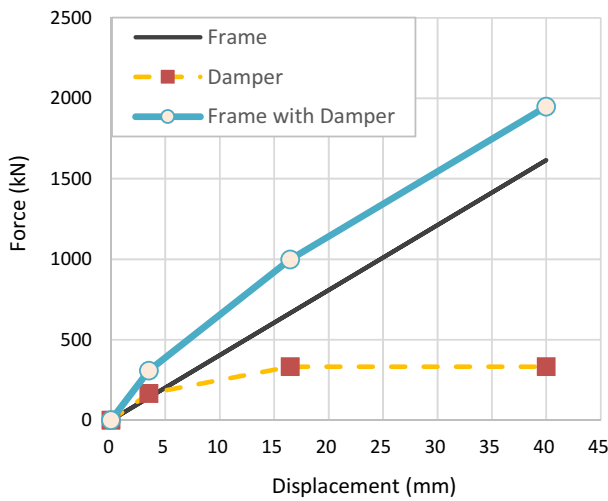


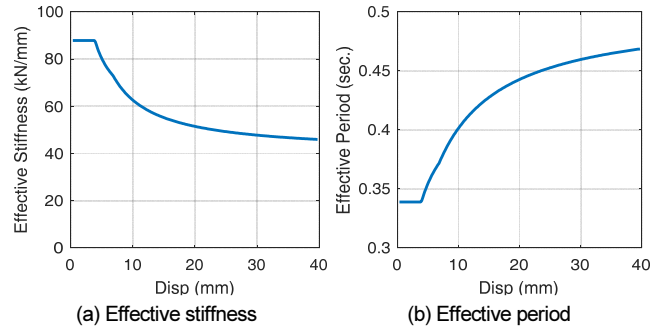
Fig. 6. The increase in strength and stiffness of frame by damper

Table 1. Applied properties of damper

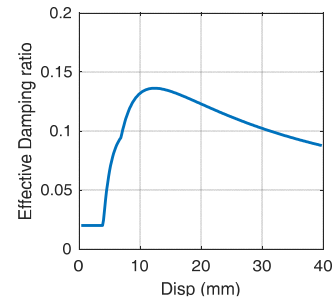
Initial stiffness	40 kN/mm	1st yield strength	100 kN
Post-yield stiffness	9.5 kN/mm	2nd yield strength	200 kN

치가 설치된 구조물이 거동하는 주기 (T)를 알아야 한다. 7쌍의 지진파 시간이력해석 결과 원 구조물의 평균 변위응답은 33.1 mm가 발생하였으며, 감쇠장치 설치 후 변위응답은 원 구조물 변위의 0.01~1.2배 사이로 예상하여 응답범위를 설정할 수 있다. 그 후 감쇠장치의 성능(강도, 강성)을 결정하면 감쇠장치가 설치된 구조물의 이력이 정해지기 때문에 각 변위에서의 유효주기와 유효감쇠비를 산정할 수 있다. Fig. 6과 같이 강성이 40 kN/mm인 단자유도 구조물(실선)에 Table 1의 특성을 가지며 삼선형 이력을 그리는 감쇠장치(점선)를 설치할 경우 감쇠장치를 설치한 구조물(원표식이 있는 실선)의 이력이 결정되며, 이를 통해 Fig. 7과 같이 각 변위에서의 유효주기와 유효감쇠비를 산정할 수 있게 된다.

Fig. 7은 Table 1의 특성을 가지는 감쇠장치 2개를 단자유도 구조물에 설치하였을 때 예상응답범위에서의 유효강성, 유효주기, 유효감쇠비를 나타낸다. 구조물이 작은 변형으로 움직일 때는 원 구조물 강성의 2배 이상인 88 kN/mm의 강성으로 거동하다가 변형이 증가할수록 강성은 원 구조물의 강성인 40 kN/mm에 수렴해가며, 주기는 원 구조물의 주기인 0.5초로



(a) Effective stiffness (b) Effective period



(c) Effective damping ratio

Fig. 7. Characteristics of structure with damper in the expected responses

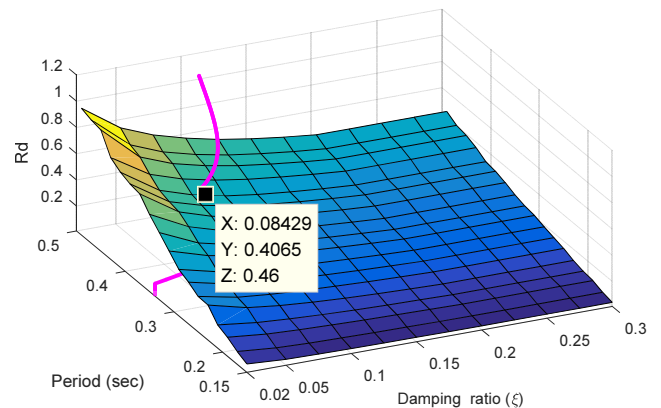


Fig. 8. Prediction of response reduction rate using response spectrum

수렴한다. 감쇠비는 일정 변형까지는 증가하다가 다시 감소하는 경향을 가진다.

이렇게 각 예상응답범위에서 산정한 유효주기와 유효감쇠비를 Fig. 8과 같이 3차원 상의 실선으로 표현할 수 있으며, 이 실선(감쇠장치가 설치된 구조물의 응답 곡선)과 응답저감계수를 나타내는 곡면 그래프가 만나는 교차점을 감쇠장치를 설치했을 때의 감소율로 예측할 수 있다. Fig. 8에 따르면 지진파의 탄성 응답스펙트럼을 활용하여 예측한 감쇠장치 설치 구조물의 변위응답은 원 구조물의 46.0%이며, 적용한 7쌍 지진파에 대해 평균적으로 주기 0.4초, 감쇠비 8%의 특성을 지니며 거동한다고 예측할 수 있다.

3. 응답스펙트럼을 활용한 감쇠장치 내진설계절차

응답스펙트럼을 활용한 감쇠장치 내진설계절차는 다음과 같다.

- 1단계: 원 구조물의 감쇠비(ζ_0)를 가정한다.
- 2단계: 고유치해석을 수행하여 구조물의 주기를 확인하고, 원 구조물의 응답스펙트럼 해석을 수행하여 구조물에 가해지는 지진하중과 발생하는 층변위를 산정한다.
- 3단계: 구조물의 층별 질량 및 강성을 추출한다.
- 4단계: 설계지진파를 선정하고 단자유도의 지진파 탄성해석을 통해 구조물의 주기와 감쇠비에 따른 응답저감계수 그래프를 작성한다.
- 5단계: 목표성능을 설정하고 목표성능을 실현하는 감쇠장치의 설치 속성을 결정한다. 목표성능을 만족하는 설치 속성을 찾기 위한 반복과정이 필요하다.
- 6단계: 비선형 시간이력해석 등을 통해 목표성능 만족여부를 검토하고, 불만족할 경우 5-6단계를 반복한다.

제시한 내진설계절차는 감쇠장치 설치 전 구조물의 응답스펙트럼 해석 결과(2단계)와 지진파 탄성응답스펙트럼(4단계)을 기초로 하여 감쇠장치의 용량 및 설치 위치와 수를 결정하며 이에 따른 응답 감소율을 개략적으로 산정할 수 있다.

4. 설계예제

본 장에서는 앞서 기술한 감쇠장치의 내진설계절차를 따라 감쇠장치를 설계한 후 비선형 시간이력해석을 수행하여 지진응답저감 효과 및 설계절차의 타당성을 검토하였다.

4.1 대상 구조물 선정 및 감쇠비 가정

대상 구조물은 1970년에 준공된 10층 규모의 철골 구조물(Table 2 참조)이며, 평면 및 단면은 Fig. 9과 같다. 해석 프로그램은 midas Gen을 사용

Table 2. Summary of 10-story structure

Location	Seoul	Structural type	Steel
Building use	Business facility	Site class	Sd
Size	10 floors	Materials	Column : SRC (SS400, fck = 21 MPa) Beam : Steel (SS400)
	42.6m × 44.4 m × 18.25 m (B×D×H)		

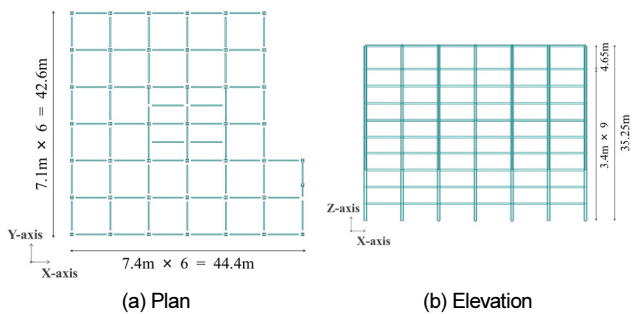


Fig. 9. 10-story steel structure

하였으며, 슬래브는 하중으로 고려하여 모델링에서는 제외하였다. 1단계는 설계 대상 구조물의 지진하중에 대한 감쇠비(ζ_0)를 가정하는 단계이며, 본 예제에서는 대상 구조물이 철골구조임을 고려하여 2%로 가정하였다.

4.2 고유치해석 및 원 구조물의 응답스펙트럼 해석

2단계는 고유치해석을 통해 구조물의 주기를 확인하고, 응답스펙트럼 해석을 통해 구조물에 가해지는 지진하중과 그에 따른 변위응답을 산출하는 과정이다. 대상 구조물의 고유치해석결과는 Table 3, Fig. 10과 같으며 구조물의 X방향 1차 모드 주기는 3.20초, Y방향 1차 모드 주기는 2.37초이며 비틀림 1차 모드 주기는 2.44초로 나타났다. 모든 방향에서의 1차 모드 질량참여율은 75% 이상인 것으로 확인되었다. 응답스펙트럼 해석을 위해 KBC 2016에 의거하여 Table 4를 기준으로 설계 지진하중을 산정하였다.

2단계에서 산출해야 하는 지진하중과 변위는 각 층의 관성력과 변위로서 이후 5단계에서 감쇠장치 설치 구조물의 유효감쇠비를 산정하는데 이용된다. 하지만 응답스펙트럼해석법은 각 모드에서의 해석결과를 SRSS 또는 CQC방법으로 조합하기 때문에 midas Gen을 통해 응답스펙트럼해석 시 사용한 각 층의 하중을 추출할 경우, 각 모드의 최대값이 조합된 결과가 추출되어 각 층 관성력의 합과 밀면전단력이 일치하지 않게 된다. 따라서 질량참여율이 75% 이상인 1차 모드만 고려한 관성력과 그때 발생한 변위를 적용하여 설계절차를 진행하였다. Table 5는 1차 모드만 고려한 응답스펙트럼 하중과 변위응답을 나타낸 것으로 층별 하중의 합계가 밀면전단력과

Table 3. Dynamic properties of 10-story structure

Mode	Fre-quency (Hz)	Period (sec)	Modal participating mass ratio (%)					
			X-dir	Y-dir	Z-rot	Sum X-dir	Sum Y-dir	Sum Z-rot
1	1.97	3.20	75.4	-	-	75.4	-	-
2	2.57	2.44	-	-	76.6	75.4	-	76.6
3	2.65	2.37	-	77.1	-	75.4	77.2	76.7
4	6.50	0.97	11.3	-	-	86.7	77.2	76.7
5	8.21	0.77	-	-	10.7	86.7	77.2	87.4
6	8.41	0.75	-	10.5	-	86.7	87.7	87.4

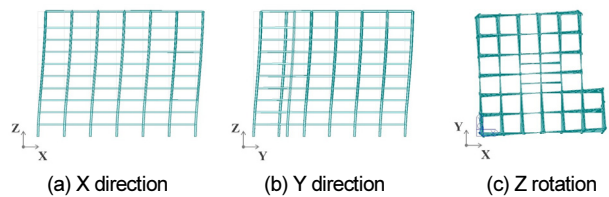


Fig. 10. 1st modal shape

Table 4. Design seismic load

Seismic zone factor (S)	0.22	Importance factor (I_E)	1.0
Design spectral response acceleration parameter	$S_{DS} = 0.5353$ $S_{D1} = 0.2317$	Response modification factor (R)	1.0
		Weight (W)	94169 kN

Table 5. Results of Response spectrum analysis considering only primary mode

Story	Height (m)	Inertia force (kN)	Displacement (mm)	Story drift (mm)
Roof	35.25	1302.3	291.3	0
10F	30.6	1051.6	268.3	23.0
9F	27.2	880.0	246.3	22.0
8F	23.8	783.7	219.4	26.9
7F	20.4	670.4	187.6	31.8
6F	17	543.5	151.9	35.7
5F	13.6	407.0	113.8	38.1
4F	10.2	271.3	75.5	38.3
3F	6.8	149.4	40.5	35.0
2F	3.4	45.5	12.7	27.8
GL	0	0	0	12.7
		6104.8	291.3	38.3

Table 6. Floor mass and story stiffness of target structure

Story	Height (m)	Floor mass (ton)	Stiffness (kN/mm)
Roof	35.25	0	0
10F	30.6	1156.6	56.6
9F	27.2	1014.0	107.4
8F	23.8	924.2	119.9
7F	20.4	924.2	126.5
6F	17	924.4	131.2
5F	13.6	925.6	137.1
4F	10.2	925.6	147.5
3F	6.8	929.1	168.4
2F	3.4	955.4	218.4
GL	0	924.3	479.7
		9603.2	479.7

동일한 것을 확인할 수 있다. 1차 모드만 고려한 응답스펙트럼 해석에 의해 발생한 원 구조물의 최상층 변위는 291.3 mm이며, 밀면전단력은 6104.8 kN이다.

4.3 구조물의 층별 질량 및 강성 추출

3단계에서는 대상 구조물의 층 질량과 강성을 추출한다. 구조물의 층 강성은 2단계에서 활용한 1차 모드만 고려한 응답스펙트럼 해석결과를 활용하여 산정하였다. 그 결과는 Table 6과 같으며 이는 이후 5단계에서 감쇠장치 설치 구조물의 유효주기를 산정하는데 이용된다.

4.4 설계지진파 선정 및 지진파 응답저감계수 그래프 작성

4단계에서는 탄성 응답스펙트럼을 활용한 지진응답 감소율 추정을 위해 설계지진파를 선정하고 지진파를 이용해 구조물의 주기와 감쇠비에 따른 응답저감계수 그래프를 작성하는 단계이다. 본 예제에서는 El Centro (1940),

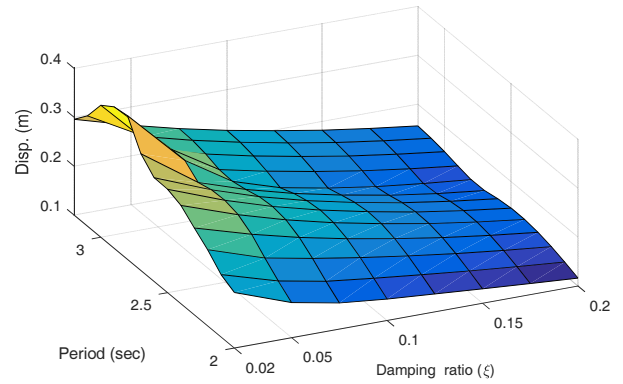


Fig. 11. Displacement response spectrum of El Centro earthquake (T:2.0~3.2 sec)

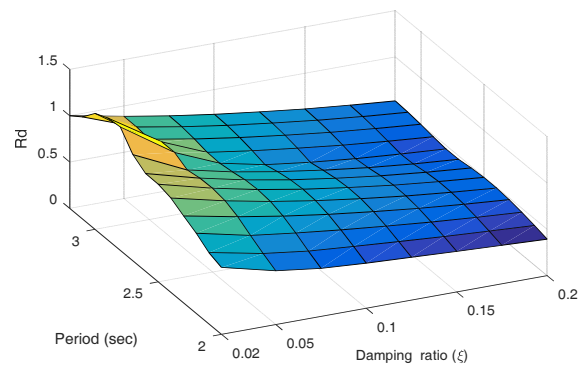


Fig. 12. Displacement response reduction factor by El Centro earthquake (T:2.0~3.2 sec)

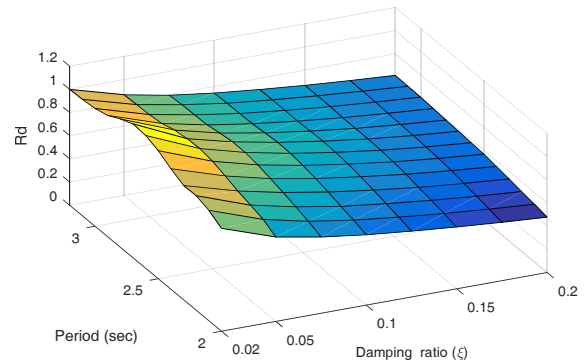


Fig. 13. Mean response reduction factor by 7 pairs of seismic waves (T:2.0~3.2 sec)

Taft (1952), Hachinohe (1968), San Fernando (1971), Northridge (1994), Loma Prieta (1989), Kobe (1995) 지진파 7쌍을 사용하였으며, 단자유도 구조물 해석을 통해 각 지진파에 대한 주기와 감쇠비별 탄성 응답스펙트럼 그래프를 작성한다.

Fig. 11은 El Centro (1940) 지진파의 탄성 변위 응답스펙트럼 그래프로 주기는 원 구조물의 주기인 3.2초에서 2초 사이, 감쇠비는 2%에서 20%까지 변화할 때의 값을 표현하였다. 구조물의 감쇠비가 2%인 경우엔 주기가 3.2초에서 3.0초로 감소할수록 변위응답이 크게 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 감쇠비가 증가할수록 변위응답이 감소하는 경향을 확인할 수

있다.

이와 같이 산정한 응답스펙트럼 그래프를 원 구조물의 특성인 주기 3.2 초, 감쇠비 2%일 때의 값을 기준으로 정규화 할 경우 Fig. 12와 같이 원 구조물 대비 다른 특성(주기와 감쇠비)을 가진 구조물의 응답저감계수 그래프를 작성할 수 있다. 이러한 방식으로 각 지진파의 주기와 감쇠비에 따른 변위 응답저감계수를 산정한 후 7쌍 지진파의 평균 그래프를 Fig. 13과 같이 작성한다. Fig. 13은 7쌍의 지진파를 기반으로 작성한 주기 3.2초, 감쇠비 2%인 구조물에 대한 응답저감계수 그래프로 이 결과를 활용하여 내진 설계절차를 진행한다.

4.5 목표성능 설정 및 감쇠장치 예비설계

4.5.1 목표성능 설정

5단계는 목표성능을 설정하고 목표성능에 해당하는 주기와 감쇠비를 실현하기 위한 감쇠장치의 용량과 설치 위치 및 개수를 결정하는 과정이다. 본 예제에서의 목표성능은 원 구조물의 X방향 최상층 변위를 85% 수준으로 저감하는 것으로 설정하였다.

4단계에서 도출한 응답저감계수 그래프를 활용하여 감쇠장치 추가에 따른 응답감소율을 산정하기 위해선 감쇠장치에 의해 추가되는 감쇠비와 감쇠장치가 설치된 구조물의 주기를 알아야 한다. 감쇠장치 설치 시 변위 응답을 원 구조물 변위의 0.01 ~ 1.5배 사이로 예상하여 응답범위를 설정한 후, 감쇠장치의 성능(강도와 강성)을 결정하면 감쇠장치가 설치된 구조물의 이력이 정해지기 때문에 각 변위에서의 유효주기와 유효감쇠비를 산정할 수 있다.

4.5.2 예상 변위에서의 유효감쇠비 산정

FEMA 356에서는 변위 및 속도 의존형 감쇠장치를 가지는 구조물의 유효감쇠비를 식 (2)와 같이 원 구조물의 감쇠비와 감쇠장치에 의한 추가감쇠비의 합으로 제한하고 있다.

$$\xi_{eff} = \xi_o + \frac{\sum_j W_j}{4\pi W_k} \quad (2)$$

여기서 ξ_o 는 원구조물의 감쇠비, W_j 는 감쇠장치 j 가 단위 주기당 한 일의 양이며, W_k 는 감쇠장치가 설치된 구조물의 최대 탄성에너지이다.

W_k 는 원 구조물의 탄성에너지와 감쇠장치에 의한 탄성에너지의 합으로 식 (3)과 같이 표현된다.

$$W_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N F_i \cdot d_i + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N_d} k_{eqj} \cdot \delta_j^2 \quad (3)$$

여기서 N 은 구조물의 층수, F_i 는 i 층의 관성력이며, d_i 는 관성력이 작용할 때 i 층에 발생하는 층변위이다. N_d 는 감쇠장치의 수, k_{eqj} 는 감쇠장치의 등가강성이며, δ_j 는 감쇠장치 j 가 설치된 양끝단에 발생하는 상대 변위이다.

W_j 는 층변위 δ_j 가 일어나는 동안 감쇠장치 j 가 단위 주기당 한 일의 양으로써, 본 논문에서 적용한 감쇠장치는 변위 의존형 감쇠장치이므로 한 주기당 힘-변위 이력곡선의 면적으로 계산하였다.

이와 같이 감쇠장치가 설치된 구조물의 유효감쇠비를 도출하기 위해선 감쇠장치가 설치된 구조물의 최대 탄성에너지 W_k 와 감쇠장치가 한 일의 양 W_j 을 결정해야 한다. 각 예상응답에서의 탄성에너지 W_k 를 산정하기 위해선 층 관성력 F_i 와 구조물에 실제 발생하는 층 변위 d_i 및 감쇠장치가 실제 거동한 변형 δ_j 이 필요하며 이는 2단계에서 추출한 1차모드만을 고려한 응답스펙트럼 하중 및 층 변위를 통해 계산이 가능하다.

각 예상응답에서의 감쇠장치의 등가강성 k_{eqj} 과 감쇠장치가 한 일의 양 W_j 또한 감쇠장치의 실제 변형 δ_j 을 알기 때문에 감쇠장치를 예비설계 한 이후에는 계산이 가능하게 된다.

4.5.3 예상 변위에서의 유효주기 산정

각 예상변위에서의 유효주기는 3단계에서 추출한 원 구조물의 층 강성에 유효감쇠비 산정을 위해 계산했던 감쇠장치의 등가강성 k_{eqj} 을 합산하여 층별 강성 매트릭스를 만든 후 3단계에서 추출한 층별 질량을 이용하여 고유치해석을 수행하는 방법으로 계산한다.

4.5.4 감쇠장치 예비설계

본 예제에서는 Table 1의 특성을 가진 감쇠장치를 3-7층까지 각 층마다 4개씩 설치한다고 가정하였으며, 그 때의 각 예상응답에 해당하는 구조물의 유효감쇠비와 유효주기를 Fig. 14에 나타내었다. 감쇠장치 설치 시 변위 응답을 원 구조물 변위(291.3 mm)의 0.01 ~ 1.5배 사이로 예상하여 응답범위를 설정하였기 때문에 Fig. 14의 가로축은 원 구조물의 변위에 대한 예상변위의 비율, 즉 응답감소율로 표현될 수 있다.

가정한 감쇠장치를 설치했을 때, 구조물의 감쇠비는 2%에서 최대 6.6%까지 증가할 수 있으며, 주기는 3.2초에서 2.7초까지 감소할 수 있는 것으로 나타났다.

이와 같이 산정한 예상응답변위에서의 유효주기와 유효감쇠비를 Fig. 15와 같이 3차원 상의 실선으로 표현할 수 있으며, 4단계에서 도출한 변위 응답저감계수 그래프와 함께 나타낼 수 있다. 감쇠장치 설치 구조물의 특성을 나타내는 실선과 응답저감계수를 표현하는 곡면 그래프가 만나는 교차

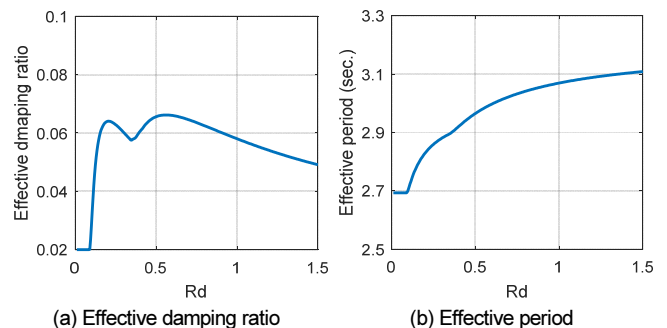


Fig. 14. Characteristics of structure with damper in the expected responses

점을 감쇠장치를 설치했을 때의 응답감소율로 예측할 수 있다. 이 결과에 따르면 Table 1의 용량을 가지는 감쇠장치를 3-7층까지 각 층마다 4개씩 총 20개 설치할 경우, 예상되는 구조물의 유효감쇠비는 6.2%, 유효주기는 3.05초이며, 원 구조물 변위의 84% 정도인 지진응답이 발생할 것으로 추정된다. 이는 설계목표인 85%를 만족하는 수준이므로 가정한 감쇠장치의 설치 속성을 확정지을 수 있다. 만약 설계목표에 도달하지 못했다면 목표성능을 만족하는 감쇠장치 설치 속성을 찾을 때까지 반복하는 과정을 수행하여야 한다. Table 7은 식 (3-4)를 활용한 교차점에서의 유효감쇠비 산정 과정을 나타낸다. 2단계에서 산출한 원 구조물의 1차 모드만 고려한 응답스펙트럼 하중과 층 변위의 84% 수준의 값이 적용되어 감쇠장치에 의한 추가감쇠비가 산정되었다. 교차점에서의 감쇠장치에 의한 추가 감쇠비는 4.2%이며, 원 구조물의 감쇠비 2%가 합쳐져 감쇠장치 설치 구조물의 감쇠비는 6.2%가 된 것을 확인할 수 있다.

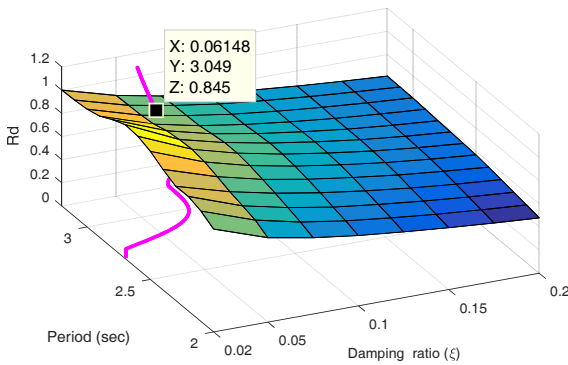


Fig. 15. Prediction of response reduction rate using response spectrum

4.6 시간이력해석을 통한 설계목표 만족여부 검토

6단계는 5단계에서 예비설계한 감쇠장치 설계 결과를 검증하는 과정으로 구조물의 비선형 시간이력해석을 통해 지진응답 감소효과를 확인하는 과정이다. 구조물은 탄성부재로 모델링하였으며, 설치되는 감쇠장치에 비선형 이력이 발생하도록 모델링하였다.

먼저 시간이력해석을 위해 4단계에서 사용했던 지진파를 설계지진하중 조건과 대상 구조물의 주기인 3.2초에 맞도록 지진파의 크기를 조정하였다. 7쌍 지진파 스펙트럼의 SRSS 평균값이 0.5 T_n (1.6초)부터 1.25 T_n (4.0초) 사이의 주기에서 설계스펙트럼의 1.3배보다 10% 이상 작지 않도록 크기가 조정된 것을 Fig. 16을 통해 확인할 수 있다. 원 구조물의 감쇠비를 2%로 가정하였기 때문에 2% 감쇠비에 대한 설계스펙트럼에 의해 지진파의 크기를

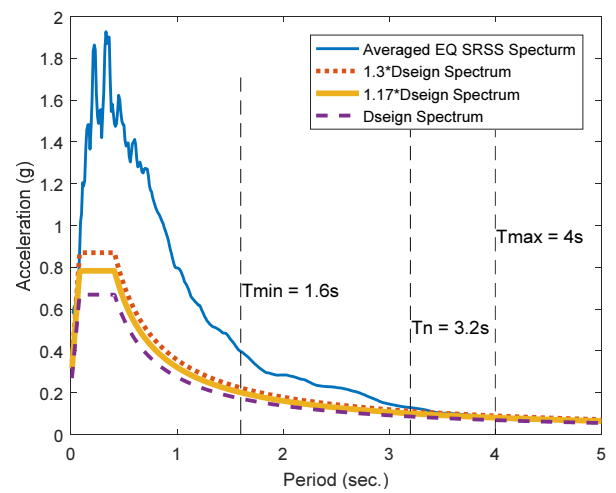


Fig. 16. The average of scaled SRSS spectrum and design spectrum

Table 7. Estimation of effective damping ratio at intersection

Story	Height (m)	Original structure				Damper					
		Inertia force F_i (kN)	Displacement d_i (mm)	Drift (mm)	$\frac{1}{2} F_i \cdot d_i$ (kN,mm)	Relative displacement δ_j (mm)	Force (kN)	Equivalent stiffness k_{eqj} (kN/mm)	$\frac{1}{2} k_{eqj} \cdot \delta_j$ (kN,mm)	W_j (kN,mm)	
Roof	35.25	1093.9	244.7	0.0	133838	-	-	-	-	-	
10F	30.6	883.3	225.4	19.3	99541	-	-	-	-	-	
9F	27.2	739.2	206.9	18.5	76467	-	-	-	-	-	
8F	23.8	658.3	184.3	22.6	60662	-	-	-	-	-	
7F	20.4	563.1	157.6	26.7	44371	24.3	200	8.2	2427	11218	
6F	17	456.5	127.6	30.0	29126	27.2	200	7.3	2725	13599	
5F	13.6	341.9	95.6	32.0	16340	29.1	200	6.9	2908	15065	
4F	10.2	227.9	63.4	32.2	7226	29.2	200	6.8	2923	15187	
3F	6.8	125.5	34.0	29.4	2135	26.7	200	7.5	2672	13172	
2F	3.4	38.2	10.7	23.4	204	-	-	-	-	-	
GL	0	0.0	0.0	10.7	0	-	-	-	-	-	
Sum					469910					13655	68239
$W_k = \frac{1}{2} F_i \cdot d_i + \frac{1}{2} k_{eqj} \cdot \delta_j^2 = 469910 + 4 \times 13655 = 524530$ (4 damper at each floor)						$W_j = 4 \times 68239 = 272957$			$\xi_d = \frac{W_j}{4\pi W_k} = 0.042$		

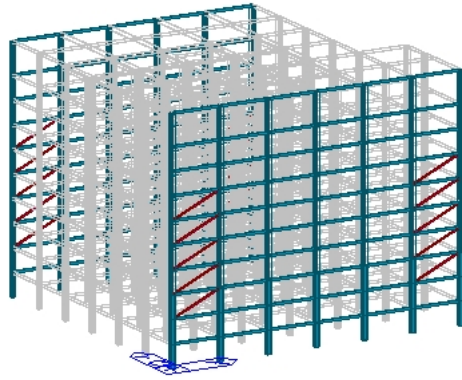


Fig. 17. Modelling of Damper

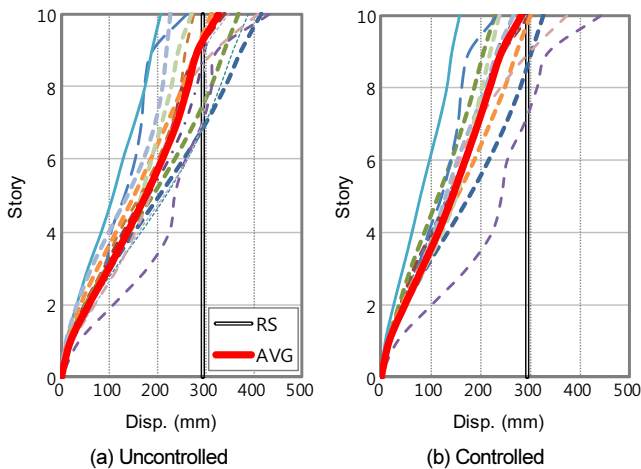


Fig. 18. Comparison of uncontrolled and controlled story displacement

Table 8. Comparison of uncontrolled and controlled seismic responses

Story	Story displacement (mm)			Story drift (mm)		
	Uncontrolled	Controlled	Ratio (%)	Uncontrolled	Controlled	Ratio (%)
Roof	326.3	282.4	86.6	-	-	-
10F	283.2	242.7	85.7	43.0	39.7	92.3
9F	262.2	218.3	83.2	21.0	24.4	116.4
8F	239.7	194.7	81.3	22.6	23.6	104.4
7F	209.2	169.1	80.8	30.5	25.7	84.1
6F	175.0	143.3	81.9	34.1	25.8	75.5
5F	137.4	114.6	83.4	37.6	28.7	76.4
4F	98.8	82.0	83.0	38.7	32.6	84.4
3F	57.0	47.7	83.7	41.8	34.2	82.0
2F	19.0	16.0	84.5	38.0	31.7	83.4
GL	-	-	-	19.0	16.0	84.5
	Average		83.4	Average		88.3

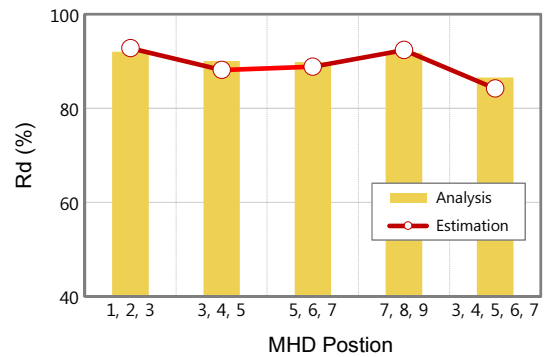


Fig. 19. Estimation of response reduction rate by damper position

Table 9. Comparison of the predicted response reduction rate with time history analysis results

Position	5 step : Prediction using response spectrum			6 step : Nonlinear time history analysis			Error rate (%)
	Period, T_n (sec.)	Damping ratio, ξ_d	Reduction rate, R_d (%)	Top displacement (mm)	Base shear force (kN)	Reduction rate, R_d (%)	
Original structure	-	-	-	326.3	12600.9	-	-
1, 2, 3	3.13	0.035	92.7	300.1	11556.7	92.0	0.81
3, 4, 5	3.10	0.047	88.1	293.7	11073.4	90.0	2.10
5, 6, 7	3.11	0.045	88.8	293.1	10614.7	89.8	1.14
7, 8, 9	3.14	0.036	92.3	299.3	10542.3	91.7	0.65
3, 4, 5, 6, 7	3.05	0.062	84.0	282.4	10265.1	86.6	2.76

조정하였으며 7쌍의 지반운동을 이용하여 해석을 수행하였으므로, 평균값으로 응답을 평가하였다.

크기가 조정된 지진파를 적용하여 해석을 수행하였으며, 5단계에서 설계한 감쇠장치는 midas Gen의 이력저동시스템으로 모델링하여 Fig. 17과 같이 3-7층 외곽에 층당 4개씩 총 20개를 설치하였다. 감쇠장치 설치 전 후 구조물에 대하여 비선형 시간이력해석을 수행하였으며, Fig. 18와 Table 8은 감쇠장치 설치 전 후의 층변위와 층간변위를 나타낸다. 감쇠장치 설치 시 원 구조물에 대한 최상층 변위 감소율은 86.6%, 평균 층변위 감소율은 83.4%, 층간변위 감소율은 88.3%로 나타났다. 이는 응답스펙트럼을 활용

해 5단계에서 예측한 감소율인 84%와 거의 근접한 결과를 보여주며, 응답스펙트럼을 활용한 감쇠장치의 내진설계절차가 적절함을 의미한다.

감쇠장치 내진설계절차의 좀 더 정확한 검증을 위해 다양한 설치위치에 대해서 내진설계절차를 통해 추정된 응답감소율과 비선형 시간이력해석결과를 비교하였다. 감쇠장치의 설치 위치는 123 / 345 / 567 / 789 / 34567 층으로 변경하여 진행하였다. Fig. 19와 Table 9는 5단계 응답스펙트럼을 활용하여 추정된 응답감소율과 6단계 비선형 시간이력해석 결과를 비교한 내용이다. 최대 2.8% 이내의 오차율로 설치위치에 따른 응답감소 경향이 비슷하게 추정하는 것을 확인하였으며, 이를 통해 응답스펙트럼을 활용하

여 감쇠장치를 설계하는 내진설계절차의 적정성을 검증하였다.

제안한 감쇠장치 내진설계절차는 지진파의 탄성 응답스펙트럼과 감쇠장치 설치 전 구조물의 응답스펙트럼 해석결과를 바탕으로 감쇠장치의 용량 및 설치 위치와 개수를 결정하며 이에 따른 응답 감소율을 시간이력해석 수행 없이 개략적으로 추정할 수 있다. 만약 하나의 감쇠장치 설치 변수에 대해 10층 규모 구조물의 비선형 시간이력해석을 수행하려면 60초의 7쌍 지진파(총 14개)를 기준으로 약 4시간이 소요된다(Intel Core I7-6700 3.4 Hz @ 8 CPUs, 32GB RAM 기준). 그러므로 15개의 MHD 설계 변수 해석을 위해 총 60시간의 해석시간이 필요하게 된다. 하지만 내진설계절차를 활용할 경우 단자유도 구조물의 지진파 탄성해석(소요시간 약 10분)과 원 구조물의 간단한 응답스펙트럼 해석(소요시간 약 1분)만을 수행하기 때문에 해석시간이 대폭 감소하며, 빠른 시간 안에 여러 설계변수에 대한 응답감소 경향을 확인할 수 있는 장점을 지녀 예비설계 단계에 활용할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 시간이력해석 없이 응답스펙트럼 해석만으로 간단히 감쇠장치를 설계할 수 있는 감쇠장치의 내진설계절차를 제시하였다.

- 1) 구조물의 응답은 주기와 감쇠비에 의해 결정되며, 감쇠장치를 추가할 경우 주기는 감소하고 감쇠비는 증가하는 효과를 보인다. 응답스펙트럼은 주기와 감쇠비 함수의 그래프로 지진파의 탄성 응답스펙트럼을 활용하여 특정 주기와 감쇠비를 가지는 구조물에 대해서 주기 및 감쇠비 변화에 따른 지진응답 감소율을 예측할 수 있다. 우선 단자유도 구조물을 이용하여 탄성 응답스펙트럼을 활용한 응답저감계수 그래프의 도출 및 감쇠장치가 설치된 구조물의 응답감소율 예측 과정을 설명하였으며, 이를 통해 감쇠장치의 내진설계절차를 제시하였다.
- 2) 제시한 설계절차에 따라 10층 사무용 철골 구조물을 예시로 감쇠장치를 설계하였으며, 비선형 시간이력을 수행하여 설계절차를 통해 설계한 결과가 목표 성능수준까지 감소하는지 검토하였다. 응답스펙트럼을 활용하여 추정한 감쇠장치 설치 구조물의 응답감소율은 84%이며, 비선형 시간이력 해석결과는 86.6% 감소하는 것으로 나타나 2.8% 오차율을 가지며, 이를 통해 제시한 설계절차의 타당성을 검증하였다.
- 3) 제시한 내진설계절차는 지진파의 탄성 응답스펙트럼과 감쇠장치 설치 전 구조물의 응답스펙트럼 해석 결과를 바탕으로 감쇠장치의 용량 및 설치 위치와 개수를 결정하며, 이에 따른 응답감소율을 시간이력해석 수행 없이 개략적으로 추정할 수 있다. 비선형 시간이력해석은 상당히 많은 시간이 소요되지만 제시한 설계절차를 이용할 경우 빠른

시간 안에 여러 설계변수에 대한 응답감소경향을 파악할 수 있다는 장점이 있지만 설계에 적용할 지진파에 대한 탄성 응답스펙트럼을 기반으로 평균 지진응답 감소율을 예측하므로 특성이 서로 비슷한 지진파를 선정하여 설계절차를 따라야 한다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중점연구지원사업(NRF-2018R1A6A1A07025819)과 국토교통과학기술진흥원의 도시건축연구사업(19AUDP-B106327-05)에 의해 수행되었습니다.

/ REFERENCES /

1. Kasai K, Ito H, Watanabe A. Peak response prediction rule for a SDOF elasto-plastic system based on equivalent linearization technique. *Journal of Structural Constructure Engineering*. AJJ, 2003;571:53-62.
2. Filiatrault A, Cherry S. Seismic design spectra for friction-damped structures. *Journal of Structural Engineering*. 1990;116(5):1334-1355.
3. Lee SH, Min KW, Park JH, Lee RJ. Optimal design of friction dampers based on the story shear force distribution of a building structure. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 2005;9(6):21-30.
4. Miguel LFF, Miguel LFF, Lopez RH. Simultaneous optimization of force and placement of friction dampers under seismic loading. *Engineering Optimization*, 2016;48(4):582-602.
5. Nabid N, Hajirasouliha I, Petkovski M. A practical method for optimum seismic design of friction wall dampers. *Earthquake Spectra*, c2017.
6. Ben-Haim, Elishakoff I. *Convex models of uncertainty in applied mechanics*. Elsevier, c1990.
7. Wu Z, Soong TT. Design spectra for actively controlled structures based on convex models. *Engineering Structures*. 1996;18(5):341-350.
8. Shinozuka M. Maximum structural response to seismic excitations. *Journal of Engineering Mechanics*. 1970;96:729-738.
9. Roh JE, Lee SH, Seo JW. Seismic retrofit Using Damping Devices for Short-period Structures Excited by Ground Accelerations Similar to Gyeong-ju Earthquakes. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 2016;20(7):503-508.