

바닥하중과 압축력을 받는 플랫 플레이트의 장기거동을 고려한 모멘트 증대법

최경규¹⁾ · 박홍근^{1)*}

¹⁾서울대학교 건축학과

(2000년 10월 9일 원고접수, 2000년 12월 20일 심사완료)

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

Kyoung-Kyu Choi¹⁾, Hong-Gun Park^{1)*}

¹⁾ Department of Architecture, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

(Received on October 9, 2000, Revised on December 20, 2000)

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 a result, the creep factor was implemented to describe the 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 were shown for the verification of the proposed design method.

Keywords : flat plate, nonlinear finite element analysis, creep, moment magnifier 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 경우¹⁻⁴⁾와 불균등재하되는 경우⁵⁾에 대한 수치해석연구가 이루어졌다. 이 해석연구 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^{6,7)}에서 바닥하중과 면내 압축력을 받는 슬래브에 대해 장기거동을 고려한 수치해석 연구를 수행하였다. 이

연구에서는 소성이론에 기반해서 개발되었던 기존의 프로그램^{8,9)}이 장기거동 해석기능을 추가하여 기하학적 비선형, 재료적 비선형, 시간해석을 수행할 수 있는 쉘 해석 프로그램(RcShell)을 개발하였으며, 기존 실험¹⁰⁾과의 비교를 통해 검증하였다. 이 해석방법을 사용하여 수치해석을 수행한 결과, 크리프와 건조수축에 의해 수직치짐이 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 구명되었다(Fig. 2). 한편, 슬래브의 강도는 고정하중의 비율이 클수록 크리프 효과에 의해, 활하중의 비율이 증가할수록 활하중의 불균등성 효과에 의해 지배된다는 사실을 밝혔다.

본 연구에서는 이전의 연구에서 개발된 모멘트 증대법^{1,4,5)}을 바탕으로, 플랫 플레이트 슬래브의 시간의존적 거동에 대한 수치해석 결과^{6,7)}를 분석하여 슬래브의 장기거동을 고려한 모멘트 증대법을 제안하고자 한다.

* Corresponding author

Tel : 02-880-7055

E-mail : hgpark@gong.snu.ac.kr

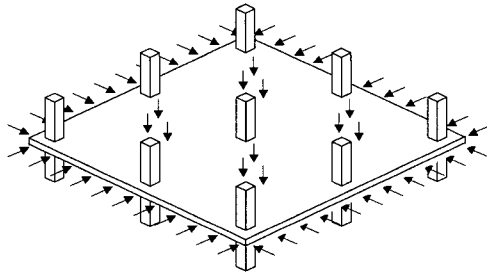


Fig. 1 Flat plate subjected to combined in-plane compressive and floor loads

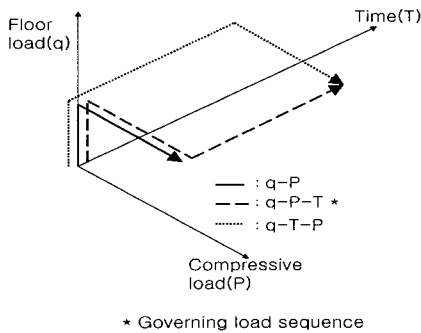


Fig. 2 Loading sequences

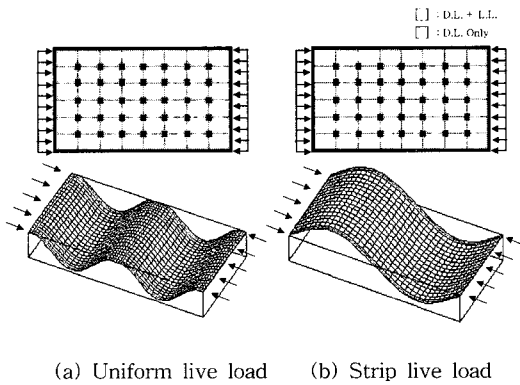


Fig. 3 Deformed shapes with live load pattern

2. 해석모델

바닥하중과 압축력을 재하받는 슬래브의 거동에 대한 크리프 및 건조수축의 영향은 바닥하중의 분포형태에 따라 상이하다. 따라서 본 연구에서는 슬래브의 강도 및 강성 저하를 연구하기 위하여 Fig. 3과 같이 두 종류의 바닥하중 분포를 가정한다. 해석에 사용된 모델의 치수 및 성질은 Table 1에 제시되었고, Fig. 4와 같은 축소모델을 해석에 이용하였다.

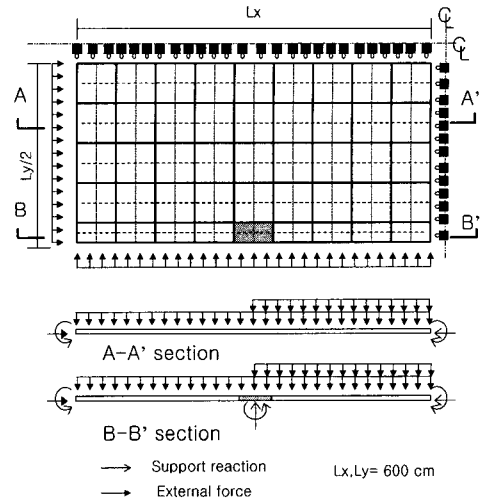


Fig. 4 Finite element model of flat plate

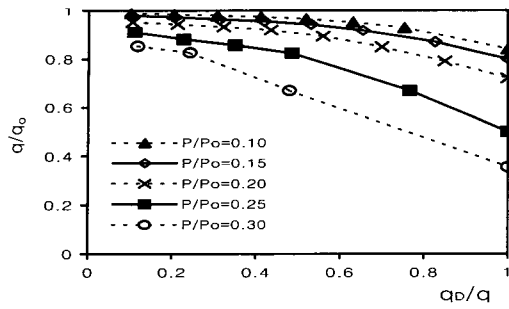
하중재하순서로는 지배하중조건으로 밝혀진 고정하중-압축력-시간-활하중($q_D - P - T - q_L$)을 사용하였다. 상대습도는 60% 온도는 25 °C로 가정하였으며 장기거동을 위한 시간경과는 1000일을 기준으로 하였다. 그 외 해석조건은 참고문헌^{6,7)}에 명시되어 있다.

3. 고정하중 대 활하중의 비에 따른 슬래브의 강도 변화

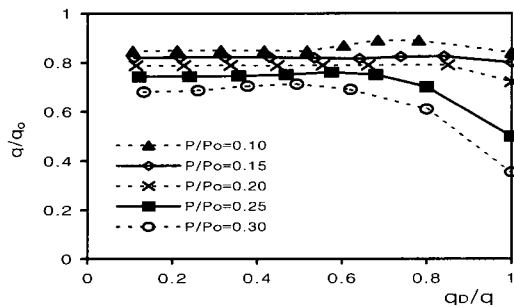
슬래브에 활하중이 균등하게 재하되는 경우(Fig. 3(a))와 불균등하게 재하되는 경우(Fig. 3(b))에 대하여 고정하중 대 활하중의 비에 따라서 크리프에 의해 슬래브 강도가 저감되는 양상을 연구하였다.^{6,7)}

Fig. 5(a)는 바닥하중이 전체 슬래브에 균등하게 재하되는 경우에 대하여 슬래브의 강도를 나타내고 있다. 고정하중(q_D)이 증가함에 따라 전체 수직재하능력($q = q_D + q_L$)과 활하중재하능력($q_L = q - q_D$)이 감소하는 경향을 보인다. 여기서 q_0 는 압축력이 없는 경우의 바닥하중재하능력이다. Fig. 5(b)는 활하중이 슬래브에 불균등하게 재하되는 경우인데, 활하중(q_L)이 클수록 크리프효과는 감소되지만 불균등하중에 의해 좌굴길이가 길어져서 슬래브의 강도는 약간씩 감소하는 경향을 보인다. q_L 이 감소하면 불균등 활하중의 효과가 줄어들면서 강도는 오히려 증가하며, 반면 q_L 이 아주 작은 경우에는 고정하중(q_D)에 의한 크리프 효과에 의하여 강도가 크게 감소하고, q_D/q 가 1에 근접할수록 슬래브의 강도가 균등분포 상태에 수렴함을 알 수 있다.

이 연구에서, 슬래브의 강도는 고정하중의 비율이 클수록



(a) Uniform live load



(b) Strip live load

Fig. 5 Strength variations of flat plates with D.L./L.L. (Uniaxial compression)

균등바닥하중에 대한 크리프 효과에 의하여, 활하중의 비율이 클수록 활하중의 불균등효과에 의해서 지배된다는 사실을 알 수 있다.

4. 크리프에 의한 유효휨강성비

슬래브에 면내 압축력이 작용하면 세장효과에 의해 모멘트 증가가 발생한다. 이 모멘트 증가효과는 식 (1)과 같이 정의한다.

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

M_0 는 바닥하중만이 작용했을 때의 1차 휨모멘트이고, M 는 세장효과에 의해 증대된 모멘트이다. 세장효과와 크리

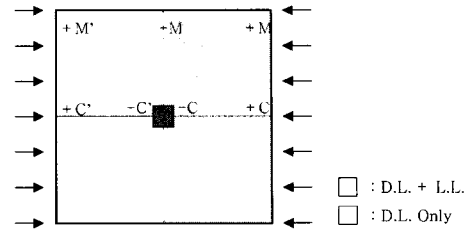


Fig. 6 Locations where k_m is measured

프 효과에 의한 모멘트 증대 정도와 슬래브의 손상정도를 슬래브의 주열대와 중간대의 각 지점 별로 연구하기 위해서, 각 지점별 (Fig. 6) 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.

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

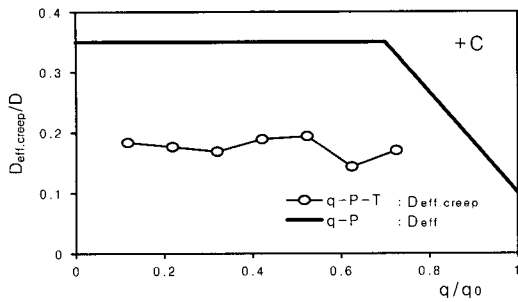
수치해석 결과 각 지점별로 측정된 M_0 , M 과 압축력 P , 좌굴계수 k_m 을 식 (3)에 대입하면 유효휨강성 D_{eff} 을 구할 수 있다. 단, M_0 는 전체 바닥하중인 $q = q_D + q_L$ 을 재하했을 때의 1차 모멘트이다. D_{eff} 에 대한 연구 및 그 결과는 기존의 연구인 참고문헌^{4,5)}에 제시되어 있다. 크리프 효과를 고려할 경우 증대모멘트 M 은 더욱 증가한다. 본 연구에서는 이 경우의 유효휨강성을 $D_{eff, creep}$ 로, 크리프에 의한 유효휨강성비 λ_{creep} 를 $D_{eff, creep}$ 와 D_{eff} 의 비로 정의한다.

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

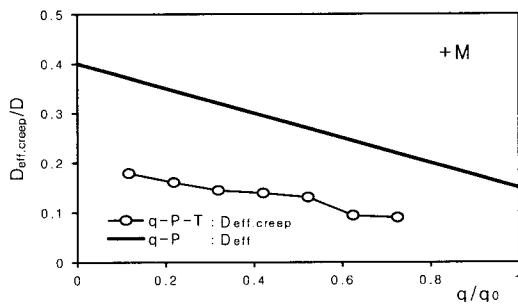
Table 1 Dimensions and properties of plate

| L_1 (cm) | L_2 (cm) | f_{ck} (kgf/cm ²) | f_y (kgf/cm ²) | Reinforcement ratio* | Thickness (cm) | $\frac{(EI/L)_c}{(EI/L)_s}$ | Humidity (%) | Time laps for D.L. (days) | Temperature (°C) |
|---------------|---------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------------------|---------------------|
| | | | | Top / Bottom | | | | | |
| 600 | 600 | 240 | 4000 | 0.01 / 0.01 | 17 | 4 | 60 | 1000 | 25 |

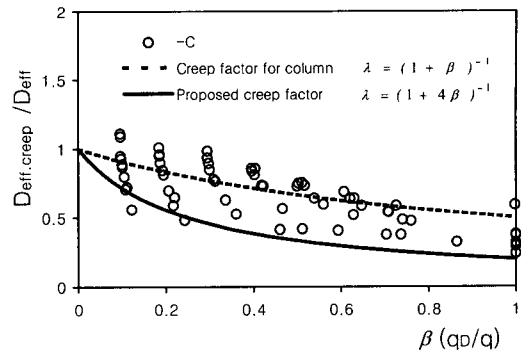
* Reinforcement bars are uniformly distributed at the top and bottom of the plate.



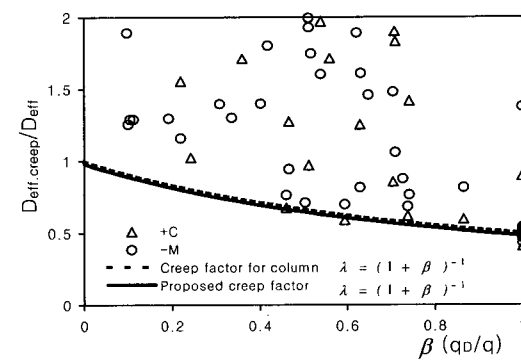
(a) Positive moment of column strip (+C)



(b) Positive moment of middle strip (+M)



(a) -C moment



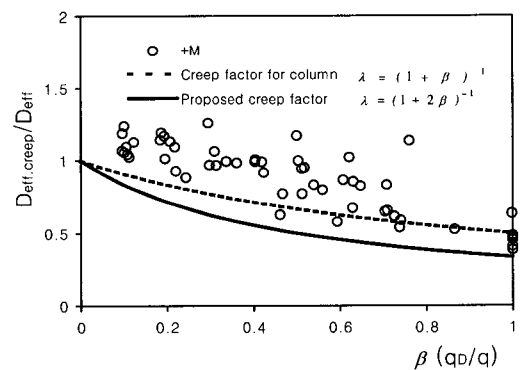
(b) +C, -M moment

Fig. 7 D_{eff} vs $D_{eff,creep}$

5. 크리프에 의한 유효휨강성비에 대한 수치해석 연구

3장의 수치해석 결과를 분석하여 장기거동의 영향이 고려된 슬래브의 유효휨강성 및 크리프에 의한 유효휨강성비 λ_{creep} 를 연구하였다. 유효휨강성은 Fig. 6에 표시된 7개의 지점에서만 측정하며, 압축력에 직각인 방향으로의 모멘트가 거의 증가하지 않으므로 압축력 작용방향의 모멘트 증대만 검토하도록 한다. 바닥하중이 균등분포일 때는 대칭성에 의해 주열대의 +C, -C와 중간대의 +M, -M 모멘트만 측정하도록 한다.

Fig. 7에는 바닥하중이 모두 고정하중으로 작용하는 경우 즉 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 참고문헌¹⁵⁾에서 안전측으로 제안된 설계값이다. 크리프 효과가 최대로 발휘되는 경우를 검토하기 위해 바닥하중 전체를 고정하중으로 가정하여 수치해석하였으며, 해석연구 결과 Fig. 7에 나타난 바와 같이 중간대와 주열대 모두에서 유효휨강성이 절반이하로 크게 감소되었다.



(c) +M moment

Fig. 8 $\lambda_{creep}(=D_{eff,creep}/D_{eff})$ in case of uniform live load

Fig. 8은 Fig. 5(a)의 해석결과로서 균등분포 하중을 받는 슬래브의 중간대와 주열대의 각 지점에서의 크리프에 의한 유효휨강성비 $\lambda_{creep}(=D_{eff,creep}/D_{eff})$ 를 나타내고 있다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 전체 바닥하중에 대한 고정하중의 비율 $\beta(=q_D/q)$ 가 증가할수록 λ_{creep} 가 감소하는 것으로 나타났다. 여기서 λ_{creep} 가 1보다 큰 경우가 나타나는데, 이는 λ_{creep} 의 계산에서 사용된 D_{eff} 가 실제의 유효휨강성이 아니라 안전측으로 제안된 설계값이기 때

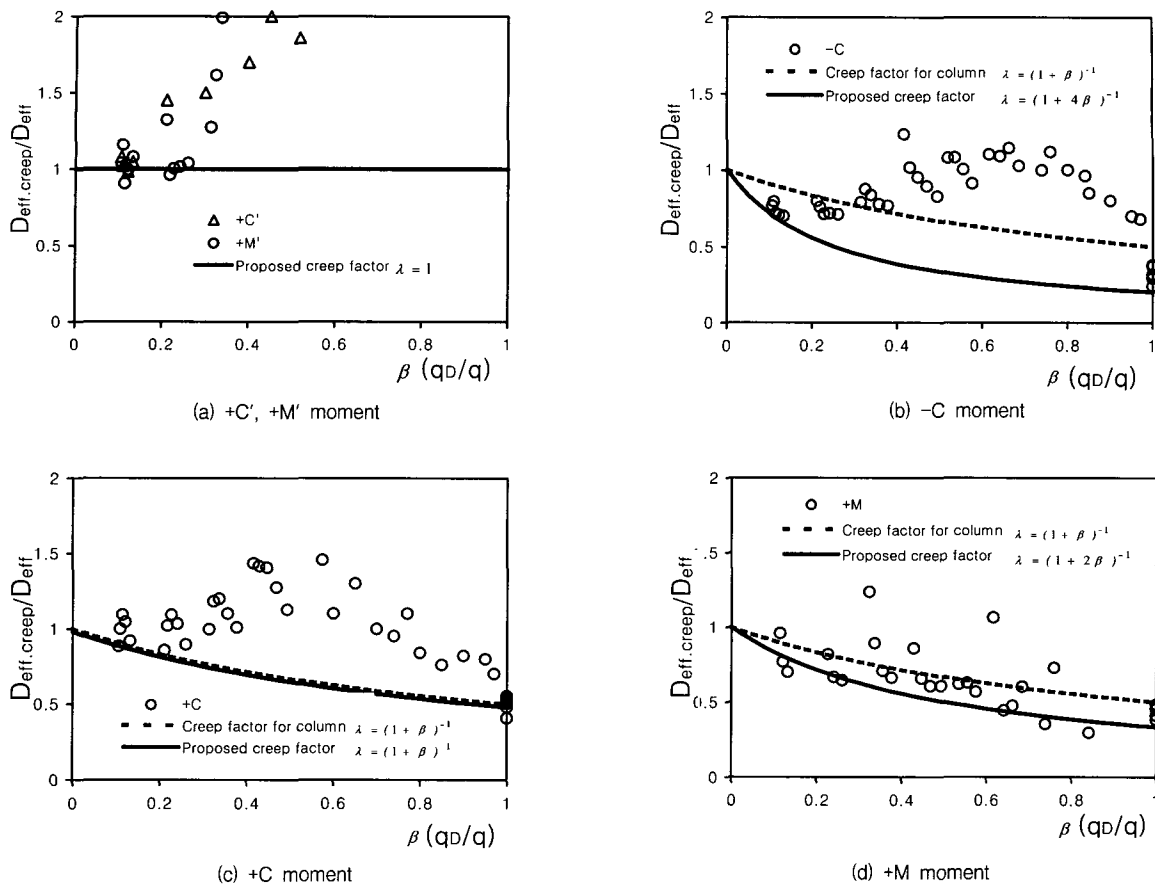


Fig. 9 $\lambda_{creep}(=D_{eff.creep}/D_{eff})$ in case of strip live load

문이다. 또 이 그림에서는 기둥의 설계에 사용되는 국내 콘크리트 설계기준¹¹⁾ 또는 ACI 기준¹²⁾에 따른 크리프에 의한 유효휨강성비 $\lambda_{creep} = 1/(1 + \beta)$ 와 플랫 플레이트의 해석 결과를 비교하고 있다. 이 비교결과, 주열대 단부 모멘트인 -C에 대하여 슬래브의 휨강성비는 기둥의 유효휨강성비 이하로 크게 저하되며, 이외의 휨모멘트에 대해서는 기둥의 유효휨강성비와 비슷한 것으로 나타났다.

Fig. 5(b)에 나타난 바와 같은 활하중이 불균등한 분포로 작용하는 경우에 대해, 고정하중과 활하중의 비율에 따른 유효휨강성의 저하를 각 지점별로 나타내면 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서 고정하중만을 재하받는 +C'와 +M' 지점에서는, 활하중의 비율이 클수록 크리프 효과가 거의 발휘되지 못하기 때문에 크리프에 의한 유효휨강성비가 1에 수렴하게 되고, 고정하중의 비율이 증가함에 따라 크리프 계수가 크게 증대하는 양상을 보인다. 이는 활하중이 불균등 분포되기 때문에, 고정하중만을 재하 받는 슬래브의 중앙부 +C'와 +M'에서는 재하과정 중 모멘트가 부방향으로 증폭되는 반면, 크리프 효과는 이 모멘트를 상쇄시키는 정모멘트 방

향으로 작용되기 때문에 q_D/q 의 모든 범위에서 λ_{creep} 가 1 보다 매우 크게 나타나게 된다. 따라서 +C'와 +M' 지점에서는 $\lambda_{creep} = 1$ 을 사용해도 충분히 안전측이 된다.

한편, 고정하중과 활하중을 동시에 재하받는 -C, +C에서는, q_D/q 가 낮은 비율에서는 크리프 효과가 아주 작아서 λ_{creep} 가 1에 가깝고, q_D/q 의 비율이 증가함에 따라 λ_{creep} 가 증대되며, $q_D/q = 1$ 에 접근하면 균등재하조건과 같은 유효휨강성을 나타내게 된다. +M의 경우에는, 중간 정도 비율의 q_D/q 에서 λ_{creep} 가 큰 폭으로 증대되던 현상이 상대적으로 둔화됨으로써, 유효휨강성 저하비율이 전반적으로 매우 크고 λ_{creep} 도 q_D/q 의 전 범위에서 균등재하경우에 근접하는 것으로 나타났다. -C'과 -M 지점에서는 불균등활하중의 효과가 매우 미약하여서 모멘트가 거의 증대하지 않거나 감소하기 때문에 검토하지 않았다.

Fig. 8, 9에 나타난 균등재하조건과 불균등재하조건에 따라 수치해석결과를 바탕으로 크리프에 의한 유효휨강성비에 대해 다음과 같은 설계식을 제안한다.

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

이 설계식은 Fig. 8, 9에 나타나 있다.

6. 모멘트 증대법

이전 연구결과^{1,4,5,6,7)}를 참고로 장기거동을 고려한 모멘트 증대법을 아래와 같이 정리할 수 있다. 이 때 k_p , S , k_m , D_{eff} 값으로는, 이전 연구논문에서 균등 분포와 불균 등 분포하중조건에 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 설계식⁵⁾으로부터 구한다.

3) 고정하중과 활하중의 비율을 식 (5)에 대입해서 슬래브의 각 지점별로 크리프에 의한 유효휨강성비 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 참고문헌⁵⁾의 결과를 이용하여 구한다.

5) 좌굴계수의 기울기 S 는 슬래브의 형상비, 기둥과 슬래브의 강성비, 고정하중과 활하중의 비에 따라 참고문헌⁵⁾의 결과를 이용하여 구한다.

6) 단계 2)와 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)에서 구한 k_p , S 값을 이용해서 좌굴계수 k_m 을 구한다. M

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)과 증대모멘트(M)을 받는 압축부재로 설계한다.

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

7. 설계예제

본 연구에서 제안된 장기거동이 고려된 모멘트증대법의 검증을 위하여 바닥하중과 면내 압축력을 받는 플랫 플레이트 슬래브에 대한 설계 및 해석을 실시한다. 슬래브에는 계수하중으로서 1.0tf/m^2 의 고정하중과 활하중이 각각 재하되며 면내압축력으로 200tf/m 이 작용하고, 이때 슬래브의 크기는 $600\text{cm} \times 600\text{cm}$ 이며 두께는 17cm 를 기준으로 한다.

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 예제에서는 $q/q_0 = 0.45$ 로 하고 슬래브의 두께를 20cm 로 증가시킨다. 슬래브의 단면과 재료적 특성은 Table 2에 정리되어 있다. 이때 슬래브의 수직재하능력 $q_0 = (1/0.45)q = 2.22q$ 가 되도록 직접설계법^{11,12)}을 사용하여 설계된다. 6장에서 설명된 모멘트 증대법에 따른 주열대 단부 (-C)와 중간대 중앙부 (+M)에 대한 설계과정은 다음과 같다.

1) $q/q_0 = 0.45$ 로 가정한다.

$$-C : M_0 = -7.33 \text{ tf} \cdot \text{m/m}$$

$$+M : M_0 = 2.7 \text{ tf} \cdot \text{m/m}$$

2) 참고문헌 (5)의 식 (4-8)과 식 (4-9)를 이용한다.

$$D = \frac{Eh^2[(12(1-\nu^2))]}{(230 \times 10^4)(0.20)^3} = 1568.63 \text{ tf} \cdot \text{m/m}$$

$$-C : D_{eff} = 0.35D = 547.40 \text{ tf} \cdot \text{m/m}$$

$$+M : D_{eff} = 0.47D = 821.10 \text{ tf} \cdot \text{m/m}$$

3) 본 논문의 식 (3), (5)에 따라서,

$$-C : \lambda_{creep} = \frac{1}{1+4\beta_d} = \frac{1}{1+4 \times 0.5} = 0.333$$

$$D_{eff, creep} = \beta_d \cdot D_{eff} = 0.333 \times 547.40 = 182.47 \text{ tf} \cdot \text{m/m}$$

$$+M : \lambda_{creep} = \frac{1}{1+2\beta_d} = \frac{1}{1+2 \times \beta_d} = 0.5$$

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 |

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_{cr0} 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 we don't consider these cases.

$$D_{eff, creep} = \beta_d \cdot D_{eff} = 0.5 \times 821.10 = 410.55 \text{ tf} \cdot \text{m/m}$$

4) 참고문헌 (5)의 표 4-2(b)를 이용하여.

$$-C : k_p = 4$$

$$+M : k_p = 2.234$$

5) 참고문헌 (5)의 표 4-3(b)를 이용하여.

$$-C : S = 0$$

$$+M : S = -0.44$$

6) 참고문헌 (5)의 표 4-3(b)를 이용하여.

$$-C : P_{cr0} = \frac{4\pi^2(547.4)}{6^2} = 600.29 \text{ tf/m}$$

$$k_m = 6.667$$

$$+M : P_{cr0} = \frac{2.234\pi^2(821.10)}{6^2} = 502.89 \text{ tf/m}$$

$$k_m = 2.499$$

7) 본문의 식 (1)과 (2)를 이용하여.

$$-C : P_{cr} = \frac{6.667\pi^2(182.47)}{6^2} = 333.53 \text{ tf/m}$$

$$M = \frac{1}{1 - 200/333.63} (-7.33) = -18.31 \text{ tf} \cdot \text{m/m}$$

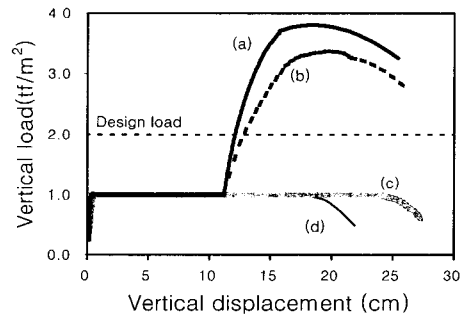
$$+M : P_{cr} = \frac{2.499\pi^2(410.55)}{6^2} = 281.28 \text{ tf/m}$$

$$M = \frac{1}{1 - 200/281.28} (2.7) = 9.34 \text{ tf} \cdot \text{m/m}$$

주열대 단부 (-C)는 압축력 200tf/m와 휨모멘트 18.31 tf/m를, 중간대 중앙부 (+M)는 압축력 200tf/m와 휨모멘트 9.34tf/m를 각각 재하받는 압축부재로 가정할 수 있다. 이때 각 지점의 압축력과 휨모멘트가 모두 해당 단면의 축력과 휨모멘트의 상관도 이내에 들면 안전한 상태이므로 그

설계안을 채택하면 된다. 만약 압축력과 휨모멘트의 조합이 단면의 상관도 바깥에 존재한다면 국부적으로 철근비를 높이거나 또는 q/q_0 값을 조금 줄이거나 슬래브의 두께를 늘린 후에 다시 1~7 단계의 설계과정을 반복수행해야 한다. 주어진 하중조건을 만족하기 위해서는 슬래브의 두께를 20cm로 하고 $q/q_0 = 0.45$ 이면 압축력과 바닥하중에 대해 안전측에 드는 것으로 나타났으며 그의 지점에 대한 설계과정은 Table 3에 요약되어 있다.

위에서 설계된 플랫 플레이트의 안전성 검토를 위하여 비선형 해석을 수행하였다. Fig. 10은 크리프 효과가 고려된 설계안 (a, b), 크리프 효과가 고려되지 않은 기존의 모멘트 증대법에 따른 설계안⁵⁾ (c), 그리고 모멘트 증대효과를 고려하지 않은 설계안 (d)의 거동을 비교하고 있다. 이 해석에서 하중재하조건은 $q_D - P - T - q_L$ 이며 시간경과는 1000일로 가정하였다. 그림에 나타난 바와 같이 모멘트 증



(a) Flat plate designed with creep effect, uniform live load
(b) Flat plate designed with creep effect, strip live load
(c) Flat plate designed with no creep effect
(d) Flat plate designed with no moment magnification

Fig. 10 Verification of moment magnifier method

대를 고려하지 않는 슬래브 (d)는 q_D-P 재하 후 $T=516$ 일만에 파괴가 일어났으며, 크리프 효과를 고려하지 않은 슬래브 (c)는 q_D-P 재하 후 $T=808$ 일만에 파괴에 이르렀다. 따라서 설계하중조건을 만족시키지 못하는 것으로 나타났다. 반면 크리프 효과가 고려된 슬래브의 경우, 균등분포하중 (a)와 불균등분포하중 (b)에 대하여 모두 설계하중 $q(q_D+q_L) = 2\text{tf/m}^2$ 를 초과하여 안전측인 것으로 나타났다. 이 해석결과는 설계하중에 비하여 비교적 큰 값을 가지고 있는데, 그 이유는 본 슬래브 설계시 탄성 이론에 근거한 직접설계법을 사용하여 실제 슬래브의 강도를 저평가하였기 때문이다.

8. 결 론

슬래브의 장기거동을 고려한 모멘트 증대법을 개발하기 위해, 면내 압축력과 바닥하중을 재하받는 슬래브에 대한 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 활하중의 불균등 분포는 크리프에 의한 슬래브의 강도 및 강성저하 효과를 감소시키는 방향으로 작용되는 것으로 나타났으며, 따라서 활하중의 비율이 높으면 활하중의 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 크리프에 의한 유효휨강성비를 제안하였으며, 이를 반영하는 모멘트 증대법을 제안하였다. 또한 본 연구에서 제안된 모멘트 증대법을 슬래브의 설계에 적용하였으며, 이에 대한 비선형 해석을 통하여 모멘트증대법의 유효성을 검증하였다.

참고문헌

1. 박홍근, "면내 압축력을 받는 플랫 플레이트 슬래브에 대한 모멘트 증대법", 한국콘크리트학회지, 제11권 1호, 1999, pp.243~254.
2. 대한건축학회, "극한강도설계법에 의한 철근콘크리트 구조계산기준 및 해설", 1994, pp.125~139.
3. Park, H., "Numerical Study on RC Flat Plates Subjected to Combined Axial and Transverse Load", *Journal of Structural Engineering and Mechanics*, Vol.8, No.2, 1999, pp.137~150.
4. Park, H., and Kim, E., "Reinforced Concrete Flat Plate Subjected to Combined and Out-of-Plane Floor Loads", *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers (ASCE), 1999, pp.1136~1142.
5. 김재요, "면내 압축력과 불균등 바닥하중을 받는 플랫 플레이트 슬래브", 서울대학교 건축학과 석사학위 논문, 2000.
6. 최경규, 박홍근, "바닥하중과 압축력을 받는 플랫 플레이트의 장기거동에 대한 해석적 연구", 한국콘크리트학회 학술 발표회 논문집, 제12권 1호, 2000, pp.611~616.
7. 최경규, 박홍근, "바닥하중과 압축력을 받는 플랫 플레이트의 장기거동에 대한 해석적 연구", 한국콘크리트학회 논문집, 제12권 5호, 2000, pp.153~164.
8. 박홍근, "통합방법을 이용한 철근콘크리트 부재의 비선형 유한요소해석", 한국콘크리트학회지, 제9권 2호, 1997, pp.133~144.
9. Park, H., and Klingner, R. E., "Nonlinear Analysis of RC Members Using Plasticity with Multiple Failure Criteria", *Journal of Structural Engineering*, Vol.123, No.5, 1997, pp.643~651.
10. Taylor, P. J., "Initial and Long-Term Deflections of a Reinforced Concrete Flat Plate Structure", *Civil Engineering Transactions*(Sydney), Vol.12, No.1, 1970, pp.14~20.
11. 박홍근, "면내 압축력 및 면외 바닥하중을 받는 플랫 플레이트 슬래브", 한국콘크리트학회지, 제11권 1호, 1999, pp.231~242.
12. American Concrete Institute, "Building Code Requirements for Structural Concrete", ACI 318-95, 1995, pp.97~98, pp.118~119, pp.207~226.

요 약

바닥하중과 면내 압축력을 동시에 재하받는 지하층 슬래브에 대해 시간의존적 거동이 고려된 모멘트 증대법을 개발하기 위해 수치해석연구를 실시하였다. 수치해석을 위해 비선형 유한요소해석 연구가 수행되었다. 수치해석 연구를 통해 균등 바닥하중과 불균등 바닥하중을 각각 재하받는 플랫 플레이트의 장기거동이 연구되었고, 크리프 효과에 의한 강도 및 강성 저하가 규명되었다. 슬래브에 대한 크리프 효과를 나타내기 위하여 크리프에 의한 유효휨강성비가 도입되었으며, 플랫 플레이트의 장기거동을 고려하기 위하여 이 크리프에 의한 유효휨강성비를 사용하는 모멘트증대법이 개발되었다. 또한 제안된 설계식의 검증을 위하여 설계예제가 제시되어 있다.

핵심용어 : 플랫 플레이트, 비선형유한요소해석, 크리프, 모멘트증대법