

내진 천장시스템의 실규모 진동대 실험 및 해석

Full-Scale Shaking Table Test and Analysis of Seismic Ceiling Systems

김 호 연*
Kim, Hoyeon

최 용 수**
Choi, Yong-Soo

심 재 일***
Sim, Jaeil

조 창 근****
Cho Chang-Geun

Abstract

In the current research, a seismic ceiling system as one of non-structural elements in buildings has been developed by applying newly designed vertical hanger clips combined with M-bar channel clips. In order to evaluate the seismic performance of the developed system, full-scale shaking table tests of one story frame structure with the conventional ceiling system or the developed seismic ceiling system were performed with time-history responses under earthquake loads. The developed system was also evaluated by the time-history dynamic analysis. From seismic test and analysis, it was shown that the developed seismic ceiling system could give improved seismic performances to minimize displacements and damages of ceiling systems as well as enhance seismic safety of the ceiling system.

Keywords : Seismic ceiling systems, Shaking table test, Dynamic load, Seismic analysis

1. 서론

2016년 9월 12일 규모 5.8의 경주 지진 및 2017년 11월 15일 규모 5.4 포항 지진은 규모 4.0~5.0의 여진 1회, 3.0~4.0의 여진 6회 포함 총 77회의 여진이 발생하였다(기상청, 2018)¹⁾. 연이은 지진 발생은 우리나라도 이제 '지진 안전시대'가 아니라는 경각심을 가지게 했다. 이에 따라 건축물의 내진 설계 및 기존 건물의 내진 보강에 대한 관심이 높아지고 있으며, 정부에서는 1986년 내진설계법이 제정된 이후 내진 설계 대상 건축물의 범위를 넓혀가고 규정 또한 강화되고 있다. 국내 건축물은 지진 규모 6.0~6.5에 저항하도록 내진 설계가 이루어지고 있지만, 경주 및 포항 지진에서 오히려 비구조재와 그 중 천장

재의 탈락이 인적 및 물적 피해에 큰 영향을 미칠 수 있음이 드러났다.

공간 형성의 위치 및 크기 제한이 없는 천장재는 규모가 커질수록 중량도 증가되고 높게 설치되면 지진에 의한 탈락 및 추락으로 인한 인명 및 재산 피해가 심각하게 발생할 수도 있다. 국내의 비구조재에 대한 내진 설계는 지진력 산정을 통한 안전 확보 측면에서 고려되어 있어, 구체적인 내진 설계 및 보강 방법에 대한 기준이 미흡하고 실제 지진 성능을 확보한 내진형 천장재 시스템을 반영한 사례 또한 미흡하다^{2),6),7),9)}.

따라서 본 연구에서는 신축 및 기존 건물에서 비구조재 내진 성능 확보를 위한 방법으로 내진형 천장시스템을 개발하였다. 개발시스템의 천장과 슬래브의 연결을 보강 가새로 응용하였으며, 연결부의 내력 및 강성보강을 위해 연결부 결함을 위한 요소철물을 개발하여 새로운 내진 천장시스템을 제안하였다. 개발된 천장시스템의 성능을 검증하고자 실규모 진동대 실험을 실시하였다. 또한 실험적 결과를 바탕으로 개발된 내진 천장시스템 적용에 따른 비선형 동적해석을 수행하여 내진 성능 평가를 실시하였다.

* 학생회원, 조선대학교 대학원, 박사과정
Architectural Engineering, Chosun University

** 정회원, 포엠(주), 공학박사
4M Co., Ltd.

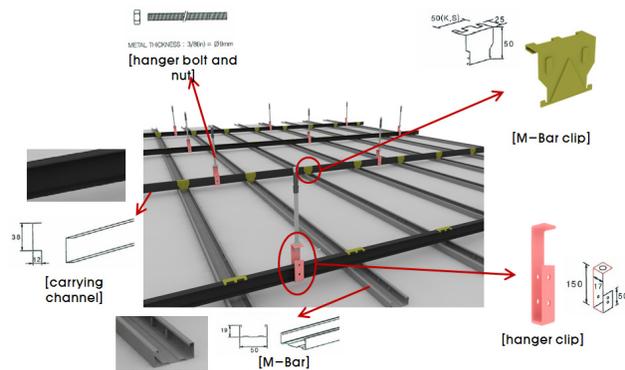
*** 정회원, 지엘기술(주), 공학박사
GL Technology Co., Ltd.

**** 교신저자, 정회원, 조선대학교 건축학부 교수, 공학박사
School of Architecture, Chosun University
Tel: 062-230-7023 Fax: 062-230-7155
E-mail: chocg@chosun.ac.kr

2. 천장시스템 개발

2.1 기존 천장시스템

일반적인 건물의 천장면을 마감하는 천장 받침재 경량철골 구조 중 가장 많이 사용되고 있는 M-bar 시스템은 <Fig. 1>과 같다.



<Fig. 1> M-bar system

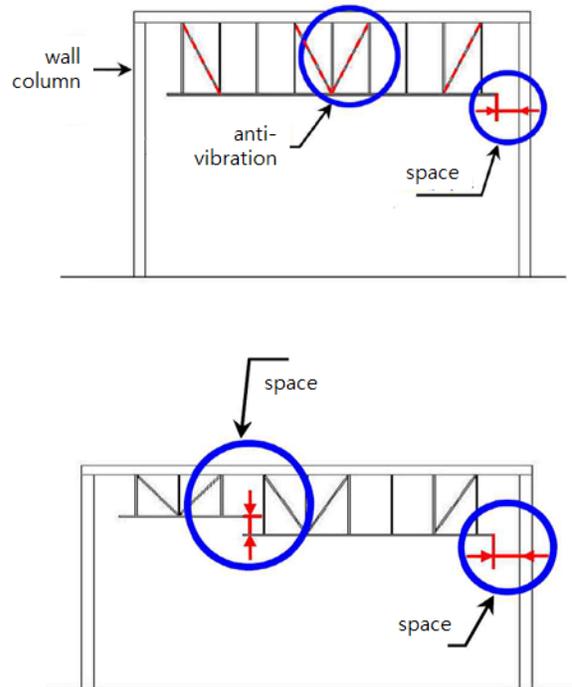
M-bar 천장시스템의 시공 방법을 살펴보면 천장 바닥의 데크 또는 콘크리트 면에 앵커를 이용하여 행거 볼트를 설치한다. 그리고 행거 클립으로 행거 볼트에 캐링 채널을 설치, M-bar 클립을 이용하여 캐링 채널에 M-bar를 설치한다. 나사못을 이용하여 M-bar에 집텍스 천장재를 설치한다.

이러한 경량철골구조는 집텍스 및 전등 설비 등의 하중을 견디는 구조물로 서론에서 언급한대로 비구조재로서 내진 성능 확보를 위한 설계 및 보강에서는 기준이 미흡하다^{3,5)}.

2.2 학교 시설 내진 설계 기준

학교시설 내진설계 기준 고시(제2009-18호, 교육과학기술부)가 2009년에 제시되었다¹²⁾. 이 기준은 철근콘크리트 및 강구조 등 구조재 뿐만 아니라 천장재, 조명기구, 책꽂이, 신발장 등 학교 시설물 비구조부재의 내진 상세를 사례를 통해 제시하고 있다. 여기서 제시하는 천장재에 관한 내진 상세를 살펴보면 지진 발생 시 진동제어를 위한 브레이스 설치와 벽·기둥과 천장재 사이의 공간 확보만을 예로

들고 있다<Fig. 2>. 이는 권장사항이며 일본의 사례이다.



<Fig. 2> Case of seismic separation joints in ceiling (MEXT 2009)

2.3 천장시스템의 개발

기존의 비내진 천장시스템은 지진하중 하에서 각 상호 연결재 및 클립들의 파손이 손쉽게 일어날 수 있다. 이를 위해 본 연구에서는 새로운 형태의 M-bar 클립과<Fig. 3>, 진동 방지를 위한 경사진가새 설치를 위한 행어 클립을 개발하였다<Fig. 4>. 개발된 제품들은 기존 제품을 준용함으로써 추가적으로 설치하여 보강이 가능하도록 고안하였다.

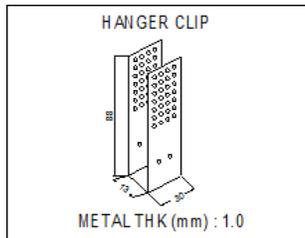
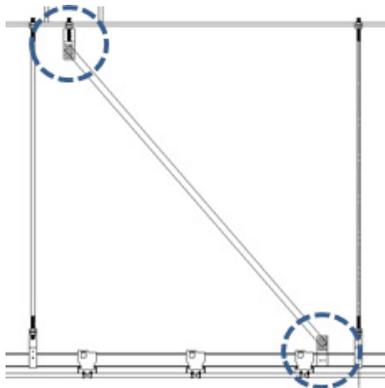
기존의 M-bar 클립은 한쪽 면으로만 감싸고 있는 반면, 개발된 M-bar 클립은 양쪽에서 마주보고 캐링 채널을 감싸게 하여 안정성을 확보하였다. 기존 M-bar 클립과 시공성에서 큰 차이를 보이지 않도록 수작업으로 쉽게 조립이 가능하도록 제작하였다.

진동 방지를 위한 가새를 설치하기 위하여 <Fig. 4>와 같이 행어 클립을 개발하였다. 개발된 행어 클립은 ㄱ 형태로 기존 천장시스템의 캐링 채널에 고정하고 위쪽으로는 ㄷ 형태로 천장 바닥면에 앵커 고

정 후 경사 가새를 설치하도록 고안하였다.



〈Fig. 3〉 Developed M-bar clip



〈Fig. 4〉 Developed hanger clip

3. 실규모 진동대 실험 및 평가

3.1 실험 방법 및 설정

개발된 내진형 천장재의 지진동 거동을 평가하기 위해 기존 천장시스템(Case 1)과 개발된 M-bar 클립 및 가새를 포함한 내진형 천장시스템(Case 2)의 두 경우로 나누어 실규모 진동대 실험을 수행하였다. 진동대 시험은 ICC-ES AC 156 (2010)¹¹⁾의 시험 방법을 준용하여 수행하였으며, 시험체의 심각한 손상 발생 혹은 사용 기기의 한계 용량에 도달하는 시

점까지 기존 인공지진과의 가속도 스케일을 증가하면서 가진하였다.

천장시스템이 설치되는 시험용 강재 프레임은 4.0m×4.0m×3.0m의 규모를 가지는 입방 구조체이고 수평면 규모 3.5m×3.5m를 가지는 천장시스템을 강재프레임 내부에 설치하였다.

본 실규모 진동대 실험은 경남 양산에 위치한 지진방재센터에서 수행하였으며, 사용된 진동대는 6-자유도 진동대 장비를 사용하였다. 진동대 시스템의 규격 및 사양은 <Table 1>과 같다.

〈Table 1〉 Dimension of shaking table

Table size(m)	4.0×4.0
Type	Fixed
Degree of freedom	6
Full payload(kN)	600
Nominal payload(kN)	200
Desired overturning moment(kN·m)	1,000
Acceleration at full payload(g)	
X-Axis	1.20
Y-Axis	1.20
Z-Axis	0.80
Acceleration at nominal payload(g)	
X-Axis	1.50
Y-Axis	1.50
Z-Axis	1.00
Maximum velocity(mm/s)	
X-Axis	1,500
Y-Axis	1,500
Z-Axis	1,000
Maximum stroke(mm)	
X-Axis	± 300
Y-Axis	± 200
Z-Axis	± 150
Operation frequency range(Hz)	0.1~60
Moveable distance(m)	-

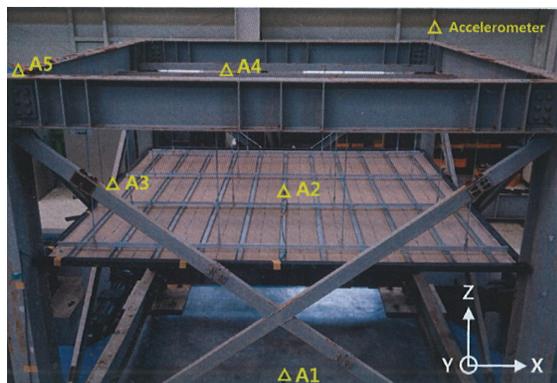


(a) View 1



(b) View 2

〈Fig. 5〉 Setup of ceiling systems in shaking table



〈Fig. 6〉 Set up an accelerometer

진동대 실험을 위하여 프레임을 진동대 바닥에 M30 Bolt(Torque=770N·m)로 16개소를 고정하였다. 천장마감재는 진동대 바닥에서부터 2.7m 높이에 시험용 프레임에 설치되고, 연직하중을 저항하기 위한 달대는 시험용 프레임 최상부에서 볼트접합으로 연결하였다. 천장마감재 외부 몰딩은 시험용

프레임의 중간 높이에 위치하는 C-형강에 피스접합으로 연결하였다.

진동대 실험을 위한 지진하중 조건은 ICC-ES AC156 (2010)에서 정의하고 있는 요구응답스펙트럼(RRS, Required Response Spectrum)을 사용하였다. 시험체의 성능 확인을 위한 절차에 따른 요구응답스펙트럼 결정 파라미터는 아래 <Table 2>와 같다. 진동대 실험은 수평 2방향 및 수직 1방향에 대해서 동시 가진하였다.

〈Table 2〉 Determined parameter in RRS

Test No.	B/D code	Test Criteria	SDS* (g)	z/h	Horizontal		Vertical	
					AF LX-H (g)	ARI G-H (g)	AF LX-V (g)	ARI G-V (g)
1			0.60	1	0.96	0.72	0.41	0.17
2			0.84	1	1.35	1.01	0.57	0.23
3	IBC 2012	ICC-ES	1.08	1	1.73	1.30	0.73	0.30
4		AC 156	1.32	1	2.12	1.59	0.89	0.36
5			1.56	1	2.50	1.88	1.05	0.43
6			1.68	1	2.69	2.0	1.13	0.46

* SDS: Spectral response acceleration at short period

$$\text{여기서, } S_{FLX-H} = S_{DS}(1 + 2\frac{z}{h})$$

$$A_{RIG-H} = 0.4S_{DS}(1 + 2\frac{z}{h})$$

$$S_{FLX-V} = 0.67S_{DS}$$

$$A_{RIG-V} = 0.27S_{DS}$$

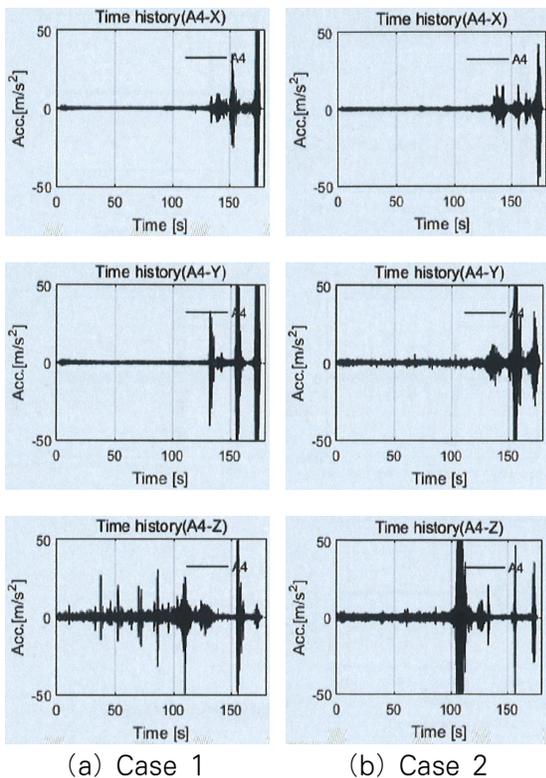
시험 절차는 ICC-ES AC156 (2010)을 준용하되, 연구를 위한 기초 실험으로서 공진주파수 탐색 시험은 최초에 한 번만 수행하였다. 천장시스템의 응답을 분석하기 위하여 주요 포인트에 3축 가속도계를 설치하였으며, 진동대의 제어 결과를 확인하기 위하여 진동대 테이블에 3축 가속도계를 설치하였다. 각 가속도계의 설치 위치는 <Fig. 6>과 같다.

3.2 실험 결과 및 고찰

진동대 실험 결과, 동일 지진파에 대한 Case별 동적응답 및 공진거동특성을 비교 분석하였다. 실험체의 공진은 진동대에서 입력된 가속도(Base, a)에 대한 실험체 각 위치에서 응답가속도(Unit, b)의 전달함수를 산정함으로써 결정하였다. 내진 및 비내진 천장시스템 두 시험체에 대한 <Fig. 6>의 각 위치별 측정 공진주파수는 <Table 3>과 같이 나타났다.

<Table 3> Result of resonance test

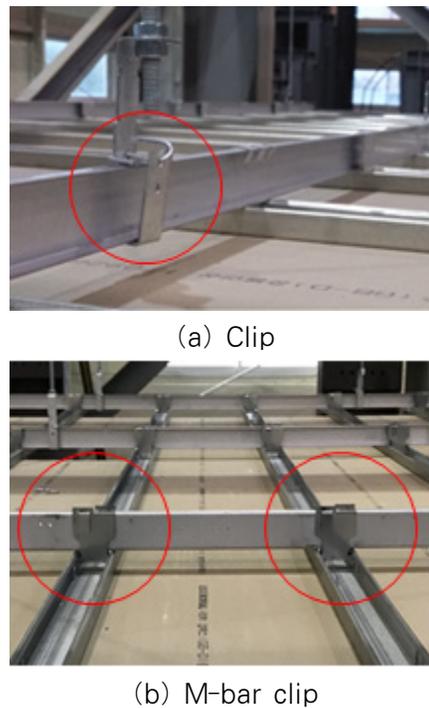
Measured locations	Dir.	Measured frequency at resonance (Hz), df=0.25Hz	
		Case 1	Case 2
A2	X	15.75	13.75
	Y	24.50	16.00
A3	X	14.00	13.75
	Y	16.00	16.00
A4	X	16.50	23.00
	Y	15.75	34.00
A5	X	23.00	16.25
	Y	15.00	16.00



<Fig. 7> Measured acceleration responses at A4

천장시스템에서 측정된 공진 주파수 값을 보면, A4 위치에서 Case 2(내진시스템)의 공진 주파수가 Case 1(기존시스템)에 비해 두 수평 방향에 대해 모두 큰 것을 나타났다. 이는 내진보강형 천장시스템이 지진동에 대한 동적 응답제어 및 변형 억제에 있어 기존시스템에 비해 내진 성능을 개선된 것으로 평가된다. 비내진 및 내진형 천장시스템의 A4 위치에서 측정된 x, y, z 방향의 응답 가속도를 시간이력으로 도시하여 <Fig. 7>에 나타내었다. 비내진형 Case 1에 비해 내진형 Case 2의 응답 가속도가 크게 측정되었다.

이는 본 연구에서 제시된 강성증진 및 동적변형 제어의 개념으로 개발된 행거 및 M-bar 클립 장치 적용의 내진형 천장시스템이 지진동에 대한 변형 및 탈락을 억제하는데 우수한 것으로 평가된다.



<Fig. 8> Setup of ceiling systems in shaking table

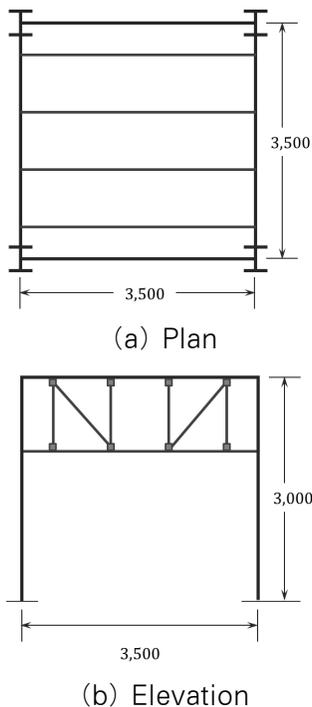
진동대의 지진동 실험 종료 후 <Fig. 8 (a)>는 Case 1(비내진)의 기존 클립, <Fig. 8 (b)>는 개발된 Case 2(내진형)의 M-bar 클립의 상태를 나타내었다. (a)에서처럼 비내진형의 기존 클립은 지진동에 의해 클립의 고정부가 많이 벌어지고 소성변형을 일으켜 지진 발생으로 천장재가 탈락할 수 있음을 보여주

었다. 하지만, (b)에서처럼 개발된 M-bar 클립은 지진동 종료 후에도 초기 설치 시 상태와 같이 소성변형 없이 충실히 고정되어있어 충분히 안전하게 천장재를 지지하고 있다.

4. 내진형 천장시스템의 동적해석

4.1 예제 구조물 모델링

비구조요소 천장시스템의 내진 성능 평가 해석을 위해 실규모 진동대 실험과 동일한 모델을 구성하여 동적지진해석을 수행하였다. 진동대 위의 철골 구조물을 Midas-Gen¹⁰⁾을 이용하여 모델링하고, 여기에 천장시스템을 연결 요소들을 이용하여 구조요소 모델을 구성하였다<Fig. 9>. 천장부의 내진보강재의 적용 여부에 변수를 두고 비내진 및 내진형 천장시스템의 적용 예를 구성하고, 실규모 지진하중에 대한 시간이력해석을 실시하여 천장시스템의 내진 성능 검증을 수행하였다.



<Fig. 9> Model of a frame with ceiling system

기둥과 보 부재는 H 300×300×10/15 강재 형강을 사용한 높이 3,000mm 및 경간 3,500mm인 1층 1경

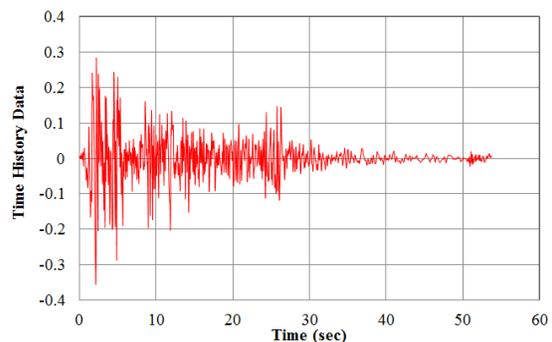
간 골조 형태이다. 비구조 요소인 천장시스템의 구형은 C-채널 150×75×6.5/10을 높이 2,000mm 및 간격 900mm로 상부에서 고정되어 있도록 모델링하였다.

<Table 4> Static loads in the frame

Dead load(1)	Floor load	
	Dead load(2)	Live load
30.25kN	3kN/m ²	2.5kN/m ²

구조물의 질량은 FEMA 273 (1997)⁸⁾에서 제안한 고정하중 100%, 활하중 25%를 고려하고, <Table 4>는 구조부재의 전체하중과 바닥에 적용된 고정하중 및 활하중 값을 보여준다.

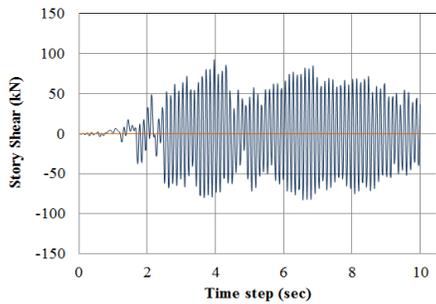
천장시스템의 비구조 부재간의 연결부 모델은 기존 천장시스템에 사용되는 알루미늄 및 행거 클립은 단순 상호 끼움 방식의 연결 상태로 비구조부재간 접합부를 핀 접합으로 가정하였다. 천장시스템의 내진형으로 개발된 M-bar 클립 및 신형 행거 클립은 끼움 후에 고정시키는 체결 방식으로서 비구조부재간 연결 철물에서의 강성이 고려된다. 하지만 해석 모델에서는 동일 평면상 비구조부재간의 고정을 위한 M-bar 클립의 조건 역시 회전성에 대해 자유롭게 하였다. 다만 상하 방향 연결 요소인 신형 행거 클립의 모델을 위해 신형 행거 클립의 강성은 인장 실험 결과를 바탕으로 초기강성을 추정하여, 모델링 시 천장시스템간의 상호 연결부에 그 추정 값으로 정의하였다. 구조물에 적용하기 위해 개발된 행거 클립의 실험을 통한 평균 초기강성은 대략 0.4kN/m로 측정되었다.



<Fig. 10> Earthquake input of El Centro 1940

4.2 시간이력해석 및 결과

이상과 같은 대상구조물의 시간이력해석에 고려된 실제 지진파는 El Centro 1940의 실측 지진 값으로서<Fig. 10>, 최대지반가속도 0.3569g 값을 0.25, 0.50, 0.75, 1.00의 증감계수로 스케일 하여 조정된 지진파 데이터를 비구조부 내진 보강 여부에 따른 구조시스템에 대한 시간이력해석을 수행하였다. 입력지진 1.00 스케일을 적용한 경우 내진형 천장시스템 구조의 시간이력해석에 의한 층전단력 결과는 <Fig. 11>과 같다.



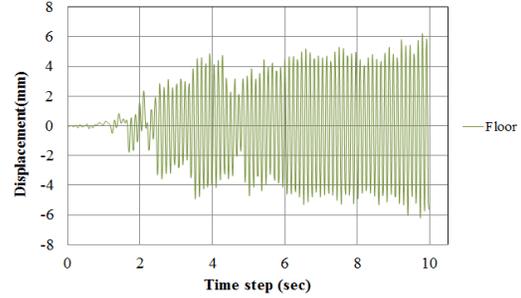
<Fig. 11> Scale factor of 1.0 for Case 2

<Table 5> Max. displacements of ceiling system

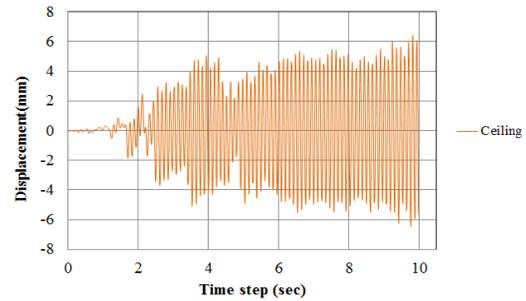
Scale factor	Case 1(mm)		Case 2(mm)	
	Floor level	Ceiling level	Floor level	Ceiling level
0.25	1.557	1.613	1.124	1.111
0.50	3.113	3.226	2.247	2.221
0.75	4.67	4.839	3.371	3.332
1.00	6.226	6.452	4.494	4.443

시간이력해석 결과, <Table 5>는 천장시스템의 상부 바닥층 레벨 및 하부 천장 레벨에서의 기존 및 내진형 천장시스템 각 Case에 대한 지진하중 스케일에 따른 최대변위해석 결과이다. 이와 관련한 입력 지진하중 1.0 스케일에 대한 시간이력에 따른 변위 응답을 각각 <Fig. 12> 및 <Fig. 13>에 도시하였다. 규모를 달리한 모든 지진하중 하에서 기존 천장시스템(Case 1)에 비해 개발된 내진형 천장시스템(Case 2)를 적용한 경우 천장시스템의 상하부 모두

에서 변위 응답 및 최대 변위가 크게 감소한 양상을 보이고 있다.

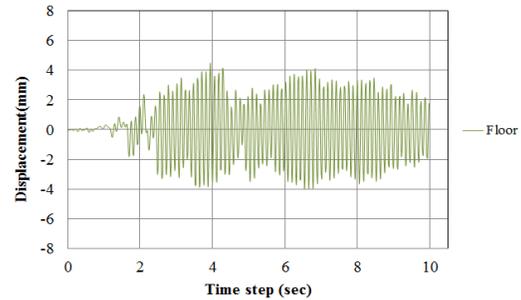


(a) Floor level

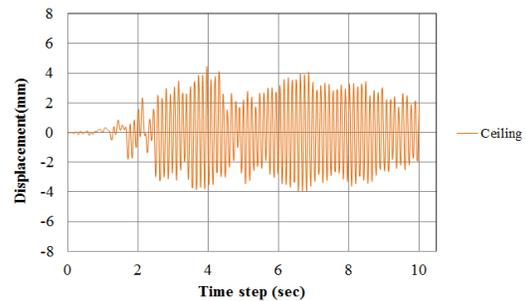


(b) Ceiling level

<Fig. 12> Displacement time-history for Case 1 with scale factor of 1.00



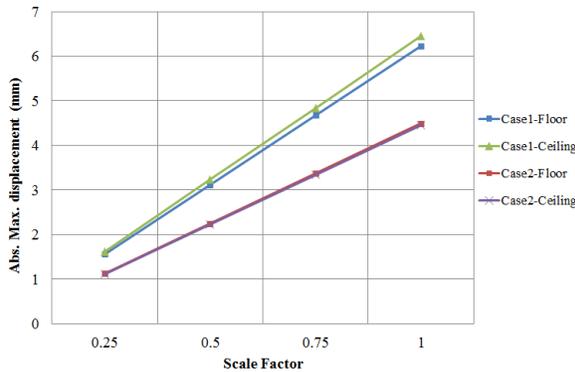
(a) Floor level



(b) Ceiling level

<Fig. 13> Displacement time-history for Case 2 with scale factor of 1.00

이는 지진동 하에서 개발된 내진형 천장시스템이 기존 시스템에 비해 변위제어능력이 우수하여<Fig. 14>, 새롭게 개발된 내진형 M-bar 클립 및 행거 클립의 적용이 천장시스템의 변형, 진동, 탈락 및 붕괴 억제 능력이 우수하여 안정적인 천장시스템으로서의 내진 능력을 발휘하는 것으로 평가된다. 한편 <Fig. 14>에서처럼, 기존 시스템에 비해 개발된 내진형 천장시스템은 상부 바닥 레벨 및 하부 천장 레벨에서의 최대 응답변위 차이가 거의 없어 천장시스템을 전체적으로 안전하게 체결 및 구속하는 것으로 보여진다.



<Fig. 14> Comparison of max. displacements in ceiling system

5. 결론

본 연구에서는 기존 및 신축 건축물에 적용 가능한 비구조 요소 중 내진형 천장시스템의 개발에 관한 연구로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

내진형 천장시스템으로 개발된 천장 패널의 연결부를 위해 고안된 장치인 수직 행거 클립, 수평 및 수직 연결부의 M-bar 클립 장치, 그리고 보강 가새로 구성된 내진형 천장시스템을 제시하였다. 기존 천장시스템과 개발된 내진형 천장시스템에 대한 지진하중에 대한 실규모 진동대 동적실험을 수행한 결과, 공진주파수에서 내진형 시스템이 기존 시스템에 비해 크게 측정되어 동적 응답제어 및 변형 억제에 있어 기존 시스템에 비해 개선되었다. 응답 가속도 측정에서도 기존 시스템에 비해 내진형 시스템이 크게 측정되어, 이는 본 연구에서 목적인 강성증진 및 동적변형제어의 개념으로 개발된 행거 및

M-bar 클립 장치 적용의 내진형 천장시스템이 지진동에 대한 변형 및 탈락 억제에 우수한 것으로 평가되었다.

진동대 실험과 동일 조건에서 동적해석모델에 의한 시간이력해석을 수행하였다. 입력 지진하중 규모에 따라서 기존 천장시스템에 비해 개발된 내진형 천장시스템은 천장시스템의 상하부 모든 위치에서 변위 응답 및 최대 변위가 크게 감소하여 개발된 내진형 연결방식을 적용한 방법이 천장시스템의 탈락 및 붕괴 억제에 효과가 있는 것으로 평가되었다.

감사의 글

이 논문은 2017년 전라남도과 전남테크노파크의 지역수요맞춤형연구개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

1. Korea Meteorological Administration, <http://www.kma.go.kr>
2. Federal Emergency Management Agency, Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage - A Practical Guide, FEMA E-74, Washington, D.C., pp.755, 2011
3. Soroushian, S., Ryan, K. L., Maragakis, M., Sato, E., Sasaki, T., Okazaki, T., ... Alvarez D., "Seismic Response of Ceiling/Sprinkler Piping Nonstructural Systems in NEES TIPS/NEES Nonstructural/NIED Collaborative Tests on a Full Scale 5-Story Building", Structures Congress 2012, pp.1315~1326, 2012
4. Wanitkorkul, A., & Filiatrault, A., "Influence of passive supplemental damping systems on structural and nonstructural seismic fragilities of a steel building", Engineering Structures, Vol.30, No.3, pp.675~682, 2008
5. Nishiyama, I., Ito, H., Nishida, K., & Yang, I. S., "Damage to gymnasium ceiling at the geiyo earthquake and its countermeasures",

- AIJ Journal of Technology and Design, Vol.8, No.16, pp.367~372, 2002
6. Federal Emergency Management Agency, Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures(FEMA-440), Washington, DC, pp.392, 2005
 7. Federal Emergency Management Agency, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings(FEMA-356), Washington, DC, pp.518, 2000
 8. Federal Emergency Management Agency, Nehrp Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings(FEMA-273), 1997
 9. Applied Technology Council, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings (ATC-40), State of California, Vol.1, pp.334, 1996
 10. MIDAS Information Technology CO. LTD, MIDAS-GEN User's Manual
 11. Seismic Simulation Test Center(SESTEC), Shaking Table Experiment for Development of Seismic Resistance Performance of Ceiling System, Report No. SESTEC-2017-R-066-0-Rev.0, Pusan, 2017
 12. Ministry of Education, "Design Standards for School Facilities Earthquake-Resistance", No.2009(13), Korea, pp.37, 2009

- Received : January 24, 2018
- Revised : January 29, 2018
- Accepted : January 29, 2018