



# 기둥의 내진설계 유무 및 면진장치 적용에 의한 저층 필로티구조의 지진거동

정현진<sup>1)</sup> · 이상화<sup>2)</sup> · 김세호<sup>2)</sup> · 안효준<sup>3)</sup> · 이종한<sup>4)\*</sup>

<sup>1)</sup>인하대학교 사회인프라공학과 석사과정    <sup>2)</sup>인하대학교 사회인프라공학과 학사과정  
<sup>3)</sup>인하대학교 사회인프라공학과 박사과정    <sup>4)</sup>인하대학교 사회인프라공학과 부교수

## Investigation of Seismic Behavior of Low-Rise Piloti Structure according to Seismic Design and Base Isolation of Columns

Hyun-Jin Jung,<sup>1)</sup> Sanghwa Lee,<sup>2)</sup> Seho Kim,<sup>2)</sup> Hyojoon An,<sup>3)</sup> and Jong-Han Lee<sup>4)\*</sup>

<sup>1)</sup>Masteral Student, Department of Civil Engineering, Inha University, Incheon 22212, Rep. of Korea  
<sup>2)</sup>Undergraduate Student, Department of Civil Engineering, Inha University, Incheon 22212, Rep. of Korea  
<sup>3)</sup>Doctoral Student, Department of Civil Engineering, Inha University, Incheon 22212, Rep. of Korea  
<sup>4)</sup>Associate Professor, Department of Civil Engineering, Inha University, Incheon 22212, Rep. of Korea

**ABSTRACT** The number of earthquakes in Korea is gradually increasing, and recent earthquakes in Gyeongju and Pohang caused serious damage to piloti structures, a common structural type in Korea. Therefore, this study evaluated the seismic safety of a piloti structure following seismic reinforcement of hoop rebar and the design of a column isolation device. The isolation device was designed at the bottom and also at the top of a column in consideration of repair and replacement. Eigenvalue analysis showed little difference in natural frequency according to the seismic design of hoop rebar but a reduction in the first natural frequency by approximately 15~21 % with the installation of the isolation device. The maximum displacement also decreased by approximately 20~22 % and the maximum stress by 43~73 %, depending on the position of the installed device. Compared with seismic reinforcement of the piloti structure with hoop rebar, the isolation device absorbed displacement induced by an earthquake within its allowable range, which results in simultaneously reducing structural displacement and the seismic load transmitted to the structure.

**Keywords** : piloti, seismic design, isolation device, eigenvalue analysis, seismic response

### 1. 서 론

2016년 9월 12일 경상북도 경주시에서 발생한 규모 5.8의 지진은 1978년 대한민국 지진 관측 이래 가장 강력한 규모의 지진이다. 이로 인해 건물의 균열과 파손 등 많은 피해가 발생하였으며, 필로티(Piloti) 구조 형식인 5층 이하의 다세대 주택이 지진에 매우 취약한 건물로 지적되었다. 필로티 구조는 건물 전체를 1층 기둥에 의해서만 지지되고 있어, 지진 발생 시 좌우 진동에 의해 기둥의 전단과 파괴로 건물 전체의 붕괴로 이어질 수 있다. 동시에 기둥의 띠철근 상세 등을 통한 내진설계가 적용되지 않은 경우가 많아 지진에 매우 취약하다.

2017년 11월 15일 경북 포항시 북구에서 발생한 규모 5.4의 지진도 콘크리트 구조물에 막대한 피해를 가져왔다. 외벽

이 무너지거나 건물이 기울어지고 붕괴하는 등 대부분의 구조물이 지진에 의해 크고 작은 피해를 입었다. 특히 필로티 구조물은 구조적 취약성으로 인해 지진에 의해 가장 큰 피해를 입었다.

국내의 필로티 구조는 구조물의 하중을 지지하는 기둥부재가 1층부에만 존재하고 상부구조는 외벽으로 구성되는 분리형 구조계가 대부분이다. 따라서 1층의 기둥이 상층부의 하중을 대부분 부담하고, 1층에는 횡하중을 분담할 수 있는 외벽이 존재하지 않아 지진에 매우 취약하다. 특히, 국내에서는 주차 공간 확보 등의 이유로 필로티 구조물 설계규제 완화와 같은 혜택을 제공하면서 필로티의 도입이 적극적으로 장려되었으며, 2017년 기준 그 수가 24만여 동에 이르렀다(Choi 2017).

지진의 디지털 관측을 시작한 1999년에는 국내의 규모 2.0 이상의 지진 발생횟수가 약 40회였으나, 2016년에는 252 회나 관측되었다. 따라서 국내의 지진 발생 횟수가 기하급수적으로 증가하고 있어 더는 지진으로부터 안전한 지역이라고 볼 수 없다. 또한, 이와 같은 빈번한 소규모 지진의 발생은

\*Corresponding author E-mail : [jh.lee@inha.ac.kr](mailto:jh.lee@inha.ac.kr)  
 Received October 13, 2020, Revised December 04, 2020,  
 Accepted December 29, 2020  
 ©2021 by Korea Concrete Institute

향후 더 큰 지진의 징조임을 많은 연구기관에서 경고하고 있다(Hong 2017; Jung 2020; Ryall 2020).

필로티 구조물의 증가와 국내 지진 발생의 증가 추이는 지진하중 하에서 필로티 구조물의 안전성 확보에 대한 필요성을 절감하게 하였다.

본 논문에서는 경주지진과 포항 지진 당시 피해가 컸던 필로티 구조물의 지상층(1층) 기둥에 대하여 띠철근의 보강에 의한 내진보강과 면진장치 설치에 의한 지진 안전성을 분석하였다. 대상 구조물은 경주지진과 포항지진 시 피해가 가장 큰 분리형 필로티 건축물로 국토교통부의 필로티 건축물 구조설계 가이드라인(MOLIT 2018)을 참고하여 설계하였다. 설계한 구조물은 전산해석 시뮬레이션을 통해 내진보강 유무 및 면진장치 설치 위치에 따른 구조물의 고유 진동특성을 분석하였으며, 최대변위와 최대힘응력을 비교 분석하였다.

## 2. 구조물 선정 및 지진하중

### 2.1 구조물 선정

본 연구에서는 국토교통부의 필로티 건축물 구조설계 가이드라인(MOLIT 2018)을 참고하여 대상 필로티 구조물을 선정하였다. 구조물은 폭 14.8 m, 길이 13 m, 높이 12 m이며 옥상을 포함하여 총 5층, 각 층의 높이는 3 m이다. 각 층의 바닥판(floor slab)과 1층의 기둥은 철근콘크리트이며 2~4층의 벽체는 무근 콘크리트이다. 2층 바닥판은 보와 슬래브로 구성되어있고, 3~5층은 슬래브로만 구성되어있다. 2층의 보의 두께는 600 mm, 슬래브는 120 mm이며, 3~5층 슬래브 두께는 200 mm이다. 벽체 두께는 200 mm이다. Fig. 1은 대상 필로티 구조물에 대한 전체 평면도 및 보, 기둥, 슬래브 부재에 대한 단면제원과 철근 배치를 보여준다.

### 2.2 하중산정

구조물에 적용되는 하중은 구조물 자체의 중량과 활하중을 고려하였다. 구조물의 자중은 구조물에 사용된 재료의 단위 중량과 각 부재의 부피를 고려하여 계산하였다. 재료의 단위 중량은 콘크리트는 23 kN/m<sup>3</sup>, 철근콘크리트를 25 kN/m<sup>3</sup>이다.

건축·토목 구조매뉴얼(Cho et al. 2006)의 적재하중 표를 참고하여 구조물의 2~4층은 거주실(dwelling)과 복도(corridor)·현관(entrance)·계단(stairs) 등을 고려한 활하중을 적용시켰고, 5층은 옥상(loof top)에 대한 하중으로 계산하였으며, Table 1에 나타내었다.

### 2.3 면진장치

필로티 구조물의 지상층 기둥에 적용될 면진장치는 적층 고무받침(rubber bearing)을 적용했다. 적층고무받침은 국내 면진장치 시장에서 관공서, 데이터센터 등과 같은 구조물에 주로 사용되어 왔다. 또한, 대상 구조물의 기둥 크기를 고려

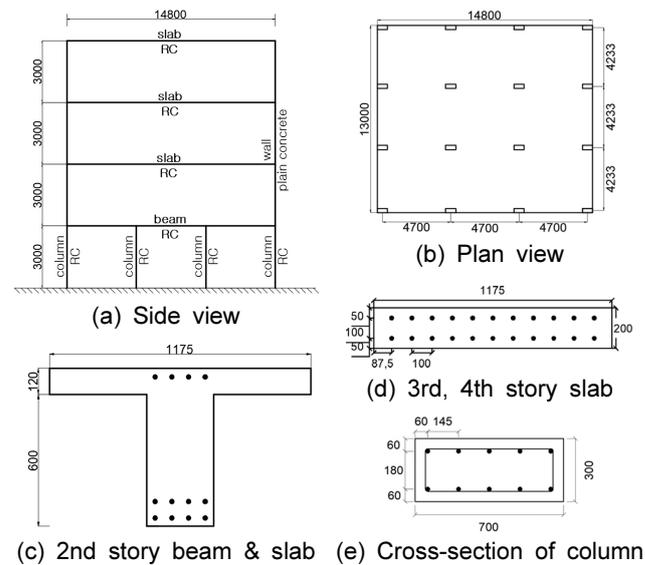


Fig. 1 Side and plan views of structure and cross-section of column (units: mm)

Table 1 Superimposed load (units: kN/m<sup>2</sup>)

Room type	Floor	Large beam & Pile foundation	Seismic force
Dwelling, Ward	1.8	1.3	0.6
Assembly hall	3.5	3.2	2.1
Corridor, Entrance, Stairs	3.5	3.2	2.1
Roof top, Balcony	1.8	1.3	0.6

Table 2 Mechanical properties of lead rubber bearing

Vertical stiffness (N/m)	Allowable bearing power (kN)	Thickness of rubber (mm)
1.579×10 <sup>9</sup>	1,602	80
Horizontal stiffness (N/m)	Allowable shearing displacement (mm)	Total height (mm)
1.053×10 <sup>6</sup>	200	306.8

Note: Vertical stiffness is defined using a specific pressure of 13 MPa, and horizontal stiffness is defined using a specific pressure of 13 MPa and a displacement of ±100 %

하여 적층고무 외의 방식들은 비교적 큰 면적과 부피를 요구하고 있어 본 연구에서는 적층고무받침을 적용하였다.

본 연구의 면진시스템에 적용된 면진장치는 작용 하중과 허용 지지력을 고려하여 선택하였다. 구조물의 기둥에 작용하는 하중 약 680 kN에 대하여 소요의 연직강성을 갖도록 허용 전단변위는 20 mm, 허용 지지력은 1,602 kN로 면진장치를 선택되었다. 면진장치의 고무판은 외경 300 mm, 내경 70 mm로 기둥 사이즈에 부합하는 면진장치를 적용하였으며, 면진장치의 물성치는 Table 2에 나타내었다.

면진장치의 두께는 80 mm이며, 고무를 포함한 장치의 총

### 3. 해석모델 구축

#### 3.1 내진 및 면진 시스템

본 연구에서는 내진설계 유무와 면진장치의 적용에 따른 필로티 구조물의 지진 거동 평가와 안전성 검토를 실시하였다. 내진설계 유무에 따라 Case-I, Case-II 구분하여 해석을 수행하였다. Case-I은 내진설계를 하지 않은 경우로 기둥에 띠철근 보강을 하지 않은 것으로 정의하였고, Case-II는 국토교통부의 가이드라인에 따라 기둥에 띠철근 내진보강을 한 경우로 정의하였다. 면진장치를 설치한 경우는 설치 위치에 따라 Case-III, Case-IV로 구분하였다. Case-III은 일반적으로 구조물에 면진장치를 적용하는 방식으로 면진장치를 기둥하부에 설치한 경우이다. Case-IV는 필로티 건축물이 기둥 분리형인 것을 고려하여 기둥과 건물하부의 연결부인 기둥상부에 면진장치를 설치한 경우이다.

#### 3.2 OpenSees 수치해석모델

수치해석 모델과 비선형 동적해석은 재료의 비선형성과 기하학적 비선형을 고려할 수 있도록 OpenSees를 이용하여 2차원으로 모형화하였다(Zhu 2019). 보와 벽체는 기둥이 파괴되기 전까지는 탄성거동으로 가정할 수 있으므로, 탄성요소(elastic element)로 정의하였다. 기둥은 가장 취약한 부재로 지진 작용 시 비선형 거동이 예상된다. 따라서 비선형요소(nonlinear element)를 사용하여 콘크리트의 균열과 철근의 항복을 고려하였다. 기둥의 단면요소는 파이버 단면(fiber section)을 사용해 띠철근 보강에 의한 심부 콘크리트의 구속효과와 구속효과를 받지 않은 피복 콘크리트를 구분하여 모형화하였다(MOLIT 2016a, 2016b). 즉, 내진설계가 되어 있지 않은 기둥은 띠철근에 의한 구속효과를 고려하지 않았다.

작용하중은 기둥과 층별 보, 벽체의 자중과 적재하중을 고려하였다. Fig. 3은 대상 필로티 구조물을 모형화한 수치해석 모델 예시로서 각 해석 경우(case)에 대하여 정의하였다. Case-I과 Case-II는 내진설계 유무의 차이로 절점과 요소는 동일하게 형성하고, 띠철근의 구속효과만을 Case-II에서 고려하였다. Case-III은 면진장치가 기둥하부에 설치된 경우, Case-IV는 면진장치가 기둥상부와 2층 건물 바닥 사이에 설치된 경우로 스프링 요소(spring element)로 모형화하였다(An and Shin 2020).

Fig. 4는 띠철근 보강에 따른 기둥 단면과 콘크리트 구속효과를 보여준다. 콘크리트와 철근의 강도는 국토교통부의 필로티 건축물 구조설계 가이드라인(MOLIT 2018)에 의해 각각 25 MPa, 400 MPa로 정의하였고, 심부와 피복 콘크리트의 압축강도와 변형률은 Mander's Stress-Strain Model(Mander et al. 1988)을 이용하였다.

$$f_{c,conf} = K_c \cdot f_{c,unconf} \quad (1)$$

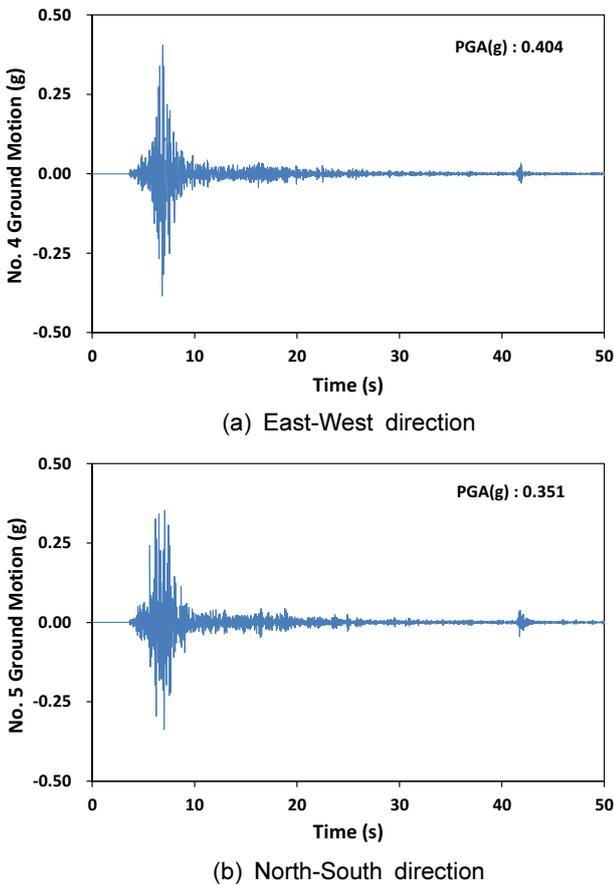


Fig. 2 Seismic waves with peak ground acceleration for Gyeong-ju earthquake

두께는 306.8 mm이다. 면진장치의 수직강성은  $1.579 \times 10^9$  N/m, 수평강성은  $1.053 \times 10^6$  N/m로 수평강성이 수직강성에 비해 매우 작다. 이는 횡방향의 지진하중이 작용할 때 큰 변형능력을 가지게 함으로써 지진하중이 면진장치의 상부 구조계로 전달되는 것을 차단 또는 감소시키기 위해서이다(Nacim and Kelly 1999).

#### 2.4 지진하중

일반적으로 지진의 세기를 나타내는 방법에는 최대지반변위(peak ground displacement, PGD), 최대지반속도(peak ground velocity, PGV), 최대지반가속도(peak ground acceleration, PGA)가 있다.

PGA는 단주기 구조물에 작용하는 지진력으로 적절하며 지진기록의 하나의 대푯값으로 사용되고 있다. 본 논문에서는 2016년 경주지진을 계측한 지진과 3개와 2017년 포항지진을 계측한 지진과 4개 중 가장 큰 PGA 값을 보이며, 진원지로부터 8.23 km 떨어진 울산계측소에서 계측된 데이터를 사용하였다(Jeon et al. 2018). 경주지진 당시 울산계측소(USN)의 데이터값은 Fig. 2에 정리하였으며, 동서방향의 PGA 값은 0.404 g이며, 남북방향은 0.351 g을 갖는다. 가장 큰 PGA 값을 갖는 USN의 동서방향 데이터를 대상 구조물의 지진하중으로 사용하였다.

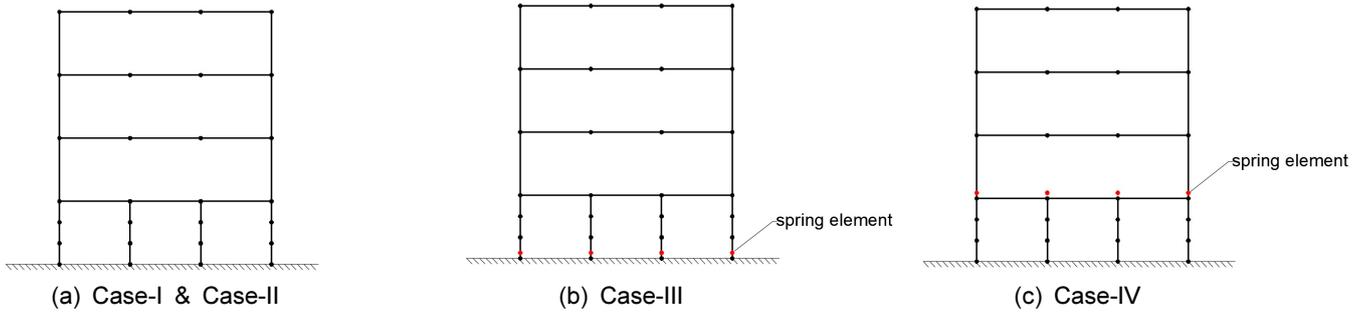


Fig. 3 Numerical modeling of piloti

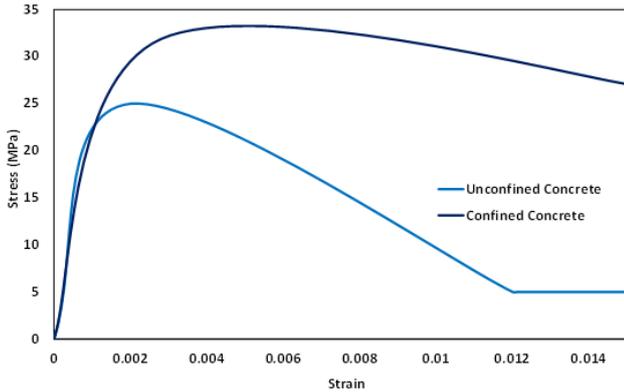


Fig. 4 Stress-strain curves of confined and unconfined concrete

$$\epsilon_{c,conf} = \epsilon_{c,unconf} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f_{c,conf}}{f_{c,unconf}} - 1 \right) \right] \quad (2)$$

여기서,  $K_c$ 는 콘크리트 구속계수,  $f_{c,conf}$ ,  $\epsilon_{c,conf}$ 는 각각 심부 콘크리트의 응력과 변형률,  $f_{c,unconf}$ ,  $\epsilon_{c,unconf}$ 는 각각 피복콘크리트의 응력과 변형률이다.

Fig. 5는 면진장치가 설치된 기둥의 수치해석 모델링과 면진장치의 하중-변위 이력곡선을 보여준다. 하중-변위 이력곡선은 일정 하중 하에서는 고무 탄성에 의해 원래의 위치로 복원되며, 지진 시에는 비선형거동으로 지진에너지 흡수 성능을 보여준다.

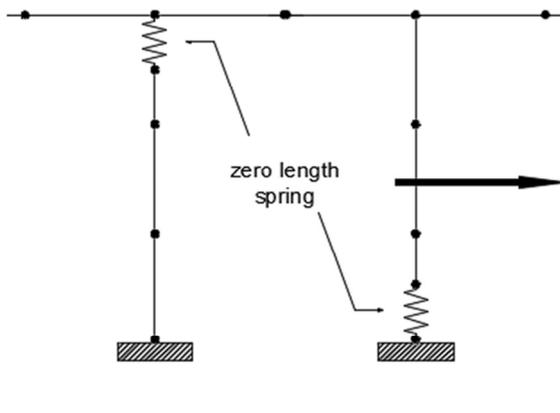


Fig. 5 Modeling and load-displacement hysteresis curve of isolation device for Case-III and Case-IV

## 4. 결과분석

### 4.1 고유치 분석

대상 구조물에 대하여 고유 진동 특성을 우선적으로 분석하기 위하여 고유치해석(eigenvalue analysis)을 수행하였다. Fig. 6은 고유치해석에 의한 정면 및 측면방향의 모드별 고유진동수(natural frequency) 변화를 나타낸 것이다.

내진설계 유무에 따른 Case-I과 Case-II는 모드별 고유진동수에 큰 차이 없이 매우 유사한 값을 보였다. 정면방향에 대해서 1차 모드는 0.53 Hz, 2, 3차 모드는 각각 0.96, 1.2 Hz 였다. 측면방향은 정면방향에 비해 다소 증가하여 각각 0.62, 1.13, 1.41 Hz로 나타났다.

면진장치를 기둥하부에 설치한 Case-III의 고유진동수는 Case-I, Case-II에 비해 정면방향의 1차 모드에서는 약 16%, 2, 3차 모드에서는 각각 약 30, 23% 감소하였다. 측면방향에서는 21, 19, 13% 감소하였다. 면진장치를 기둥상부에 설치한 Case-IV는 Case-I, Case-II에 비해 정면방향의 1차 모드는 약 15%, 2, 3차 모드는 약 17, 13% 감소하였다. 측면방향에서는 16, 11, 6% 감소하였다. 고유치해석 결과 필로티 기둥의 상·하부에 설치된 면진장치는 구조물의 고유진동수를 감소, 즉 고유주기를 증가시키는 것을 확인하였다. 1차모드의 고유진동수 감소는 면진장치의 기둥 상·하부 설치에 관계없이 거의 유사하게 나타났으나, 고차 모드로 갈수록 기둥 하부에 설치된 경우가 고유진동수를 더욱 감소시켰다.

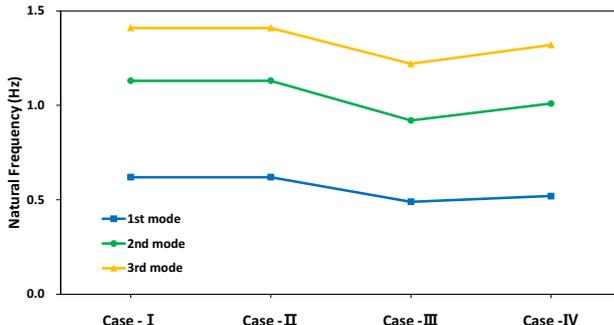
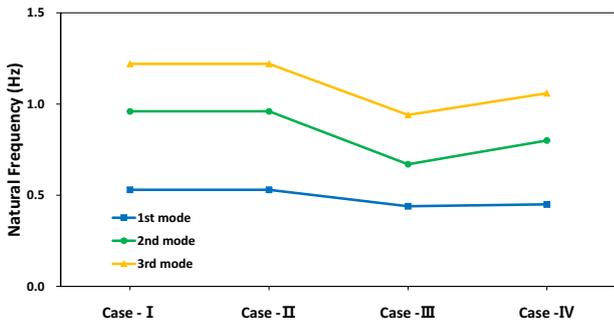
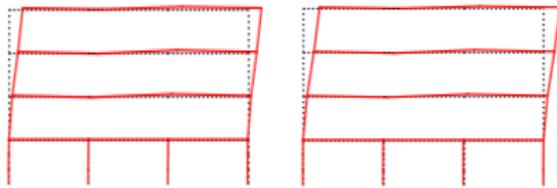
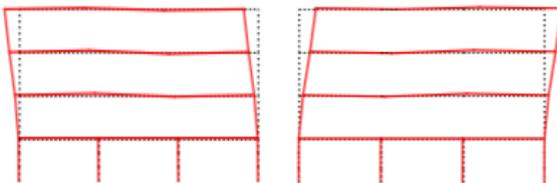


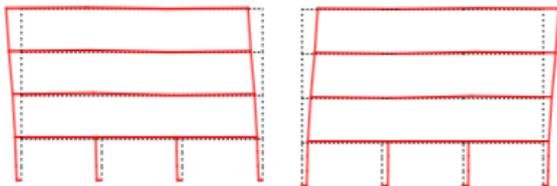
Fig. 6 Natural frequency obtained from the eigenvalue analysis in the frontal and lateral directions



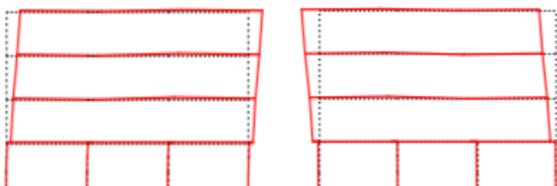
(a) Case-I



(b) Case-II



(c) Case-III



(d) Case-IV

Fig. 7 First mode shapes for analysis case

Fig. 7은 각 해석 경우(case)에 대하여 정면 및 측면방향의 1차 모드 형상(mode shape)을 나타낸 것이다. Case-I과 Case-II는 고유진동수와 유사하게 모드형상에서도 큰 차이를 보이지 않았다. 면진장치를 기둥하부에 설치한 Case-III는 기둥하부에서 수평방향으로 변형이 발생하고, Case-IV는 기둥상부에서 수평방향으로 변형이 발생하는 1차 모드형상을 보였다.

#### 4.2 변위 및 응력 분석

각 해석 경우(case)에 대해 변위 및 응력의 값들을 비교 분석하였다. Tables 3~6은 구조물의 최상부에서 최대 횡변위가 발생했을 때 높이별 변위값을 보여준다. Case-III과 Case-IV의 최대변위는 면진장치가 흡수한 변위를 제외한 상대값으로 표시하였다.

Table 3 Lateral displacement of the structure at the maximum displacement at the top (Case-I)

Location	Frontal direction	Lateral direction
	Displ. (mm)	Displ. (mm)
4th story-Top	11.21	11.47
3rd story-Top	7.12	9.22
2nd story-Top	3.34	7.60
Col-Top	0.73	1.74
Col-Bottom	0.00	0.00

Table 4 Lateral displacement of the structure at the maximum displacement at the top (Case-II)

Location	Frontal direction	Lateral direction
	Displ. (mm)	Displ. (mm)
4th story-Top	11.25	11.34
3rd story-Top	7.15	9.07
2nd story-Top	3.33	7.53
Col-Top	0.75	1.83
Col-Bottom	0.00	0.00

Table 5 Lateral displacement of the structure at the maximum displacement at the top (Case-III)

Location	Frontal direction	Lateral direction
	Displ. (mm)	Displ. (mm)
4th story-Top	9.19	9.06
3rd story-Top	6.24	5.05
2nd story-Top	2.02	1.42
Col-Top	0.57	0.75
Base isolation	0.00 (6.10)	0.00 (6.62)
Col-Bottom	0.00	0.00

Note: Values in parentheses are the displacement at base isolation

**Table 6** Lateral displacement of the structure at the maximum displacement at the top (Case-IV)

Location	Frontal direction	Lateral direction
	Displ. (mm)	Displ. (mm)
4th story-Top	8.59	8.82
3rd story-Top	4.91	5.25
2nd story-Top	1.72	1.85
Base isolation	0.00 (4.25)	0.00 (4.90)
Col-Top	0.00	0.00
Col-Bottom	0.00	0.00

Note: Values in parentheses are the displacement at base isolation

**Table 7** Maximum stress of column

Cases	Frontal direction	Lateral direction
	Stress (MPa)	Stress (MPa)
Case-I	9.77 (column-bottom)	9.42 (column-bottom)
Case-II	5.80 (column-bottom)	5.24 (column-bottom)
Case-III	3.29 (column-top)	3.18 (column-top)
Case-IV	4.66 (column-top)	4.65 (column-top)

Table 7은 기둥의 최대 응력값을 보여준다. 최대응력은 모두 최외측의 기둥에서 발생하였으며, Case-I과 Case-II는 기둥하부에서, Case-III과 Case-IV는 기둥의 상부에서 최대응력이 발생하였다.

Case-I의 최대횡변위는 11.47 mm, Case-II는 11.34 mm로 유사한 값으로 나타났다. 반면, Case-I의 기둥에서 발생된 최대응력은 9.77 MPa, Case-II의 최대응력은 5.80 MPa로 기둥에 작용하는 최대응력이 40.6%로 크게 감소하였다. 따라서 띠철근 보강을 통한 기둥의 내진설계는 구조물 전체의 최대 변위에서는 미미한 효과를 보였지만, 기둥의 응력감소효과는 크게 나타날 수 있음을 확인하였다.

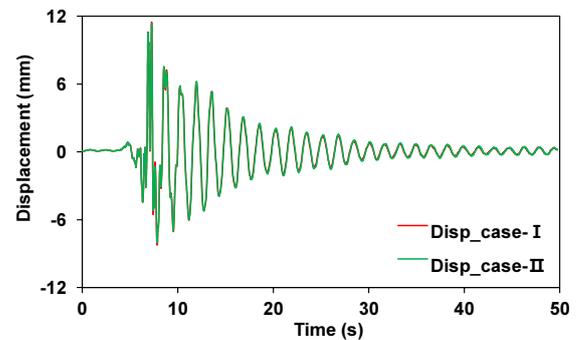
면진장치가 기둥하부에 설치된 Case-III에서는 면진장치에서 약 6.1~6.6 m의 변위를 흡수하여, 구조물의 상대 최대 변위는 상부에서 약 9.2 mm로 감소하였다. 면진장치가 기둥상부에 설치된 Case-IV에서도 면진에서 약 4.3~4.9 mm의 변위가 발생하여, 구조물 상부의 상대 최대 변위는 약 8.8 mm 발생하였다. 내진설계한 Case-II와 비교 시, Case-III는 최대 변위를 약 20.1%, Case-IV는 약 22.2% 감소하였다. Case-III과 Case-IV의 기둥의 최대응력은 각각 3.29 MPa과 4.66 MPa로 Case-II 대비 최대응력이 43.3%, 19.7% 감소하였다. 따라서 Case-III, Case-IV 모두 면진장치가 허용 변위 내에서 지진하중에 의한 변위를 흡수하여, 기둥 자체의 변위를 감소시키고, 동시에 기둥에 전달되는 지진하중과 발생 내력을 감소시켰다. Case-III는 Case-IV에 비해 상대적으로 더 작은 최대횡

변위와 기둥의 최대응력이 발생하였다. 이는 면진장치가 하부에 설치된 Case-III는 지진하중의 대부분을 면진장치가 흡수하지만, 상부에 설치된 Case-IV는 지진하중이 기둥에 가해진 후 면진장치에 흡수된다. 따라서 Case-III에 비해 응력이 상대적으로 다소 크게 나타나며, 면진장치의 변위량은 작게 나타난다. 즉, 구조적 응답면에서 Case-III가 좀 더 유리하게 나타났다. 반면에 Case-IV는 Case-I, Case-II에 비해 상당한 응답감소 효과를 나타내며, 지진하중 후 면진장치의 보수·보강이나 교체 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

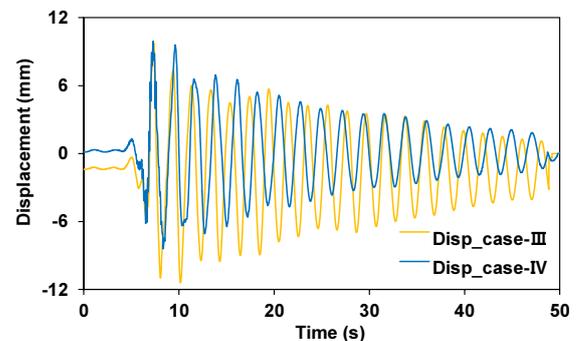
### 4.3 시간이력분석

Figs. 8~9는 구조물의 변위 및 휨모멘트 시간응답을 보여준다. 면진장치를 설치한 Case-III과 Case-IV의 변위는 면진장치가 흡수한 변위를 제외하고 나타내었다. Case-I과 Case-II, Case-III과 Case-IV의 변위와 휨모멘트의 시간이력 응답형상이 서로 유사하게 나타났다.

변위 시간이력 그래프 형상은 Fig. 7에 보인 바와 같이 면진장치를 설치하지 않은 Case-I, Case-II와 면진장치를 설치한 Case-III, Case-IV의 수렴형상이 다르게 나타났다. Case-I과 Case-II는 변위가 영(0)에 수렴하는 형상을 보인 반면, Case-III과 Case-IV는 변위 크기는 감소하였지만, 영(0)에 수렴하는 정도는 상대적으로 작게 나타났다. 이는 면진장치의 감쇠효과가 반영되지 않은 결과로 판단되며, 향후 면진장치 설치 시 감쇠효과를 고려한 설계와 해석이 필요할 것으로 판단된다. 또한, Case-III, Case-IV는 지진 시 면진장치의 비선형 거동에 의해 비대칭 형상의 감소경향을 보였다.

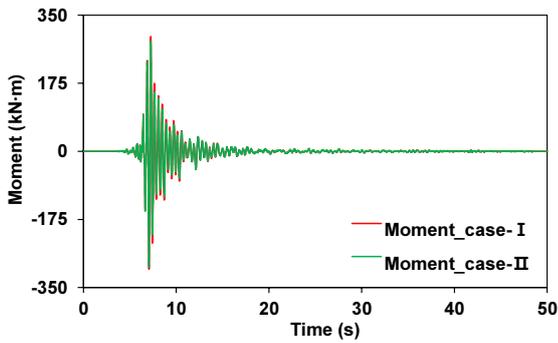


(a) East-West direction

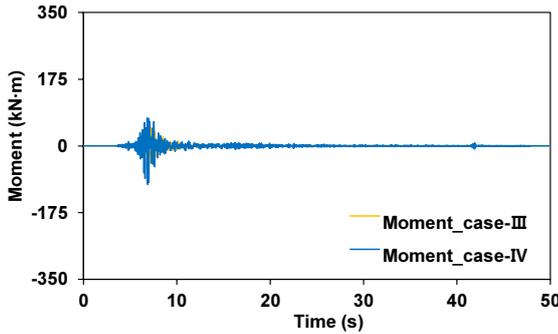


(b) North-South direction

**Fig. 8** Displacement time response



(a) Case-I & Case-II



(b) Case-III & Case-IV

Fig. 9 Moment time response

Fig. 8의 휨모멘트 시간이력 형상은 내진설계 유무에 의한 Case-I과 Case-II는 휨모멘트가 약 20초일 때 영(0)으로 수렴하고, 면진장치가 설치된 Case-III과 Case-IV는 약 10초일 때 영(0)에 수렴하였다. 이는 내진설계만 하였을 때보다 면진장치를 설치하였을 때 지진에너지를 훨씬 빨리 흡수하는 것으로 판단되며, 기둥의 상·하부에 의한 차이는 거의 없었다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 경주, 포항지진에서 큰 피해를 입은 필로티 구조물에 대해서 기둥의 띠철근 내진보강과 기둥의 면진장치 설치에 의한 지진 안전성을 분석하였다. 면진장치는 상재하중과 허용변위를 고려하여 기둥의 하부에 설치하였다. 또한, 보수, 보강 및 교체 측면을 고려하여 기둥의 상부위치 설치도 고려하였다. 국토교통부에서 제시한 분리형 필로티 구조물을 대상으로 구조물의 고유진동특성을 분석하고 변위와 모멘트 응답에 의한 최대변위와 최대응력을 비교 분석하였다. 본 논문에서 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

띠철근 내진설계 유무에 의한 변위 및 모멘트 응답은 큰 차이를 보이지 않았다. 띠철근보강을 하지 않은 경우와 비교 시 최대변위는 1.13% 감소로 미소한 차이만 보였다. 고유치 해석에서도 구조물의 고유진동수 값은 거의 동일한 결과를 보였다. 반면 기둥에 작용하는 최대응력은 40.6% 감소로 띠철근 보강에 따른 기둥 자체의 응력감소는 큰 효과를 보였다.

면진장치를 기둥의 상·하부에 설치한 경우는 허용변위 내에서 지진하중에 의한 변위를 흡수함으로써 면진장치가 흡수한 변위를 제외한 기둥의 최대변위와 최대응력을 감소

시켰다. 띠철근 보강에 의한 내진설계 대비 면진장치를 기둥 하부에 설치한 경우는 최대변위는 20.11%, 최대응력은 43.28% 감소하였다. 면진장치를 기둥상부에 설치한 경우는 최대 변위 22.22%, 최대응력 19.66% 감소시켰다. 즉, 면진장치를 기둥하부에 설치하였을 때가 기둥상부에 설치하였을 때보다 응력 감소의 효과가 크게 나타났다.

변위와 휨모멘트의 시간이력 응답형상을 분석한 결과, 모멘트응답은 면진장치가 설치된 경우가 약 2배 빨리 영(0)에 수렴하였다. 반면에 변위응답은 크기 감소는 나타났지만, 영(0)에 수렴하는 정도는 작게 나타났다. 향후 면진장치의 감쇠효과를 반영한 설계와 해석이 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국연구재단 중견연구지원사업(과제번호: NRF-2019R1A2C1006494) 및 인하대학교 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

- An, H. J., and Shin, S. B. (2020) *A Comparative Study on Seismic Fragility of Representative PSC Beam Bridge considering Aging Effect*. Inha University's Master of Engineering Thesis. 15-18. (In Korean)
- Cho, C. Y., Kim, H. S., and Yang, M. S. (2006) *Construction Civil Structure Manual*. Seoul, Korea; Engineer Book. 270-271. (In Korean)
- Choi, N. C. (2017) *Strengthens Management of 40,000 Piloti Buildings in Gyeonggi-do "Earthquake Fire Vulnerable"*. Incheon Ilbo, 20 February. [http://www.incheonilbo.com/news/articleView.html?idxno=930886&replyAll=&reply\\_sc\\_order\\_by=1](http://www.incheonilbo.com/news/articleView.html?idxno=930886&replyAll=&reply_sc_order_by=1) Accessed 10 May 2020. (In Korean)
- Hong, T. K. (2017) The 12 September 2016  $M_L$  5.8 Midcrustal Earthquake in the Korean Peninsula and Its Seismic Implications. *Geophys. Geophysical Research Letters* 44(7), 3131-3138.
- Jeon, J. S., Choi, H. S., Seo, Y. D., Kim, C. G., and Heo, G. H. (2018) Seismic Performance of Steel Industrial Storage Racks Subjected to Korea Earthquakes. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea* 22(3), 149-160. (In Korean)
- Jung, M. H. (2020) "Should the Earthquake Hit Kores?" *Foreign Media Attention to the Korean Peninsula*. Chosun Ilbo, 22 May. [https://biz.chosun.com/site/data/html\\_dir/2020/05/22/2020052200985.html](https://biz.chosun.com/site/data/html_dir/2020/05/22/2020052200985.html), Accessed 10 May 2020. (In Korean)
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R. (1988) Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering* 114(8), 1804-1826.
- MOLIT (2016a) *Concrete Structural Analysis and Design Principles (KDS 14 20 10)*. Sejong, Korea; Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). 5-6. (In Korean)

MOLIT (2016b) *Concrete Structural Reinforcement Detailed Design Principles (KDS 14 20 50)*. Sejong, Korea; Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). 8-9. (In Korean)

MOLIT (2018) *Piloti Building Structural Design Guidelines*. Sejong, Korea; Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). 3-44. (In Korean)

Naeim, F., and Kelly, J. M. (1999) *Design of Seismic Isolated*

*Structures: from Theory to Practice*. New York; John Willey and Sons Inc.

Ryall, J. (2020) "Could a major earthquake soon strike South Korea?". DW, 20 May. <https://www.dw.com/en/could-a-major-earthquake-soon-strike-south-korea/a-53513252>.

Zhu, M. (2019) *The OpenSeesPy Library*. GitHub. <https://open-seespydoc.readthedocs.io/en/latest/>. Accessed 21 May 2020.

---

**요 약** 최근의 경주, 포항지진에서 필로티 구조물의 피해가 주요하게 발생하였으며, 국내의 지진 발생 횟수도 점차 증가되는 추세이다. 따라서 본 논문에서는 필로티 구조물의 지상층 기둥에 대한 띠철근 내진보강과 면진장치 설치에 의한 지진 안전성을 분석하였다. 면진장치는 기둥의 하부 위치와 보수, 보강 및 교체측면을 고려하여 기둥의 상부 위치를 고려하였다. 고유치 분석 결과 내진설계 유무에 의해서는 모드별 진동수 차이가 거의 없었으며, 면진장치 설치에 의해서는 1차 모드에서 약 15~21 % 감소하였다. 최대변위는 면진장치 설치 위치에 따라 약 20~22 %, 최대응력은 약 43~73 % 감소하였다. 대상 필로티 구조물에 대해서 띠철근에 의한 내진보강에 비해 면진장치가 허용 범위 내에서 지진하중에 의한 변위를 흡수하여 구조물 자체의 변위를 감소시키고, 동시에 구조물에 전달되는 지진하중을 감소시켰다.

**핵심용어** : 필로티 구조물, 내진설계, 면진장치, 고유치해석, 지진응답