

면내 압축력 및 바닥하중을 받는 플랫 플레이트의 설계

Design of RC Flat Plate Subjected to Combined Axial Compressive and Floor Load

김 재 요* 박 흥 군**
Kim, Jae Yo Park, Hong Gun

ABSTRACT

This paper presents a design procedure using the moment magnifier method that is applicable to RC flat plates subjected to combined axial compressive and uniform or non-uniform floor load. Based on the numerical results, the design values of the buckling coefficient and the effective flexural rigidity, that define the buckling force, have been proposed. Using these design values, this paper provides the design procedure for the moment magnifier method.

1. 서 론

깊은 지하층 구조물의 경우 바닥하중뿐만 아니라 수압이나 토압에 의한 큰 규모의 면내 압축력이 슬래브에 작용하게 된다(Fig. 1). 이러한 면내 압축력은 슬래브에 세장효과를 일으켜 슬래브의 강도를 저하시킬 수 있다. 그러므로 지하층 바닥 슬래브의 설계시 바닥하중뿐만 아니라 면내 압축력을 반영할 수 있는 설계기준이 필요하다.

이전의 연구^(1,2,3,4,5)에서 이러한 바닥하중과 면내 압축력을 동시에 받는 플랫 플레이트 슬래브에 대한 연구가 이루어졌다. 변수연구를 통해 바닥하중과 면내 압축력을 동시에 받는 슬래브의 거동과 강도가 연구되었으며,^(1,3,5) 주얼대와 주간대의 각 위치에서 좌굴계수와 유효휨강성의 설계값을 제안하였다.^(1,4,5)

본 연구에서는 이 설계값들을 사용하여, 면내 압축력과 균등 혹은 불균등 바닥하중을 받는 플랫 플레이트 슬래브에 적용할 수 있는 모멘트 증대법의 설계과정을 제시한다.

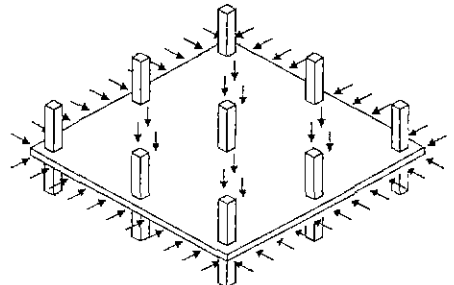


Fig 1 Flat Plate under Combined Axial Compressive and Floor Loads

* 김희원, 서울대학교 건축학과 박사과정

** 김희원, 서울대학교 건축학과 조교수

2 모멘트 증대법

본 논문에서는 좌굴하중에 의하여 정의되는 다음과 같은 모멘트 증대계수를 플랫 플레이트 슬래브에 적용한다.

$$M = \delta M_0, \quad \delta = \frac{1}{1 - \frac{P}{P_{cr}}} \quad (1)$$

M_0 는 수직하중만이 작용하였을 때 슬래브에 발생된 1차 휨모멘트이며, δ 는 압축력이 작용했을 때의 휨모멘트와 관련된 모멘트증대계수이다. 슬래브의 휨모멘트의 분포는 슬래브의 형상 및 그 위치에 따라 다양하게 분포하므로, 모멘트증대계수 및 좌굴계수의 분포도 균일하지 않다. 또한 압축과 인장균열에 의한 슬래브 단면의 손상에 의하여 휨강성이 저하된다. 이러한 슬래브의 형상비 및 작용하중에 따른 좌굴계수와 휨강성의 변화를 고려한 좌굴하중은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P_{cr} = \frac{k_m \pi^2 D_{eff}}{L_1^2} \quad (2)$$

k_m 은 슬래브의 형상 및 슬래브내 각 위치에 따라 변화하는 좌굴계수이며, D_{eff} 는 압축과 인장균열에 의하여 저하된 휨강성을 나타내는 유효휨강성이다.

2.1 좌굴계수

슬래브의 형상비 및 기둥의 휨강성에 따른 슬래브 각 지점에서의 좌굴계수 k_m 에 대하여 탄성재료특성과 기하학적 비선형을 고려한 수치해석연구가 수행되었다.^(2,4,5) 좌굴계수는 면내 압축력에 의한 슬래브 각 지점에서의 모멘트 변화를 측정하여 구할 수 있으며 k_m 이 측정되는 각 위치는 Fig. 2에 나타나 있다. k_m 은 Eq. 1과 2에 의해 다음 식과 같이 정의된다

$$k_m = \frac{P L^2}{\left(1 - \frac{M_0}{M}\right) \pi^2 D} \quad (3)$$

해석결과 k_m 은 P/P_{cr0} 가 증가함에 따라 선형으로 증가하거나 감소하며, 결국 슬래브의 좌굴길이에 따른 좌굴계수 k_p 에 수렴하는 것으로 나타났다.^(2,4,5) 따라서 k_m 은 $(P/P_{cr0}, k_m) = (1.0, k_p)$ 를 지나며 기울기 S 를 갖는 Eq. 4와 같은 직선으로 이상화할 수 있다.

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

기울기 S 는 슬래브의 형상비, 슬래브에 대한 기둥의 강성비, 고정하중에 대한 적재하중의 비에 의해 결정되는 값으로 이전연구^(2,4,5)에 요약되어 있다. k_p 값은 탄성재료의 가정에 의해 얻어진 값으로서 슬래브의 형상비, 기둥의 강성에 의한 슬래브의 단부조건 등 슬래브의 형상조건에 의하여 결정되는 슬래브의 좌굴길이에 의한 좌굴계수값이다. 슬래브 전체에 동일한 적재하중이 작용하여 슬래브간의 하중차가 없는 경우 k_p 값은 양단이 고정되어 있는 기둥의 좌굴계수와 같은 4로 나타났다. 그러나 적재하중의 불균등한 분포에 의해 연속된 슬래브 사이에 수직하중의 차가 있는 경우 k_p 값은 4보다 작게 나타나며 그 값은 슬래브의 형상비, 기둥강성비, 적재하중비 등의 조건에 따라 다르게 나타난다. 각 조건에 따른 k_p 값은 이전 연구^(2,4,5)에 나타나 있다.

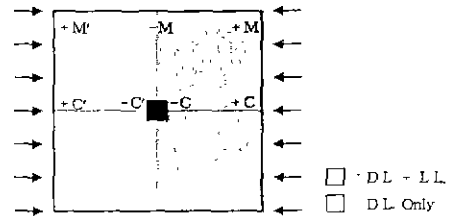


Fig 2 Locations where k_m is measured

2.2 유효휨강성

유효휨강성은 Eq. 1과 2로부터 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$D_{eff} = \frac{P L_1^2}{\left(1 - \frac{M_0}{M}\right) \pi^2 k_m} \quad (5)$$

슬래브 각 위치에서 M_0 , M , P 를 측정하고 P 에 따른 k_m 값을 앞에서 기술한 것과 같이 수치해석을 통하여 구해낸다면 D_{eff} 를 구할 수 있다.

슬래브의 형상비, 기둥강성비 등에 따른 D_{eff} 값의 변화는 이전 연구^(2,4,5)에 수록되어 있다. 각 변수에 따른 유효휨강성의 다양한 변화를 설계에 모두 반영한다는 것은 어려우므로, 설계과정에 사용할 수 있는 하한값을 사용하도록 한다. 슬래브 각 위치에 따른 유효휨강성의 설계식은 Table 1과 같다.

Table 1 Proposed Effective Flexural Rigidity

주열대	단부	부모멘트 (-C)	$\left(\frac{D_{eff}}{D}\right) = -0.5\left(\frac{q}{q_0}\right) + 0.7 \leq 0.35$
	중앙부	정모멘트 (+C)	$\left(\frac{D_{eff}}{D}\right) = -\left(\frac{q}{q_0}\right) + 0.35\left(\frac{L_2}{L_1}\right) + 1.0 \leq 0.15\left(\frac{L_2}{L_1}\right) + 0.375$ for $\left(\frac{L_2}{L_1}\right) < 1.5$ $\left(\frac{D_{eff}}{D}\right) = 0.6$ for $\left(\frac{L_2}{L_1}\right) \geq 1.5$
		부모멘트 (+C')	$\left(\frac{D_{eff}}{D}\right) = -1.1\left(\frac{q}{q_0}\right) + 1.3 \leq 0.95$ for $\left(\frac{L_2}{L_1}\right) \leq 1.0$ and $\frac{(EI/L)_c}{(EI/L)_s} \leq 1.5$ $\left(\frac{D_{eff}}{D}\right) = 0.95$ for $\left(\frac{L_2}{L_1}\right) > 1.0$ or $\frac{(EI/L)_c}{(EI/L)_s} > 1.5$
주간대	단부	부모멘트 (-M)	$\left(\frac{D_{eff}}{D}\right) = -0.25\left(\frac{q}{q_0}\right) + 0.4$
	중앙부	정모멘트 (+M)	$\left(\frac{D_{eff}}{D}\right) = -0.6\left(\frac{q}{q_0}\right) + 0.8 \leq 0.2\left(\frac{L_2}{L_1}\right) + 0.35$ for $\left(\frac{L_2}{L_1}\right) < 1.5$ $\left(\frac{D_{eff}}{D}\right) = -0.6\left(\frac{q}{q_0}\right) + 0.4\left(\frac{L_2}{L_1}\right) + 0.2 \leq 0.65$ for $\left(\frac{L_2}{L_1}\right) \geq 1.5$
		부모멘트 (+M')	$\left(\frac{D_{eff}}{D}\right) = -\left(\frac{q}{q_0}\right) + 1.2 \leq 0.9$ for $\left(\frac{L_2}{L_1}\right) < 1.5$ $\left(\frac{D_{eff}}{D}\right) = \left[0.8\left(\frac{L_2}{L_1}\right) - 2.2\right]\left(\frac{q}{q_0}\right) + 0.8\left(\frac{L_2}{L_1}\right) \leq 0.9$ for $\left(\frac{L_2}{L_1}\right) \geq 1.5$

3. 설계 과정

본 논문에서 제안한 좌굴계수값 k_m 과 유효휨강성 D_{eff} 를 Eq. 1의 모멘트중대계수의 산정에 이용할 수 있다. 모멘트 중대법에 의한 플랫 플레이트 슬래브의 설계과정은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 수직하중을 받는 플랫 플레이트 슬래브에 대하여 주간대와 주열대의 각 위치에서의 휨모멘트 M_0 를 구한다. 이때 슬래브 중앙부의 경우 연속된 슬래브의 한쪽 슬래브에만 적재하중이 작용하는 하중조건에서의 휨모멘트를 고려하여야 한다.
- 2) 유효휨강성 D_{eff} 를 제안된 설계식으로부터 구한다.
- 3) 슬래브의 형상비와 기둥강성비에 따른 k_p 값을 얻을 수 있다. 이때 슬래브 단부의 경우 $k_p=4$ 이다.
- 4) 슬래브의 형상비, 슬래브에 대한 기둥의 강성비, 고정하중에 대한 적재하중 비에 따른 슬래브 각 지점에서의 좌굴계수의 기율기 S 값을 구한다.

- 5) 앞에서 얻어진 k_p 와 S 에 의해 Eq. 4로부터 슬래브 각 지점에서의 좌굴계수 k_m 을 구한다. 이때 P_{cr0} 는 D_{eff} 와 k_p 에 의하여 정의된다.
- 6) 좌굴계수 k_m 과 유효휨강성 D_{eff} 를 사용하여 Eq. 2로부터 P_{cr} 을 구할 수 있으며, Eq. 1에 의하여 슬래브 각 지점에서의 면내 압축력에 의하여 증대된 휨모멘트 M 을 구한다.
- 7) 슬래브 각 위치에서 1축 압축력 방향의 단면을 증대된 휨모멘트 M 과 압축력을 받는 압축재로 설계한다.
- 8) 직각방향에 대해서도 1) - 7)의 과정을 반복한다.

이때 슬래브 단부의 설계시에는 모든 슬래브에 적재하중이 균등하게 분포되는 경우가 극한상태가 되므로 이러한 바닥하중분포에 대한 설계값 k_p , k_m , D_{eff} 를 사용한다.^(2,4) 또한 슬래브 중앙부의 설계시에는 적재하중이 불균등하게 분포되는 경우가 극한상태가 되므로 이러한 바닥하중분포에 대한 설계값을 사용한다.⁽⁵⁾

4. 설계 예제

이상에서 기술된 모멘트 증대법을 사용하여 바닥하중 및 면내 압축력을 받는 플랫 플레이트 슬래브를 설계한다. 바닥하중으로 고정하중 10kPa와 적재하중 10kPa가 작용하며 면내 압축력으로 1500k/m의 1축 압축력이 2방향으로 작용하는 600cm×600cm의 슬래브를 예로 들어본다. 이 슬래브에 대한 재료특성 및 단면특성은 Table 2에 나타나 있다.

Table 2 Summary of Design Example

L_2 cm	L_1 cm	h cm	f'_c MPa	E_c MPa	F_S MPa	E_S MPa	ν	P kN/m	q kPa	$\frac{L_2}{L_1}$	$\frac{(EI/L)_c}{(EI/L)_s}$	$\frac{L_c L_s}{D.L.}$
600	600	17	24	23000	400	210000	0.15	1500	20	1.0	4.0	1.0

면내 압축력을 고려하기 위하여 슬래브의 철근비 증대를 통하여 바닥하중 재하능력 q_0 를 증가시켜 설계함으로써 면내 압축력에 대한 저항능력을 증가시키도록 한다. 본 예제의 슬래브에 실제로 작용하는 바닥하중은 20kPa이지만 면내 압축력을 고려하기 위하여 $q/q_0 = 0.6$ 이 되도록 33kPa의 바닥하중 재하능력을 갖도록 슬래브를 설계한다. q/q_0 가 정해진다면 앞에서 제안한 모멘트 증대법에 의하여 슬래브 각 지점에서의 증대모멘트가 결정된다.

다음은 $q/q_0 = 0.6$ 인 경우에 대하여 주열대 단부(-C)와 주열대 중앙부(+C)의 증대모멘트를 계산하는 과정이다.

$$1) -C : M_0 = -73.3 \text{ kN m/m}$$

$$+C : M_0 = 41.3 \text{ kN m/m}$$

$$2) -C : \frac{D_{eff}}{D} = 0.35$$

$$D_{eff} = \frac{(23000 \times 10^3) (0.17)^3}{12 \times (1 - 0.15^2)} \times 0.35 = 3371.7 \text{ kN m}$$

$$+C : \frac{D_{eff}}{D} = 0.525$$

$$D_{eff} = \frac{(23000 \times 10^3) (0.17)^3}{12 \times (1 - 0.15^2)} \times 0.525 = 5057.5 \text{ kN m}$$

3) -C : $k_p = 4.0$
 +C : $k_p = 2.245$

4) -C : $S = 0$
 +C : $S = -0.91$

5) -C : $P_{c\sigma} = \frac{\pi^2(4.0)(3371.7)}{6^2} = 3697.4 \text{ kN/m}$
 $k_m = 4.0$
 +C : $P_{c\sigma} = \frac{\pi^2(2.245)(5057.5)}{6^2} = 3112.8 \text{ kN/m}$
 $k_m = -0.91 \times \left(\frac{1500}{3112.8}\right) + (2.245 + 0.91) = 2.72$

6) -C : $P_{cr} = \frac{\pi^2(4.0)(3371.7)}{6^2} = 3697.4 \text{ kN/m}$
 $M = \frac{1}{1 - \frac{1500}{3697.4}} \times (-73.3) = -123.3 \text{ kN m/m}$
 +C : $P_{cr} = \frac{\pi^2(2.72)(5057.5)}{6^2} = 3766.5 \text{ kN/m}$
 $M = \frac{1}{1 - \frac{1500}{3766.5}} \times (41.3) = 68.5 \text{ kN m/m}$

이상과 같은 과정에 의하여 면내 압축력에 의하여 증대된 주열대 단부의 부모멘트와 중앙부의 정모멘트를 계산할 수 있다. 따라서 주열대 단부의 단면은 1500 kN/m의 축하중과 123.3 kN m/m의 증대모멘트를, 주열대 중앙부의 단면은 1500 kN/m의 축하중과 68.5 kN m/m의 증대모멘트를 동시에 받는 압축재로 가정할 수 있다. 본 예제에 대하여 $q/q_0 = 0.6$ 으로 가정한 슬래브 각 지점에서의 증대모멘트 계산과정은 Table 3에 요약되어 있다.

Table 3 Design Parameters

	M_0 kNm/m	$\frac{D_{eff}}{D}$	D_{eff} kNm	k_p	S	$P_{c\sigma}$ kN/m	k_m	P_{cr} kN/m	δ	M kNm/m
-C	-73.3	0.35	3371.7	4	0	3697.4	4.00	3697.4	1.7	-123.3
-M	-24.4	0.25	2408.3	4	-4	2641.0	5.73	3782.1	1.7	-40.4
-C	41.3	0.525	5057.5	2.245	-0.91	3112.8	2.72	3766.5	1.7	68.5
+M	27.0	0.44	4238.7	2.245	-0.44	2608.8	2.43	2826.1	2.1	57.5
+C'	12.6	0.95	9151.7	2.245	6.6	5632.7	2.25	5632.7	1.4	-17.2
+M'	8.4	0.6	5780.0	2.245	4.33	3557.5	2.25	3557.5	1.7	-14.5

작용하는 바닥하중과 재하능력의 비 q/q_0 를 가정하고, 이 가정된 값에 의해서 산정된 슬래브 각 지점에서의 축하중과 증대모멘트가 해당되는 단면의 상판도 내부에 존재하게 되면 안전한 상태가 되며, 증대모멘트가 상판도 밖에 존재할 경우에는 안전한 상태에 도달할 때까지 q_0 를 증가시키거나 국부적으로 철근양을 증가시키는 방법을 사용할 수 있다. 여기서는 q_0 를 증가시키는 방법을 사용한다.

본 예제 슬래브의 경우 $q/q_0 = 0.6$ 으로 바닥하중 재하능력을 증가시켰을 때 면내 압축력을 지지할 수 있는 것으로 나타났다.

Fig. 3은 바닥하중 재하능력을 증가시키지 않은 경우와 $q/q_0 = 0.6$ 으로 바닥하중 재하능력을 증가시킨 경우에 대하여 면내 압축력과 중앙부의 수직처짐의 관계를 나타내고 있다. 바닥하중 재하능력을 증가시킴으로서 면내 압축력에 대한 지지력이 크게 증가했음을 알 수 있다.

그러나 바닥하중만 작용하는 경우($q/q_0=1.0$)에 대한 설계만으로도 면내 압축력 1500kN/m를 충분히 지지할 수 있는 것으로 나타났으며, 이것은 바닥하중 재하능력 증가의 불필요성을 보여 줄 수도 있다. 이러한 현상은 규준에 의한 철근비의 산정시 탄성해석을 사용함으로써,

실제 슬래브의 재하능력을 저평가하기 때문이다. 따라서 모멘트 증대법을 적용하는 과정에서 q/q_0 값이 실제보다 높게 평가됨으로서, 모멘트의 증대를 과평가하여 과설계를 가져온다.

그러나, 모멘트 증대계수의 산정시 크리이프효과나 강성감소계수를 고려하게 되면 이러한 과설계의 현상은 크게 줄어들며, 면내압축력에 대한 강도가 감소할 것이다. 특히 크리이프효과에 의한 초기변형값의 증가는 압축력에 대한 지지능력의 감소에 큰 영향을 주게 되므로 반드시 고려하여야 한다.

5. 결 론

바닥하중과 토압 및 수압의 횡하중으로 인한 면내 압축력을 받는 플랫 플레이트 슬래브의 설계에 적용할 수 있는 모멘트 증대법을 제시하였다. 수치해석결과를 토대로 제안되었던 슬래브 주열대와 주간대 각 위치에서의 좌굴계수와 유효휨강성의 설계값을 사용하는 모멘트 증대법의 설계과정을 제안하였으며, 이러한 모멘트 증대법을 실제 슬래브에 적용한 결과 면내 압축력에 의한 슬래브 각 지점에서의 모멘트는 크게 증대되는 것으로 나타났다. 면내 압축력에 대한 슬래브의 지지능력은 압축력이 작용하는 순간의 초기 변형값에 의한 영향이 크므로, 슬래브의 변형에 큰 영향을 줄 수 있는 크리이프효과에 대한 세밀한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. 박홍근, 면내 압축력 및 면외 바닥하중을 받는 플랫 플레이트 슬래브, 한국콘크리트학회지, 제11권, 1호, 1999.1
2. 박홍근, 면내 압축력을 받는 플랫 플레이트 슬래브에 대한 모멘트 증대법, 한국콘크리트학회지, 제11권, 1호, 1999.1
3. H. Park, Numerical Study on RC Flat Plates Subjected to Combined Axial and Transverse Load, Journal of Structural Engineering and Mechanics, An International Journal, Vol.7, No.8, 1999.8
4. H. Park, E. Kim, Reinforced Concrete Flat Plate Subjected to Combined In-Plane Compressive and Out-of-Plane Floor Loads, Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), 1999.10
5. 김재요, "면내 압축력과 불균등 바닥하중을 받는 플랫 플레이트 슬래브", 서울대학교 건축학과 석사학위 논문, 2000.2

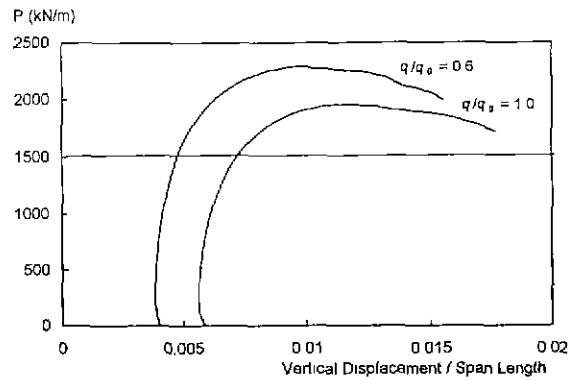


Fig 3 Axial Load - Vertical Displacement Curve