

---

# 면내 압축력 및 면외 바닥하중을 받는 플랫 플레이트 슬래브

RC Flat Plate Subject to Combined In-Plane Compressive  
and Out-of-Plane Floor Loads



박홍근\*

Park, Honggun

---

## ABSTRACT

This paper presents a numerical study on the flat plates in deep basements, subjected to out-of-plane floor load and in-plane compressive load due to soil and hydraulic lateral pressure. For nonlinear finite element analysis, a computer program addressing material and geometric nonlinearities is developed. The validity of the numerical model is established by comparison with existing experiments performed on plates simply supported on four edges. The flat plates to be studied are designed according to the Direct Design Method in Korean Building Code for Structural Concrete. Through numerical study on the effects of different load combinations and loading sequence, the load condition that governs the strength of the flat plates is determined. For the plates under the governing load condition, parametric studies are performed to investigate variations of the strength with reinforcement ratio, aspect ratio, concrete strength, and slenderness ratio. Based on the numerical results, the floor load magnification factor is proposed.

keywords : axial compression, finite element analysis, flat plate, reinforced concrete, slenderness, two-way slab

---

\* 정회원, 서울대학교 건축학과 전임강사

• 본 논문에 대한 토의를 1999년 6월 30일까지 학회로 보내  
주시면 1999년 8월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

## 1. 서론

최근 높은 지가로 인하여 도심의 대형건물들에 대규모의 주차장을 확보하기 위한 지하 9층 정도의 깊은 지하층이 설치되는 것을 어렵지 않게 발견할 수 있다. 지하 30m 이상의 깊이를 갖는 이 지하구조는 큰 토압 및 수압을 받고 있으며 (Fig. 1) 따라서 지하층 바닥슬래브는 바닥하중과 함께 토압과 수압으로 인한 면내 압축력을 동시에 받고 있다.

지하층 바닥구조로서 두방향 슬래브의 일종인 플랫폼플레이트(flat plate)가 흔히 사용되고 있다. (Fig. 2) 그 이유는 지판(drop panel)이나 보가 없는 플랫폼플레이트 구조가 시공시 작업능률을 향상시키고 굴토깊이를 줄일 수 있는 장점을 갖고 있기 때문이다. 일반적으로 지하층바닥에 재하되는 중력하중은 계수하중으로서 주차장에 대하여  $1 - 2 \text{ t/m}^2$  이며, 기계실과 전기실에 대해서는 이보다 더 클 수 있다. 지하 7층 또는 8층에 재하되는 토압과 수압에 의한 횡하중은 계수하중으로서  $150 - 300 \text{ t/m}$  에 달한다. 따라서 이 큰 횡하중에 의하여 발생하는 면내 압축력이 플랫폼플레이트 슬래브에 세장효과를 일으킬 수 있다.

20년 이상의 기간동안 이러한 깊은 지하 구조들이 시공되어 왔으나, 많은 구조설계자들은 지하층 바닥슬래브 설계시 면내 압축력의 영향을 무시하고 있으며 바닥하중만을 고려하고 있다. 최근에는 이러한 깊은 지하층의 설계 및 시공이 증가함에 따라 구조설계자들이 면내 압축력의 중요성을 인지하기 시작하였으며, 이 압축력의 영향을 설계에 반영하고 있다. 그러나 국내외를 막론하고 현재의 철근콘크리트 설계기준은 면내하중을 받는 두방향 슬래브의 설계에 관한 조항을 제공하지 않고 있으며, 이에 대한 학술적 연구도 전무한 실정이다. 따라서 구조설계자들은 플랫폼플레이트 슬래브의 주열대와 주간대를 하나의 압축재로 간주하여 압축재의 설계에 적용되고 있는 모멘트증대법을 사용하고 있다. 그러나 이 모멘트증대법은 원래 기둥의 설계를 위하여 개발되었으므로, 이 방법 및 관련 조항들을 플랫폼플레이트 슬래브에도 적용할 수 있는지의 여부가 검증되어야 한다.

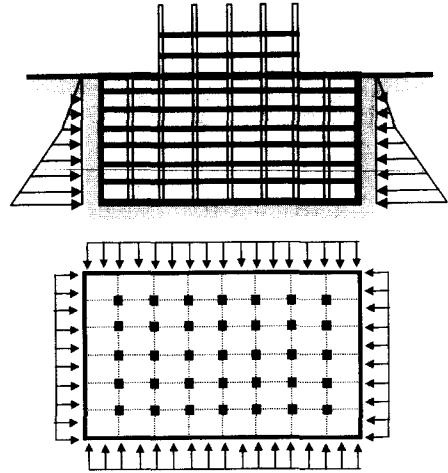


Fig. 1 Basement Structure under Soil and Hydraulic Lateral Pressure

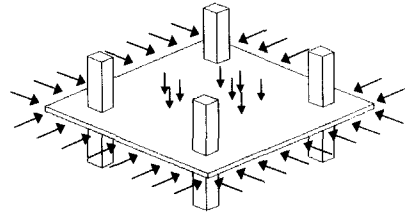


Fig. 2 Flat Plate Subject to Combined In-Plane Compressive and Out-of-Plane Floor Loads

면내와 면외의 하중을 받는 플랫폼플레이트 슬래브는 휨모멘트를 받는 일종의 압축재의 성격을 갖고 있으나 그 외관과 치수 뿐만 아니라 특성 및 하중조건이 기둥과는 다음과 같은 면에서 구별된다.

1) 일반적으로 면내하중은 면외하중에 비례하지 않는다. 면외 중력하중은 면내압축을 일으키는 토압 및 수압과는 무관하며 따라서 하중조합 및 하중재하순서는 일정하지 않다. 면내하중이 재하되기 전에 극한 면외하중이 재하될 수 있으며, 그 반대 현상이 나타날 수도 있다.

2) 한 방향의 횡하중은 그 직각방향의 횡하중과 무관할 수 있으므로, 슬래브는 1축압축력 또는 2축압축력을 받을 수 있다.

3) 현재의 설계기준은 두방향 슬래브의 처짐을 제한하기 위하여 최소 두께를 규정하고 있기 때

Table 1 Summary of Experimental Program for Plates Simply Supported on Four Edges (Ghoneim and MacGregor<sup>6,7</sup>)

specimen	$l_v$ mm	$L_y/L_x$	$L_x/h$	$P_x$ t/m	$P_y$ t/m	$q$ t/m <sup>2</sup>	$f'_c$ kg/cm <sup>2</sup>	$F_c$ t/cm <sup>2</sup>	$\rho$ %
C1	1829	1.0	26.98	0.00	0.00	7.39	252.0	213.0	0.383
C2	1829	1.0	27.06	0.00	65.39	5.26	252.7	214.0	0.385
C6	1829	1.0	27.14	65.78	65.78	6.92	254.4	217.2	0.386
C9	1829	1.0	27.34	0.00	34.24	5.25	249.4	192.0	0.389

Note :  $F_y = 4.5 \text{ t/cm}^2$ ,  $F_u = 6.2 \text{ t/cm}^2$

Reinforcement is uniformly distributed at the top and the bottom in both directions.

문에 슬래브의 경간 길이 대 두께의 비, 즉 슬래브의 세장비가 비교적 일정하다. ACI 318-95<sup>(3)</sup>에 따르면 연속된 슬래브의 경우, 세장비는 철근의 강도에 따라  $L_n/31 - L_n/36$ 의 범위이다.

4) 철근비가 낮고 슬래브내 분포가 일정하지 않다. 최근 MacGregor와 그의 동료 연구진(Aghayere<sup>(4)</sup>, Massicotte and Elwi<sup>(8)</sup>, Ghoneim<sup>(6,7)</sup>)은 4 변이 단순 지지되어 있는 철근콘크리트 판에 대한 실험 또는 해석연구를 실시하였다. 현재 면내 압축력을 받는 플랫플레이트 슬래브에 대한 연구는 보고되지 않았으나, 단순지지 판에 대한 이러한 연구는 플랫플레이트 슬래브의 거동특성을 이해하는데 도움을 주고 있다.

본 연구는 면내압축과 면외 바닥하중을 동시에 받는 플랫플레이트 슬래브의 거동특성에 관한 기초연구로서 비선형 유한요소해석을 사용한 수치해석 연구를 통하여 하중조합, 하중재하순서, 철근비, 형상비, 콘크리트 강도, 세장비에 따른 슬래브 강도의 변화를 연구한다.

## 2. 수치해석방법

면내와 면외 하중을 받는 세장한 판구조의 해석을 위한 유한요소모델은 세가지 요소를 고려하여야 한다. 재료모델은 2축 압축에 의한 강도의 증가현상과 인장균열을 동시에 고려할 수 있어야 하며, 유한요소는 판구조의 면내거동 및 휨거동을 나타낼 수 있어야 하며, 이 유한요소 및 해석방법은 대변형으로 인한 세장효과를 나타낼 수 있어야 한다.

이러한 수치해석방법으로서 저자에 의하여 개발된 재료모델 및 유한요소해석방법을 사용하여

다.<sup>(2,9)</sup> 철근콘크리트의 재료모델로서 소성이론과 파괴모델의 통합방법을 사용하였다. 압축파괴와 인장균열의 다중파괴기준을 사용하는 이 재료모델은 철근콘크리트의 거동 특성인 인장균열에 의한 인장응력의 저하와 다축 압축에 의한 압축강도의 증가현상을 동시에 나타낼 수 있다. 유한요소로서는 면내거동 및 휨거동을 나타낼 수 있는 9 절점의 쉘요소를 사용하였다. 기하학적 비선형 효과를 고려하기 위하여 강성행렬의 구성에서 Updated Lagrangian formulation을 사용하였으며, 쉘 요소의 형태를 나타내는 각 절점의 좌표와 그 절점에서의 접면에 대한 직각방향벡터는 해당절점의 변위에 의하여 계속하여 수정된다. 재료모델 및 비선형 해석방법은 참고문헌 [2]와 [9]에 자세히 나타나 있다.

## 3. 해석방법의 검증

플랫플레이트 슬래브에 대한 기초연구로서 그리고 해석모델의 검증을 위하여 4변이 단순 지지된 판에 대한 해석을 수행하였다. Ghoneim과 MacGregor<sup>(6,7)</sup>가 실험한 시험체 C1, C2, C6, C9의 특성이 Table 1에 요약되어 있다. 각 시험체는 거의 같은 크기와 특성을 갖고 있으나 서로 다른 하중조건을 갖고 있다. C1은 수직방향의 면외 바닥하중(이하 수직하중 또는 바닥하중)을 받으며, C2와 C6는 면내 압축하중과 이후에 재하되는 면외 수직하중의 조합하중을 받는다. 면내 압축하중으로서 C2는 1축 압축하중을 받고 있는데 비하여 C6는 2축 압축하중을 받는다. 반면에 C9는 수직하중과 이후에 재하되는 1축압축하중을 받는다.

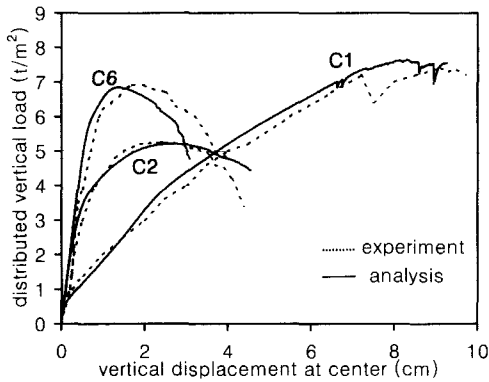


Fig. 3 Effect of Different Load Combinations on Plates Simply Supported on Four Edges.

Fig. 3은 서로 다른 하중조합을 받고 있는 C1, C2, C6의 해석결과와 실험결과를 비교하고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 C1은 하중-변위 곡선의 초기에 휨균열에 의한 강성의 저감을 보이고 있다. 반면에 C2와 C6는 면내압축력으로 인하여 상대적으로 큰 강성을 나타내고 있다. 면내 압축력은 판의 휨강성에 두 개의 상반된 영향을 주고 있다. 면내 압축력은 수직하중에 의하여 발생할 수 있는 휨균열을 억제하여 휨강성을 증가시킨다. 반면에 과도한 수직변위가 발생하는 경우에는 세장효과를 일으켜서 휨강성의 저하를 가져온다. 1축 압축을 받고 있는 C2의 경우에는 세장효과가 지배적이며, 따라서 휨강성의 저하가 나타난다. 그러나 2축 압축을 받는 C6는 C2보다 큰 강도를 나타내는데, 그 이유는 콘크리트가 2축 압축상태에서 증가된 강도를 나타내며, 2축 압축력으로 인하여 양방향의 휨강도가 모두 증가하기 때문이다.

위에서 언급한 바와 같이 C9는 다른 하중순서, 즉 수직하중과 이후에 재하되는 1축 압축하중의 조합하중을 받고 있다. Fig. 4는 실험과 수치해석결과를 비교하고 있다. 먼저 수직하중으로서 C2의 수직하중 재하능력인  $5.25 \text{ t/m}^2$  이 재하되어 일정하게 유지되며, 이 후에 1축압축하중이 재하된다. Ghoneim과 MacGregor는 C9의 1축압축 재하능력이  $34.2 \text{ t/m}$ 로서, 이는 1축압축과 이후에 재하되는 수직하중을 받는 C2의 재하능력의 절반에 불과하다고 보고하였다. 이러한

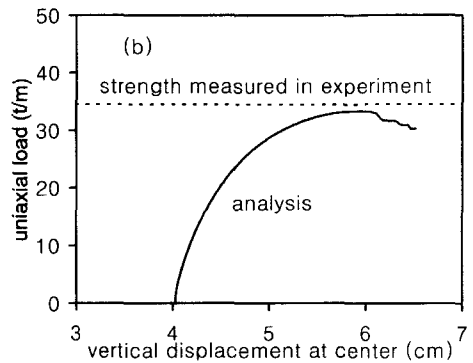
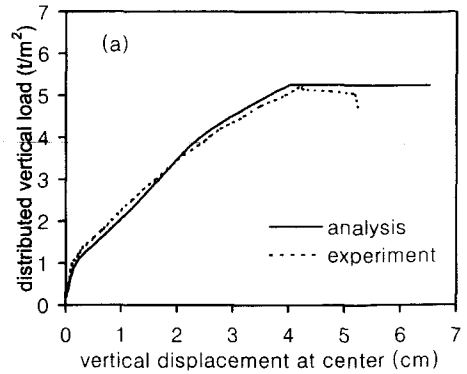


Fig. 4 Comparison of Experiment and Numerical Results for C9 under Vertical Load and Subsequently Applied Uniaxial Load:  
(a) Vertical Load-Displacement Curve;  
(b) Uniaxial Load-Vertical Displacement Curve.

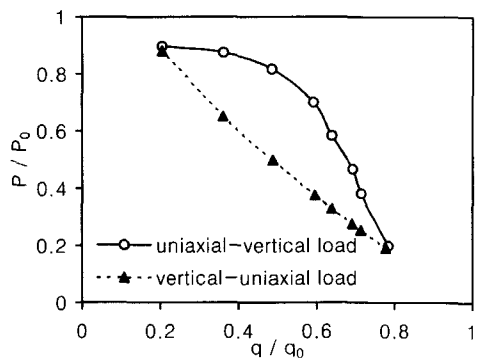


Fig. 5 Effect of Loading Sequence on Plates Simply Supported on Four Edges

결과는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 수치해석결과에 의해서도 뒷받침된다.

다음은 하중재하순서에 따른 강도의 변화를 보다 면밀히 연구하였다. 수치해석에 사용된 판의 크기와 특성은 C2와 같다. Fig. 5는 다른 재하순서의 하중 즉, 1축압축후 수직하중과 수직하중 후 1축압축하중을 받는 판에 대하여 압축과 수직하중 재하능력을 나타내는  $P/P_0 - q/q_0$  관계곡선을 비교하고 있다. 이 그림에서  $P_0$ 는 단위길이당 압축재하능력으로서  $f'_c h$ 이며,  $q_0$ 는 단위면적당 수직하중 재하능력으로서 수치해석을 통하여 구할 수 있다. 그림에 나타난 바와 같이  $q/q_0$ 의 전 영역에 걸쳐 수직하중 후 1축압축을 받는 판의 강도가 1축압축 후 수직하중을 받는 판의 강도보다 작다. 그 이유는 수직하중이 먼저 재하될 경우, 이 수직하중에 의하여 발생된 휨균열과 수직방향 처짐이 압축력에 의한 세장효과에 의하여 가속화되기 때문이다. Ghoneim 과 MacGregor는, 수직하중과 1축압축력의 비례하중을 받는 판의 강도는 1축압축 후 수직하중을 받는 판의 강도와 일치한다고 보고하였다.

하중조합 및 재하순서에 대한 앞서의 연구결과를 종합하면, 수직하중 후 1축압축의 조합하중이 판의 강도를 결정하는 하중조건이라는 사실과, 또한 이 연구에서 사용하고 있는 해석방법이 면내와 면외 하중을 받는 판의 거동을 비교적 잘 나타낸다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 해석모델

플랫플레이트 슬래브의 거동은 단부조건, 연속되는 스패ん길이의 비, 하중조건 등에 의하여 영향을 받는다. 이 논문에서는 플랫플레이트 슬래브에 대한 기초적인 연구로서, Fig. 2와 같은 일반적인 연속슬래브를 다음과 같은 가정을 이용하여 이상화하였다. 1) 모든 슬래브는 각 방향 같은 경간 길이의 직사각형 평면을 갖는다. 2) 전단파괴는 일어나지 않는다. 3) 기둥은 수직방향 이외에 다른 지지력을 제공하지 않는다. 4) 모든 슬래브는 같은 크기의 균등히 분포된 수직하중과 면내 축하중을 받으며 따라서 수직방향 처짐과 좌굴이 동시에 발생한다. 위의 가정에 의하여, 연

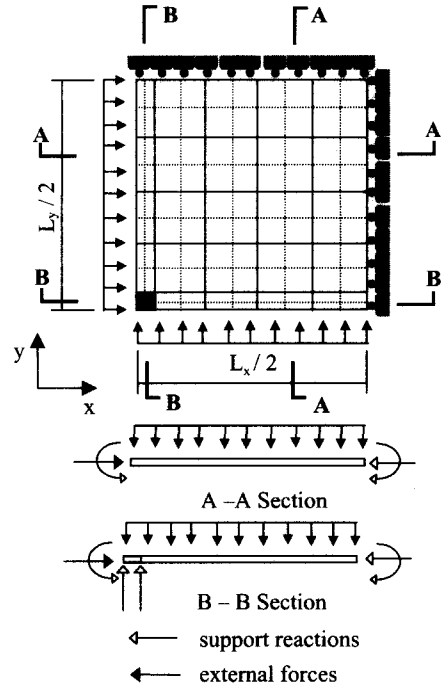


Fig. 6 Finite Element Model of Flat Plate

속된 플랫플레이트 슬래브는 네 개의 모서리 기둥을 갖는 하나의 판으로 이상화할 수 있으며 다시 Fig. 6에 나타난 바와 같이 대칭성을 이용하여 1/4모델로 축소할 수 있다.

수치해석연구에 사용된 슬래브의 해석모델의 특성이 Table 2와 3에 요약되어 있다. 이 슬래브들은 일반적인 바닥하중의 범위인  $1 - 3 \text{ t/m}^2$ 에 대하여 국내 철근콘크리트설계기준<sup>(1)</sup>의 직접설계법에 의하여 설계되었다. PG, PJ, PK를 제외 모든 슬래브의 두께는 두방향슬래브의 최소두께인  $L_n/33$ <sup>(3)</sup>을 만족하고 있다. 철근비와 철근의 배치는 직접설계법을 따르고 있으나, 하단근은 슬래브 전체에 걸쳐 연속되도록 배치하였다.

#### 5. 지배하중조건

앞서 밝힌 바와 같이 바닥하중 및 토압과 수압에 의한 면내 압축력을 받는 슬래브에서는 하중조합 및 재하순서가 일정하지 않으므로, 슬래브의 강도를 지배하는 하중조건을 파악하는 것이

Table 2 Summary of Analytical Program for Flat Plates

Model	$L_1$ cm	$L_2$ cm	$h$ cm	$f'_c$ kg/cm <sup>2</sup>	$E_c$ t/cm <sup>2</sup>	load condition
PA1	600	600	17	240	230	V-U
PA2	600	600	17	240	230	U-V
PA3	600	600	17	240	230	V-B <sup>a</sup>
PA4	600	600	17	240	230	B <sup>a</sup> -V
PB1	900	600	25	240	230	V-U
PB2	600	900	25	240	230	V-U
PB3	900	600	25	240	230	V-B <sup>a</sup>
PB4	900	600	25	240	230	V-B <sup>b</sup>
PB5	900	600	25	240	230	V-B <sup>c</sup>
PC1,PC2,PC3	600	600	17	240	230	V-U
PD1,PD2,PD3	900	600	25	240	230	V-U
PE1,PE2,PE3	1200	600	35	240	230	V-U
PF1,PF2,PF3	600	900	25	240	230	V-U
PG1,PG2,PG3	600	900	15	240	230	V-U
PH1,PH2,PH3	600	600	17	350	280	V-U
PI1,PI2,PI3	600	600	20	240	230	V-U
PJ1,PJ2,PJ3	600	600	15	240	230	V-U
PK1,PK2,PK3	600	600	13.5	240	230	V-U

Note : Column size = 60cm x 60cm for 600cm x 600cm plates  
= 80cm x 80cm for other plates

B-V : Biaxial compressive load and subsequently applied vertical load

V-B : Vertical load and subsequently applied biaxial compressive load

U-V : Uniaxial compressive load and subsequently applied vertical load ( $P_1:P_2=1:0$ )

V-U : Vertical load and subsequently applied uniaxial compressive load ( $P_1:P_2=1:0$ )

<sup>a</sup> $P_1:P_2=1:1$ ; <sup>b</sup> $P_1:P_2=0.5:1$ ; <sup>c</sup> $P_1:P_2=1:0.5$

Table 3 Reinforcement Ratios for Flat Plates

Model	long span				short span				$w$ t/m <sup>2</sup>
	column strip		middle strip		column strip		middle strip		
	ends %	center %	ends %	center %	ends %	center %	ends %	center %	
PC1	0.483	0.201	0.155	0.133	0.483	0.201	0.155	0.133	1.1
PA series,PC2	1.040	0.412	0.315	0.270	1.040	0.412	0.315	0.270	2.2
PC3	1.647	0.615	0.467	0.399	1.647	0.615	0.467	0.399	3.2
PD1,PF1,PG1	0.480	0.200	0.154	0.132	0.283	0.120	0.075	0.075	1.1
PBseries,PD2,PF2,PG2	1.025	0.410	0.314	0.269	0.586	0.243	0.092	0.079	2.2
PD3,PF3,PG3	1.610	0.611	0.464	0.397	0.884	0.358	0.135	0.116	3.2
PE1	0.431	0.183	0.141	0.121	0.183	0.078	0.075	0.075	1.1
PE2	0.924	0.373	0.286	0.245	0.374	0.157	0.075	0.075	2.2
PE3	1.429	0.554	0.423	0.362	0.555	0.230	0.075	0.075	3.3
PH1,PI1,PJ1,PK1	0.483	0.201	0.155	0.133	0.483	0.201	0.155	0.133	-
PH2,PI2,PJ2,PK2	1.040	0.412	0.315	0.270	1.040	0.412	0.315	0.270	-
PH3,PI3,PJ3,PK3	1.647	0.615	0.467	0.399	1.647	0.615	0.467	0.399	-

Note : Minimum reinforcement is 0.075%(=0.15%/2) at the top and the bottom.

Concrete cover + 1/2 diameter of a bar = 3cm.

$F_s = 4$  t/cm<sup>2</sup>,  $E_s = 2100$  t/cm<sup>2</sup>,  $w =$  factored vertical load per unit area.

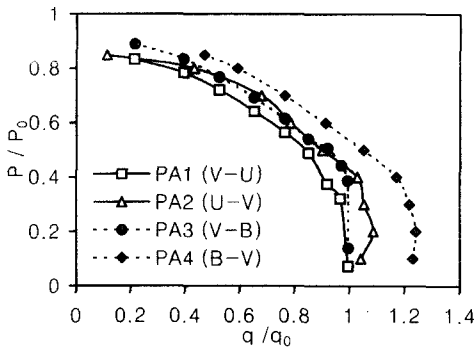


Fig. 7 Effect of Load Combinations and Loading Sequence on Square Plates

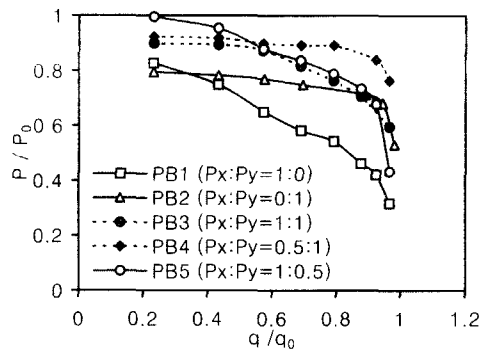


Fig. 8 Effects of Load Combinations on Rectangular Plates

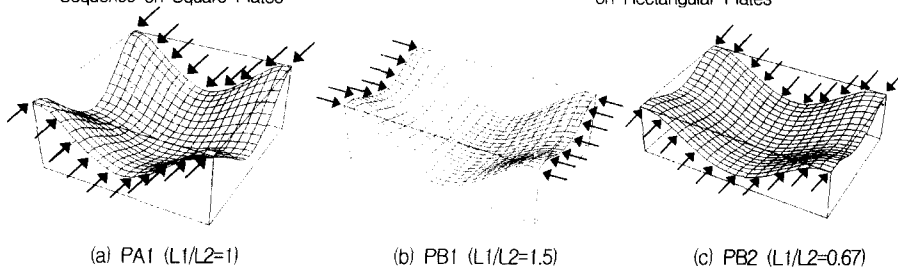


Fig. 9 Deformed Shapes of (a) PA1 (L1/L2=1); (b) PB1 (L1/L2=1.5); (c) PB2 (L1/L2=0.67)

중요하다. Fig. 7은 다른 하중조합 및 재하순서를 갖는 정방향 평면의 PA 슬래브에 대한  $P/P_0 - q/q_0$  관계곡선을 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 수직하중후 1축압축하중의 조합하중을 받는 PA1이 가장 작은 강도를 나타낸다. 이러한 현상은 4 변이 단순지지된 판에 대한 연구에서도 관찰되었다.(Fig. 5) 그러나 플랫폼레이트에서 하중조합 및 재하순서에 의한 강도차이는 단순지지된 판의 강도차이보다 뚜렷하지 않다. 4개의 기둥에 의하여 지지되는 연속된 플랫폼레이트 슬래브에서는, 연속성으로 인하여 중앙의 수직변위가 상대적으로 작으며, 축하중이 전달되는 모서리도 수직방향으로 이동하므로, 중앙과 모서리의 변위차가 크지 않으며, 결과적으로 세장효과가 크지 않다. Fig. 9(a)는 PA1의 변형 형태를 나타내고 있다.

Fig. 8은 다른 하중조합을 갖는 직사각형 평면의 PB슬래브에 대한  $P/P_0 - q/q_0$  관계곡선을 비교하고 있다. 이 슬래브들은  $L_x/L_y = 1.5$  인 형상비를 갖고 있으며, 수직하중 후 면내축하중의 조합하중을 받고 있다. PB1과 PB2는 각각  $P_x$ 와

$P_y$ 의 1축압축력을 받고 있으며, PB3, PB4, PB5는 각각  $P_x/P_y = 1.0, 0.5, 2.0$  인 2축압축력을 받고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 일반적으로  $P_x$ 를 받는 PB1이 가장 낮은 강도를 나타내며, 작은  $q/q_0$  영역에서는  $P_y$ 를 받는 PB2가 가장 작은 강도를 나타낸다. 이것은 어떠한  $q/q_0$ 에 대해서도 장변 또는 단변 방향의 1축압축력을 받는 슬래브의 강도가 최저한계를 나타낸다는 것을 가리킨다. Fig. 9(b)와 (c)는 PB1과 PB2의 변형 형태를 나타낸다.

위에서 설명한 바와 같이 다른 하중조합 및 재하순서를 갖는 정사각형과 직사각형 플랫폼레이트 슬래브에 대한 연구결과는 수직하중후 1축압축의 조합하중이 슬래브의 강도를 지배하는 하중조건이라는 사실을 보여주고 있다. 이것은 수직하중과 각 방향의 1축압축의 조합하중을 받도록 설계된 슬래브는 어떠한 하중조합과 재하순서의 하중이라도 지지할 수 있다는 것을 의미한다.

## 6. 변수연구

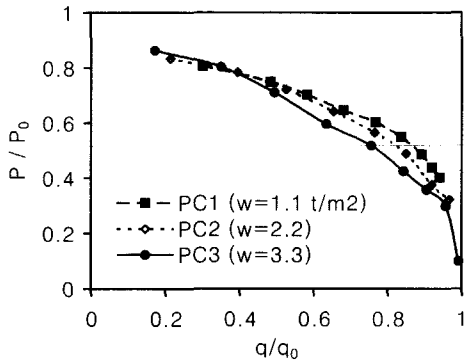


Fig. 10 Effect of Reinforcement Ratio

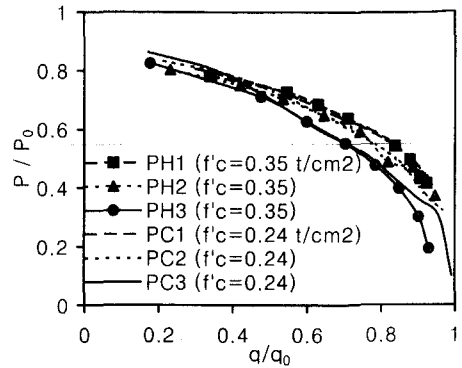


Fig. 13 Effect of Concrete Strength

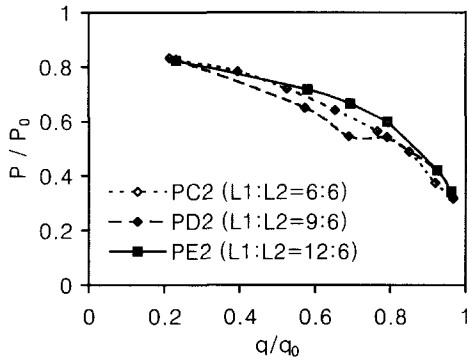


Fig. 11 Effect of Aspect Ratio

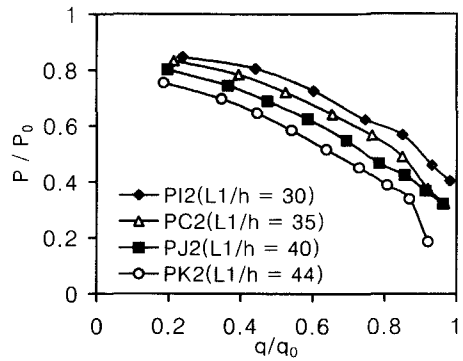
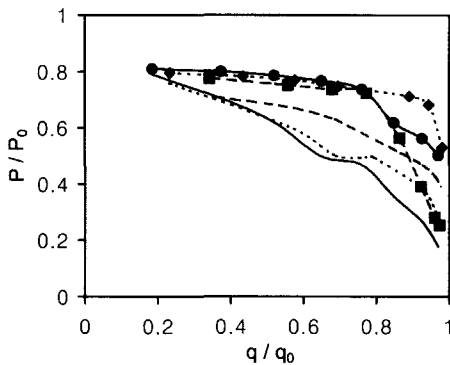


Fig. 14 Effects of Slenderness Ratio



uni-axial load parallel to long span      uni-axial load parallel to short span

--- PD1(L1:L2=9:6)      -■- PF1(L1:L2=6:9)  
 ..... PD2(L1:L2=9:6)      -◆- PF2(L1:L2=6:9)  
 — PD3(L1:L2=9:6)      -●- PF3(L1:L2=6:9)

Fig. 12 Effect of Direction of Uniaxial Load

지배하중조건인 수직하중 후 1축압축하중의 조합하중을 받는 슬래브에 대하여 철근비, 형상비, 콘크리트 강도, 세장비에 따른 슬래브 강도의 변화를 연구하기 위한 변수연구를 실시하였다.

Table 2와 3에 나타난 바와 같이 PC1, PC2, PC3는 각각 1.1, 2.2, 3.2 t/m<sup>2</sup>의 바닥하중을 받도록 설계되었다. Fig. 10은 PC 슬래브에 대하여  $P/P_0 - q/q_0$  관계곡선을 보여주고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 철근비의 차이에도 불구하고 유사한 상호관계곡선을 나타내고 있으며,  $q/q_0$ 이 1에 가까운 영역에서는 철근비가 가장 작은 PC1이 가장 큰 강도를 나타낸다. 이 관계곡선은 점  $(P/P_0, q/q_0) = (1, 0)$ 에 도달하지 않는데, 그 이유는 슬래브단면의 상하단에 철근비가 다르므로 단면성능의 편심이 발생되어 순수 압축력에 의해서도 모멘트가 발생하기 때문이다.



PC, PD, PE 슬래브는  $L_1/L_2 = 1.0, 1.5, 2.0$ 의 다른 형상비를 갖고 있으나, 거의 같은 세장비를 갖도록 설계되었다. 이 슬래브는 수직하중 후 장변방향으로 재하되는 1축압축력을 받고 있다. Fig. 11은 PC2, PD2, PE2에 대한 관계곡선을 비교하고 있다. 이 그림에 나타난 바와 같이 다른 형상비에도 불구하고 관계곡선이 비슷하다. 이는 슬래브가 다른 형상비를 갖는다 하더라도 세장비가 같으면 대등한 관계곡선을 나타낸다는 것을 가리킨다.

PF 슬래브의 형상비와 특성은 PD와 같으나 1축압축력이 장변방향이 아닌 단변방향으로 재하된다. Fig. 12는 PD와 PF에 대한  $P/P_0 - q/q_0$  관계곡선을 비교하고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 PF2와 PF3는 PD2와 PD3보다 큰 강도를 타낸다. 이는 단변방향에 대한 세장비가 장변방향에 대한 세장비보다 작으므로 세장효과도 작기 때문이다. 그러나  $q/q_0$  이 큰 영역에서는 PF1의 강도가 PD1보다 작다. 이는 철근비가 매우 작은 경우에는 단변방향의 압축력을 받는 경우가 더 작은 강도를 나타낼 수 있다는 것을 가리킨다.

PH 슬래브는 PC와 같은 형상 및 특성을 갖고 있으나  $f'_c = 350 \text{ kg/cm}^2$ 의 보다 큰 콘크리트 강도를 갖고 있다. Fig. 13은 PH와 PC 슬래브 강도를 비교하고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 다른 콘크리트 강도에도 불구하고 비슷한 관계곡선을 나타내고 있다.

PI, PC, PJ, PK 슬래브는 각각 20, 17, 15, 13.5 cm의 두께를 갖도록 설계되었으며, 따라서 각각의 세장비는 30, 35, 40, 44이다. Fig. 14는 세장비에 따른 관계곡선의 변화를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 일정한  $q/q_0$ 에 대하여 세장비가 증가함에 따라  $P/P_0$ 가 감소됨을 관찰할 수 있다.

앞서 설명한 변수연구에 의한 해석결과는  $P/P_0 - q/q_0$  관계곡선이 형상비와 콘크리트 강도보다는 세장비와 철근비에 의하여 영향을 받는다는 사실을 보여주고 있다.

## 7. 바닥하중중대계수

위에서 설명한 수치해석연구를 통하여 여러

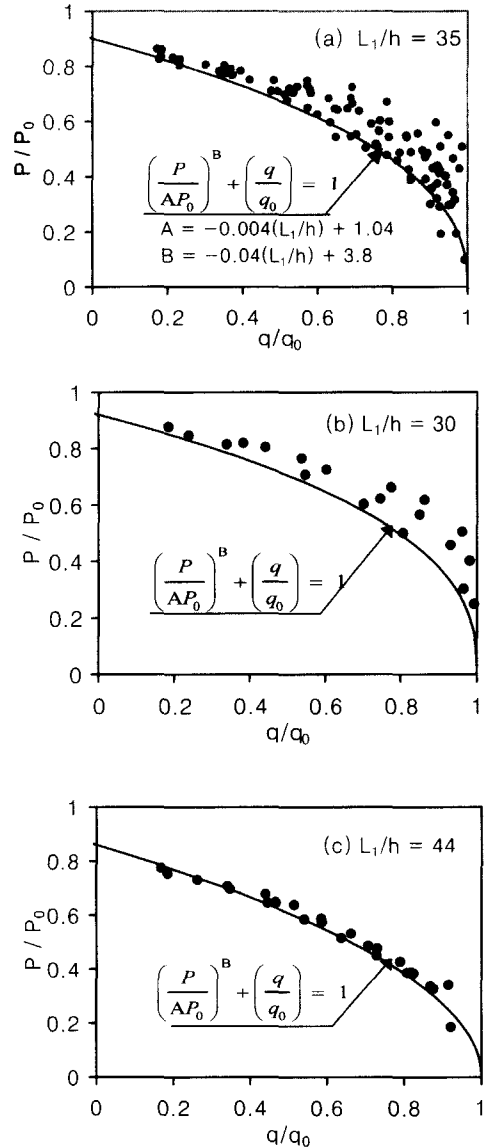


Fig. 15 Summary of Analytical Results and Proposed Interaction Curve: (a)  $L_1/h = 35$  (PC, PD, PE, and PH series); (b)  $L_1/h = 30$  (PI series); (c)  $L_1/h = 44$  (PK series)

가지 변수에 대한 플랫폼레이트 슬래브의 강도변화를 연구하였다. 이 해석결과가 Fig. 15에 요약되어 있다. Fig. 15 (a), (b), (c)는 세장비가 대략 35, 30, 44인 플랫폼레이트 슬래브에 대한  $P/P_0$  과  $q/q_0$ 의 상호관계를 나타내고 있다. 또한 이 그림에 나타난 바와 같이, 본 연구에서는 수치해석결과를 바탕으로 세장비의 함수로 정의

되는  $P/P_0 - q/q_0$  관계곡선을 제안한다.

$$\left(\frac{P}{AP_0}\right)^B + \left(\frac{q}{q_0}\right) = 1 \quad (1)$$

$A = -0.004(L_1/h) + 1.04$ ,  $B = -0.04(L_1/h) + 3.8$ ,  $P$ 는 설계 1축압축하중이며,  $P_0$ 는 슬래브의 1축압축하중 재하능력으로서 약  $0.85f'_c h$ 이다.  $q$ 는 설계바닥하중이며,  $q_0$ 는 슬래브의 바닥하중 재하능력이다. 이 제안된 관계곡선은 수치 통계적인 결과는 아니며 단순히 해석결과의 최저치를 가리킨다. 또한 이 관계곡선은 세장비가 30에서 44사이인 슬래브에만 적용할 수 있다. 위에서 설명한 바와 같이 이 관계곡선은 세장비 뿐만 아니라 철근비에 의하여 영향을 받는다. 그러나 Fig. 12에 나타난 바와 같이 강도에 대한 철근비의 영향은 1축하중의 방향에 따라 다르며, 또한 슬래브의 각 위치에서 철근비가 일정하지 않기 때문에 철근비의 함수로서 관계곡선을 나타내기는 어렵다.

이 제안된  $P/P_0 - q/q_0$  관계곡선을 사용하는 바닥하중증대법을 플랫플레이트 슬래브의 설계에 적용할 수 있다. Eq. 1에서 설계축하중  $P$ 를 지지하기 위하여 필요한 슬래브의 바닥하중 재하능력  $q_0$ 를 구할 수 있다.

$$q_0 = \delta_q q$$

$$\delta_q = \frac{1}{1 - \left(\frac{P}{AP_0}\right)^B} \quad (2)$$

여기서  $\delta_q$ 는 바닥하중증대계수이다. 플랫플레이트 슬래브는  $q_0$ 을 받는 순수한 휨부재로서

설계할 수 있으며, 압축력과 휨의 조합응력을 고려할 필요가 없다. 그러나 이 방법은 직접설계법에 의하여 설계된 연속된 플랫플레이트 슬래브에만 적용할 수 있다. 또한 이 증대계수에 대한 크리이프 효과도 추후에 연구되어야 할 것이다.

서로 다른 스펠 길이를 갖는 두 개의 정방형 플랫플레이트 슬래브에 대한 설계예가 Table 4에 나타나 있다. 설계압축력  $P$ 는 200 t/m이며 설계바닥하중  $q$ 는 2 t/m<sup>2</sup>이다. 여기서 크리이프 효과는 고려되지 않았다. 표에 나타난 바와 같이 압축력을 지지하기 위하여 길이가 각각 600cm와 900cm인 슬래브는 2.62 t/m<sup>2</sup>와 2.2 t/m<sup>2</sup>의 증대된 바닥하중,  $q_0$ 에 대하여 설계되어야 한다. 앞서 설명한 바와 같이 대부분의 플랫플레이트 슬래브는 처짐제한을 위하여 최대 세장비를 만족하도록 설계되므로, 스펠 길이가 증가함에 따라서 슬래브의 두께가 증가하며 더 큰 압축재하능력을 갖게 된다. 결과적으로 표에 나타난 바와 같이 긴 경간길이를 갖는 슬래브에 대한 바닥하중증대계수가 작은 경간길이를 갖는 슬래브보다 작게 된다.

## 8. 결론

바닥하중과 면내 압축하중을 동시에 받는 플랫플레이트 슬래브의 거동을 조사하기 위하여 비선형 유한요소해석을 사용하는 수치해석연구를 실시하였다. 비선형 유한요소해석을 위하여 재료와 기하학적 비선형효과를 고려하는 수치해석프로그램을 개발하였으며, 이 수치해석방법은 4번이 단순지지된 판에 대한 기존의 실험결과와 비교 검증되었다.

해석모델로서는 국내 철근콘크리트계산규준의 직접설계법에 의하여 설계된 연속된 플랫플레이트 슬래브가 사용되었다. 하중조합 및 하중순서에

Table 4 Design Example of Square Flat Plates

$L_1$ cm	$h$ cm	$L_1/h$	$f'_c$ kg/cm <sup>2</sup>	$q$ t/m <sup>2</sup>	$P$ t/m	$P_0$ t/m	$P/P_0$	$\delta_q$	$q_0$ t/m <sup>2</sup>
600	17	35.3	240	2	200	408	0.49	1.31	2.62
900	25	36.0	240	2	200	600	0.33	1.10	2.20

대한 연구를 통하여 수직하중과 이후 재하되는 1축압축하중(수직-1축압축 하중)이 슬래브의 강도를 결정하는 지배하중조건이라는 것이 밝혀졌다.

수직-1축압축하중을 받는 플랫폼레이트 슬래브의 철근비, 형상비, 콘크리트 강도, 세장비에 대한 변수연구를 통하여  $P/P_0 - q/q_0$  관계곡선의 변화를 연구하였다. 이 연구를 통하여 관계곡선이 형상비와 콘크리트 강도보다는 철근비과 세장비에 의하여 보다 큰 영향을 받는다는 것이 관찰되었다.

이 수치해석결과를 바탕으로 세장비의 함수로서 정의되는  $P/P_0 - q/q_0$  관계곡선을 제시하였다. 이 관계곡선을 사용하는 바닥하중증대법이 플랫폼레이트의 설계에 적용될 수 있다. 바닥하중증대계수는  $P/P_0 - q/q_0$  관계곡선으로부터 구할 수 있으며, 플랫폼레이트 슬래브는 이 증대된 바닥하중에 대하여 휨부재로서 설계될 수 있다. 이 방법은, 슬래브를 압축과 휨모멘트를 받는 조합하중에 대하여 설계할 필요가 없다는 점에서 사용하기 편리하나, 직접설계법에 의하여 설계된 연속된 플랫폼레이트에만 적용할 수 있다.

일련의 연구로서 다양한 하중 및 지지조건을 갖는 플랫폼레이트 슬래브에 대한 설계를 위하여, 기둥의 설계에 사용되는 것과 유사한 방법의 모멘트 증대법에 대한 연구가 실시되었으며 그 연구결과가 추후에 발표될 것이다.

이 논문의 연구는 수치해석결과를 제시하고 있으므로 추후에 이 결과를 검증할 수 있는 실험이 실시되어야 한다. 또한 슬래브의 세장효과에 큰 영향을 줄 것으로 판단되는 크리이프효과에 대한 연구가 필요하다.

### 감사의 글

본 연구를 위하여 '서울대학교 발전기금 일반학술연구비(관리번호 98-09-1086)'를 지원해 주신 서울대학교에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 대한건축학회, "국한강도설계법에 의한 철근콘크리트 구조계산규준 및 해설", 1994, pp.125-139.
2. 박홍근, "통합방법을 이용한 철근콘크리트부재의 비선형 유한요소해석", 한국콘크리트학회지, 제9권 제2호, pp.133-144.
3. American Concrete Institute, Building Code Requirements for Structural Concrete. ACI 318-95, pp.97-98, pp.207-226.
4. Aghayere, A. O. and MacGregor, J. G., "Tests of Reinforced Concrete Plates under Combined In-Plane and Transverse Loads", Structural Journal, ACI, Vol.87, No.6, pp.615-622.
5. Bathe, K. Finite Element Procedures in Engineering Analysis. Prentice-Hall, Inc. pp.301-406.
6. Ghoneim, M. G. and MacGregor, J. G., "Tests of Reinforced Concrete Plates under Combined inplane and Lateral Loads", Structural Journal, ACI, Vol.91, No.1, pp.19-30.
7. Ghoneim, M. G. and MacGregor, J. G., "Behavior of Reinforced Concrete Plates under Combined inplane and Lateral Loads", Structural Journal, ACI, Vol.91, No.2, pp.188-197.
8. Massicotte, B., MacGregor J. G. and Elwi, A. E., "Behavior of Concrete Panels Subjected to Axial and Lateral Loads", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.116, No.9, pp.2324-2343.
9. Park, H. and Klingner, R. E., "Nonlinear Analysis of RC Members Using Plasticity with Multiple Failure Criteria", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.123, No.5, pp.643-651.
10. Weaver, Jr., W. and Johnston, P. R., Finite Elements for Structural Analysis, Prentice-Hall Inc, pp.236-254.

## 요 약

면의 바닥하중과 토압과 수압에 의한 면내 압축력을 받는, 깊은 지하구조에 사용되는 플랫폼레이트 슬래브에 대한 수치해석연구를 실시하였다. 비선형 유한요소해석을 위하여 재료와 기하학적 비선형효과를 고려한 수치해석프로그램을 개발하였으며, 이 수치해석방법은 4 변이 단순지지된 플레이트에 대한 실험결과와 비교에 의하여 검증되었다. 해석모델로서 국내 콘크리트계산규준의 직접설계법에 의하여 설계된 플랫폼레이트 슬래브가 사용되었다. 하중조합과 하중순서에 대한 연구를 통하여 플랫폼레이트 슬래브의 강도를 지배하는 하중조건을 연구하였으며, 이 지배하중을 받는 슬래브에 대한 변수연구를 통하여 철근비, 형상비, 콘크리트강도, 세장비에 따른 슬래브의 강도변화를 연구하였다. 이 연구결과를 바탕으로 바닥하중증대법을 제시하였다.

(접수일자 1998.11.24 )