

비선형 단자유도 모델을 활용한 마찰감쇠 천장시스템의 해석과 설계

이승준¹ · 전수찬² · 이철호^{3*}

¹석사과정, 서울대학교, 건축학과, ²교수, 서울대학교, 건축학과, ³박사후연구원, 서울대학교, 건축학과

Seismic Response Analysis and Design of Friction-added Ceiling System Based on Simplified SDOF Model

Lee, Seung-Jun¹, Jun, Su-Chan², Lee, Cheol-Ho^{3*}

¹Graduate Student (M.S Course), Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

²Postdoctoral Researcher, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

³Professor, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

Abstract - In this study, a systematic analytical study was conducted for a friction-added ceiling system which had been developed in the previous study conducted by the authors. The friction-added ceiling system incorporated a novel rotational friction mechanism and its effectiveness was demonstrated through a series of shake-table tests. The primary focus of this study was to evaluate the effects of key governing parameters of the friction-added ceiling system, with due consideration for the dynamic characteristics of supporting structures. Firstly, based on a total of 6 building models, the effects of structural dynamic properties on the peak floor acceleration (PFA) were evaluated. The analysis results showed that the in-structure amplification (PFA/PGA) was higher for concentrically braced frames (CBF) compared to the moment-resisting frames (MRF) due to the relatively short-period characteristics inherent to CBFs. It was also observed that the PFA reduction caused by structural nonlinearities was more pronounced for CBFs because of their drastic elongation of fundamental period. The friction-added ceiling systems showed reduced displacement response as the friction force increased. The effectiveness of the friction-added ceiling systems was only minimally influenced by the length of the hanger wires and the angle of damper braces, implying the versatility of the system to various design and installation conditions. Various response characteristics of friction-added ceiling systems considering structural nonlinearities was also presented.

Keywords - Nonstructural element, Seismic design, Ceiling system, Nonlinear time history analysis, Friction damper

1. 서론

지난 경주 및 포항 지진과 더불어 다양한 국내외 지진 피해를 통해 확인되었듯 비구조요소는 지진에 매우 취약하며 이러한 비구조요소의 피해는 상당한 직·간접적 경제적 손실을 야기하는 것으로 나타났다. 일반적으로 비구조요소는 지진 하중이 지반-구조물-비구조요소를 거쳐 전달되는 과정에서 그 응답이 크게 증폭되기

때문에 지진 규모에 비해 상대적으로 지진피해가 큰 특징이 있다^[1]. 이에 따라 비구조요소 내진설계의 중요성과 연구의 필요성이 꾸준히 증가하고 있는 실정이다.

천장시스템은 대표적 비구조요소 중 하나로 일반적으로 대 공간에 걸쳐 설치되기 때문에 천장시스템의 파괴는 건축물의 심각한 기능손실과 더불어 인명피해를 야기할 수 있다(Fig. 1 참고). 천장 시스템은 일반적으로 복잡한 접합 상세와 낮은 면내 강성을 갖고 있으며 지진하중 작용 시 주변 벽체와의 충돌로 인하여 쉽게 파괴가 발생한다^[2]. 이를 방지하고자 KDS 41 17 00^[3]을 포함한 다양한 국내외 설계 기준들에서는 천장시스템의 가장자리에 벽체와 이격을 확보하도록 제안하고 있으며, 구체적인 사항은 구조물의 내진설계범주에 따라 결정된다. 이는 지진 발생 시에 천장시스템의 변위 응답을 가장자리 이격을 통해 흡수하여 천장시스템이 주변 테두리 벽체

Note.-Discussion open until August 31, 2024. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 06, 2023; revised on December 30, 2023; approved on January 09, 2024.

Copyright © 2024 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-880-9061 Fax. +82-2-880-9061

E-mail. ceholee@snu.ac.kr

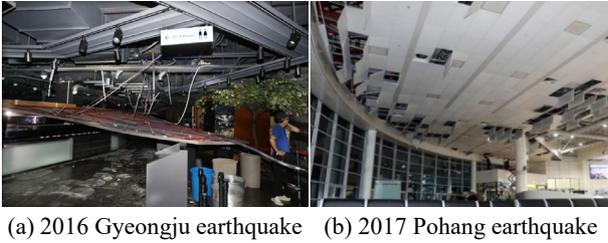
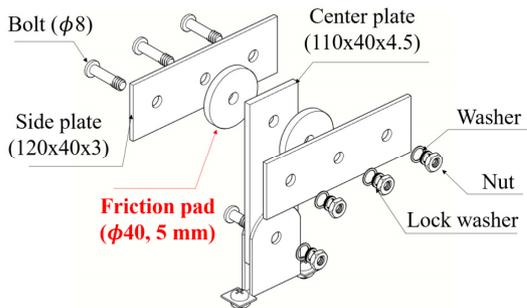


Fig. 1. Ceiling system failure observed 2016 Gyeongju and 2017 Pohang earthquakes

와 충돌하여 파괴되는 것을 최소화하기 위함이다.

ASTM E580에서는 내진설계범주 D에 해당하는 구조물에 설치되는 천장의 경우 연속하는 두 면을 주변지지 클립을 통해 벽체에 고정시키도록 요구하고 있으며, 천장의 면적이 100 m²를 초과하는 경우 가새를 통하여 보강할 것을 제안하고 있다^[4]. 하지만 주변지지 클립은 천장의 모든 그리드 부재에 설치되어야 하기 때문에 시공 난이도가 급격하게 상승하는 문제가 있으며, 천장 가새는 천장 그리드의 낮은 면내강성으로 인해 내진성능향상에 기여하는 바가 매우 미미한 문제가 있다(Jun *et al.*)^[2].

본 연구의 선행 논문에서는 이러한 현행 가새 보강 천장시스템의 한계를 보완하기 위해 새로운 회전형 마찰감쇠 내진 천장 시스템을 제안하였다. 회전형 마찰감쇠 장치는 Fig. 2(b)에서 볼 수 있듯이 두 플레이트 사이에 설치된 마찰패드(마찰패드)가 설치되어 있어 두 플레이트의 상대회전을 통해 지진에너지를 소산시키는 시스템이다. 마찰감쇠 천장시스템은 마찰감쇠 장치를 통해 천장의 지진응답을 저감시키기 때문에 기본적으로 현행 기준에서 요구하는 고정 부재(주변지지 클립, 가새)가 사용되지 않은 떠달린 시스템(free-floating)으로 시공성 및 다양한 천장시스템에 대한 적용성이 우수한 장점이 있다. 진동대 실험을 통해 성능을 입증하였으며, 이와 더불어 마찰감쇠 천



(a) Component of friction damper

장시스템의 거동을 모사할 수 있는 비선형 단자유도 모델을 제안하였다^[5]. 하지만 마찰감쇠 천장시스템이 설치되는 구조물의 동특성 및 마찰감쇠 천장시스템의 응답을 지배하는 주요 설계 변수들에 대한 연구들은 제한적으로 수행되었기에 효과적인 마찰감쇠 천장시스템의 설계를 위해서는 추가적인 연구가 필요한 실정이다.

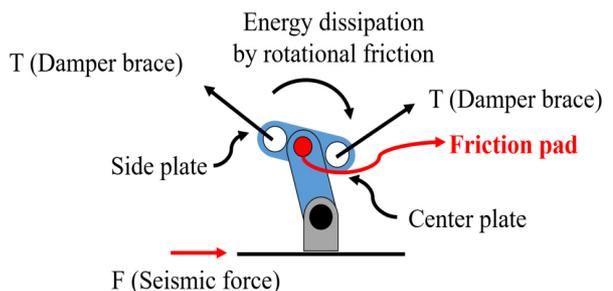
본 연구에서는 마찰감쇠 천장시스템의 지진거동 특성 분석을 위하여 주요 설계 변수에 대한 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 해석에 사용된 입력지진파(층운동)는 구조 모델에 대한 시간이력해석을 통해 얻은 결과를 사용하였으며, 이때 구조물의 동특성이 미치는 영향을 고려하기 위하여 두 가지 철골 구조물(모멘트 골조 및 중심 가새 골조)에 대한 해석을 수행하였다.

2. 구조물 최대응답 분석

본 장에서는 마찰감쇠 천장시스템의 주요 설계 변수를 평가하기 앞서 천장시스템에 작용하는 구조물의 최대응답가속도증폭의 특성을 분석하였다. 두 가지 철골 구조물(모멘트 골조 및 중심 가새 골조)에 대한 선형 및 비선형 시간이력해석을 수행하였으며, 구조물의 동특성 및 비선형 거동이 최대응답가속도증폭에 미치는 영향을 평가하였다.

2.1 구조 모델 및 입력 지진파

본 연구에서 사용한 모멘트 및 가새 골조 구조물은 각각 저층, 중층, 고층의 3가지 구조물로 구성되어 있으며(총 6개의 구조 모델), 가새 골조는 일반적으로 모멘트 골조 대비 강성이 커 주기가 짧기 때문에 상대적으로



(b) Energy-dissipation mechanism

Fig. 2. Component and mechanism of friction damper

Table 1. Eigenvalue analysis results of building models

Lateral system	Story	1 st mode			2 nd mode			3 rd mode		
		Period (sec)	Modal mass (%)	Participation factor	Period (sec)	Modal mass (%)	Participation factor	Period (sec)	Modal mass (%)	Participation factor
MRF	3	1.07	83.35	1.28	0.35	12.74	0.40	0.20	3.67	0.30
	9	2.36	80.62	1.29	0.81	8.52	0.42	0.46	2.14	0.22
	20	3.98	74.03	1.38	1.40	11.08	0.6	0.81	3.38	0.35
CBF	3	0.57	99.71	1.29	0.21	9.96	0.56	0.14	1.29	0.21
	9	1.42	72.18	1.46	0.49	18.71	0.66	0.27	4.91	0.35
	15	2.40	67.95	1.51	0.77	20.71	0.76	0.41	5.26	0.40

주기가 긴 특성을 갖는 모멘트 골조와의 비교를 위하여 선택하였다.

모멘트 골조와 가새 골조의 구조 모델을 위해 OpenSees^[6]를 활용하였다. 모멘트 골조와 가새 골조의 부재와 물성치는 각각 Gupta *et al.*^[7], Cho *et al.*^[8]을 참고하여 수립하였다. 구조물의 비선형 모델링은 Fiber element를 통해 구축하였으며 이때 Fiber element의 재료 모델은 OpenSees의 steel02 (Giuffre-Menegotto-Pinto model)을 활용하였다. Table 1은 각 구조 모델의 고유치 해석 결과를 요약한 것이다.

구조 모델의 동적 해석을 위하여 20개의 입력 지진 (somerville *et al.*)을 활용하였다^[9]. 각각의 지진파는 모멘트 및 가새 골조의 설계에 사용된 설계 응답 스펙트럼에 맞추어 ASCE 7-22^[10] 기준에 따라 스케일링하였다(Fig. 3 참고).

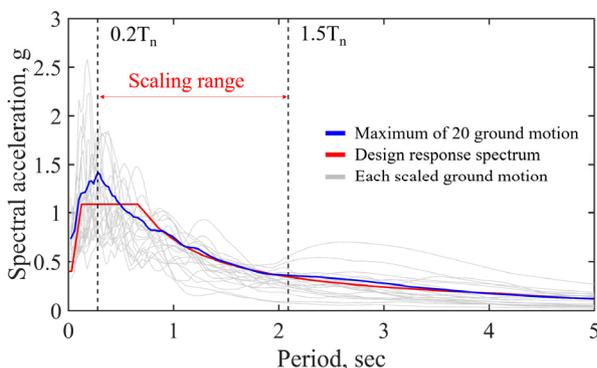


Fig. 3. Scaled 20 ground motion spectra to match design response spectrum of 9-story steel braced frame according to ASCE 7-22 (5 % damping)

2.2 구조물 최대응답가속도증폭 평가

본 장에서는 구조물의 동특성 및 비선형거동이 최대 응답가속도증폭에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 이를 바탕으로 ASCE 7-22를 통해 산정한 최대응답가속도증폭에 대한 평가를 수행하였다. ASCE 7-22에 따른 층별 최대응답가속도증폭은 식 (1)과 같이 산정할 수 있으며, 최대응답가속도증폭은 최대응답가속도 (PFA)를 최대지반가속도(PGA)로 나누어 정의한다.

$$H_f = \frac{PFA}{PGA} = 1 + a_1 \left(\frac{z}{h} \right) + a_2 \left(\frac{z}{h} \right)^{10} \quad (1)$$

여기서, $a_1 = 1/T_a \leq 2.5$, $a_2 = [1 - (0.4/T_a)^2] > 0$, T_a = 구조물 근사 고유주기, z = 비구조요소가 설치되는 높이, h = 전체 구조물의 높이이다.

구조물 비선형 거동의 증가에 따른 최대응답가속도증폭의 감소는 ASCE 7-22에 따라 산정된 응답가속도증폭 감소계수(R_μ)를 바탕으로 평가하였다. ASCE 7-22의 경우 설계지진 수준에서의 구조물의 비선형 거동으로 인한 최대응답가속도증폭의 감소를 반영하고자 최대응답가속도증폭 감소계수(R_μ)를 아래의 식 (2)와 같이 산정할 것을 제안하고 있다.

$$R_\mu = \left[\frac{1.1R}{I_c \Omega_o} \right]^{1/2} \geq 1.3 \quad (2)$$

여기서 R = 구조물반응수정계수, I_c = 구조물 중요도계수, Ω_o = 구조물 초과강도계수를 의미한다.

이때 식 (2)의 구조물반응수정계수(R)은 SEAOC 1999^[11]을 통하여 아래의 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$R = R_D \times R_o = R_D \times \left(\frac{\Omega_o}{1.1} \right) \quad (3)$$

여기서, R_D =설계지진수준에서의 구조물의 연성도, R_o =구조물 초과강도계수의 하한, Ω_o =구조물 초과강도계수의 상한값을 의미한다.

식 (2)의 구조물반응수정계수(R)에 식 (3)을 대입하고 구조물 중요도 계수(I_e)를 1로 하여 식을 정리하면 식 (4)와 같이 정리할 수 있으며, 구조물 비선형 거동으로 인한 층응답가속도 증폭 감소계수(R_μ)는 설계지진수준에서의 구조물의 연성도(R_D)에 대한 제곱근 함수로 표현된다.

$$R_\mu = \left[\frac{1.1R}{I_e \Omega_o} \right]^{1/2} = [R_D]^{1/2} \approx [u_m/u_y]^{1/2} \quad (4)$$

여기서 u_m =비선형 시간이력해석을 통한 구조물 지붕층의 최대 변위, u_y =구조물 지붕층의 항복 변위이다.

Fig. 4는 모멘트 골조와 가새 골조의 최대층응답가속도 증폭 결과를 보여주고 있다. 전반적으로 가새 골조의 최대층응답가속도 증폭이 모멘트 골조 대비 크게 평가되었다. 이는 상대적으로 짧은 가새 골조의 고유주기가 지반응답스펙트럼 상 가속도 응답 증폭 구간에 위치하기 때문이다(Fig. 3 참고).

구조물의 비선형 거동을 단계별로 포착하고자, Fig. 3에 따라 스케일링 된 지진파의 가진 레벨을 25 %부터 200 %까지 25 % 간격으로 증가시켜가며 비선형 시간 이력해석을 수행하였다. 구조물 연성도는 식 (4)를 활용하여 각 가진 레벨별 비선형 시간이력해석을 통한 최대 지붕층 변위를 구조물 지붕층 항복 변위로 나누어 평가하였다. Fig. 5는 각 구조물의 지붕층에서의 최대 층응답가속도 증폭 감소를 식 (4)와 함께 나타낸 것이다. 전반적으로 구조물 비선형 거동이 증가함에 따라 최대층응답가속도 증폭은 감소하는 경향을 보였으며 이때 감소의 정도는 전반적으로 모멘트 골조보다 가새 골조에서 큰 것으로 확인되었다. 이는 가새 골조의 경우 가새의 좌굴과 동시에 급격한 주기의 증가가 발생하여 지반응답스펙트럼 상에서의 주기가 가속도 응답 증폭 구간을 벗어나기 때문으로 판단된다.

3. 마찰감쇠 천장시스템의 지진해석

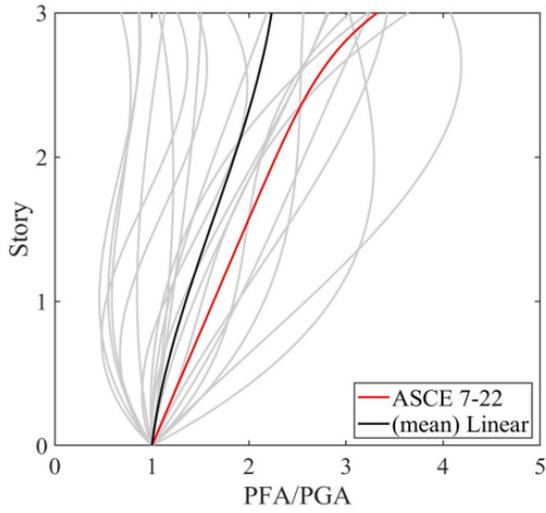
3.1 마찰감쇠 천장시스템의 비선형 단자유도 모델

Fig. 6(b)는 마찰천장의 비선형거동을 모사하기 위한 bi-linear 이력 모델을 보여주고 있다. Fig. 6(a)에서 볼 수 있듯이 지진하중이 도입 마찰력보다 작은 경우 천장시스템의 거동은 마찰 댐퍼 가새의 영향을 받게 된다. 반면, 지진하중이 도입 마찰력보다 큰 경우 천장시스템의 거동은 비내진 천장시스템과 동일하게 진자거동을 하게 된다. 비내진 천장의 강성은 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 선행연구에서 확인된 비내진 천장모델로 부터 계산하여 적용하였으며, 직접현수의 경우 진자모델(Fig. 7(a)), 간접현수 천장시스템의 경우 각 직교방향의 횡강성이 다른 것을 감안하여 단·복곡률 모델을 바탕으로 산정하여 적용하였다(Fig. 7(b)~Fig. 7(c)). 이때, 직접 및 간접현수 천장시스템의 감쇠비는 실험 계측을 바탕으로 각각 1 %, 7 %를 적용하였다^{[2],[12]}. Fig. 8은 선행 연구에서 계측된 마찰천장의 진동대 실험결과와 제안된 bi-linear 모델을 통해 얻은 해석결과를 비교하여 보여주고 있다. 그림과 같이 제안된 마찰천장시스템은 안정적인 이력곡선을 형성하며 에너지 소산을 하며, 앞서 설명된 bi-linear model은 이러한 마찰천장시스템의 이력거동을 효과적으로 모사할 수 있다. 이때 실험과 해석의 변위 응답 절대값에 대한 상대 오차는 약 25 % 수준인 것으로 나타났다.

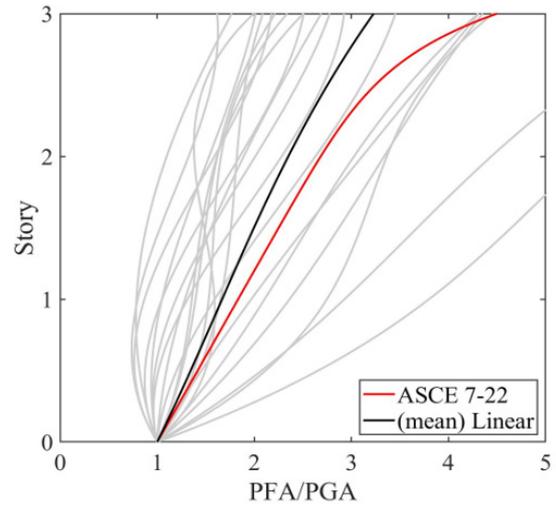
마찰감쇠 천장시스템의 주요 설계 변수인 마찰 댐퍼의 개수, 도입 마찰력, 행어와이어의 길이, 마찰 댐퍼 가새의 각도는 각각 비선형 단자유도 모델의 마찰 댐퍼가 지지하는 질량(m_{fc}), 마찰력($F_{friction}$), 천장시스템의 강성($k_{ceiling}$), 마찰 댐퍼 가새의 강성(k_{brace})에 대응된다. Table 2는 주요 해석 변수를 정리한 것이다. 마찰감쇠 천장시스템의 비선형 시간이력해석은 MATLAB을 활용하였으며 Newmark- β 법을 사용하였다.

3.2 구조물 동특성에 따른 마찰감쇠 천장시스템의 응답

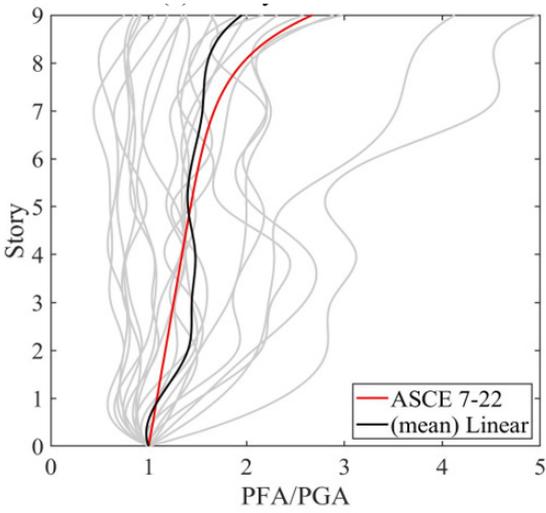
본 장에서는 구조물 동특성이 마찰감쇠 천장시스템의 응답에 미치는 영향을 분석하였다. 구조물의 선형 시간이력해석을 통해 얻은 층응답을 마찰감쇠 천장시스템 모델의 입력으로 활용하였으며 천장시스템의 물



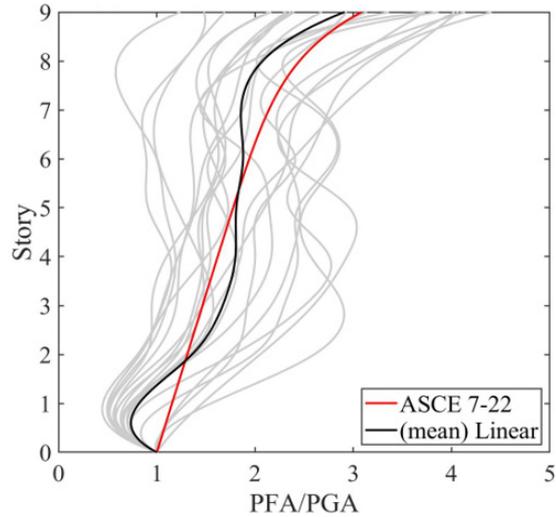
(a) 3-story moment frame



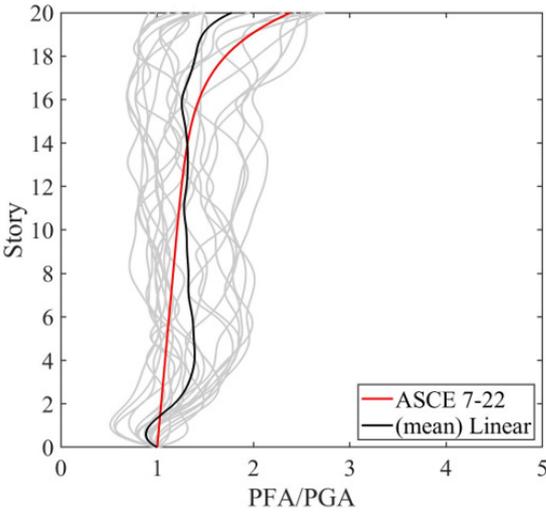
(b) 3-story concentrically braced frame



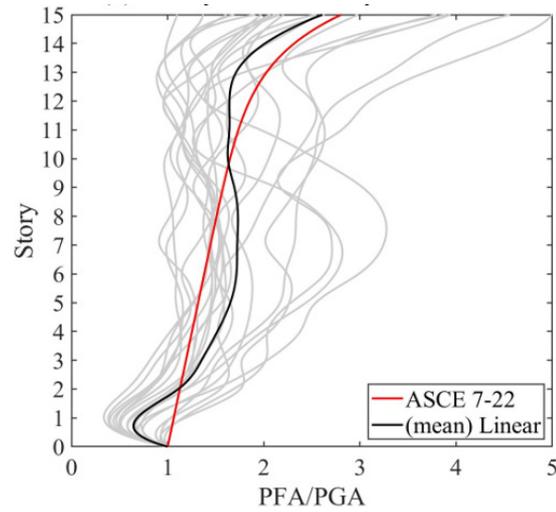
(c) 9-story moment frame



(d) 9-story concentrically braced frame

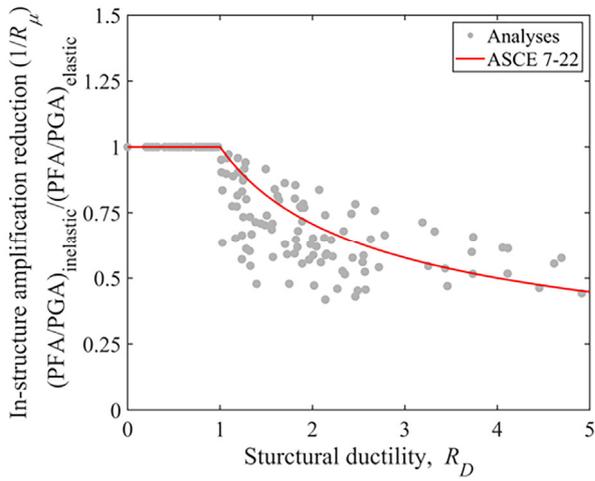


(e) 20-story moment frame

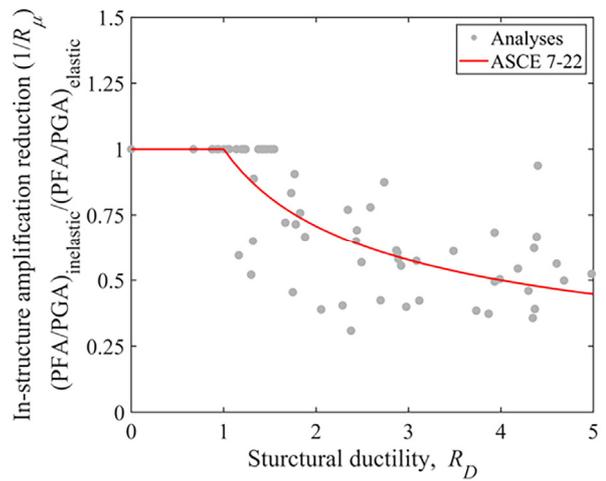


(f) 15-story concentrically braced frame

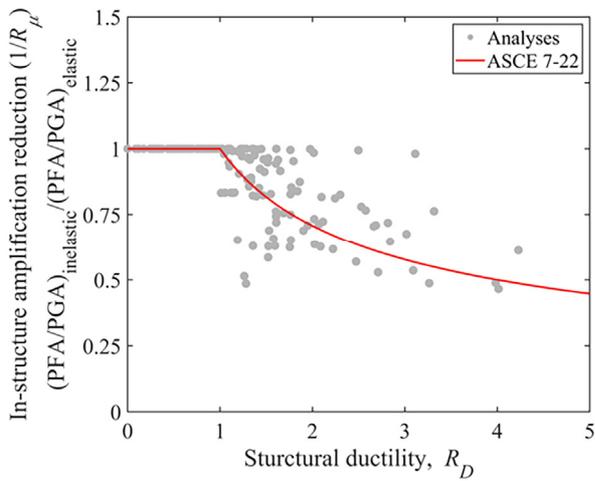
Fig. 4. Effect of supporting structure on extent and distribution of PFA/PGA



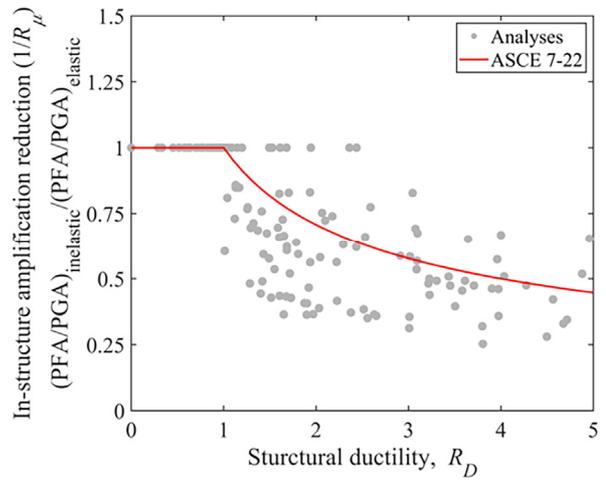
(a) 3-story moment frame



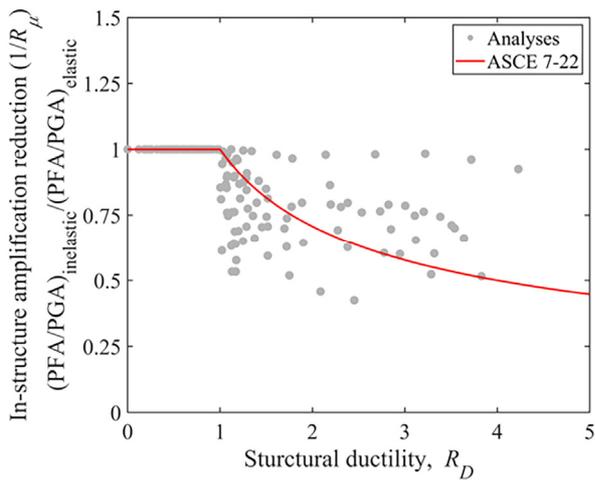
(b) 3-story concentrically braced frame



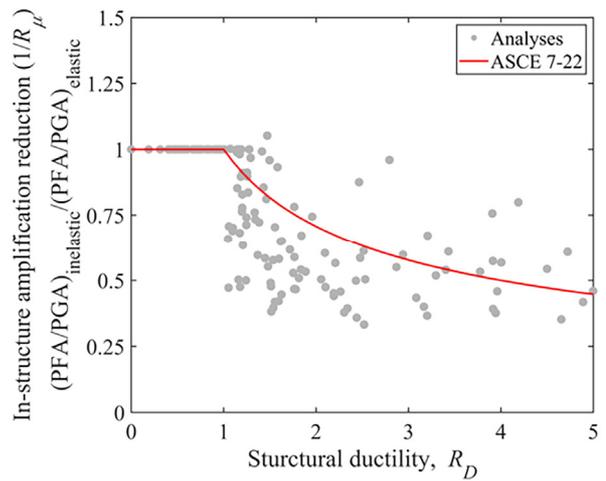
(c) 9-story moment frame



(d) 9-story concentrically braced frame



(e) 20-story moment frame



(f) 15-story concentrically braced frame

Fig. 5. PFA/PGA reduction depending on structural ductility

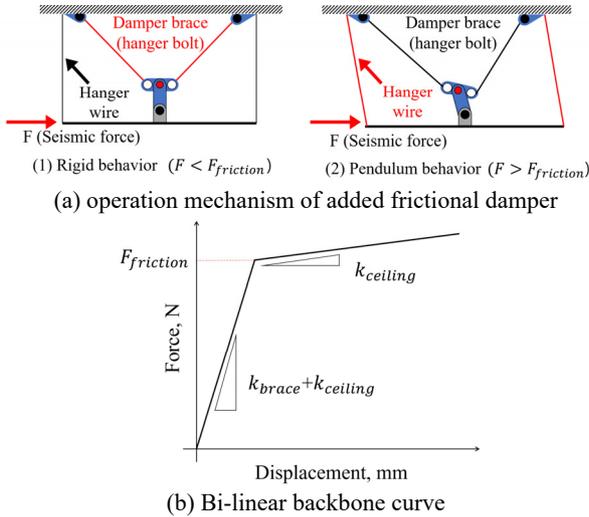


Fig. 6. Simplified SDOF model with bi-linear backbone curve

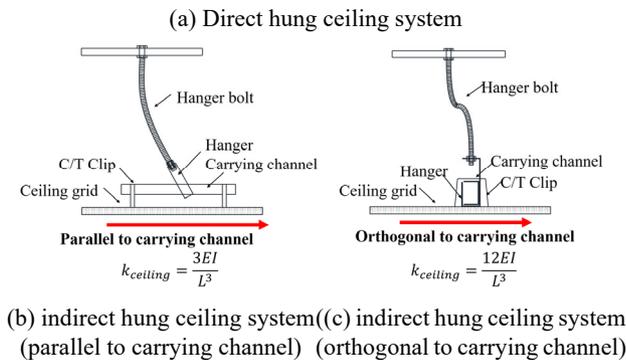
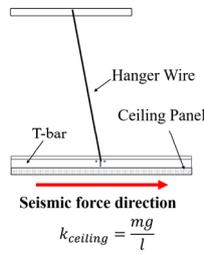


Fig. 7. Deformed shape and lateral stiffness of non-seismic ceiling system depending on hanging method

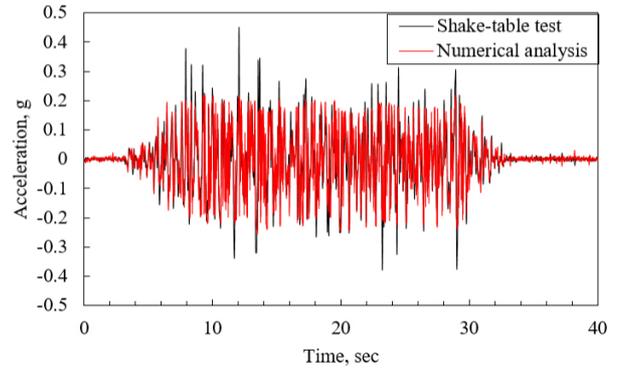
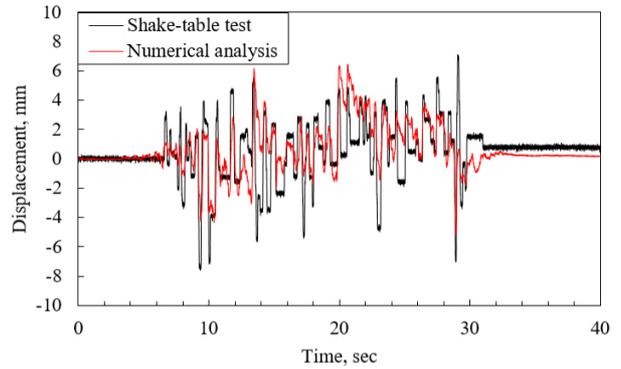


Fig. 8. Validation of proposed SDOF model under artificial input motion (ICC-AC156)

성치는 Table 2의 실험 계측값과 동일하게 설정하였다. Fig. 9은 각 구조물에 설치된 마찰감쇠 천장의 층별 최대 변위를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 모멘트 골조에 설치된 마찰감쇠 천장의 경우 전반적으로 이격거리 제한조건 (약 50 mm)를 만족하는 것으로 나타났다. 3층, 9층, 20층 모멘트 골조의 변위 응답의 중앙값은 34.08 mm로 나타났다. 반면, 3층, 9층, 15층 가새 골조에서의 천장시스템 변위 응답의 중앙값은

Table 2. Key governing parameters of friction-added ceiling system

Key governing parameters	Values of key governing parameter
Number of damper (m_{fc})	1 (0.0676 N·sec ² /mm), 2 (0.0338 N·sec ² /mm)*, 3 (0.0225 N·sec ² /mm), 4 (0.0170 N·sec ² /mm)
Friction force ($F_{friction}$)	16.28 N, 32.55 N, 48.83 N, 65.10 N*, 97.65 N, 130.20 N, 162.75 N
Length of hanger wire ($k_{ceiling}$)	500 mm (0.66 N/mm), 750 mm (0.44 N/mm)*, 1000 mm (0.33 N/mm), 1250 mm (0.27 N/mm), 1500 mm (0.22 N/mm)
Friction damper brace angle (k_{brace})	15° (6797.60 N/mm), 25° (9771.64 N/mm), 35° (10833.96 N/mm), 45° (9952.28 N/mm)*, 60° (6094.59 N/mm), 75° (1821.57 N/mm)

* used for friction-added ceiling test specimen

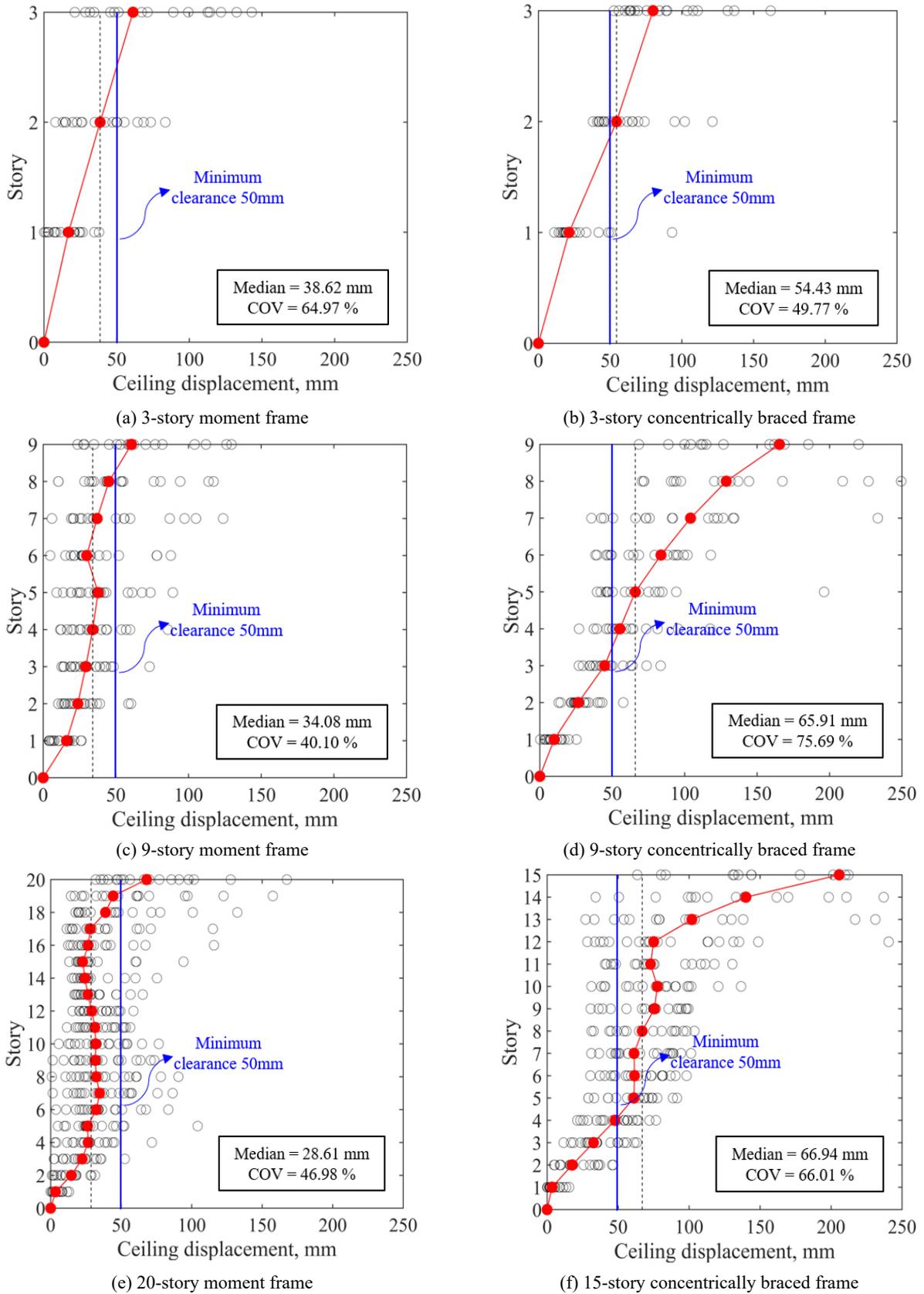


Fig. 9. Displacement response of friction-added ceiling system under 6 different types of supporting structures

65.91 mm로, 모멘트 골조 대비 약 93.40% 높은 것으로 나타났다. 이는 앞선 결과와 같이 구조물의 주기가 짧은 가새 골조의 특성상 천장시스템이 더 높은 최대층응답가속도의 영향을 받기 때문으로 판단된다.

3.3 마찰감쇠 천장시스템의 주요 설계 변수 평가

본 장에서는 마찰감쇠 천장시스템의 거동을 지배하는 주요 설계 변수에 대한 평가를 수행하였으며, 추가적으로 직·간접현수 천장시스템에 설치되는 마찰 댐퍼의 성능을 비교 평가하였다. 해석 시, 각각의 변수에 대한 영향을 독립적으로 평가하기 위하여 평가하고자 하는 변수 이외의 다른 모든 변수들은 실험 계측값과 동일하게 고정하였다. 또한 구조물은 선형으로 가정하였다.

3.3.1 마찰 댐퍼의 개수

마찰 댐퍼가 지지하는 천장의 질량은 실험조건 (천장

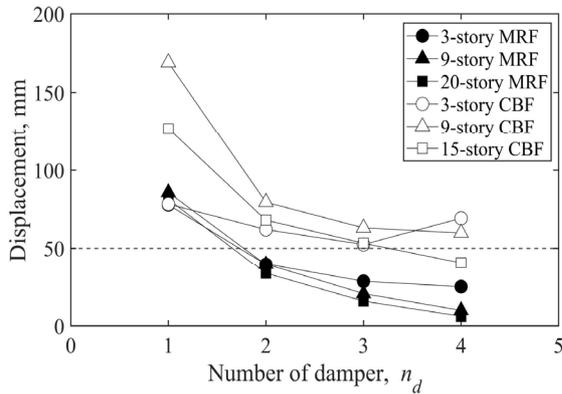


Fig. 10. Effect of number of damper

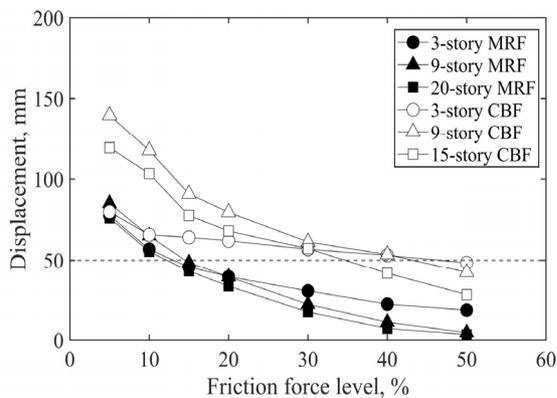


Fig. 11. Effect of friction force level

시스템의 면적=14.98m²)을 기준으로 산정하였으며, 실험조건과 같이 각 방향으로 2개씩 설치되는 조건에서 단일 댐퍼가 지지하는 천장 질량은 0.0338 N·sec²/mm 이다(Table 2 참고).

Fig. 10에서와 같이 마찰 댐퍼의 개수가 증가함에 따라 응답이 감소하는 경향은 마찰감쇠 천장시스템이 설치된 6개의 구조모델에 대하여 동일하게 나타났다. 댐퍼의 개수가 1개에서 2개로 증가하였을 때 응답의 감소량이 가장 컸으며, 3개 이상으로 댐퍼가 늘어나는 경우에는 응답의 감소가 전자 대비 비교적 작은 것을 확인하였다. 모멘트 골조에 설치된 마찰감쇠 천장시스템의 경우 실험과 동일한 댐퍼의 개수에서 이격거리 제한조건을 만족하는 경향을 보였다. 반면, 가새 골조의 경우에는 이격거리 제한조건 만족을 위해서는 적어도 3개 이상의 댐퍼가 요구됨을 확인하였다.

3.3.2 도입 마찰력

Fig. 11은 도입 마찰력을 변수로 해석한 결과를 보여

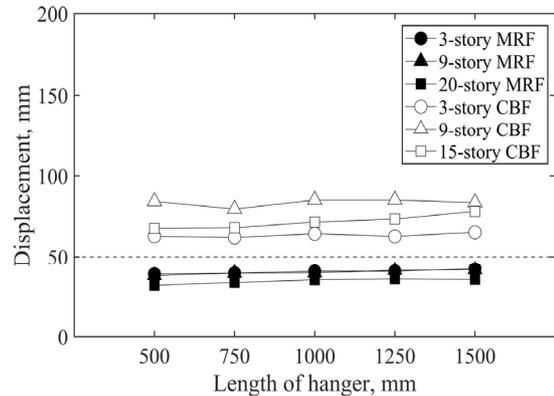


Fig. 12. Effect of length of hanger wire

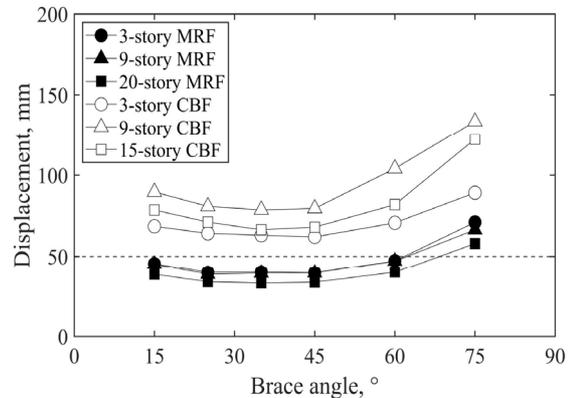


Fig. 13. Effect of Damper brace angle

주고 있다. 도입 마찰력의 크기는 천장시스템의 무게에 대한 비로 나타내었다($F_{friction}/W_{ceiling}$). 구조물의 시스템과 종류에 관계없이 마찰력이 증가할수록 응답은 꾸준히 감소하는 경향을 보였으며, 모든 모멘트 골조에 설치된 마찰감쇠 천장시스템의 경우 천장시스템 중량의 20 % 수준의 마찰력인 snug-tight condition(약 65.1 N)에서 이격거리 제한조건을 만족하였다. 하지만 가새 골조에 설치된 마찰감쇠 천장시스템의 경우에는 천장시스템 중량의 40 %–50 % 수준의 마찰력에서 이격거리 제한조건과 유사한 변위 응답을 보였다. 앞서와 마찬가지로 가새 골조의 경우 더 높은 층응답가속도의 영향을 받기 때문에, 이 경우 실험에 도입된 마찰력 대비 높은 마찰력이 도입될 필요가 있지만, 실제적으로 snug-tight condition 이상으로는 정확한 도입 마찰력 조절이 어려운 특성을 감안한다면 댐퍼의 개수를 증가시키는 것이 변위 응답 감소에 효과적일 것이라 판단된다.

3.3.3 행어와이어의 길이

행어와이어의 길이에 따른 강성은 Fig. 7(a)에 따라 계산되었으며, Fig. 12와 같이 행어와이어의 길이의 변화에도 불구하고 마찰감쇠 천장시스템의 응답은 설치된 구조물의 종류와 관계없이 비교적 일정하게 유지되는 경향을 보였다. 이는 마찰 댐퍼 가새의 횡강성이 진자거동을 하는 유연한 천장시스템의 횡강성보다 월등히 커 마찰감쇠 천장시스템의 강성비(k_{brace}/k_{total} , 여기서 $k_{total} = k_{brace} + k_{ceiling}$)에 큰 영향을 미치지 못하기 때문이다. 이를 통해 제안된 마찰감쇠 천장시스템은 행어와이어의 길이, 즉 천장시스템의 높이에 구애받지 않고 다양한 설계 요구조건을 내진 성능의 저하 없이 수용할 수 있는 매우 효율적인 천장시스템임을 확인하였다. 다만 가새 골조에 설치된 마찰감쇠 천장시스템의 경우, 앞선 주요 설계 변수인 마찰 댐퍼의 개수, 도입 마찰력의 조절이 이격거리 제한조건 만족을 위해 필요할 것으로 판단된다.

3.3.4 마찰 댐퍼 가새의 각도

마찰 댐퍼 가새의 설치 각도에 따른 시스템의 강성은 실험에서 적용한 가새 부재(행어볼트, $d = 8 \text{ mm}$)를 기준으로 산정하였다. 실험에서는 45° 를 적용하였지만, 실제 설치시 천장에 위치하는 다양한 간섭물(HVAC,

pipe)를 고려하여 배치해야 하며, 본 연구에서는 Table 2와 같이 가새의 각도를 15° – 75° 로 설정하여 해석을 수행하였다. Table 2에서 볼 수 있듯이 각도가 35° 까지 강성이 증가하기 때문에 천장의 응답은 감소하지만, 이후로는 각도가 증가함에 따라 강성이 감소하므로 천장의 변위가 증가하는 경향을 확인할 수 있다(Fig. 12 참고). Fig. 13에서 볼 수 있듯 마찰 댐퍼 가새의 각도 범위가 15° – 60° 인 경우 대부분의 구조물에서 이격거리 제한조건을 만족시키며, 절대적인 변위의 변동도 크지 않으므로 천장 간섭물의 배치상황을 고려하여 마찰 댐퍼를 유연하게 배치해 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3.5 직·간접현수 천장시스템의 응답평가

본 장에서는 직·간접현수 천장시스템에서의 회전형 마찰 댐퍼의 성능을 평가하였다. 직·간접 시스템은 앞서 언급되었듯 매다는 부재(각각 행어와이어($d = 2.7 \text{ mm}$), 행어볼트($d = 8 \text{ mm}$)) 및 접합부의 특성으로 인해서 다른 횡강성과 감쇠비를 갖고 있다(Fig. 7 참고).

Fig. 14은 직·간접현수 천장시스템에 따른 마찰감쇠 천장시스템의 변위 응답을 요약한 것이다. 해석결과 간접현수 방식을 사용하였을 때의 마찰감쇠 천장시스템의 변위 응답이 직접현수 천장 방식 대비 약 85% 감소한 것으로 나타났다. 이는 직접현수 천장시스템 대비 다양하고 복잡한 접합상세로 인해 비교적 높은 감쇠비를 가지는 간접현수 천장시스템의 특성에 기인한 것으로 판단된다^[2]. 그림에서 볼 수 있듯이 두 시스템 모두 동일한 감쇠비($\xi_{fc} = 1\%$)를 적용한 경우 응답의 차이는 두드러지지 않았으며 앞서 강성비(k_{brace}/k_{total})분석에서 언급되었듯이 이는 마찰 댐퍼 가새의 강성이 천장시

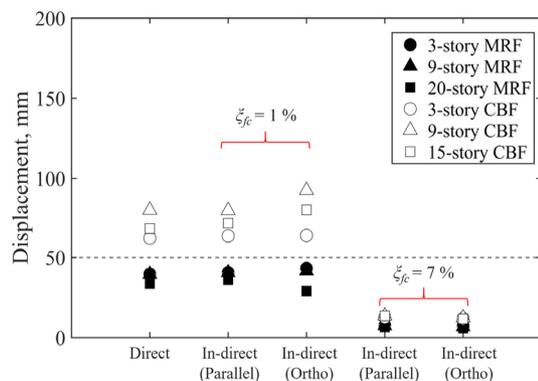
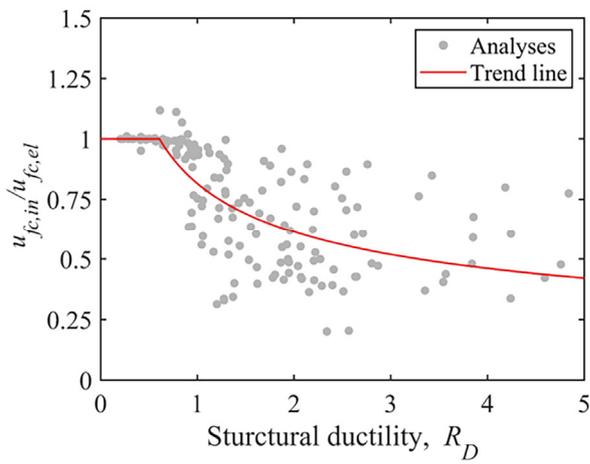
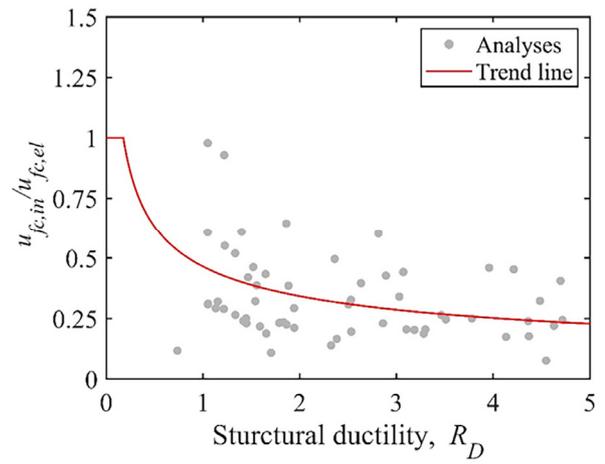


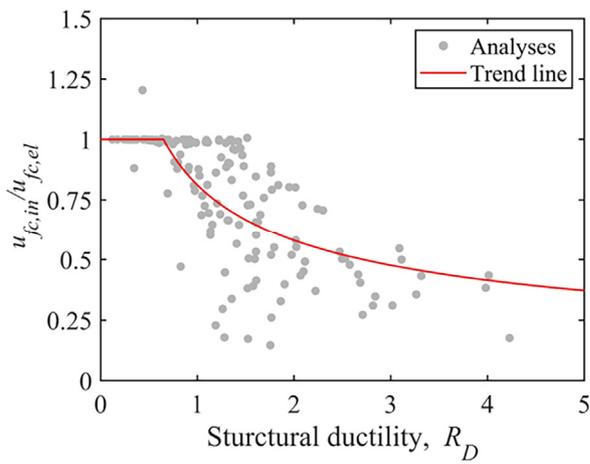
Fig. 14. Effect of hanging method



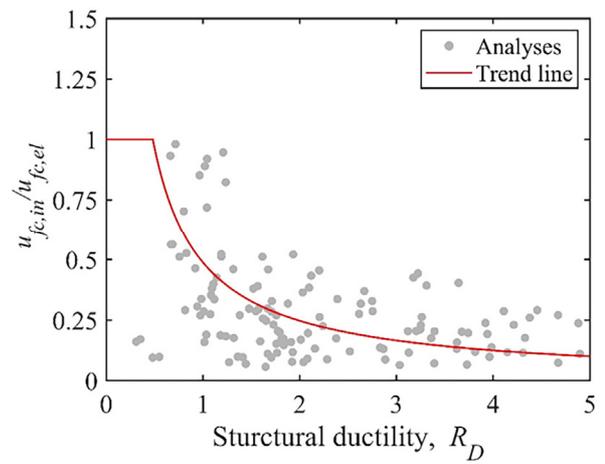
(a) 3-story moment frame



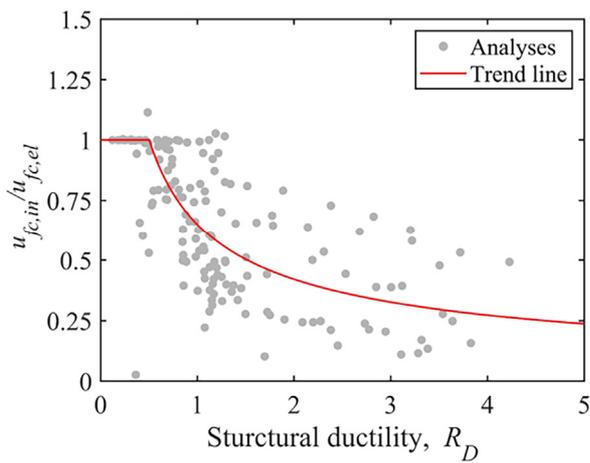
(b) 3-story concentrically braced frame



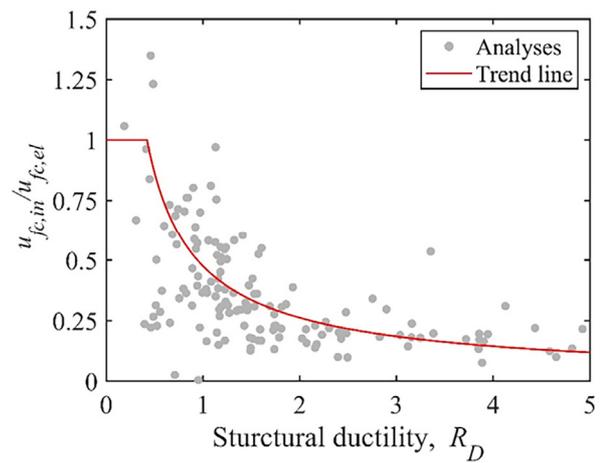
(c) 9-story moment frame



(d) 9-story concentrically braced frame



(e) 20-story moment frame



(f) 15-story concentrically braced frame

Fig. 15. Displacement response reduction depending on structural ductility

시스템의 강성에 비해 월등히 크기 때문에 강성비가 미치는 영향이 미미하기 때문이다.

3.4 구조물 비선형 거동에 따른 마찰감쇠 천장시스템의 응답 분석

본 장에서는 비선형 시간이력해석을 통해 도출한 층 응답을 활용하여 수치해석을 수행하였다. 구조물 비선형 거동에 따른 마찰감쇠 천장시스템의 응답 특성만을 고려하기 위해 마찰감쇠 천장시스템의 주요 물성치는 실험과 동일하게 설정하였다(Table 2 참고).

Fig. 15은 각 구조물의 지붕층에 설치된 마찰감쇠 천장시스템의 변위 응답 감소를 구조물 연성도에 따라 나타낸 것으로 세로축은 비선형구조물에서의 천장시스템의 변위 응답($u_{f,el}$)을 탄성구조물에서의 천장시스템의 변위 응답($u_{f,lin}$)으로 정규화한 것이다. 이때 구조물이 탄성 상태($R_D = 1$)임에도 불구하고 변위 응답이 감소하는 경향이 고차모드의 영향이 커지는 고층 구조물일수록 두드러지게 나타났는데 이는 구조물 연성도(R_D)가 구조물의 1차 모드 push-over 해석으로 평가했기 때문으로 판단된다.

Fig. 15의 붉은색 선은 응답 감소 경향의 추세선을 나타내며 전반적으로 구조물 비선형 거동이 증가함에 따라 응답은 감소하는 경향을 보였다. 가새 골조에서의 마찰감쇠 천장시스템의 변위 응답 감소가 모멘트 골조 대비 더욱 크게 나타나는 경향이 나타났다. 이는 앞선 결과와 마찬가지로 가새 골조의 경우 가새의 좌굴에 의한 층응답가속도증폭의 감소량이 크기 때문으로 판단된다. 구조물의 항복에 의한 주기 변동으로 인해 마찰감쇠 천장시스템과의 공진 가능성이 있으므로 설계 시 이에 대한 각별한 주의가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 마찰감쇠 천장시스템의 지진거동 특성 분석을 위하여 주요 설계 변수에 대한 비선형 시간 이력해석을 수행하였다. 해석에 사용된 입력지진파(층 운동)은 구조물의 시간이력해석을 통해 얻은 결과를 사용하였으며, 이때 구조물의 동특성이 미치는 영향을 고려하기 위하여 두 가지 철골 구조물(모멘트 골조 및 중

심 가새 골조)에 대한 해석을 수행하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 아래와 같다.

- (1) 천장시스템의 응답에 영향을 미치는 최대층응답가속도증폭 (PFA/PGA)을 분석한 결과 최대층응답가속도증폭은 가새 골조에서 더욱 크게 평가된 것을 확인하였다. 이는 모멘트 골조 대비 높은 강성으로 인해 가새 골조의 주기가 짧게 평가되어 그 주기가 지반응답스펙트럼상 가속도 응답 증폭 구간에 위치하기 때문으로 판단된다.
- (2) 구조물 비선형 거동으로 인한 최대층응답가속도증폭의 감소는 모멘트 골조 대비 가새 골조에서 더욱 크게 평가되었다. 이는 가새의 좌굴에 따른 주기의 증가폭이 모멘트 골조 대비 커 지반응답스펙트럼상의 가속도 응답 증폭 구간을 벗어나기 때문으로 판단된다. 반면 모멘트 골조의 경우 비교적 긴 주기로 인해 지반응답스펙트럼상에서 가속도 감소 구간에 주기가 위치하기 때문에 비선형 거동으로 인한 주기 증가가 유발하는 최대층응답가속도증폭 감소 역시 작게 평가되었다.
- (3) 마찰 댐퍼의 설치 개수가 증가할수록(즉, 단일 댐퍼가 지지하는 천장의 질량이 감소할수록) 시스템의 변위응답이 감소하는 것을 확인하였다. 단일 댐퍼가 지지하는 천장의 질량이 $0.0338 \text{ N}\cdot\text{sec}^2/\text{mm}$ 인 경우 대부분의 모멘트 골조에서는 ASTM E580에서 제안하는 이격거리 제한조건을 만족하였으며, 모멘트 골조 대비 더 큰 층응답가속도의 영향을 받는 가새 골조에 설치되는 경우, 그 질량이 $0.0225 \text{ N}\cdot\text{sec}^2/\text{mm}$ 이하가 되도록 하여 이격거리 제한조건을 만족시킬 필요가 있음을 확인하였다.
- (4) 행어와이어의 길이가 마찰 천장시스템의 거동에 미치는 영향은 미미하였다. 이는 시스템 거동의 주요 영향인자인 강성비(k_{brace}/k_{total})에 대해 마찰 댐퍼 가새의 강성이 지배적이기 때문으로 확인되었다. 마찰댐퍼 가새의 강성은 설치각도를 $15^\circ\text{--}60^\circ$ 으로 만족시키는 경우 크게 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구의 회전형 마찰천장시스템의 경우 천장에 설치되는 다양한 간섭물을 고려하여 자유롭게 배치하여 적용할 수 있음을 확인하였다.
- (5) 본 연구의 회전형 마찰감쇠장치는 대표적 천장시

스템인 간접현수에 대해서도 우수한 내진성능을 기대할 수 있음을 확인하였다. 마찰감쇠장치를 간접현수 시스템에 대해 적용하는 경우 직접현수 시스템 대비 85 % 감소된 응답이 발생함을 확인하였으며 이는 직접현수 대비 간접현수 천장시스템의 감쇠비가 높기 때문으로 확인되었다.

- (6) 구조물 비선형 거동이 마찰감쇠 천장시스템에 미치는 영향을 평가하였으며, 가새 골조에서의 변위 응답 감소가 모멘트 골조보다 더욱 큰 것으로 나타났다. 이는 마찰감쇠 천장시스템의 입력 하중인 최대충응답가속도가 감소하기 때문에 판단된다. 구조물의 비선형 거동으로 인한 마찰감쇠 천장시스템의 변위 응답 감소를 고려한다면 보다 경제적으로 이격거리 제한조건을 만족시킬 수 있는 설계가 가능할 것으로 판단된다. 다만, 구조물 비선형 거동 시 발생할 수 있는 구조물 주기 이동으로 인한 구조물과 천장시스템의 공진은 주의할 필요가 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축 연구개발사업의 연구비 지원(21AUDP-C146352-04)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] Jun, S.C., Lee, C.H., and Bae, C.J. (2022) Development of Seismic Ceiling System Based on Shake Table Test of Full-Scale 2-Story Steel Moment Frame, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.34, No.6, pp.341-352 (in Korean).
- [2] Jun, S.C., Lee, C.H., and Bae, C.J. (2021) Analysis of Dynamic Behavior of Seismic and Non-Seismic Suspended Ceiling Systems Based on Shake-Table Testing, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.2, pp.63-74 (in Korean).
- [3] MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) (2019) *Seismic Design Standard for Buildings*, KDS 41 17 00:2019, MOLIT, Korea (in Korean).
- [4] ASTM (American Society for Testing and Materials) (2017) *Standard Practice for Installation of Ceiling Suspension Systems for Acoustical Tile and Lay-in Panels in Areas Subject to Earthquake Ground Motions*, ASTM E580/E580M-17, ASTM, US.
- [5] Jun, S.-C., Lee, C.-H., and Bae, C.-J. (2022) Shake Table Testing of Braced and Friction-added Suspended Ceilings and Associated Numerical Study, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.252, 113724.
- [6] McKenna, F., Fenves, G.L., and Scott, M.H. (2000) *Open System for Earthquake Engineering Simulation*, OpenSees, Pacific Earthquake Engineering Research Center, US.
- [7] Gupta, A., and Krawinkler, H. (1999) *Seismic Demands for Performance Evaluation of Steel Moment Resisting Frame Structures*, Report No. 132, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, US.
- [8] Cho, C.-H., Lee, C.-H., and Kim, J.-J. (2011) Prediction of Column Axial Forces in Inverted V-braced Seismic Steel Frames Considering Brace Buckling, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.137, No.12, pp.1440-1450.
- [9] Somerville, P.G., Smith, N., Punyamurthula, S., and Sun, J. (1997) *Development of Ground Motion Time Histories for Phase 2 of the FEMA/SAC Steel Project*, SAC/BD-97/04, SAC Joint Venture, US.
- [10] ASCE (American Society of Civil Engineers) (2017) *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*, ASCE/SEI 7-22, ASCE, US.
- [11] SEAOC (Structural Engineers Association of California) Seismology Committee (1999) *Recommended Lateral Force Requirements and Commentary* (7th Ed.), SEAOC, US.
- [12] Pourali, A., Dhakal, R.P., MacRae, G., and Tasligedik, A.S. (2017) Fully floating Suspended Ceiling System: Experimental Evaluation of Structural Feasibility and Challenges, *Earthquake Spectra*, EERI, Vol.33, No.4, pp.1627-1654.

요약: 지난 국내의 지진사례를 통해 천장시스템은 막대한 경제적 피해를 입을 수 있음이 확인되었다. 선행연구에서는 마찰 댐퍼를 활용하여 변위 및 가속도 응답을 효과적으로 제어할 수 있는 마찰감쇠 천장시스템을 제안하였다. 하지만 마찰감쇠 천장시스템의 주요 설계 변수에 대한 연구는 아직 제한적인 실정이다. 본 연구에서는 비선형 단자유도 모델을 활용하여 마찰감쇠 천장시스템의 주요 설계 변수를 평가하였다. 우선 천장시스템의 응답에 영향을 미치는 최대충응답가속도증폭을 평가하였으며 이는 가새 골조가모멘트 골조 대비 크게 평가되었다. 이는 가새 골조의 주기가 지반응답스펙트럼에서 가속도 응답 증폭 구간에 속하기 때문이다. 또한 비선형 거동이 증가함에 따른 최대충응답가속도증폭의 감소 역시 가새 골조에서 크게 나타났으며 이는 가새가 좌굴함에 따른 주기 증가가 원인인 것으로 판단된다. 마찰감쇠 천장시스템의 주요 설계 변수해석 결과 마찰감쇠 천장시스템의 변위 응답은 마찰력이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 또한 행어와이어의 길이에 관계없이 마찰감쇠 천장시스템의 변위 응답은 일정하게 유지되었는데 이는 행어와이어의 길이가 마찰감쇠 천장시스템의 강성비에 큰 영향을 주지 않기 때문이다. 이를 통해 제안된 천장시스템이 다양한 설계 요구조건을 수용할 수 있음을 확인하였다. 이외에도 구조물의 비선형 거동이 마찰감쇠 천장시스템의 응답에 미치는 영향을 평가하였다.

핵심용어: 비구조요소, 내진설계, 천장시스템, 비선형 시간이력해석, 마찰 댐퍼
