

바닥하중과 압축력을 받는 플랫 플레이트의 장기거동을 고려한 모멘트 증대법

Moment Magnifier Method for Long-term Behavior of Flat Plate Subjected to In-Plane Compressive and Transverse Loads

최 경 규* 박 홍 군**

Choi, Kyoung Kyu Park, Hong Gun

ABSTRACT

Numerical studies were carried out to develop the moment magnifier method for long-term behavior of flat plates, subjected to combined in-plane compressive and transverse loads. Nonlinear finite element analyses were performed for the numerical studies.

Through the numerical studies, the long term behavior of the flat plate subjected to uniform or nonuniform floor load was investigated, and creep effects on the degradation of strength and stiffness of the slabs were examined. As the result, the creep factor was developed to epitomizes with creep effect on the flat plate. The moment magnifier method using the creep factor was developed for long-term behavior of flat plates. Also, the design examples are shown for verification of proposed design method.

1. 서 론

대규모의 건물에 설치되는 깊은 지하층의 슬래브에는 바닥하중 뿐 아니라 토압 및 수압 등 면내 압축력이 함께 재하되므로 (Fig. 1), 슬래브의 설계에 있어서는 그 조합력이 고려되어야 한다.

지금까지의 연구에서 수직하중이 균등재하되는 경우⁽⁶⁾와 불균등재하되는 경우⁽¹⁾에 대한 수치해석연구가 이루어졌다. 이 해석 연구 결과 슬래브의 강도 및 거동과 지배재하조건이 밝혀졌으며, 또한 슬래브의 주열대와 중간대의 각 지점별 유효휨강성과 함께 모멘트 증대법이 제안되었다.

장기하중을 재하받는 콘크리트 구조물은 시간 경과에 따라 크리프, 건조수축 등 추가적인 거동변화를 보인다. 이전의 연구⁽³⁾에서 바닥하중과 면내 압축력을 받는 슬래브에 대해 장기거동을 고려한 수치

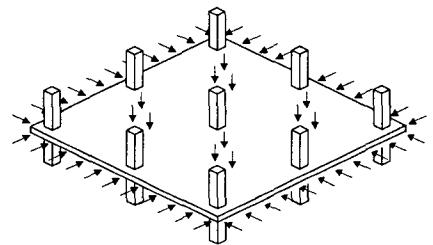


Fig. 1 Flat Plate Subjected to Combined In-Plane Compression and Floor Loads

* 정희원, 서울대학교 건축학과 석사과정

** 정희원, 서울대학교 건축학과 조교수

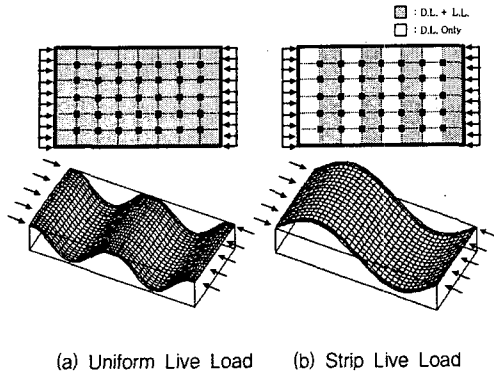


Fig. 2 Deformed Shapes with Live Load Pattern

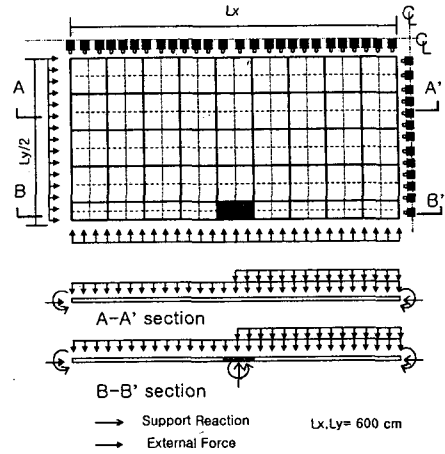


Fig. 3 Finite Element Model of Flat Plate

** 정희원, 서울대학교 건축학과 조교수

해석 연구를 수행하였다. 해석결과, 크리프와 건조수축에 의해 수직처짐이 크게 증가하므로 슬래브가 면내 압축력을 재하받게 되면 2차 효과가 증대되며, 따라서 강도의 심각한 저하를 야기하는 것으로 나타났다. 또한 재하순서에 있어서는 바닥하중, 압축력을 먼저 재하한 뒤 시간경과가 플랫 플레이트의 강도에 가장 큰 영향을 미치는 지배하중조건임이 규명되었다. 본 연구에서는 이전의 연구에서 개발된 모멘트 증대법^(1,6)을 바탕으로 슬래브의 장기거동을 고려한 모멘트 증대법을 제안하고자 한다.

2. 해석모델

바닥하중과 압축력을 재하받는 슬래브의 거동에 대한 크리프 및 건조수축의 영향은 바닥하중의 분포형태에 따라 상이하다.(Fig. 2) 하중재하순서로는 지배하중조건으로 밝혀진 고정하중-압축력-시간-적재하중($q_D - P - T - q_L$)을 사용하였고 장기거동을 위한 시간경과는 1000일을 기준으로 하였다. 본 해석에서는 Fig. 4와 같은 축소모델을 이용하였으며 그 외 모델의 치수 및 성질은 참고문헌 (3)의 Table 1에 명시되어 있다.

3. 크리프 계수

슬래브에 면내 압축력이 작용하면 세장효과에 의해 모멘트 증가가 발생한다.

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

M_0 는 바닥하중만이 작용했을 때의 1차 휨모멘트이고 M 는 세장효과에 의해 증대된 모멘트이다. 세장효과와 크리프 효과에 의한 모멘트 증대 정도와 슬래브의 손상정도를 슬래브의 주열대와 중간대의 각 지점 별로 연구하기 위해서, 각 지점별 (Fig. 4) 좌굴계수 k_m 과 각 지점별 강성의 손상정도를 표현하는 유효휨강성 D_{eff} 를 사용하여 좌굴하중을 나타내면 식 (2)와 같다.

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

이때 식 (1)과 식 (2)로부터 유효휨강성은 다음과 같이 정의된다.

$$D_{eff} = \frac{PL_1^2}{(1 - \frac{M_0}{M}) \pi^2 k_m} \quad (3)$$

수치해석 결과 각 지점별로 측정된 M_0 , M 과 압축력 P , 좌굴계수 k_m 을 식 (3)에 대입하면 유효휨강성 D_{eff} 을 구할 수 있다. 단, M_0 는 전체 바닥하중인 $q = q_D + q_L$ 을 재하했을 때의 1차 모멘트이다. D_{eff} 에 대한 연구 및 그 결과는 기존의 연구인 참고문헌(1, 6)에 제시되어 있다. 크리프 효과를 고려할 경우 증대모멘트 M 은 더욱 증가하는데, 본 연구에서는 이 경우의 유효휨강성을 $D_{eff, creep}$ 로, 크리프 계수 λ_{creep} 를 $D_{eff, creep}$ 와 D_{eff} 의 비로 정의한다.

$$\lambda_{creep} = \frac{D_{eff, creep}}{D_{eff}} \quad (4)$$

4. 크리프 계수에 대한 수치해석 연구

장기거동의 영향이 고려된 슬래브의 유효휨강성 및 크리프 계수를 연구하였다. 유효휨강성은 Fig. 4에 표시된 7개의 지점에서만 측정하며, 압축력 작용방향의 모멘트 증대만 검토하도록 한다.

Fig. 5에는 균등분포하중조건에 대해, 크리프 효과의 유무에 따른 슬래브 휨강성의 저하가 비교되고 있다. 여기서 D 는 탄성휨강성으로서 $D = Eh^2/[12(1-\nu^2)]$ 으로 정의되며, q - P 재하순서에 해당하는 유효휨강성 D_{eff} 은 참고문헌(1)과 (6)에서 안전측으로 제안된 설계값이다. 크리프 효과가 최대로 발휘되는 경우를 검토하기 위해 바닥하중 전체를 고정하중으로 가정하여 수치해석하였고, 그 결과 Fig. 5에 나타난 바처럼 유효휨강성이 절반이하로 크게 감소되었다.

Fig. 6은 균등분포 하중을 받는 슬래브의 중간대와 주열대의 각 지점에서의 크리프 계수 $\lambda_{creep}(=D_{eff, creep}/D_{eff})$ 를 나타내고 있다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 전체 바닥하중에 대한 고정하중의 비율 $\beta(=q_D/q)$ 이 증가할수록 크리프 계수 λ_{creep} 가 감소하는 것으로 나타났다. 여기서 λ_{creep} 이 1보다 큰 경우가 나타나는데, 이는 D_{eff} 가 실제의 유효휨강성이 아니라 안전측으로 제안된 설계값이기 때문이다. 또 이 그림에서는 국내 콘크리트 설계기준⁽²⁾ 또는 ACI 기준⁽⁴⁾에 따른 크리프 계수 $\lambda_{creep} = 1/(1+\beta)$ 와 플랫 플레이트의 해석결과를 비교하고 있다. 이 비교결과, 주열대 단부 모멘트인 -C에 대하여 슬래브의 휨강성은 기둥의 크리프 계수 이하로 크게 저하되며, 이외의 휨모멘트에 대해서는 기둥의 크리프 계수와 비슷한 것으로 나타났다.

적재하중이 불균등한 분포로 작용하는 경우에는 그 효과가 슬래브의 중앙부 +C'와 +M'에 집중된다. 이때 중앙부에는 재하과정 중에 모멘트가 부방향으로 증폭되는 반면, 크리프 효과는 이 모멘트를

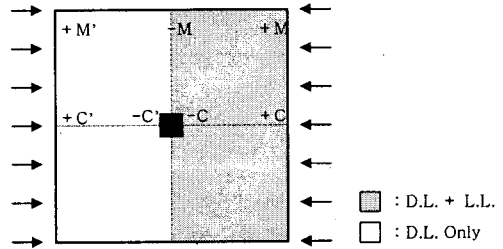
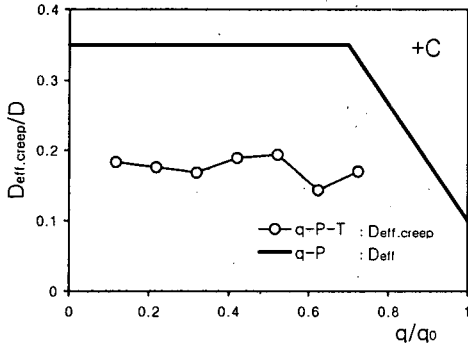
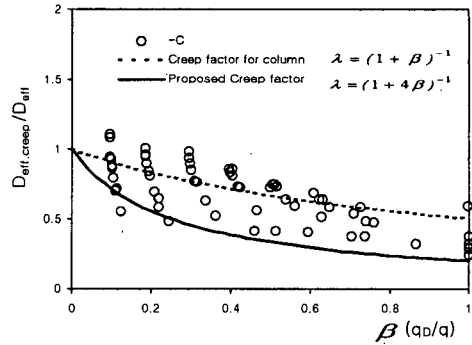


Fig. 4 Locations where k_m is measured



Positive moment of Column strip (+C)

Fig. 5 D_{eff} vs $D_{eff, creep}$



-C moment

Fig. 6 $\lambda_{creep} (= D_{eff, creep} / D_{eff})$ in case of Uniform Live Load

상쇄시키는 정모멘트 방향으로 작용되기 때문에 q_D/q 의 모든 범위에서 크리프 계수 λ_{creep} 가 1 보다 매우 크게 나타나게 된다. 따라서 +C'와 +M'지점에서는 $\lambda_{creep} = 1$ 을 사용해도 충분히 안전측이 된다. 균등재하조건과 불균등재하조건에 따라 수치해석결과를 바탕으로 크리프 계수에 대해 다음과 같은 설계식을 제안한다.

$$\lambda_{creep} = \begin{cases} \frac{1}{1+4\beta} & \text{for } -C \\ \frac{1}{1+2\beta} & \text{for } +M \\ \frac{1}{1+\beta} & \text{for } +C, -M \\ 1 & \text{for } +C', -C', +M' \end{cases} \quad (5)$$

5. 모멘트 증대법

이전 연구결과를 참고^(1,6)로 장기거동을 고려한 모멘트 증대법을 아래와 같이 정리할 수 있다. 이 때 k_p, S, k_m, D_{eff} 값으로는, 이전 연구논문에서 균등 분포와 불균등 분포의 각각에 대해 제안된 값을 이용한다.

1) 플랫 플레이트 슬래브에 작용하는 바닥하중에 의한 1차 모멘트를 주열대, 중간대 별로 각 지점에서 산정한다.

2) 유효휨강성 D_{eff} 은 단부와 중앙부에 대해 각 지점별로 제안된 설계식⁽¹⁾으로부터 구한다.

3) 고정하중과 적재하중의 비율을 식 (5)에 대입해서 슬래브의 각 지점별로 크리프 계수 λ_{creep} 을 계산한다. 또 장기거동이 고려된 $D_{eff, creep}$ 를 식 (3)을 이용해서 구한다.

4) k_p 는 슬래브의 형상비, 기둥과 슬래브의 강성비에 따라 참고문헌(1)의 결과를 이용하여 구한다.

5) 좌굴계수의 기울기 S 는 슬래브의 형상비, 기둥과 슬래브의 강성비, 고정하중과 적재하중의 비에 따라 참고문헌(1)의 결과를 이용하여 구한다.

6) 단계 2)과 4)의 결과를 $P_{c0} = \frac{k_p \pi^2 D_{eff}}{L^2}$ 의 관계에 대입해서 P_{c0} 을 산정한다. 또한 단계 4)과 5)에

Table 2. Dimensions and Properties of Plate

L_1, L_2 (cm)	h (cm)	f_{ck} (kgf/cm ²)	f_y (kgf/cm ²)	E_c (tf/cm ²)	E_s (tf/cm ²)	P (tf/m)	q_D (tf/m ²)	q_L (tf/m ²)	$\frac{(EI/L)_c}{(EI/L)_s}$
600	20	240	4000	230	2100	200	1	1	4

서 구한 k_p , S 값을 이용해서 좌굴계수 k_m 을 구한다.

7) 좌굴계수 k_m 와 유효휨강성 $D_{eff, creep}$ 를 식 (2)와 식(1)에 순차적으로 적용해서 모멘트 증대계수 δ 를 계산하며, 크리프와 압축력에 의한 증대모멘트 M 을 산정한다.

8) 슬래브의 각 지점에서 1축 압축력이 작용하는 방향에 대한 단면을 압축력(P)와 증대모멘트(M)을 받는 압축부재로써 설계한다.

9) 설계한 단면의 직각방향으로도 1) ~ 8)까지의 설계과정을 반복수행한다.

6. 설계예제

본 연구에서 제안된 장기거동이 고려된 모멘트증대법의 검증을 위하여 바닥하중과 면내 압축력을 받는 플랫 플레이트 슬래브에 대한 설계 및 해석을 실시한다. 슬래브의 단면과 재료적 특성은 Table 2에 정리되어 있다.

슬래브가 면내 압축력에 대해 저항하도록 설계하는 방법으로는 첫째, 단면의 철근비를 늘려서 수직재하능력 q_0 를 높이는 방법과 둘째, 슬래브의 두께를 늘리는 방법이 있다. 크리프의 효과에 의해 단면의 압축력에 대한 저항능력이 크게 감소되는 점을 감안하면 두가지 방법을 동시에 사용하는 것이 타당하다. 본 예제의 슬래브는 수직재하능력 $q_0 = (1/0.45)q = 2.22q$ 가 되도록 직접설계법⁽⁷⁾을 사용하여 설계된다. 각 지점의 압축력과 휨모멘트가 모두 해당 단면의 축력과 휨모멘트의 상관도 이내에 들면 안전한 상태이므로 그 설계안을 채택하면 된다. 만약 압축력과 휨모멘트의 조합이 단면의 상관도 바깥

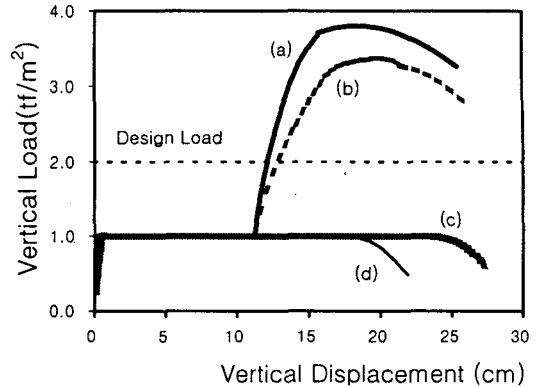
Table 3. Calculation of Magnified Moment for Plate Design

	M_0 tf.m/m	D_{eff} tf.m/m	λ_{creep}	$D_{eff, creep}$ tf.m/m	k_p	S tf/m	P_{c0} tf/m	k_m	P_{cr} tf/m	δ	M tf.m/m
-C	-7.33	547.4	0.33	182.5	4	-4	600.29	6.667	333.53	2.498	-18.31
-M	-2.44	450.0	0.67	300.0	4	0	493.09	4	328.73	2.554	-6.23
+C	4.13	821.1	0.67	547.4	2.234	-0.91	502.89	2.782	417.52	1.919	7.93
+M	2.7	821.1	0.5	410.6	2.234	-0.44	502.89	2.499	281.28	3.461	9.34
+C'	2.16	1173.0	1	1173.0	2.234	6.6	718.42	-2.529	-	-	-
+M'	0.84	1173.0	1	1173.0	2.234	4.33	718.42	-0.891	-	-	-

The moment of +C', +M' is not increased in the negative direction by pattern of live load. So these cases aren't considered.

에 존재한다면 a/a_0 값을 조금 줄여서 철근비를 높이거나 또는 슬래브의 두께를 늘린 후에 다시 1 ~ 7 단계의 설계과정을 반복수행해야 한다. 이러한 설계과정은 Table 3에 요약되어 있다.

위에서 설계된 플랫 플레이트의 안전성 검토를 위하여 비선형 해석을 수행하였다. Fig. 7은 크리프 효과가 고려된 설계안 (a, b), 크리프 효과가 고려되지 않은 기존의 모멘트 증대법에 따른 설계안⁽¹⁾ (c), 그리고 모멘트 증대효과를 고려하지 않은 설계안 (d)의 거동을 비교하고 있다. 이 해석에서 하중재하조건은 $q_D - P - T - q_L$ 이며 시간 경과 1000일로 가정하였다. 그림에 나타난 바와 같이 (c)와 (d)는 $q_D - P$ 재하 후 $T=516$ 일, 808일만에 각각 파괴가 일어났으며, 따라서 설계 하중조건을 만족시키지 못하는 것으로 나타났다.



- (a) Creep effect, Uniform Live load
- (b) Creep effect, Strip Live load
- (c) no Creep effect
- (d) no Moment Magnification

Fig. 7 Verification of Moment Magnifier Method

7. 결론

슬래브의 장기거동을 고려한 모멘트 증대법을 개발하기 위해, 면내 압축력과 바닥하중을 재하받는 슬래브에 대해 시간의존적 수치해석 연구를 수행하였다. 수치해석결과 크리프 효과에 의해서 수직처짐이 증가함으로써 압축력에 의한 2차 모멘트가 크게 유발되고, 그 결과 슬래브의 강도와 강성이 크게 저하되는 것으로 나타났다. 또한 적재하중의 비율이 높으면 적재하중의 불균등성 효과가 지배적이고 고정하중의 비율이 높으면 크리프 효과가 우세하게 발휘된다.

수치해석결과를 바탕으로 슬래브의 중간대와 주열대의 각 지점에서 크리프 효과에 의하여 슬래브의 휨강성이 감소하는 효과를 분석하였다. 분석결과 주열대 단부 부모멘트와 중간대의 정모멘트에서 휨강성이 크게 감소하는 것으로 나타났다. 이 분석결과를 토대로 크리프에 의한 휨강성 감소를 나타내는 크리프 계수를 제안하였으며, 이를 반영하는 모멘트 증대법을 제안하였다. 또한 본 연구에서 제안된 모멘트 증대법을 슬래브의 설계에 적용하였으며, 이에 대한 비선형 해석을 통하여 모멘트증대법의 유효성을 검증하였다.

참 고 문 헌

1. 김재요, "면내 압축력과 불균등 바닥하중을 받는 플랫 플레이트 슬래브", 서울대학교 건축학과 석사학위 논문, 2000.
2. 대한건축학회, "극한강도설계법에 의한 철근콘크리트 구조계산기준 및 해설", 1994, pp. 125-139
3. 최경규, 박홍근, "바닥하중과 압축력을 받는 플랫 플레이트의 장기거동에 대한 해석적 연구", 한국콘크리트학회, 2000년 봄학술발표대회는문집, 2000. 5.
4. American Concrete Institute, Building Code Requirements for Structural Concrete. ACI 318-95, pp. 97-98, pp. 118-119, pp. 207-226.
5. Park, H., and Klinger, R. E. (1997). "Nonlinear Analysis of RC Members Using Plasticity with Multiple Failure Criteria", Journal of Structural Engineering, 123(5), pp. 643-651.
6. Park, H., and Kim, E. (1999). "Reinforced Concrete Flat Plate Subjected to Combined and Out-of-Plane Floor Loads", Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), pp. 1136-1142.