

# 바닥하중 및 면내압축력을 받는 플랫 플레이트 슬래브

## Reinforced Concrete Flat Plates Under Combined In-plane and Out-of-plane Loads

박 홍 근\*      김 의 회\*\*      홍 성 걸\*\*\*  
Park, Hong Gun      Kim, Eui Hoe      Hong, Sung Gul

### ABSTRACT

Numerical studies are performed to investigate the behavior of flat plates under combined in-plane and out-of-plane loads. The numerical model is verified by comparison with experiments for plates simply supported on four edges. Through study on different load combination and loading sequence, the critical load condition that governs the strength of the flat plate is determined. Parametric studies are performed to investigate the buckling coefficient and the effective flexural rigidity so that the moment magnification method is applicable to the flat plates

### 1. 서론

최근 지하 9층정도의 깊은 지하실을 갖는 대규모 건물이 건설되는 것을 흔히 발견할 수 있다. 지하층 슬래브는 수직하중 뿐만 아니라 수압이나 토압에 의한 축하중을 전달하는 역할을 하게 되므로 바닥하중 및 면내압축력을 동시에 받게 된다(그림 1). 지하층의 바닥구조로서 시공성을 높일 수 있고 굴토깊이를 줄일 수 있는 플랫 플레이트 슬래브가 많이 쓰이고 있다(그림 2). 플랫 플레이트 슬래브는 바닥하중 및 면내압축력에 의하여 휨모멘트와 압축력을 받는다는 점에서 기둥부재와 유사하지만 슬래브의 크기, 모양, 배근 등의 특성 뿐만 아니라 바닥하중과 1축 또는 2축의 면내압축력이 서로 독립적으로 작용하는 하중조건이 1축압축력과 휨모멘트의 비례하중을 받는 기둥부재와 차이를 가진다. 따라서 압축력을 받는 지하층 슬래브를 설계하는 경우 기둥부재와는 다른 접근방법이

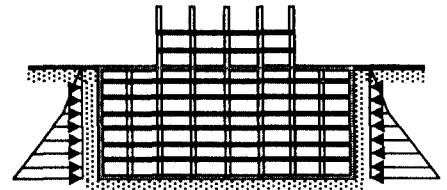


그림 1 횡하중을 받는 지하층 슬래브

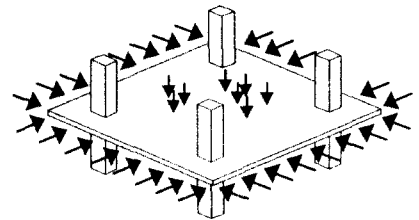


그림 2 바닥하중 및 면내하중을 받는 플랫 플레이트 슬래브

\* 정회원, 서울대학교 건축학과 전임강사  
\*\* 서울대학교 건축학과 석사과정  
\*\*\* 정회원, 서울대학교 건축학과 조교수

필요하다.

본 논문의 목적은 철근콘크리트 슬래브의 비선형해석을 통해 면외하중과 면내하중을 동시에 받는 슬래브의 거동을 연구하고 해석결과를 바탕으로 지하층 슬래브의 합리적인 설계방향을 제시하는 것이다. 이를 위하여 저자에 의해 개발된 비선형 유한요소해석 프로그램을 사용한다. 재료모델과 비선형해석방법에 대한 자세한 기술은 참고문헌 4에 수록되어 있다.

## 2. 해석방법의 검증

플랫 플레이트 슬래브에 대한 예비연구와 해석방법의 검증단계로 면외하중과 면내압축력을 받는 단순지지 플레이트에 대한 수치해석이 수행되며 해석결과는 Ghoneim과 Macgregor(1994)에 의해 보고된 실험결과와 비교된다. 표 1에서 보는 바와 같이 시험체 C1, C2, C6, C9는 같은 크기와 재료특성을 가지고 있으나 다른 하중조합 및 재하순서를 갖고 있다. C1은 수직하중만을 받는다. C2와 C6는 면내압축력에 이은 수직하중을 받는데, C2는 1축압축력(이하 1축-수직하중)을, C6는 2

축압축력(이하 2축-수직하중)을 받는다. 반면 C9는 수직하중에 이은 1축압축력(이하 수직-1축하중)을 받는다. 그림 3과 4는 시험체 C1, C2, C6, C9의 해석과 실험에 따른 하중-변위 곡선을 나타내는데 다양한 하중조건에 대하여 해석결과가 실험결과에 매우 근접하게 나타난다.

## 3. 해석모델

플랫 플레이트 슬래브의 해석모델이 표 2에 요약되어 있다. 슬래브에 영향을 주는 변수인 하중조합,

표 1 단순지지 플레이트 시험체 (Ghoneim and MacGregor, 1994)

시험체	$L_y$ (mm)	$L_y / L_x$	$L_x / h$	$P_x$ (kN/m)	$P_y$ (kN/m)	$q$ (kPa)	$f'_c$ (Mpa)	$E_c$ (Mpa)
C1	1829	1.0	26.98	0.0	0.0	73.88	25.21	21300
C2	1829	1.0	27.06	0.0	653.9	52.59	25.27	21400
C6	1829	1.0	27.14	657.8	657.8	69.16	25.44	21720
C9	1829	1.0	27.34	0.0	342.4	52.50	24.94	19200

시험체	$F_y$ Mpa	$F_u$ Mpa	철근비 (%)				상단면에서 철근중심까지의 거리 (cm)			
			x-방향		y-방향		x-방향		y-방향	
			상부	하부	상부	하부	상부	하부	상부	하부
C1	450	620	0.383	0.383	0.383	0.383	21.9	56.8	15.6	50.5
C2	450	620	0.385	0.385	0.385	0.385	19.7	57.6	13.4	51.3
C6	450	620	0.386	0.386	0.386	0.386	18.1	56.1	11.0	49.8
C9	450	620	0.389	0.389	0.389	0.389	17.8	56.3	11.5	50.0

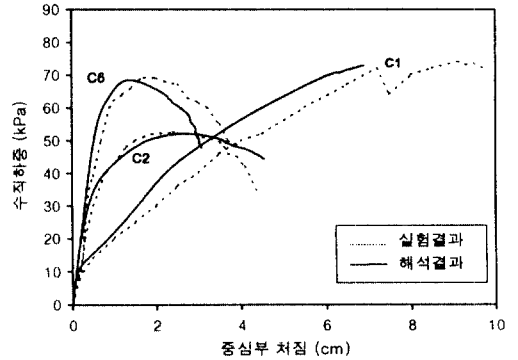


그림 3 단순지지 플레이트의 실험-해석결과

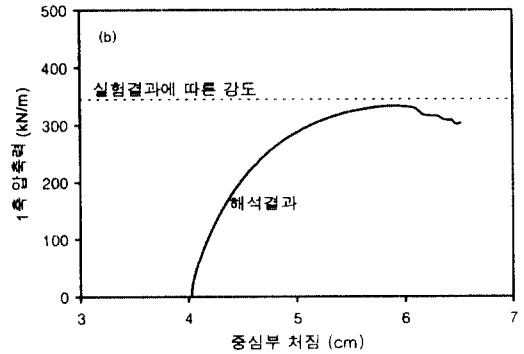


그림 4 시험체 C9의 실험-해석결과

표 2 플랫 플레이트 슬래브 해석모델의 재료특성과 하중조건

해석모델	$L_1$ (cm)	$L_2$ (cm)	$L_1/L_2$	$h$ (cm)	$f_c$ (Mpa)	$E_c$ (Mpa)	하중조합	바닥하중(kPa)
PA1	600	600	1	17	24	23000	V-U	20
PA2	600	600	1	17	24	23000	U-V	20
PA3	600	600	1	17	24	23000	V-B	20
PA4	600	600	1	17	24	23000	B-V	20
PB1	900	600	1.5	25	24	23000	V-U	20
PB2	600	900	0.67	25	24	23000	V-U	20
PB3	900	600	1.5	25	24	23000	V-B ( $P_1:P_2=1:1$ )	20
PB4	900	600	1.5	25	24	23000	V-B ( $P_1:P_2=0.5:1$ )	20
PB5	900	600	1.5	25	24	23000	V-B ( $P_1:P_2=1:0.5$ )	20
PC1, PC2, PC3	600	600	1	17	24	23000	V-U	10, 20, 30
PD1, PD2, PD3	900	600	1.5	25	24	23000	V-U	10, 20, 30
PE1, PE2, PE3	1200	600	2	35	24	23000	V-U	10, 20, 30
PF1, PF2, PF3	600	900	0.67	25	24	23000	V-U	10, 20, 30
PG1, PG2, PG3	600	900	0.67	15	24	23000	V-U	-
PH1, PH2, PH3	600	600	1	17	35	28000	V-U	-
PI1, PI2, PI3	600	600	1	20	24	23000	V-U	-
PJ1, PJ2, PJ3	600	600	1	15	24	23000	V-U	-
PK1, PK2, PK3	600	600	1	13.5	24	23000	V-U	-

\* B-V : 2 축압축력에 이은 수직하중      V-B : 수직하중에 이은 2 축압축력  
 U-V : 1 축압축력에 이은 수직하중 ( $P_1:P_2=1:0$ )      V-U : 수직하중에 이은 1 축압축력 ( $P_1:P_2=1:0$ )

철근비, 형상비, 콘크리트강도, 세장비 등에 따라 해석모델을 PA ~ PK 계열로 분류하였다. 바닥하중에 대한 플랫 플레이트 슬래브의 설계는 국내 철근콘크리트 구조계산규준<sup>1</sup>의 직접설계법에 따른다.

#### 4. 지배하중조건

그림 5는 하중조건이 서로 다른 정방형 플레이트인 PA 계열의 수직하중과 축하중의 상호관계곡선이다. 그림에 나타난 바와 같이 수직-1 축하중을 받는 PA1이 최소강도를 지닌다. 그림 6는 하중조건이 다른 장방형 플레이트인 PB 계열의 상호관계곡선이다. PB 계열은  $L_x/L_y=1.5$ 이고 수직하중에 이은 1 축 또는 2 축하중을 받는다. 그림에 나타난 바와 같이 장방향으로 축하중이 작용하는 PB1이 최소 강도를 지닌다. 앞의 두 연구결과에서 수직하중에 이어 1 축압축력을 받는 경우가 슬래브의 강도를 결정하는 지배하중 조건임을 알 수 있다. 따라서 이후의 해석연구는 지배하중조건인 수직-1 축하중의 경우에 대하여 실시한다. 그림 7과 8은 형상비가 다르고 수직-1 축하중을 받는 PA1, PB1, PB2의 변형모습을 나타낸다.

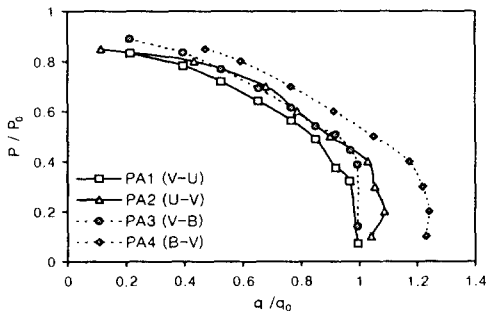


그림 5 정방형슬래브에서 하중조합 및 재하순서의 영향

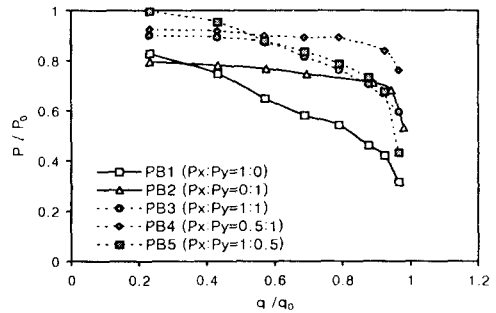


그림 6 장방형슬래브에서 하중조합의 영향

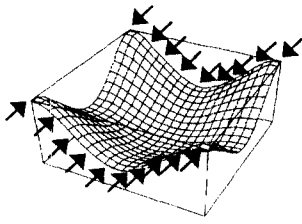


그림 7 PA1의 변형모습 ( $L_1/L_2=1$ )

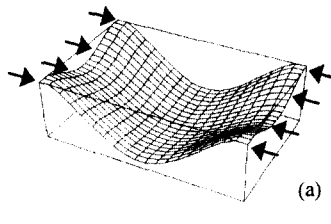
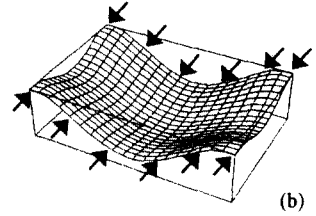


그림 8 (a) PB1 ( $L_1/L_2=1.5$ )과 (b) PB2 ( $L_1/L_2=0.67$ )의 변형모습



### 5. 좌굴계수

모멘트 증대계수법을 플레이트에 적용할 경우 증대모멘트, 임계하중, 좌굴계수 등의 관계는 다음 식과 같다.

$$M = \delta \times M_o \quad (1) \quad \delta = \frac{1}{1 - P/P_{cr}} \quad (2) \quad P_{cr} = \frac{k_m \pi^2 D}{L_1^2} \quad (3)$$

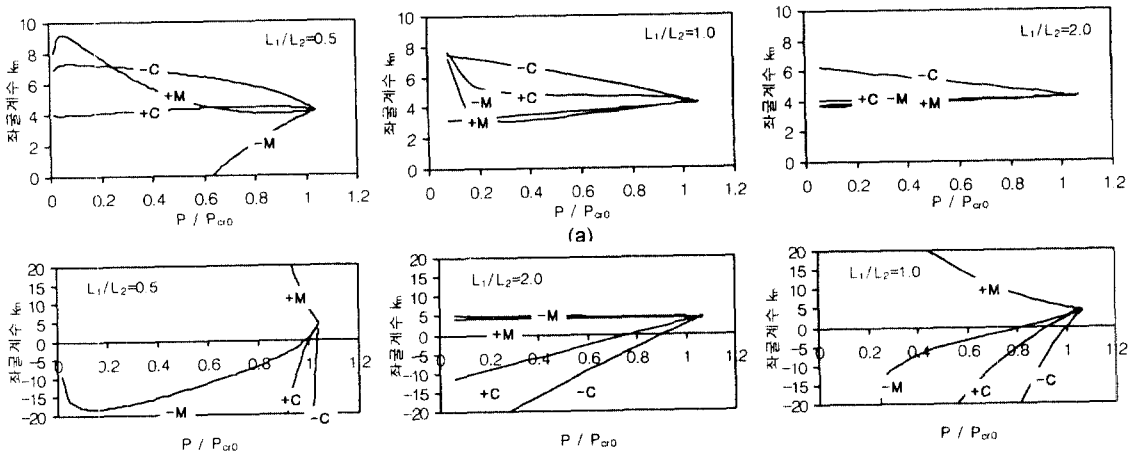
여기서  $D$ 는 탄성휨강성이다. 식(1), (2), (3)에 의해 좌굴계수는 다음과 같이 정의된다.

$$k_m = PL_1^2 / ((1 - M_o/M)\pi^2 D) \quad (4)$$

선형재료와 기하학적 비선형을 고려한 해석을 통하여 슬래브의 각 위치에서 모멘트의 변화를 측정하면  $k_m$ 을 구할 수 있다. 그림 9의 (a)와 (b)는 주열대와 주간대의 각 위치에서 축하중 방향과 그 직각방향의 휨모멘트에 대한  $k_m$ 을 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 좌굴계수  $k_m$ 은 점  $(P/P_{cr0}, k_m) = (1, 4)$ 를 지나고 기울기가  $S$ 인 다음의 선형함수로 이상화할 수 있다.

$$k_m = S(P/P_{cr0}) + (4 - S) \quad (5)$$

형상비( $L_1/L_2$ )에 따른 플랫 플레이트 슬래브 각 지점의  $S$ 값은 표 3과 같다.



\*-C:주열대 부모멘트 -M:주간대 부모멘트 +C:주열대 정모멘트 +M:주간대 정모멘트  $P_{cr0}$ :  $k=4$ 인 경우의 임계하중

그림 9 플랫 플레이트 슬래브 각 지점의 좌굴계수 (a) 1 축하중에 평행한 방향 (b) 1 축하중에 직각방향

표 3 S 값

휨모멘트가 측정되는 방향과 위치		$L_1/L_2$						
		0.5	0.67	0.8	1.0	1.25	1.5	2.0
1 축하중에 평행한 방향	-C	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
	+C	0	0	0	0	0	0	0
	-M	10	5.7	4.5	0	0	0	0
	+M	0	0	0	0	0	0	0
1 축하중에 직각인 방향	-C	n	n	n	n	n	n	n
	+C	n	n	n	n	n	n	n
	-M	n	n	n	20	4	0	0
	+M	n	n	n	n	-12	-4	0

\*n: 고려하지 않음

### 6. 유효휨강성

앞서 정의한 좌굴계수를 바탕으로 플랫 플레이트 슬래브의 유효휨강성이 연구된다. 식(4)와 식(5)에 의해서 각 지점의 모멘트에 대한 유효휨강성은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$D_{eff} = \frac{PL_1^2}{(4-s)\pi^2} \left( \frac{1}{1-M_0/M} - \frac{s}{4} \right) \quad (6)$$

재료 및 기하학적 비선형 해석을 통하여 플랫 플레이트 슬래브에서 철근비, 장단비, 콘크리트강도, 세장비 등의 변수에 따른 유효휨강성의 변화가 분석된다. 해석모델 PC ~ PK 계열의 해석결과에 따른 유효휨강성이 그림 10에 요약되어 있다. 그림의 (a)와 (b)는 각각 주열대와 주간대의 모멘트에 대한 유효휨강성을 나타내는데 이 해석결과를 바탕으로 유효휨강성의 설계식이 제안된다. 그림에 나타난 바와 같이 수직하중능력( $q_0$ )이 증가할수록 유효휨강성이 증가한다는 것을 알 수 있다.

### 7. 모멘트 증대계수법

본 연구에서 제안한 좌굴계수 및 유효휨강성을 이용한 모멘트 증대계수법은 다음 순서를 따른다.

- 1) 슬래브에 수직하중만 가해지는 경우의 1차모멘트( $M_0$ )를 주간대와 주열대의 각 위치에서 구한다.
- 2) 한방향의 1축하중에 대하여 표 3를 참조하여  $L_1/L_2$ 에 따른 좌굴계수의 기울기  $S$ 를 구한다.
- 3) 식(4)에 의해 좌굴계수( $k_m$ )를 구한다. 안전측으로서 표 3의  $S$  값이  $n$ 이 아닌 모든 경우는 좌굴계수를 4로 간주할 수 있다.
- 4) 그림 10에서 바닥하중에 따른 유효휨강성( $D_{eff}$ )을 구한다.
- 5) 식(3)에 의해 임계하중( $P_{cr}$ )을 구한다.
- 6) 식(2)에 의해 모멘트 증대계수( $\delta$ )를 구한다.
- 7) 식(1)에 의해 증대 모멘트( $M$ )를 구한다.  $S \leq 0$ 인 경우는 증대모멘트를 고려하여야 한다.  $S > 0$ 인 경우는  $k_m > 0$ 인 경우에만 증대모멘트를 고려하고 이때 모멘트의 부호는 바뀌어야 한다.
- 8) 결국 슬래브 단면은 증대모멘트와 1축압축력을 동시에 받는 압축재로 설계된다. 그러나  $L_1/L_2 > 1$ 인 경우에 하중방향에 직각인 주간대의 단면은 증대모멘트를 받는 휨재로 설계되어야 한다.

9) 앞서 구한 단면의 직각방향에 대해서도 단계 2)~7)을 반복한다.

실제 설계에는 크리프 효과 및 강성저감계수가 고려되어야 한다.

### 8. 결론

바닥하중 및 1축 또는 2축의 압축력을 받는 플랫 플레이트 슬래브를 연구한 결과 수직하중에 의한 1축압축력을 받는 상태가 슬래브의 강도를 결정하는 지배하중조건임을 알 수 있었다. 이 지배하중조건에 대하여 플랫 플레이트 슬래브의 좌굴계수와 유효휨강성의 분포를 분석하여 그에 따른 설계식을 제안하였다. 슬래브의 각 위치에서 좌굴계수의 변화는 기울기가 다른 축하중의 선형함수로 이상화 할 수 있으며, 수직하중능력( $q_0$ )이 증가할수록 유효휨강성이 증가한다는 것을 알 수 있다. 제안된 좌굴계수와 유효휨강성을 사용하여 전술한 방법과 같이 플랫 플레이트 슬래브에 모멘트 증대계수법을 적용할 수 있다.

지금까지 연구된 내용은 모두 해석된 결과를 바탕으로 한다. 따라서 추후 위의 해석결과를 검증하는 여러 실험들이 수행되기를 기대한다. 또한 크리프 효과 및 드롭페일이나 보가 존재하는 다른 슬래브시스템에 대한 추가연구도 필요하다.

### 참고 문헌

1. “철근콘크리트 구조계산규준(1994)”, 대한건축학회, pp68~73, pp125~139
2. Ghoneim, M.G. and MacGregor, J. G.(1994), “Tests of Reinforced Concrete Plates under Combined Inplane and Lateral Loads”, Structural J., ACI, 91(1).
3. Ghoneim, M.G. and MacGregor, J. G.(1994), “Behavior of Reinforced Concrete Plates under Combined Inplane and Lateral Loads”, Structural J., ACI, 91(2).
4. Park, H. and Klingner, R. E.(1997), “Nonlinear Analysis of RC Members Using Plasticity with Multiple Failure Criteria”, J. Struct. Engrg., ASCE, 123(5), pp643~651
5. Timoshenko, S. P. and Gere, J. M., “Theory of Elastic Stability”, Second Ed, McGraw-Hill Inc. 1961, pp319~347.

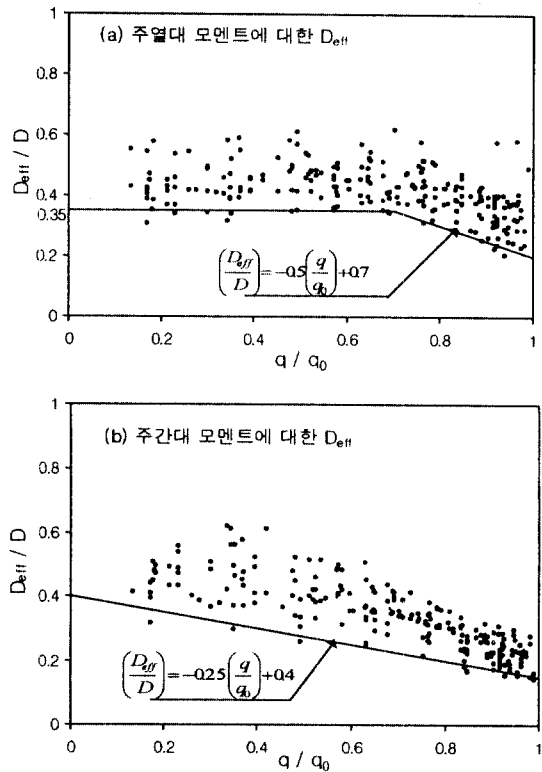


그림 10 유효휨강성( $D_{eff}$ )의 분포