

# 형상비에 따른 프리캐스트 콘크리트 슬래브의 지진 거동에 대한 해석적 연구

## Analytical Study on Seismic Behavior of Precast Concrete Slabs with Different Aspect Ratios

임규석<sup>1)</sup> · 장원석<sup>2)</sup> · 정성훈<sup>3)\*</sup>

Lim, Gyu Seok<sup>1)</sup> · Jang, Won Seok<sup>2)</sup> · Jeong, Seong-Hoon<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup>인하대학교 건축공학과 석사과정, <sup>2)</sup>인하대학교 건축공학과 선임연구원, <sup>3)</sup>인하대학교 건축공학과 교수

<sup>1)</sup>Graduate Student, Department of Architecture Engineering, Inha University, <sup>2)</sup>Senior Researcher, Department of Architecture Engineering, Inha University, <sup>3)</sup>Professor, Department of Architecture Engineering, Inha University

### / A B S T R A C T /

Due to the recent increase in domestic seismic activity and the proliferation of PC structure buildings, there is a pressing need for a fundamental study to develop and revise the design criteria for Half-PC slabs. In this study, we propose criteria for determining the rigid diaphragm based on the aspect ratio of Half-PC slabs and investigate the structural effects based on the presence of chord element installation. This study concluded that Half-PC slabs with an aspect ratio of 3.0 or lower can be designed as rigid diaphragms. When chord elements are installed, it is possible to design Half-PC slabs with an aspect ratio of 4.0 or lower as rigid diaphragms. In addition, the increase in the aspect ratio of the Half-PC slab leads to a decrease in the in-plane stiffness of the structure, confirming that the reduction effect of the maximum displacement in force direction ( $\Delta_{max}$ ) due to the increase in wall stiffness is predominantly influenced by flexibility.

**Key words:** Earthquake, Half-PC slab, Diaphragm design force, Precast concrete structure

## 1. 서론

최근 국내의 지진 발생 빈도가 증가하는 추세이며 그 대표적인 예로 2016년 경주지진( $M_L = 5.8$ )과 2017년 포항지진( $M_L = 5.4$ )을 들 수 있다. 국민 안전체[1], 행정안전부[2]에서는 경주 지진이 123,168명의 이재민과 110억 원의 재산피해를 유발하였고, 포항 지진이 1,797명의 이재민과 551억 원의 재산피해를 유발한 사실을 확인하였다. 상술한 지진들로 인해 대한민국은 더 이상 지진 안전지대가 아니라는 인식이 확산함과 동시에 내진 관련 건설 규정 및 정책의 제정 및 개정이 요구되었다. 이러한 요구를 뒷받침하기 위하여 주요 구조 부재의 특성과 국내의 건설산업 특성을 반영한 기초연구의 필요성이 대두되었다.

최근 대형 공장, 물류창고, 주차장 건축물 등의 수주 증가로 PC(Precast

Concrete) 구조의 적용이 증가하는 추세이다. 국내의 PC 시장규모는 2016년에 약 4,800억 원을 기록하였으며 이는 전체 건설시장의 0.5%에 해당하는 비율이다. 2021년에는 약 1.4조 원의 시장규모를 기록하였으며, 전체 건설시장의 1%를 차지하였다[3]. 시장규모의 관점에서 5년 동안 약 300%의 성장률을 보였으며 이는 시간의 흐름에 따라 가속화될 것으로 전망된다. 따라서 늘어나는 PC 구조물이 적절한 내진 성능을 갖도록 명확한 설계규정과 관련 연구의 진행이 필요하다.

PC 구조는 투입 부재들을 사전에 제작하여 현장에서 조립 및 설치하는 구조이다. 이러한 PC 구조의 특징은 시공 품질의 균일성 확보, 공기 단축, 투입 인원 절감 등 타 공법 대비 경제성을 확보할 수 있는 것으로 알려져 있다[4]. 해외의 경우, PC 구조의 바닥 격막(Diaphragm)은 PC 유닛(unit)의 결합·연결을 통해 구성된다[5-7]. 이러한 PC 유닛간의 연결은 연결재(Connector)에 의하여 이루어지며 설계 지진력에 대해 설계한다. 이처럼 연결재로 결합된 격막은 PC 공법의 경제성을 극대화할 수 있다고 알려져 있다. 반면, 국내에서는 PC 유닛을 거푸집으로 사용하고 그 위에 철근 배근, 콘크리트를 타설하는 Half-PC형 슬래브를 바닥 격막으로 주로 사용한다. 국내의 PC 격

\*Corresponding author: Jeong, Seong-Hoon

E-mail: jeong@inha.ac.kr

(Received October 31, 2023; Revised December 26, 2023; Accepted December 26, 2023)

막 관련 설계기준이 불분명하고, 연구사례가 부족하여 토핑(Topping) 부분을 일반적인 철근콘크리트 슬래브와 같이 설계하는 것으로 알려져 있다. 이러한 설계는 PC 유닛의 압축력, 마찰력 등에 대한 저항능력이 고려되지 않아 과잉설계될 수 있으며 PC 구조의 장점인 경제성을 저하한다.

상술한 내용을 종합하면 Half-PC형 슬래브의 내진설계규정 제·개정을 위한 연구가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 Half-PC형 슬래브의 형상비 변화에 따른 강한 격막(Rigid Diaphragm) 판정 기준을 제시하고, 현재(Chord) 설치의 구조적 효과를 파악하고자 한다.

## 2. 격막의 개요

### 2.1 격막의 특성

격막이란 중력에 대한 하중뿐 아닌 지진하중, 풍하중 등과 같은 횡하중을 횡하중저항시스템(Lateral Force Resisting System, LFRS)의 수직부재에 전달하는 경사·수평의 판형 부재이다[8]. 횡하중 저항시스템에는 가새골조 시스템, 전단벽 시스템, 모멘트골조 시스템 등이 있다[9].

격막은 유연도 특성에 따라 강한 격막과 유연한(Flexible) 격막으로 구분되며 격막의 유연도는 면내 강성과 밀접한 관련이 있다. 미국의 설계기준 제·개정의 기초자료인 ASCE 7-22[9]에서는 유연한 격막 판별 기준을 식(1)과 같이 제시하고 있다.

$$\frac{\delta_{MDD}}{\Delta_{ADVE}} > 2 \tag{1}$$

여기서,  $\delta_{MDD}$ 는 격막 최대 수평 변위,  $\Delta_{ADVE}$ 는 평균 층간변위이다.

식(1)을 만족하는 격막을 유연한 격막으로 구분한다. 또한, 국내의 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00:2022)[10]에서는 유연한 격막을 ‘격막의 횡변위가 그 층의 평균 층간변위( $\Delta_{ADVE}$ )의 2배를 초과하는 격막’으로 정의하며 강한 격막은 ‘유연한 격막으로 분류되지 않은 격막’으로 정의한다. 따라서 본 연구에서는 Half-PC형 슬래브의 강한 격막 판별 기준을 식(2)와 같이 정의하였다. Fig. 1은  $\delta_{MDD}$ 와  $\Delta_{ADVE}$ 의 산정법을 나타낸 그림이다.

$$\frac{\delta_{MDD}}{\Delta_{ADVE}} \leq 2 \tag{2}$$

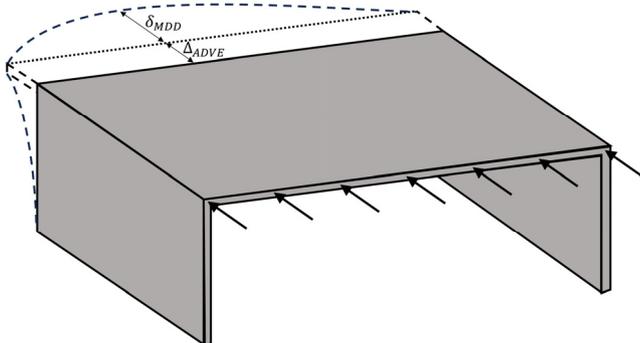


Fig. 1. Measurement method of  $\delta_{MDD}$ ,  $\Delta_{ADVE}$

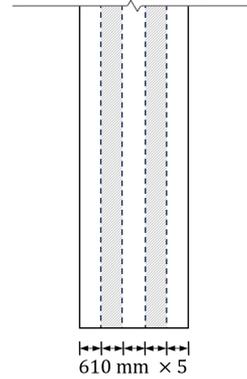


Fig. 2. Location of contact element in PC unit

격막은 PC 유닛과 토핑 사이의 결합 정도, 토핑의 유무에 따라 토핑이 있는 합성 격막(Topped Composite Diaphragm), 토핑이 있는 비합성 격막(Topped Noncomposite Diaphragm), 토핑이 없는 격막(Untopped Diaphragm)으로 구분된다[11]. 본 연구의 Half-PC형 슬래브는 토핑이 있는 합성 격막으로 구분된다. 토핑이 있는 합성 격막은 PC 유닛과 토핑이 거친면 처리, 전단 연결재 등에 의하여 결합하고, 상호작용 하며 거동하는 격막을 말한다. 상술한 상호작용은 격막의 거동 예측을 어렵게 하여 격막의 거동 예측을 위해 구조 해석이 요구된다. 본 연구에서는 PC 유닛과 토핑의 결합을 위해 전단 연결재의 일종인 래티스 거더(Lattice Girder)가 설치된 것으로 가정하였다. 그에 따라 래티스 거더 설치 위치의 PC 유닛과 토핑의 표면에 결합된 접촉 요소(Bonded Contact Element) 설정을 통해 해당 영역을 일체화하여 거동하도록 설정하였습니다. Fig. 2에 PC 유닛에서 접촉 요소가 설정된 영역을 나타내었다.

### 2.2 등가 보 모델(Equivalent Beam Model) 설계법

본 연구에서는 등가 보 모델(Equivalent Beam Model, EBM) 설계법을 이용하여 현재를 설계하였다.

EBM 설계법은 대표적인 격막 설계 방법이다. EBM 설계법은 횡하중 저항시스템의 수직부재 위치가 지점 위치와 같도록 격막을 보로 변환한다. 격막의 면내 방향으로 작용하는 하중은 보의 연직 방향 하중으로 대체하고 보에 대한 해석을 진행한다. 해석 결과로 횡하중에 의해 격막 내에 발생하는 축방향력, 최대 전단력, 최대 휨모멘트의 발생 위치 및 크기를 도출한다. 이러한 과정을 Fig. 3에 도식화하여 나타내었다.

연결재 설계 시 동일 선상에 놓인 연결재의 공칭강도가 해석 결과로 도출된 최대 전단력( $V_{u,max}$ )보다 크도록 연결재의 종류 및 수량을 결정한다. 현재는 면내 모멘트( $M_{u,max}$ )에 의한 축방향력을 받는 부재이다[9]. 현재에 작용하는 축방향력은 식(3)에 의해 계산되며 축방향력에 대해 현재를 설계한다.

$$T_u = C_u = \frac{M_{u,max}}{d} \tag{3}$$

여기서,  $T_u$ 는 현재의 설계 인장력,  $C_u$ 는 현재의 압축 인장력,  $d$ 는 현재 설계를 위한 유효 길이를 의미한다.  $d$ 는 CRSI에서 정의하고 있는 현재 설치에 대한 유효 길이로 그 길이를 가력 방향 길이의 95% 값으로 정의하고 있다[8].

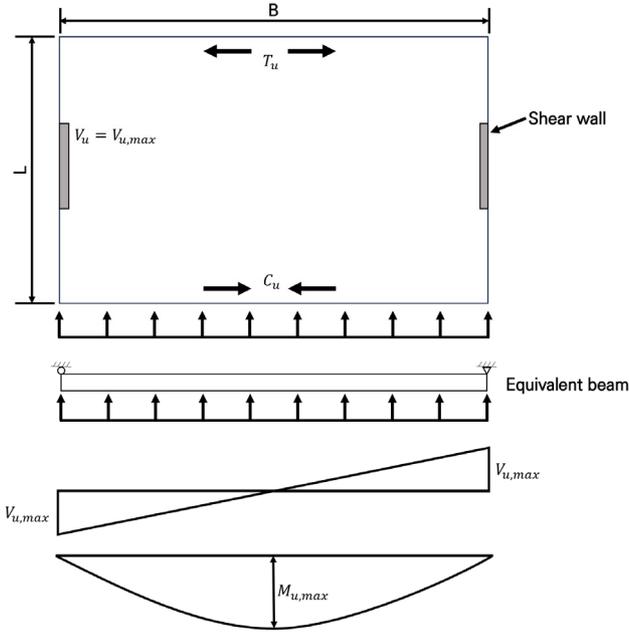


Fig. 3. Equivalent beam model method

### 3. Half-PC형 슬래브의 유한요소해석

이 장에서는 Half-PC형 슬래브의 유한요소해석을 위한 예제 구조물의 상세 정보, 재료 모델 설정, 모델링 상세에 대해 설명한다. ANSYS 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 해석을 진행하였다.

#### 3.1 모델링

##### 3.1.1 예제 구조물 개요

격막 설계 하중 산정을 위해 필요한 구조체의 상세 정보는 Table 1과 같다. 모델의 구성은 Fleischman and Wan[12]의 연구에 기초하였으며 예제 구조물 중 하나인 3.0의 형상비를 갖는 모델의 평면도를 Fig. 4에 나타내었다. 그림의 치수 정보는 mm를 기본 단위로 한다.

Table 1. Structure details

Location	No. Floor	Floor Height [m]	Seismic Classification	Soil Profile Type
Seoul	7	3.5	I	S <sub>4</sub>

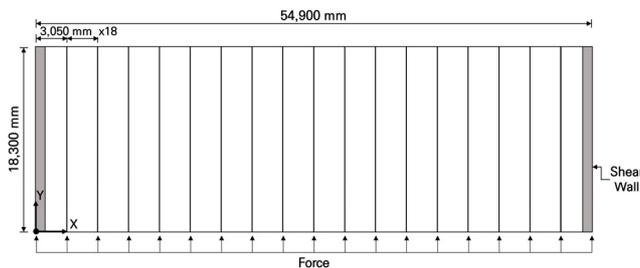


Fig. 4. Model Plan View

#### 3.1.2 재료 모델

본 연구에서는 콘크리트, 철근, 벽체 스프링에 대해 재료 모델을 설정하였다.

콘크리트는 Popovics[13, 14]의 재료 모델을 적용하여 재료 특성을 설정하였다. 변형률에 따른 콘크리트 응력은 식 (4)를 통해 계산하였다. PC 유닛과 토핑의 콘크리트 압축강도는 각각 40 MPa, 27 MPa로 설정하였다. 압축강도 도달 후 재료의 강성은 0으로 설정하였으며 인장력에 대한 저항 능력은 없는 것으로 가정하였다. 콘크리트의 응력-변형률 그래프를 Fig. 5에 나타내었다.

$$f = \frac{f_{cc} x r}{r - 1 + x^r} \quad (4)$$

$$x = \epsilon / \epsilon_{cc}$$

$$r = E_c / (E_c - E_{sec})$$

$$E_{sec} = f'_{cc} / \epsilon_{cc}$$

여기서,  $f_c$ 는 콘크리트 응력,  $\epsilon$ 은 축방향 변형률,  $f'_{cc}$ 는 콘크리트 압축강도,  $\epsilon_{cc}$ 는 콘크리트 압축강도에서의 변형률,  $E_c$ 는 초기 접선 탄성계수이다.

철근은 이선형 모델(Bilinear Model)을 적용하여 재료 특성을 설정하였다. 항복 후 변형률 경화(Strain Hardening)가 발생하지 않는 것으로 가정하였다. 철근의 상세 재료 특성값을 Table 2에 정리하였으며 철근의 응력-변형률 그래프를 Fig. 5에 나타내었다.

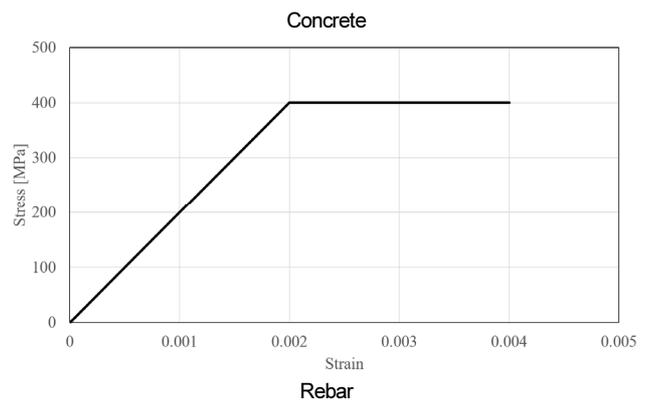
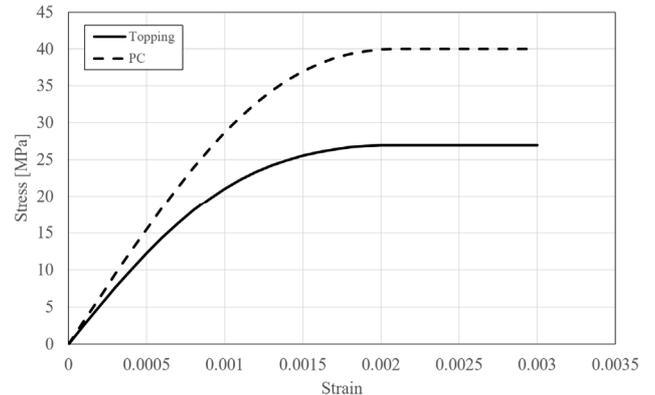


Fig. 5. Stress-strain curve of concrete and rebar

**Table 2.** Rebar material details

Elastic Modulus [MPa]	Yield Strength [MPa]	Tensile Strength [MPa]	Poisson's Ratio
200,000	400	400	0.3

**Table 3.** Wall spring stiffness

Aspect Ratio	3.0		3.5		4.0	
Interstory Drift [mm]	31.5	24.5	31.5	24.5	31.5	24.5
Spring Stiffness [N/mm]	1,388	1,785	1,579	2,031	1,770	2,276

전단벽의 면내 거동을 해석에 반영하기 위해 벽체 스프링을 모델링하였다. 총 24개의 스프링 요소를 X축 방향의 격막 양단에 설치하였다. 스프링의 강성은 「기존 시설물 내진성능 평가요령」[15]에서 제안하는 인명안전 성능수준을 만족하는 허용층간변형각(1%)의 90%, 70%의 층간변형각을 갖도록 설정하였다. 허용층간변형각의 90%를 만족하는 층간변위는 31.5 mm, 70%를 만족하는 층간변위는 24.5 mm로 계산된다. 또한, 격막 설계 하중은 구조체의 중량에 비례하여 증감하므로 벽체 스프링은 구조체의 형상비에 따라 각기 다른 강성을 갖도록 설정한다. 벽체 스프링의 강성을 설정하기 위한 계산식은 식 (5)와 같으며 그 결과 산출된 스프링의 강성값은 Table 3과 같다.

$$k_{spring} = \frac{F_{px}}{d_{interstory} \times n_{spring}} \tag{5}$$

여기서,  $k_{spring}$  은 벽체 스프링의 강성,  $F_{px}$  는 격막 설계 하중,  $d_{interstory}$  는 층간변위,  $n_{spring}$  은 전체 스프링의 수를 나타낸다.

**3.1.3 모델링 상세**

Fleischman and Wan[12], Wan et al.[16]의 연구에 따르면 면내 작용 하중에 의한 격막의 거동은 형상비가 주요 요인으로 작용한다. 따라서 본 연구에서는 형상비를 변수로 설정하여 해석 모델을 구성하였다. 3.0 이하의 형상비를 갖는 철근콘크리트 격막을 강한 격막으로 이상화할 수 있다는 규정[9]을 고려하여 그 이상의 형상비를 갖는 Half-PC형 슬래브에 관한 연구가 필요하다고 판단하였다. 그에 따라 3.0, 3.5, 4.0의 형상비를 갖는 Half-PC형 슬래브 모델을 구성하고 해석하여 슬래브의 유연도, 거동 특성에 대해 분석하였다. 형상비에 따른 Half-PC형 슬래브의 치수 정보를 Table 4에 나타내었다.

Half-PC형 슬래브는 크게 토폭 부분과 PC 부분으로 나뉜다. 토폭 부분은

**Table 4.** Dimension information according to aspect ratio

Aspect Ratio	No. PC Units [EA]	Length of X-Dir. [mm]	Length of Y-Dir. [mm]
3.0	18	54,900	18,300
3.5	21	64,050	18,300
4.0	24	73,200	18,300

철근콘크리트로 구성되고, PC 부분은 더블티 부재(Double Tee Element)로 구성된다.

토폭 부분은 Table 4와 같은 평면 길이를 가지며 두께는 100 mm로 설정하였다. 토폭 부분의 하부는 PC 부분의 상부와 접하도록 모델링하였다. 국내 Half-PC형 슬래브 설계에 가장 널리 사용하고 있는 철근 간격인 400, 300, 200 mm를 표본으로 선정하였다. 본 연구에서는 표본의 상한값과 하한값인 400, 200 mm의 철근 간격을 갖도록 D10 철근을 배근하여 해석 모델을 구성하였다. 토폭 부분의 철근 배근 간격을  $G_t$ 로 나타내었다. 토폭 부분의 철근과 콘크리트를 결속하기 위하여 CEINTF 명령어를 적용하였다. 이 명령어는 선택된 콘크리트 노드들과 철근 부재를 연결하는 구속식을 생성하여 연결 위치에서 서로 동일한 변형률을 갖도록 한다.

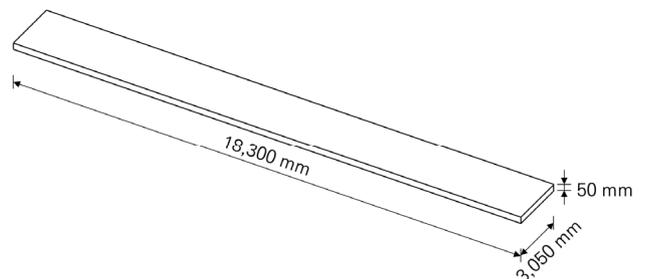
더블티 부재의 웨브가 Half-PC형 슬래브의 면내 강성에 주는 영향은 매우 작아 무시할 수 있다. 그에 따라 더블티 부재의 플랜지에 대해서만 모델링을 진행하였다[4]. 모델링을 진행한 더블티 유닛의 치수 정보는 Fig. 6과 같다. 더블티 부재 사이에 작용하는 마찰력과 압축력을 해석에 반영하기 위해 접촉 요소를 설정하였다. 접촉 요소는 콘크리트 재료 모델에 기초한 접촉력을 발생시켜 두 부재를 밀어내는 방식으로 더블티 부재 사이에 발생하는 압축력을 구현한다. 또한, Coulomb 마찰 모델을 접촉 요소에 적용하여 더블티 부재 사이에 작용하는 마찰력을 해석에 구현하였다. Coulomb 마찰 모델은 마찰계수와 접촉면에 수직으로 작용하는 압축력의 곱이 접촉면에 수평으로 작용하는 힘보다 작은 경우에 미끄러짐(Sliding)을 발생시킨다. 미끄러짐 발생의 기준이 되는  $F_t$ 는 식(6)와 같이 계산된다. 마찰계수는 Eurocode 2에서 제안하고 있는 표면이 매끄러운 콘크리트 사이의 마찰계수인 0.6을 적용하였다[17, 18].

$$F_t = \mu F_n \tag{6}$$

여기서,  $F_t$ 는 미끄러짐 발생 기준 하중,  $\mu$ 는 마찰계수,  $F_n$ 은 접촉면에 수직으로 작용하는 하중이다.

현재 설치 여부, 철근 배근 간격, 형상비, 벽체 스프링 강성에 따라 해석 모델을 Table 5와 같이 분류하였으며 철근 배근 간격을  $G_t$ 로 나타내었다. 모델명의 D는 현재가 없는 격막, DC는 현재가 설치된 격막을 의미한다. 모델명의 3.0, 3.5, 4.0은 격막의 형상비를 의미한다. 또한, 모델명의 A는 동일한 모델에서 상대적으로 벽체 스프링 강성이 작은 모델, B는 상대적으로 벽체 스프링 강성이 큰 모델을 의미한다.

해석 결과의 정확도와 해석의 수렴성을 고려하여 모델의 메쉬 크기(Mesh Size)를 610×1520 mm로 설정하였다. 메쉬 생성을 완료한 모델을 Fig. 7



**Fig. 6.** Dimension information of double tee unit

**Table 5.** Analysis model classification

Model Name	$G_t$ [mm]	Wall Spring Stiffness [N/mm]
D1_3.0A	400	1,388
D1_3.0B		1,785
D1_3.5A		1,579
D1_3.5B		2,031
D1_4.0A		1,770
D1_4.0B		2,276
D2_3.0A	200	1,388
D2_3.0B		1,785
D2_3.5A		1,579
D2_3.5B		2,031
D2_4.0A		1,770
D2_4.0B		2,276
DC1_3.0A	400	1,388
DC1_3.0B		1,785
DC1_3.5A		1,579
DC1_3.5B		2,031
DC1_4.0A		1,770
DC1_4.0B		2,276
DC2_3.0A	200	1,388
DC2_3.0B		1,785
DC2_3.5A		1,579
DC2_3.5B		2,031
DC2_4.0A		1,770
DC2_4.0B		2,276

**Table 6.** Diaphragm design force calculation results

Aspect Ratio	Floor	$F_i$ [kN]	$\sum F_i / \sum w_i$	$F_{px}$ [kN]
3.0	R	1,157.2	0.2394	1,049.7
	7	989.0	0.2394	1,049.7
	6	821.4	0.2256	989.2
	5	654.4	0.2065	905.5
	4	488.1	0.1874	822.0
	3	323.0	0.1685	738.8
	2	159.4	0.1496	656.1
	3.5	R	1,316.2	0.2394
7		1,124.0	0.2394	1,194.0
6		934.3	0.2256	1,125.2
5		744.3	0.2065	1,029.9
4		555.2	0.1874	935.0
3		367.4	0.1685	840.4
2		181.3	0.1496	746.2
4.0		R	1,475.3	0.2394
	7	1,260.9	0.2394	1,338.3
	6	1,047.2	0.2256	1,261.1
	5	834.2	0.2065	1,154.4
	4	622.3	0.1874	1,048.0
	3	411.8	0.1685	941.9
	2	203.2	0.1496	836.4

은 식 (8), 상한값은 식 (9)로 제한하고 있다.

$$F_{px} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{\sum w_i} w_{px} \quad (7)$$

$$F_{px} = 0.2 S_{DS} I_e w_{px} \quad (8)$$

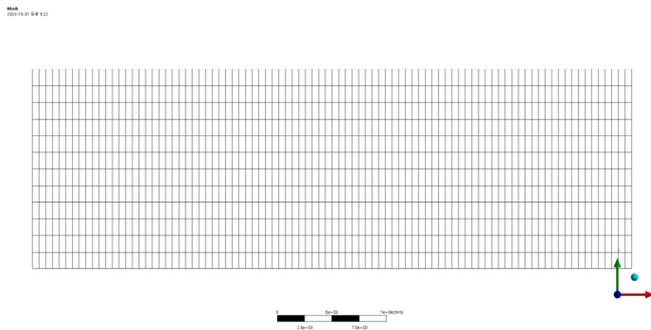
$$F_{px} = 0.4 S_{DS} I_e w_{px} \quad (9)$$

여기서,  $F_{px}$ 는  $x$  층에서 격막 설계 하중,  $F_i$ 는  $i$  층에 작용하는 격막 하중,  $w_i$ 는  $i$  층에서의 층 중량,  $w_{px}$ 는  $x$  층에서의 격막 중량,  $n$ 은 층 층수,  $S_{DS}$ 는 단주기 설계스펙트럼가속도,  $I_e$ 는 내진설계 중요도 계수를 의미한다.

격막 설계 하중 산정을 위한 철근콘크리트의 단위중량을  $24 \text{ kN/m}^3$ 으로 설정하였으며 그에 따라 각 층은 약  $4,385.4 \text{ kN}$ 의 층 중량을 갖는다. 형상비에 따른 격막 설계 하중을 Table 6에 나타내었다. 최상층에서 최대 격막 설계 하중이 발생하므로 최상층의 격막 설계 하중을 해석 모델에 적용하여 해석을 진행하였다. 따라서 격막 설계 하중  $1,049.7 \text{ kN}$ ,  $1,194.0 \text{ kN}$ ,  $1,338.3 \text{ kN}$ 을 각각 3.0, 3.5, 4.0의 형상비를 갖는 해석 모델에 적용하였다.

### 3.1.5 현재 설계

현재는 철근과 같은 선형 부재로 해석 모델의 PC 부분에 설치되며 Y축



**Fig. 7.** Meshed model

에 나타내었다.

### 3.1.4 격막 설계 하중

격막 설계 하중이란 자봉 또는 바닥 격막이 저항할 수 있게 설계하는 면내 설계 지진력을 말한다. 본 연구에서는 격막 설계 하중이 작용할 때의 해석 결과를 확인한다. Half-PC형 슬래브의 면내 거동을 중점적으로 확인하기 위하여 연직 방향 하중은 고려하지 않았다[4]. 국내의 내진설계규정에는 격막 설계 하중을 정의하고 있지 않아 ASCE 7-22 규정을 기초하여 격막 설계 하중을 산정하였다[9]. 격막 설계 하중 산정식은 식 (7)과 같으며, 하한값

**Table 7.** Chord design results

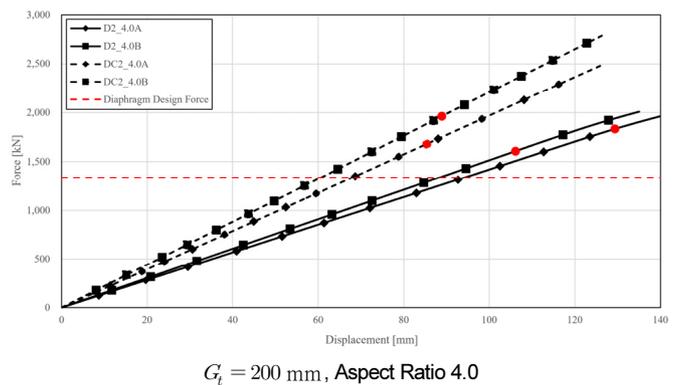
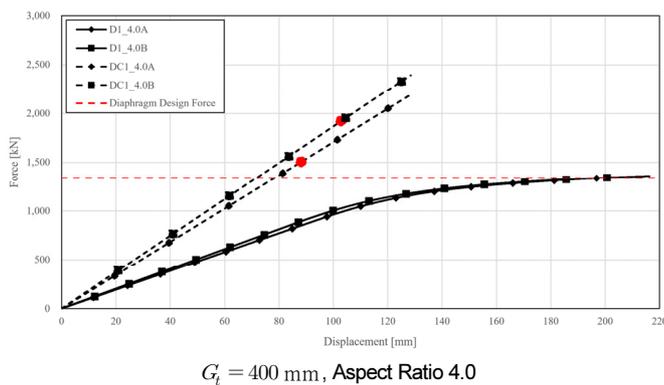
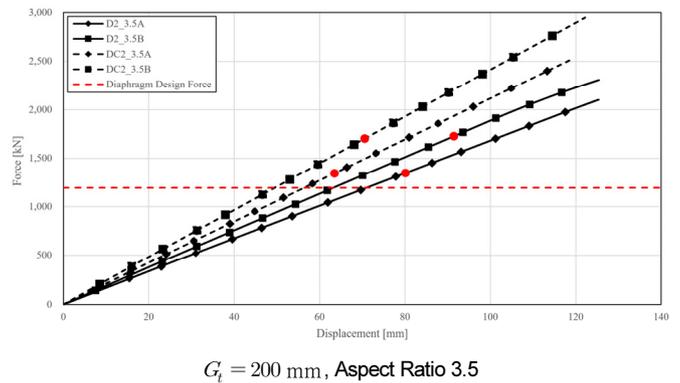
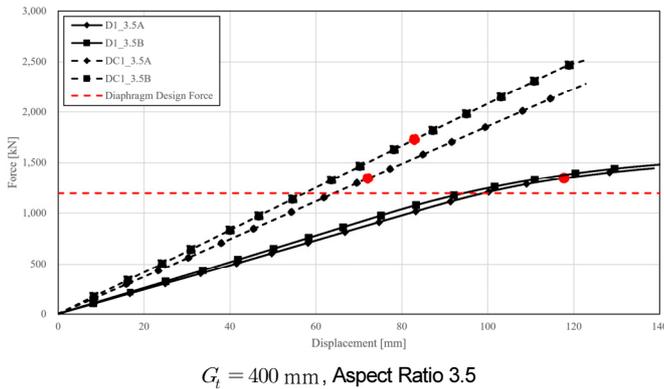
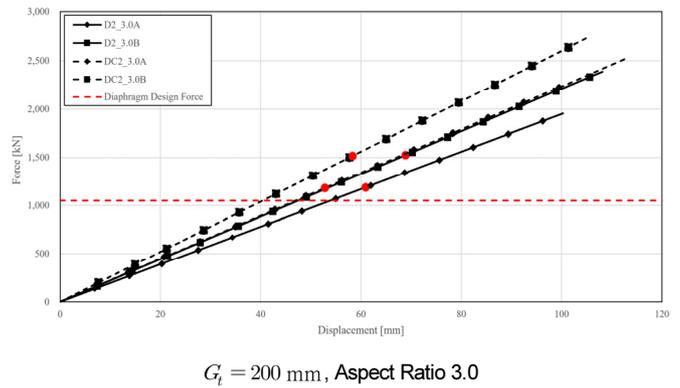
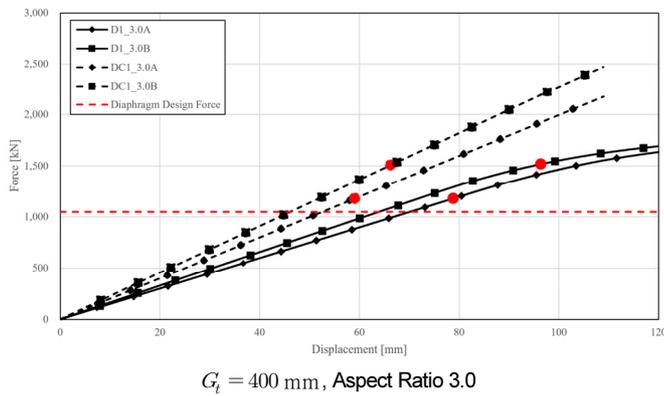
	Aspect Ratio		
	3.0	3.5	4.0
$F_{px}$ [kN]	1049.7	1,194.0	1,338.3
$d$ [mm]	17,300	17,300	17,300
$M_{u,max}$ [kN · m]	7,203	9,559	12,245
$T_u$ [kN]	416.4	552.6	707.8
$A_{chord}$	1,041.0	1,381.4	1,769.5
Chord Spec.	3D22	3D25	4D25

방향의 격막 양단으로부터 500 mm 이격된 위치에 설치하였다[19]. 현재의 설계에는 등가 보 모델 설계법을 적용하였으며 설계된 현재의 사양은 Table 7과 같다.

### 4. 해석 결과

Half-PC형 슬래브의 하중-변위 그래프와 격막 설계 하중 작용 시 가력 방향 최대 변위( $\Delta_{max}$ ),  $\delta_{MDD}/\Delta_{ADVE}$  등을 정리한 표, 응력분포를 해석 결과로 도출하였다. 하중-변위 그래프에서 변위는 가력 방향 최대 변위( $\Delta_{max}$ )를 나타낸다. 가력 방향 최대 변위( $\Delta_{max}$ )는 Half-PC형 슬래브의 최대 변위를 나타내며  $\delta_{MDD}$ 와  $\Delta_{ADVE}$ 의 합과 같다. 하중-변위 그래프를 Fig. 8에 나타내었으며 격막 설계 하중을 수평의 점선으로, 허용층간변위 발생 위치를 원형 표식으로 그래프 상에 나타내었다. 또한, 격막 설계 하중 하에서의 모델별  $\Delta_{max}$ ,  $\delta_{MDD}/\Delta_{ADVE}$  등의 해석 결과를 Table 8에 나타내었으며 Half-PC형 슬래브의 격막 설계 하중 하에서의 응력분포를 Fig. 9에 나타내었다. 응력분포는 D1\_4.0A, DC1\_4.0A 모델에 대해 나타내었다.

해석 결과로 도출된  $\delta_{MDD}/\Delta_{ADVE}$ 와 식 (2)의 비교를 통하여 Half-PC형



**Fig. 8.** Force-Displacement curves

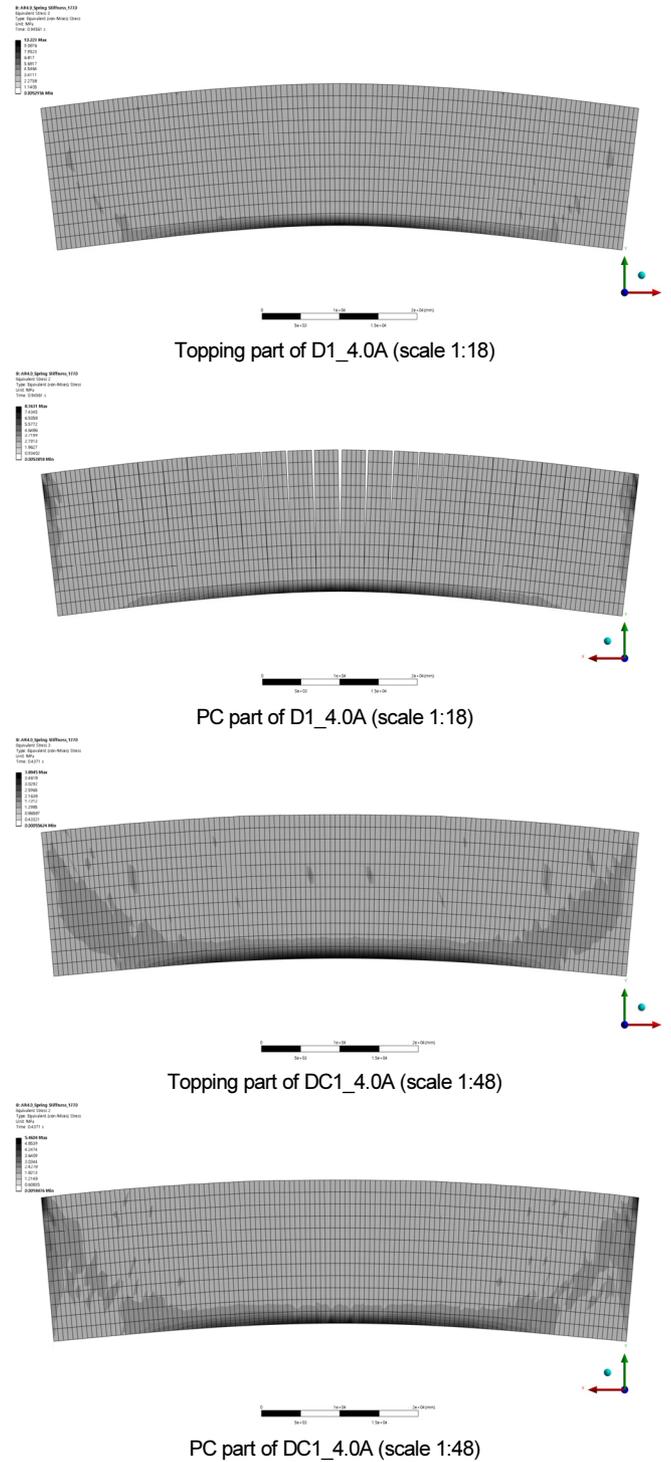
**Table 8.** Analysis Results

Model Name	$\Delta_{ADVE}$ [mm]	$\delta_{MDD}$ [mm]	$\Delta_{max}$ [mm]	$\delta_{MDD}/\Delta_{ADVE}$
D1_3.0A	32.1	37.9	70.0	1.18
D1_3.0B	25.6	38.2	63.9	1.49
D1_3.5A	32.1	66.3	98.4	2.06
D1_3.5B	25.9	68.3	94.2	2.63
D1_4.0A	32.4	166.0	198.4	5.13
D1_4.0B	25.2	170.7	195.9	6.77
D2_3.0A	32.3	21.6	53.9	0.67
D2_3.0B	25.7	21.7	47.4	0.84
D2_3.5A	32.2	38.7	70.9	1.20
D2_3.5B	25.2	38.0	63.2	1.51
D2_4.0A	32.3	61.7	94.0	1.91
D2_4.0B	25.2	63.0	88.2	2.50
DC1_3.0A	31.9	20.6	52.5	0.65
DC1_3.0B	25.2	20.8	46.0	0.83
DC1_3.5A	32.0	32.1	64.1	1.00
DC1_3.5B	25.0	32.2	57.2	1.29
DC1_4.0A	32.0	46.4	78.4	1.45
DC1_4.0B	24.9	46.6	71.5	1.87
DC2_3.0A	31.9	14.9	46.8	0.47
DC2_3.0B	25.4	14.9	40.3	0.59
DC2_3.5A	31.9	24.4	56.3	0.76
DC2_3.5B	24.9	24.1	49.0	0.97
DC2_4.0A	31.5	36.3	67.8	1.15
DC2_4.0B	25.0	35.5	60.5	1.42

슬래브의 유연도를 판정하였다. Table 8에서 현재가 설치되지 않고  $G_f = 200$  mm인 3.5, 4.0의 형상비를 갖는 모델과  $G_f = 400$  mm인 D2\_4.0B 모델이 유연한 격막임을 확인할 수 있다. 또한, 현재가 설치된 모든 모델이 강한 격막으로 구분되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 종합하면 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다. 구조 설계 시 3.0 이하의 형상비를 갖는 Half-PC형 슬래브를 강한 격막으로 이상화할 수 있으며 현재를 설치한 경우에는 4.0 이하의 형상비를 갖는 Half-PC형 슬래브까지 강한 격막으로 이상화하여 설계할 수 있다. 또한, 현재의 설치 격막의 유연도를 개선하는 효과가 있음을 추론할 수 있다. 상술한 형상비 범위에 포함되지 않는 Half-PC형 슬래브는 강한 격막으로 이상화하기 위하여 상세 구조 해석과 같은 구조적 검토가 필요할 것으로 판단된다.

Half-PC형 슬래브의 형상비가 구조물의 강성에 미치는 영향을 확인하기 위해 일정한 가력 방향 최대 변위( $\Delta_{max}$ )에서의 작용 하중( $F$ )을 관찰하였다. 기준이 되는  $\Delta_{max}$ 의 값을 100 mm로 설정하였으며 그때의 작용 하중을 Fig. 10에 정리하였다. Fig. 10에서 형상비 증가에 따라 해석 모델에 작용하는 하중  $F$ 가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 면내 최대 변위가 고정되어 있으므로  $F$ 의 감소는 구조체 강성의 감소를 의미한다. 따라서 형상비 증가에 따라 Half-PC형 슬래브의 강성이 감소하는 것을 결론으로 도출할 수 있다.

벽체 강성의 증가에 따라 격막 설계 하중에 의한 벽체의 변위가 감소하



**Fig. 9.** Stress Distribution

므로 가력 방향 최대 변위( $\Delta_{max}$ )는 감소한다. 벽체 강성 증가에 의한  $\Delta_{max}$  감소량을 Fig. 11에 나타내었다.  $\Delta_{max}$  감소량은 형상비 증가에 따라 일정한 경향성을 보이지 않는 것을 확인할 수 있다. 또한, 현재가 설치되지 않고  $G_f = 400$  mm인 형상비 3.5, 4.0을 갖는 Half-PC형 슬래브와  $G_f = 200$  mm인 형상비 4.0을 갖는 Half-PC형 슬래브에서  $\Delta_{max}$  감소량이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 상술한 모델들은 유연한 격막으로 분류된 모델이며 그 외의 모델들은 강한 격막으로 분류된다. 강한 격막의 경우 벽체 강성의 증가

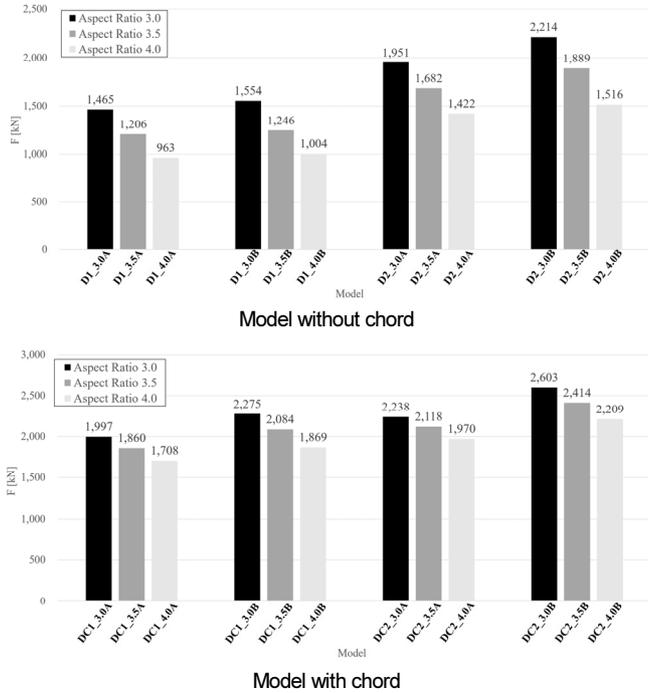


Fig. 10. Applied force at Δ<sub>max</sub> = 100 mm

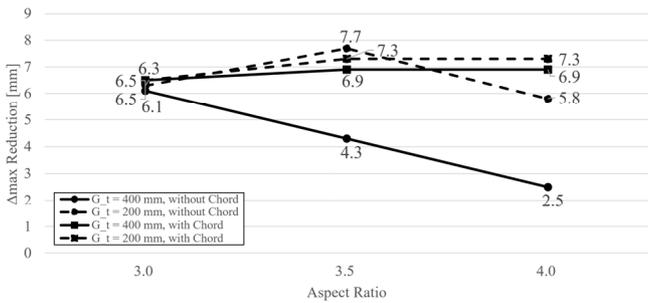


Fig. 11. Δ<sub>max</sub> reduction due to increase in wall stiffness

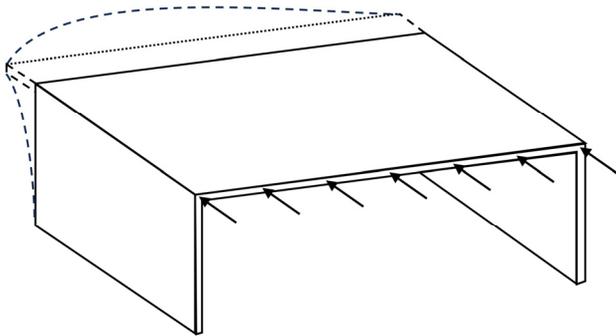


Fig. 12. In-plane behavior of flexible diaphragm

에 따라 Δ<sub>max</sub> 감소량이 증가하거나 일정하지만 유연한 격막의 경우에는 Δ<sub>max</sub> 감소량이 감소하는 것으로 판단된다. 이러한 특성은 유연한 격막이 면내 하중 하에서 Fig. 12과 같이 아치 형상을 하며 거동하는 것이 원인으로 추정된다. 이러한 사항들을 종합하였을 때 벽체 강성 증가에 따른 Δ<sub>max</sub> 감소량은 격막의 유연도에 지배적인 영향을 받음을 결론으로 도출할 수 있다.

## 5. 결론

Half-PC형 슬래브는 국내에서 주로 사용되는 PC 구조의 격막이다. Half-PC형 슬래브의 형상비에 따른 강한 격막 이상화 기준을 제시하고, 현재 설치의 구조적 이점을 확인하기 위하여 본 연구를 진행하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같이 정리된다.

- (1) 3.0 이하의 형상비를 갖는 Half-PC형 슬래브는 강한 격막 판정 기준인  $\delta_{MDD}/\Delta_{ADVE} \leq 2$ 를 만족하여 강한 격막으로 이상화하여 설계할 수 있다. 또한, 현재를 설치할 경우, 4.0 이하의 형상비를 갖는 Half-PC형 슬래브는 강한 격막으로 이상화하여 설계할 수 있다. 상술한 범위 밖의 형상비를 갖는 Half-PC형 슬래브는 강한 격막으로 이상화하여 설계하기 위하여 상세 구조 해석과 같은 구조적 검토가 필요할 것으로 판단된다.
- (2) Half-PC형 슬래브의 형상비 증가는 면내 하중에 대한 구조체 강성이 감소하는 결과로 이어지는 것으로 판단된다.
- (3) 벽체의 강성 증가에 따른 Δ<sub>max</sub> 감소 효과는 Half-PC형 슬래브의 형상비보다 유연도에 지배적인 영향을 받는 것으로 판단된다.

일반적으로 지진하중을 받는 PC 슬래브의 면내거동은 형상비 증가에 따라 고차 모드의 영향이 커져 푸쉬오버 해석만으로는 그 거동을 상세히 나타내는데 한계가 있다고 알려져 있다. 따라서 추후 연구에서는 형상비 증가에 따른 모드 해석을 통하여 고차 모드에 대한 거동 특성 파악이 필요할 것으로 판단된다.

### / 감사의 글 /

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00278784).

### / REFERENCES /

1. Ministry of Public Safety and Security. 9.12 Earthquake White Paper. Ministry of Public Safety and Security; c2017.
2. Ministry of the Interior and Safety. Pohang earthquake damage recovery cost of 144.5 billion won confirmed. Ministry of the Interior and Safety [Internet]. 2017 Dec 06 [cited 2023 Oct 26]. Available from: [https://www.mois.go.kr/frt/bbs/type010/commonSelectBoardArticle.do?bbsId=BBSMSTR\\_000000000008&nttId=60882#none](https://www.mois.go.kr/frt/bbs/type010/commonSelectBoardArticle.do?bbsId=BBSMSTR_000000000008&nttId=60882#none)
3. Yun GC. Architectural PC market size: 1,4 trillion won... “Rapid growth in the future due to factors such as logistics facilities”. Maeil Construction Newspaper [Internet]. 2023 Feb 21 [cited 2023 Oct 26]. Available from: <http://www.mcnews.co.kr/78029>
4. Precast/Prestressed Concrete Institute. PCI design handbook : precast and prestressed concrete(8). PCI; c2017.
5. Farrow KT, Fleischman RB. Effect of Dimension and Detail on the Capacity of Precast Concrete Parking Structure Diaphragms. PCI

- Journal. 2003 Sep;48(5):46–61.
6. Fleischman RB, Naito CJ, Restrepo J, Sause R, Ghosh SK. Seismic Design Methodology for Precast Concrete Diaphragms Part1: Design Framework. PCI Journal. 2005 Sep;50(5):68–83.
  7. Wan G, Zhang D, Fleischman RB, Naito CJ. A coupled connector element for nonlinear static pushover analysis of precast concrete diaphragms. Engineering Structures. 2015 Mar;86:58–71.
  8. Concrete Reinforcing Steel Institute. Design Guide for Reinforced Concrete Diaphragms. CRSI; c2019.
  9. American Society of Civil Engineers. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. ASCE/SEI; c2022.
  10. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Seismic Building Design Code KDS 41 17 00 : 2022. Ministry of Land, Infrastructure and Transport; c2022.
  11. Fleischman RB, Ghosh SK, Naito CJ, Wan G, Restrepo J, Schoettler M, Sause R, Cao L. Seismic Design Methodology for Precast Concrete Diaphragms Part2: Research Program. PCI Journal. 2005 Nov; 50(6):14–31.
  12. Fleischman RB, Wan G. Appropriate Overstrength of Shear Reinforcement in Precast Concrete Diaphragms. Journal of Structural Engineering. 2007 Nov;133(11):1616–1626.
  13. Popovics S. A numerical approach to the complete stress–strain curve of concrete. Cement and Concrete Research. 1973;3(5):583–599.
  14. Mander JB. Seismic Design of Bridge Piers [Doctorate]. [New Zealand]: University of Canterbury; c1983. 503 p.
  15. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Existing Facility (Building) Seismic Performance Evaluation Guidelines. Korea Authority of Land & Infrastructure Safety; c2021.
  16. Wan G, Fleischman RB, Zhang D. Effect of Spandrel Beam to Double Tee Connection Characteristic on Flexure–Controlled Precast Diaphragms. Journal of Structural Engineering. 2012 Apr;138(2):247–257.
  17. European Committee for Standardization. Eurocode 2: design of concrete structures. General rules and rules for buildings; c1992.
  18. Mohamad ME, Ibrahim IS, Abdullah R, Rahman ABA, Kueh ABH, Usman J. Friction and cohesion coefficients of composite concrete–to–concrete bond. Cement and Concrete Research. 2015 Feb;56: 1–14.
  19. Moehle JP, Hooper JD, Kelly DJ, Meyer TR. Seismic Design of Cast–in–Place Concrete Diaphragms, Chords, and Collectors. National Institute of Standards and Technology; c2010.