

시공하중의 영향을 받는 플랫플레이트의 장기처짐

Long Term Deflection of Flat Plate Affected by Construction Load

강수민* 이지웅* 오재근* 김옥중* 이도범** 박홍근***
Kang, Su Min Lee, Ji Woong Oh, Jea Geun Kim, Ook Jong Lee, Do Bum Park, Hong Gun

ABSTRACT

Serviceability of reinforced concrete building is affected dominantly by long term deflection of slab. And in case of reinforced concrete building with flat plate slab, severe long term deflection was expected because it has no beams which have large flexural stiffness. Therefore it is important to calculate exactly long term deflection of RC flat plate structure to assure its serviceability. However, current codes couldn't calculate exactly long term deflection of RC flat plate structure because they don't consider effects of boundary condition and construction load. By the way, recently the method to calculate long term deflection of RC flat plate structure was proposed by considering these effects. In the present study, long term deflection of RC flat plate structure was analyzed by comparing this method with recent experimental results. In conclusion, long term deflection of RC flat plate structure was affected considerably by effects of boundary condition, construction load and tensile strength of concrete. And recently proposed method considers these effects reasonably but it should be modified to reflect creep effect of RC flat plate slab reasonably.

1. 서론 및 기존 연구

철근콘크리트 구조물에서 슬래브의 장기처짐은 구조물의 사용성에 큰 영향을 미친다. 특히 보가 없는 플랫플레이트 구조물은 슬래브의 휨강성이 일반적인 보-슬래브 구조물 보다 떨어지기 때문에 장기처짐이 크게 일어날 것으로 예상되며 실제 플랫플레이트 구조물에서 이러한 장기처짐이 문제가 되는 경우가 다수 발생하였다. 또한 플랫플레이트 구조물은 시공 속도 증진을 위해 한 개 층 당 2일~4일 공정이 흔히 사용되는 추세인데, 이때 발생하는 시공하중은 아직 완전히 경화되지 않은 슬래브에 휨 균열과 크리프 처짐을 유발시키고, 이러한 초기 휨 손상은 장기 거동에 큰 영향을 미치게 된다.⁽¹⁾ 따라서 플랫플레이트 구조물의 사용성을 확보하기 위해서는 이러한 시공하중의 영향을 반영하여 장기처짐을 합리적으로 계산할 수 있어야 한다.

기존연구⁽¹⁾에 따르면 슬래브의 장기 처짐은 슬래브의 두께, 경계 조건, 철근량, 슬래브의 기하학적 형상, 콘크리트 타설 후 경과 시간 등과 같은 여러 변수들에 의하여 영향을 받는다. 또한 슬래브의 장기 처짐은 위에서 언급한 여러 변수들의 영향뿐만 아니라 시공 중 조건인 시공 하중, 층 공사 주기(floor construction cycle), 초기 채령 콘크리트의 강도 등의 영향을 받으므로 이를 고려할 수 있어야 한다. 이러한 목적을 위하여 몇몇 연구자들이 플랫 플레이트 장기처짐 계산방법에 대해 연구하였다. 표 1은 장기처짐 계산방법에 대한 기존 연구 결과를 개략적으로 정리한 것이다. 그러나 대부분 기존 연구의 제안식이 비선형 유한요소해석이나 실험을 통해 각 변수들의 영향을 추정하여 제안한 경험식이므로 모든 변수들의 영향을 반영하지 못하고 있으며, 제안식에 대한 이론적 근거가 충분치 못한 한계점을 가지고 있다.

* 정회원, 대림산업(주) 건축연구지원팀 연구원

** 정회원, 대림산업(주) 건축연구지원팀 팀장

*** 정회원, 서울대학교 건축학과 부교수

표 1 Existing methods for calculating long term deflection

ACI		Gardner ⁽³⁾	Asamoah ⁽²⁾
Multiplier method	Calculation		
$\delta_i = \lambda_i \delta_{sus}$ $\lambda_i = 1 + \lambda_{sh} + \lambda_{cp}$ δ_i = total deflection δ_{sus} = immediate deflection due to sustained load λ_{sh} = multiplier for shrinkage λ_{cp} = multiplier for creep	$\delta_i = \delta_{sus} + \delta_{sh} + \delta_{cp}$ δ_{sh} = additional deflection due to shrinkage δ_{cp} = additional deflection due to creep	$\delta_i = \delta_{sh} + \delta_{sus} \left[1 + C_i \left(1 + \frac{CL}{UL} \right) \right]$ C_i = creep coefficient CL = maximum construction load UL = design capacity	$\delta_i = \frac{0.000425x}{h^2} \left[\frac{l_n^4}{t_0^{0.2}} \right] \left[\frac{27.1}{E_{cm28}} \right] \left[\frac{1}{\beta} \right]$ h = slab thickness (m) l_n = longer clear span (m) $x=1.0$ for corner panel and 0.4 for an interior panel t_0 = construction cycle E_{cm28} = mean modulus of elasticity at 28 days (GPa) β = aspect ratio

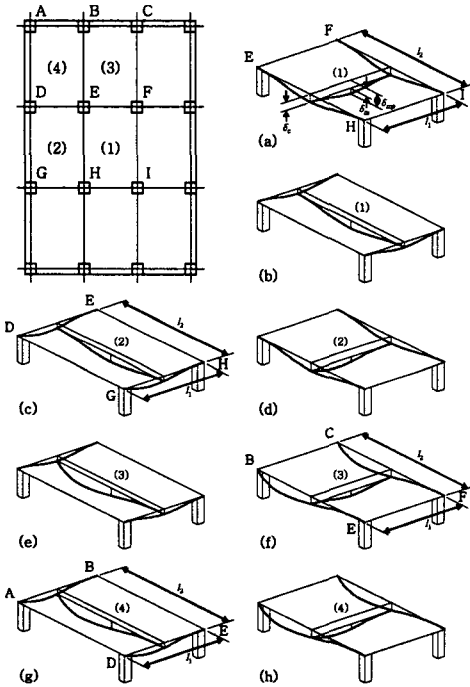


그림 1 경계조건을 반영한 플랫플레이트 처짐 계산⁽¹⁾

$$\begin{aligned}
 (\delta_{inc})_{내부} &= \left[\frac{5\lambda(LR)_{sus}}{2E_c} \right] \times \left[0.32 \frac{\alpha_1^4}{(2\beta-1)} l_1^3 + 0.34 \frac{\alpha_2^4}{\gamma_2} l_2^3 \right] \frac{l_2}{h^2} \\
 (\delta_{inc})_{외부} &= \left[\frac{5\lambda(LR)_{sus}}{2E_c} \right] \times \left[0.32 \frac{\alpha_1^4}{(2\beta-1)} l_1^3 + 0.7 \frac{\alpha_2^4}{\gamma_2} l_2^3 \right] \frac{l_2}{h^2} \quad (1) \\
 (\delta_{inc})_{코너} &= \left[\frac{5\lambda(LR)}{2E_c} \right] \times \left[0.7 \frac{\alpha_1^4}{(2\beta-1)} l_1^3 + 0.7 \frac{\alpha_2^4}{\gamma_2} l_2^3 \right] \frac{l_2}{h^2}
 \end{aligned}$$

여기서, $\alpha_1 = l_{n1}/l_1$, λ =장기처짐계수, $(LR)_{sus}$ =슬래브 자중에 대한 시공하중 비율, β =슬래브 종횡비, γ =유효강성비, (자세한 계산방법은 기존연구⁽¹⁾ 참조).

이러한 플랫플레이트 장기처짐 계산식의 한계를 극복하기 위하여 최근 강성훈 등⁽¹⁾은 시공 하중, 층 공사 주기 등의 영향을 반영할 수 있는 보다 합리적인 플랫플레이트의 장기처짐 계산법을 제안하였다. 특히 강성훈 등⁽¹⁾이 제안한 최소두께 산정식은 그림 1과 같이 플랫플레이트의 경계조건을 장기처짐을 계산하는데 합리적으로 반영하여 식 (1)과 같이 제안하였다. 하지만 강성훈 등⁽¹⁾이 제안한 장기처짐 계산식은 유효보이론과 슬래브 직접설계이론을 반영하여 제안된 이론적인 값이라고 할 수 있으며 실험결과가 부족하여 실제적인 검증이 이루어지지 않았다고 볼 수 있다.

그런데 최근 R. L. Vollum 등⁽⁴⁾에 의해서 플랫플레이트 장기처짐에 관한 대규모 실험이 이루어졌으며 시공하중 및 장기처짐에 대한 신뢰할 수 있는 실험 결과를 얻을 수 있게 되었다. 따라서 본 연구에서는 R. L. Vollum 등⁽⁴⁾의 실험결과와 강성훈 등⁽¹⁾이 제안한 장기처짐 계산방법을 비교함으로써 장기처짐 계산방법을 검증하고 플랫플레이트 구조물의 장기처짐에 대해 분석하도록 하겠다.

2. 제안된 방법과 실험결과 분석

Vollum 등⁽⁴⁾은 그림 2와 같은 평면의 6층 규모의 플랫플레이트 구조물의 장기처짐을 측정하였다. 실제 시공하중과 시공 후 하중에 대한 측정을 그림 3과 같이 명확하게 측정하였으며 이에 따른 장기처짐을 각

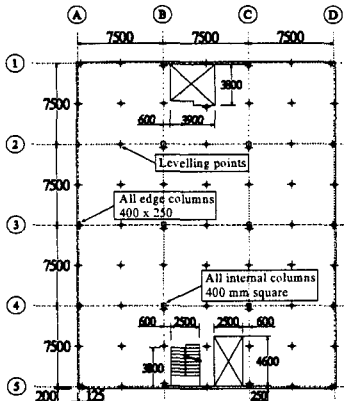


그림 2 실험대상 건물 평면(2층)

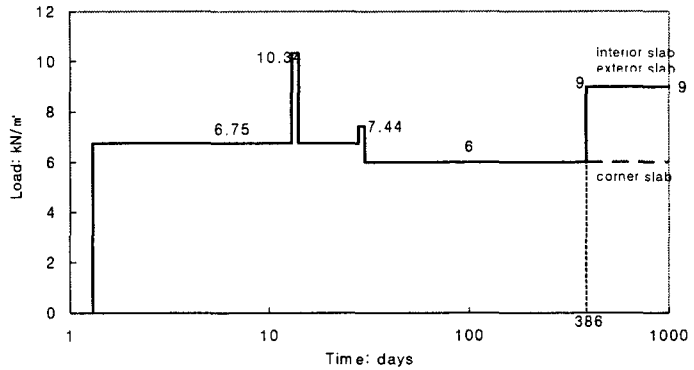


그림 3 실험대상 건물 2층 슬래브에 가해지는 시공하중 및 장기하중

슬래브 중앙에서 측정하였으며 이는 표 2에 나타난 바와 같다. 또한 재료성질, 강도, 크립, 건조수축 등에 대한 데이터가 충실히 측정되어 플랫플레이트 장기처짐을 분석하기에 적합하다. 표 2에는 강성훈 등이 제안한 장기처짐 계산방법을 사용하여 실험결과를 예측한 것을 동시에 표시하였다. 표 2를 분석하여 볼 때, 예측된 장기처짐은 시공하중의 영향을 합리적으로 반영할수록 실제 장기처짐과 가까워 지는 것을 볼 수 있다. 시공하중을 고려하지 않은 경우에 해석값과 실험값의 차이가 큰 것을 볼 수 있으나 시공하중을 고려하면 그 차이가 줄어들고 있으며 시공하중에서 충격하중의 영향을 고려하여 그 크기를 증가시켰을 경우 (일반적으로 시공하중을 고정하중(D)의 0.5배로 가정) 해석값과 실험값의 차이가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 따라서 시공하중을 합리적으로 고려해야 신뢰성있는 장기처짐 예측이 가능함을 알 수 있다. 그런데 시공하중을 0.5D로 가정하여도 해석값과 실험값에는 어느 정도 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 이는 강성훈 등이 제안한 장기처짐 계산에서 크립에 의한 장기처짐을 반영할 때, ACI의 크립모델을 사용하였는데, 일반적으로 ACI 크립모델은 2방향 슬래브의 크립을 과소평가하기 때문인 것으로 판단된다.

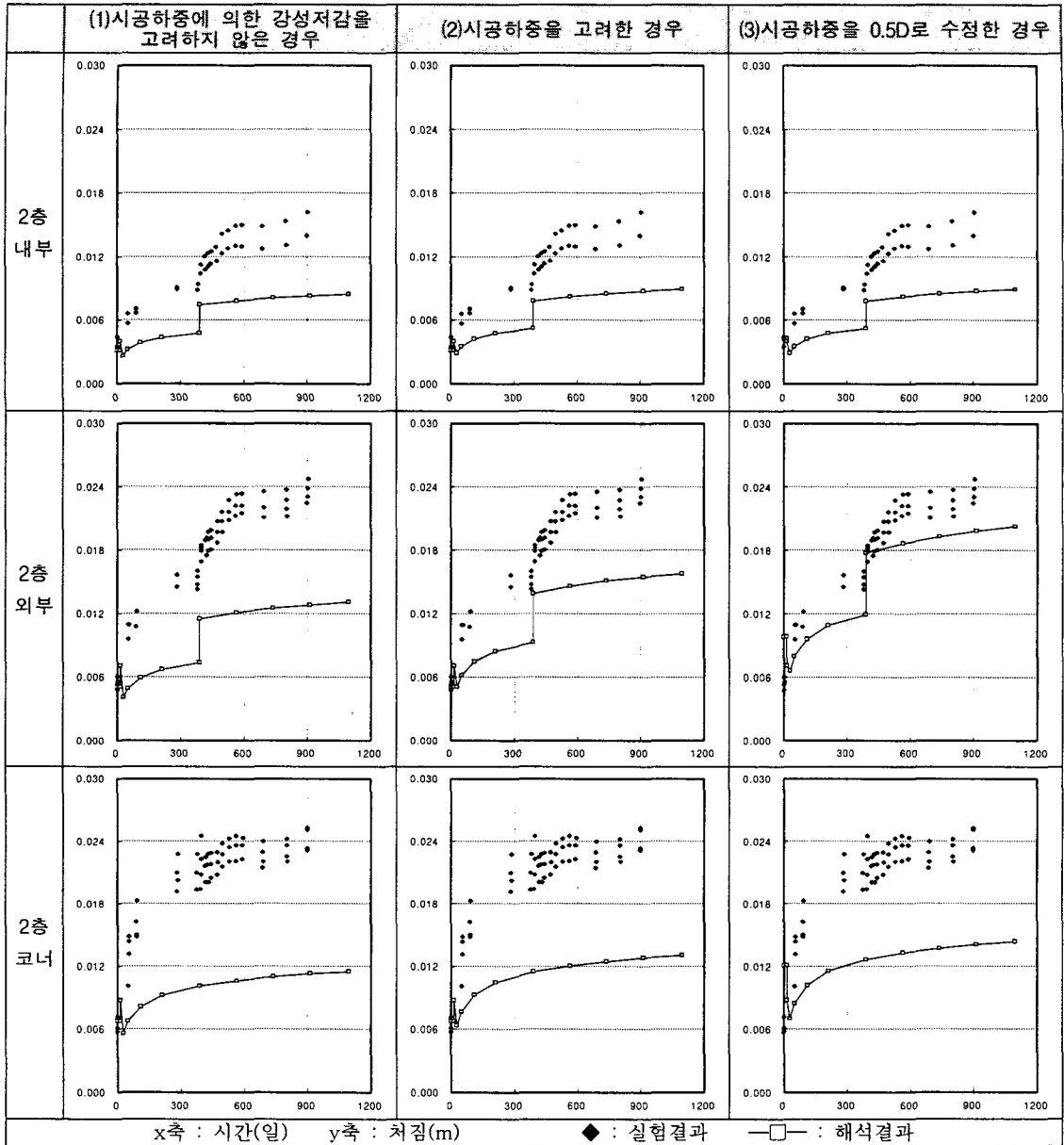
표 2에 따르면 내부, 외부 그리고 코너 스패의 장기처짐이 상당히 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 그림 3에서 슬래브에 가해지는 하중을 살펴보면 하중조건이 시공 후 386일까지는 각 슬래브가 동일한 것을 볼 수 있으며 이때의 장기처짐 실험값은 내부슬래브의 경우는 대략 9mm, 외부슬래브의 경우는 15mm 정도이고 코너 슬래브의 경우는 21mm 정도이므로 경계조건에 따라 슬래브의 장기처짐이 크게 차이나는 것을 볼 수 있다. 따라서 강성훈 등의 장기처짐 제안식이 경계조건을 반영하도록 한 것은 합리적이라고 판단된다. 하지만 ACI 기준에서 장기처짐을 방지하기 위해 제안된 슬래브의 최소두께는 내부 슬래브와 외부 슬래브만을 고려하도록 되어있기 때문에 코너 슬래브의 장기처짐을 제어하기에는 합리적이지 못하다고 판단되며 이에 대한 개선이 필요하다고 판단된다.

Vollum⁽⁴⁾ 등의 실험결과를 살펴보면 슬래브 장기처짐에서 철근량은 큰 변수가 되지 못하는 것으로 나타났다. 슬래브의 유효강성은 장기처짐에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 장기처짐을 제어하기 위해서는 철근량을 증가시키는 것보다는 유효강성을 확보하기 위하여 초기 슬래브균열을 제어하는 것이 중요하며 이를 위해서는 시공 중에 콘크리트 인장강도를 조기에 발현시키는 것이 장기처짐 제어를 위한 합리적인 방법이라고 할 수 있다. 따라서 슬래브의 장기처짐을 제어하기 위해서는 조강콘크리트를 사용하거나 인장강도가 큰 콘크리트를 사용하는 것이 합리적이라고 할 수 있다.

3. 결론

RC 건물에서 슬래브의 장기처짐은 사용성에 중요한 영향을 미치므로 장기처짐을 합리적으로 예측해야 한다. 특히 플랫플레이트 슬래브의 경우, 휨강성이 큰 보가 없으므로 장기처짐이 크게 발생하므로 이를 합리적으로 예측해야 한다. 플랫플레이트 슬래브의 장기처짐에 대한 실험과 해석방법을 분석한 결과, 슬래브의 장기처짐을 합리적으로 예측하기 위해서는 시공하중의 영향, 경계조건의 영향을 반영해야 한다. 반면 장기처짐에 대한 ACI 크립모델은 2방향 슬래브의 장기처짐을 예측하기에 적합하지 않은 것으로 판단된다. 슬래브의 장기처짐을 제어하기 위해서는 철근의 사용량을 증가시키기 보다는 조강콘크리트를 사용하거나 인장강도가 큰 콘크리트를 사용하여 초기 균열을 제어하는 것이 합리적이라고 할 수 있다.

표 2 플랫플레이트 슬래브의 장기처짐에 대한 실험값과 예측값 분석



참고문헌

- (1)시공 하중의 영향을 받는 플랫 플레이트의 최소 두께 강성훈, 최경규, 박홍근, 한국콘크리트학회논문집, 1229-5515, 제15권5호, pp650~661, 2003
- (2) Asamoah, K. O. and Gardner , "Flat Slab Thickness Required to satisfy serviceability Including Early Age Construction Loads," *ACI Structural Journal*, Vol. 94, No. 6, November 1997, pp.700~707.
- (3) Gardner, N. J. and Fu, H. C., "Effect of High Construction Loads on the Long-Term Deflections of Flat Slabs," *ACI Structural Journal*, Vol. 84, No. 4, July 1987, pp.349~360.
- (4) R. L. Vollum, R. M. Moss and T. R. Hossain, "Slab Deflections in the Cardington in-situ Concrete Frame Building," *Magazine of Concrete research*, 2002, 54, No. 1. pp. 23~34