

시공하중 및 균열 효과를 고려한 플랫 플레이트의 장기 처짐에 대한 변수 연구

Parametric Study on Long-Term Deflections of Flat Plates Considering Effects of Construction Loads and Cracking

최 승 민¹⁾ 엄 태 성²⁾ 김 재 요^{3)*}
Choi, Seung Min Eom, Tae Sung Kim, Jea Yo

Abstract

The structural designs of RC flat plates that have no flexural stiffness by boundary beams may be governed not by strength conditions but by serviceabilities. Specially, since over-loading and tensile cracking in early-aged slabs significantly increase the immediate and long-term deflections of a flat plate system, a construction sequence and its impact on the slab deflections may be decisive factors in designs of flat plate systems. In this study, the procedure of calculating slab deflections with considering construction sequences, concrete cracking, and long-term effects is proposed. Using the proposed method, the parametric study for deflections of flat plates is performed. With various conditions for slab construction cycle, the number of shored floors, tensile or compressive reinforcement ratio, compressive strength of concrete, construction live load, and slab thickness, the immediate deflection during construction and long-term deflections after completion are analyzed. The calculated results are compared with the serviceability limits offered by the structural design code.

Keywords : Flat Plate, Long-Term deflection, Construction load, Crack, Reinforced concrete

1. 서 론

플랫 플레이트 바닥 구조는 층고 절감 및 시공성 향상, 공간 활용성 향상이라는 장점에도 불구하고, 작은 휨강성으로 인하여 강도가 아닌 처짐에 의해 부재 설계가 지배 받을 수 있어 구조설계에 주의가 요구된다. 특히, 새롭게 타설된 슬래브 콘크리트는 완전히 경화하기까지 강도 및 강성을 충분히 발휘할 수 없으므로, 타설 후 일정 기간 동안에는 자중을 스스로 지탱하지 못하고 동바리로 연결된 하부 층들로 자중의 전체 혹은 일부를 전달하게 된다. 시공 중 타설 시점이 다양한 여러 층 슬래브들이 하나의 시스템을 구성하고, 이 시스템을 구성하는 슬래브들에 작용하는 시공하중은 지속적으로 변화하게 되며, 시공조건에 따라 자중의 2배가 넘는 시공하중이 작용할 수 있다.(김재요, 2009; 황현중 등, 2010) 따라서, 플랫 플레이트는 시공하중의 큰 영향을 받을 수 있으며, 동바리를 통하여 전달되는 시공하중으로 인하여 초기 재령의 슬래브에 과

대한 하중이 작용함으로써, 구조 안전성뿐만 아니라 장단기 사용성에도 영향을 미칠 수 있다.(Gardner and Fu, 1987; Vollum et al., 2002) 완전히 경화되지 않은 슬래브에 발생한 이러한 초기 손상은 슬래브 경화 후에도 존재함으로써 슬래브 자중 및 마감하중, 활하중 등에 의한 즉시처짐은 물론 장기 거동에 큰 영향을 미칠 수 있다.

시공 중 플랫 플레이트 구조에 발생하는 손상 및 처짐을 분석하기 위해서는 시공단계를 고려한 슬래브 처짐 산정법이 사용되어야 한다. 일반적으로, 시공 중 슬래브 콘크리트는 경화되고 있는 과정이므로, 강성 및 강도가 지속적으로 변화하여, 단순히 시공하중의 크기만으로 슬래브의 처짐과 손상을 평가할 수는 없다. 시공단계에 따라 변화하는 시공하중의 크기와 함께, 시공하중 작용시점들마다 변화하는 슬래브 콘크리트의 강도와 강성을 함께 고려하여 처짐을 산정할 수 있어야 한다. 이를 위하여, 시공하중과 강도 및 강성의 발현, 균열에 따른 유효단면강성 저하 효과를 고려하여, 시공단계별로 시공하중을 산정하

1) 정회원, 광운대학교 건축공학과 석사과정
2) 정회원, 대구가톨릭대학교 건축학부 조교수, 공학박사
3) 정회원, 광운대학교 건축공학과 조교수, 공학박사, 교신저자

* Corresponding author : kimjyo@kw.ac.kr 02-940-5637

• 본 논문에 대한 토의를 2012년 2월 29일까지 학회로 보내주시면 2012년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

는 과정이 개발되어야 한다. 플랫 플레이트의 처짐에 대한 기존의 연구들(Rangan, 1986; 강성훈 등, 2003; 김재요, 2009)에서는 이러한 시공단계 효과를 고려하지 않고, 특정 시점에 대한 처짐 산정 과정만을 제시하고 있다.

또한, 지속하중에 의한 건조수축 및 크리프에 의하여, 하중이 작용하는 순간의 처짐 외에 추가적인 처짐이 슬래브에 발생할 수 있다. 설계기준(한국콘크리트학회, 2007; ACI committee 318, 2008)에서는 즉시처짐의 최대 2배의 추가처짐이 휨부재에 발생하는 것으로 정의하고 있다. 이러한, 장기처짐 효과는 재하 초기에 크게 발생하며, 시공 중에도 지속적으로 발생할 수 있다. 설계기준(한국콘크리트학회, 2007; ACI committee 318, 2008)에서는 재하 초기 3개월 동안 즉시처짐값만큼의 추가처짐이 발생하는 것으로, 시간 경과계수를 정의하고 있다. 따라서, 시공단계에서의 처짐 변화를 예측하기 위해서는 장기처짐 효과도 포함되어야 한다. 시공단계 효과를 고려한 플랫 플레이트 처짐을 산정한 기존의 연구(김재요 등, 2009)에서는 이러한 장기처짐 효과를 반영하지 못하고, 시공 중에 발생하는 즉시처짐만을 예측하였다.

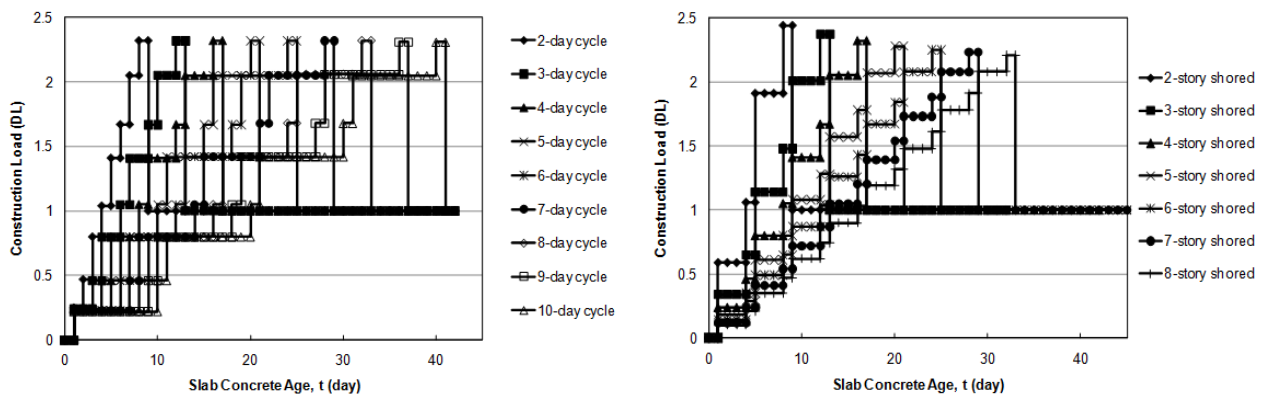
이 연구에서는 시공 단계에 따라 변화하는 시공하중과 재료성질을 종합적으로 고려하여 플랫 플레이트 시공 중 처짐 및 장기처짐 변화를 산정할 수 있는 방법을 제시한다. 또한, 제안된 장기처짐 산정법을 다양한 설계 및 시공 조건들에 적용하여, 각 변수에 따른 장기처짐 변화값을 분석한다. 시공주기 및 동바리 지지 층 수, 인장철근비, 압축철근비, 콘크리트 강도, 시공활하중, 슬래브 두께 등에 따른 플랫 플레이트의 처짐 변화를 비교하고, 설계기준에서 제시하는 허용처짐값과 비교함으로써, 슬래브 처짐에 대한 각 변수들의 효과를 분석한다.

2. 시공단계별 슬래브 처짐 산정

2.1 시공하중 산정

ACI 347.2R-05(ACI Committee 347, 2005)은 Grundy and Kabaila(1963)가 제안한 “간편법(simplified method)”을 통하여 슬래브의 시공 하중을 결정하는 가이드라인을 제시하고 있다. 간편법에서 시공하중의 변화값은 각 층 슬래브의 재령에 따른 탄성계수의 비에 따라 분배되어 누적된다. 동바리의 무한강성을 가정하고, 슬래브 콘크리트의 균열에 의한 효과를 고려하지 않아 정밀성이 비교적 낮을 수 있으나,(황현중 등, 2010) 간단한 수계산만으로 시공하중을 산정할 수 있어 가장 많이 사용되고 있는 시공하중 산정법이다.

Fig. 1은 슬래브 1개 층 자중의 50%에 해당하는 시공 활하중이 최상층에 작용하고 최상층 콘크리트 타설 후 1일에 최하부 동바리가 제거되는 시공순서를 가정하여, 슬래브 층당 시공주기 및 동바리 지지 층 수 변화에 따라 간편법에 의하여 산정된 슬래브 시공하중의 변화를 보여주고 있다.(김재요, 2009) 동바리에 의해 연결된 슬래브 시스템의 하부층으로 갈수록 보다 큰 시공 하중이 작용하며, 상부층들과 연결된 동바리가 제거되기 직전에 최대 하중이 작용한다. 최대 시공 하중의 크기 및 작용 시점의 슬래브 콘크리트 재령은 시공주기 및 동바리 지지층 수에 따라 달라진다. Fig. 1(a)는 4개 층 동바리 지지인 경우에 대하여, 층당 2일~10일의 시공주기에 따른 콘크리트 재령별 시공 하중을 보여 주고 있다. 시공 주기의 변화에 대하여 최대 시공 하중값은 거의 유사하나, 시공 주기가 길어질수록 최대 시공 하중이 작용하는 슬래브 콘크리트



(a) Construction Load with 4 Story Shored

(b) Construction Load with 4 Day Cycle

Fig. 1 Slab Construction Load with Concrete Age

재량이 커진다. Fig. 1(b)는 4일 층당 시공주기에 대하여, 2개 층~8개 층의 동바리 지지 층 수에 따른 콘크리트 재량별 시공 하중을 보여 주고 있다. 동바리 지지 층 수가 많아질수록 최대 시공 하중은 감소하며, 최대 시공 하중에 대응되는 슬래브 콘크리트 재량이 커진다.

2.2 슬래브 처짐 산정

이 연구에서는 각 시공단계별 탄성계수와 시공하중의 비율에 따른 계수 및 유효단면2차모멘트값 변화에 따른 증폭계수를 사용하여 탄성처짐값으로부터 직접 슬래브 처짐값을 산정하는 처짐해석법(김재요 등, 2009)을 적용하여 즉시처짐값을 산정한다. 또한, 설계기준(한국콘크리트학회, 2007; ACI committee 318, 2008)에서 제시하는 시간 경과계수를 적용하여 장기처짐값을 산정한다.

플랫 플레이트의 중앙부 처짐값은 교차보법(Scanlon and Murray, 1982; Rangan, 1986; ACI Committee 435, 2003; 강성훈 등, 2004; 김재요 등, 2009)에 의하여 산정한다. 교차보법에서는 각 방향의 주열대와 중간대를 연속보로 간주하고 각각의 처짐을 계산하여 중첩함으로써, 슬래브 중앙부의 처짐을 산정할 수 있다. 슬래브 주열대와 중간대의 처짐은 주열대와 중간대의 각 모멘트에 의하여 다음과 같이 결정된다.

$$\delta = \frac{5}{48} \frac{l_n^2}{E_c I_g} [M_m + 0.1(M_1 + M_2)] \quad (1)$$

여기서, l_n 은 모멘트가 결정되는 방향의 순경간 길이이며, E_c 는 슬래브 콘크리트의 탄성계수, I_g 는 슬래브의 전 단면 2차모멘트이다. 또한, M_m 은 중앙부의 단위 폭당 모멘트이며, M_1 과 M_2 는 양 단부의 단위 폭당 모멘트이다.

슬래브 중앙부 처짐은 주열대 등가보의 처짐과 중간대 등가보의 처짐을 중첩시켜 다음과 같이 구할 수 있다(Fig. 2).

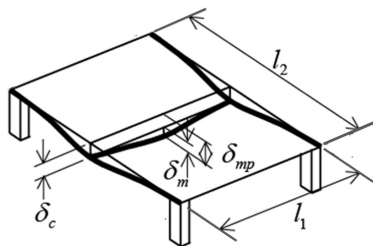


Fig. 2 Crossing Beam Method

$$\delta_{mp} = \delta_c + \delta_m \quad (2)$$

여기서, δ_{mp} 는 슬래브 중앙부 처짐값이며, δ_c 와 δ_m 은 각각 주열대와 중간대의 처짐값으로서 식 (1)에 의하여 계산된다.

콘크리트 설계기준(한국콘크리트학회, 2007; ACI committee 318, 2008)은 휨부재의 균열에 따른 유효단면강성저하를 고려하기 위하여 다음과 같은 유효단면2차모멘트 산정식을 제시하고 있다.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \quad (3)$$

여기서, M_{cr} 은 콘크리트의 휨균열을 발생시키는 균열모멘트이고, M_a 는 슬래브 작용 모멘트이다. I_g 는 철근을 무시한 콘크리트 전체 단면의 중심축에 대한 단면 2차모멘트이고, I_{cr} 은 균열 단면의 단면2차모멘트이다. 단순지지부재의 경우, 최대 정모멘트를 식 (3)에 대입하여 부재의 유효단면2차모멘트를 직접 산정할 수 있으나, 연속지지인 경우 양단의 부모멘트와 중앙부 정모멘트에 의한 유효단면2차모멘트를 각각 산정한 후, 다음 식에 의하여 부재 전체의 평균유효단면2차모멘트값(I_{ea})을 계산한다.(한국콘크리트학회, 2007)

$$I_{ea} = 0.75I_{em} + 0.15(I_{e1} + I_{e2}) \quad (4)$$

여기서, I_{e1} 과 I_{e2} 는 양단 연속부재의 양 단부 부모멘트에 대한 유효단면2차모멘트값이며, I_{em} 은 중앙부 정모멘트에 대한 유효단면2차모멘트값으로 식 (3)에 대입하여 산정한다.

이러한 내용들을 바탕으로 플랫 플레이트 장기처짐 산정의 전 과정은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 주요 시공단계를 정의하고, 슬래브 시공주기 및 동바리 지지 층 수를 고려하여 시공단계별 시공하중을 산정한다.
- 2) 슬래브 자중(DL)에 의한 플랫 플레이트에서의 모멘트를 산정한다. 플랫 플레이트 각 지점의 단위폭당 모멘트는 직접설계법(한국콘크리트학회, 2007; ACI committee 318, 2008)에 따라 다음 식과 같

이 정의한다.

$$M = \alpha \frac{w l_n^2}{4} \quad (5)$$

여기서, w 는 슬래브 단위 폭당 작용하는 바닥하중이며, α 는 슬래브 각 지점에 따라 결정되는 변수로서, 플랫 플레이트의 경우 Table 1과 같이 결정된다. (한국콘크리트 학회, 2007; ACI committee 318, 2008)

- 3) 슬래브 자중(DL) 및 28일 재료강성(E_c)을 적용한 플랫 플레이트 탄성 처짐값을 산정한다. 전단면 2차모멘트(I_g)를 적용한 슬래브의 주열대 및 중간대의 처짐값 δ_{ce} 와 δ_{me} 를 식 (1)에 의하여 각각 계산한다.
- 4) 각 시공단계별 탄성 처짐 증가값과 모멘트값을 정의한다. 탄성 처짐값은 작용하중 및 재료강성과 선형적인 관계이며, 탄성 모멘트값 역시 작용하중과 선형적인 관계이다. 따라서, 슬래브 1개층 자중(DL) 및 28일 재료강성(E_c)에 의한 결과에 해당 시공단계의 시공하중 및 재령에 따른 탄성계수(ACI Committee 209, 1997)를 비례적으로 적용하여, 각 시공단계별 모멘트값과 탄성 처짐 증가값을 산정할 수 있다.

$$M_i = M(DL) \times LF_i \quad (6)$$

$$\Delta \delta_{ce,i} = \delta_{ce}(DL, E_c) \times \Delta LF_i \times \frac{E_c}{E_{c,i}} \quad (7a)$$

$$\Delta \delta_{me,i} = \delta_{me}(DL, E_c) \times \Delta LF_i \times \frac{E_c}{E_{c,i}} \quad (7b)$$

Table 1 Factors for Bending Moment in Flat Plate

Location		Column Strip	Middle Strip
Interior Span	Negative Moment	0.49	0.16
	Positive Moment	0.21	0.14
Exterior Span	Interior Negative Moment	0.53	0.18
	Positive Moment	0.31	0.21
	Exterior Negative Moment	0.26	0

여기서, M_i 는 i 단계에서의 슬래브 작용 모멘트값이고, $M(DL)$ 은 슬래브 1개층 자중(DL)에 의한 슬래브 작용 모멘트값이며, $\Delta \delta_{ce,i}$ 와 $\Delta \delta_{me,i}$ 는 각각 i 단계의 주열대와 중간대에서의 탄성처짐 증가값이고, $\delta_{ce}(DL, E_c)$ 와 $\delta_{me}(DL, E_c)$ 는 슬래브 1개층 자중(DL)과 28일 재료강성(E_c)을 적용한 주열대와 중간대에서의 탄성처짐값이다. 또한, $E_{c,i}$ 는 i 단계에서의 재령을 반영한 콘크리트의 탄성계수값이며, LF_i 는 i 단계에 작용하는 시공하중을 의미하고, 슬래브 1개 층 자중(DL)에 대한 비를 나타내는 계수이다. ΔLF_i 는 i 단계에서의 시공하중비의 증가값이다.

- 5) 식 (6)을 이용하여 산정된 각 시공단계별 작용모멘트(M)와 콘크리트 압축강도 및 균열모멘트를 고려하여, 식 (3)과 (4)에 의하여 시공단계별 유효단면 2차모멘트($I_{e,i}$)가 산정된다. 이 때, 주열대와 중간대에 대한 유효단면 2차모멘트값 $I_{ce,i}$ 와 $I_{me,i}$ 가 각각 산정되어야 하며, 균열에 의하여 저하된 유효단면강성은 하중이 제거되더라도 회복되지 않는 것으로 가정하여, 이전 단계들의 유효단면 2차모멘트값보다 작거나 같아지도록 적용된다.
- 6) 식 (7)을 이용하여 산정된 각 시공단계별 탄성 처짐 증가값($\Delta \delta_{e,i}$)을 누적하여, 총 탄성처짐값($\delta_{e,i}$)을 산정한다. 이 때, 주열대와 중간대에 대하여 총 탄성처짐값 $\delta_{ce,i}$ 와 $\delta_{me,i}$ 가 각각 산정된다.

$$\delta_{ce,i} = \sum_{k=1}^i \Delta \delta_{ce,k} \quad \text{and} \quad \delta_{me,i} = \sum_{k=1}^i \Delta \delta_{me,k} \quad (8)$$

- 7) 각 시공단계별 총 탄성처짐값은 해당 시공단계의 유효단면 2차모멘트($I_{e,i}$)와 전단면 2차모멘트(I_g)를 이용하여 비탄성 처짐값으로 증폭된다.

$$\delta_{c,i} = \delta_{ce,i} \times \frac{I_{cg}}{I_{ce,i}} = \left(\sum_{k=1}^i \Delta \delta_{ce,k} \right) \times \frac{I_{cg}}{I_{ce,i}} \quad (9a)$$

$$= \left\{ \sum_{k=1}^i \left(\delta_{ce}(DL, E_c) \times \Delta LF_k \times \frac{E_c}{E_{c,k}} \right) \right\} \times \frac{I_{cg}}{I_{ce,i}}$$

$$\delta_{m,i} = \delta_{me,i} \times \frac{I_{mg}}{I_{me,i}} = \left(\sum_{k=1}^i \Delta \delta_{me,k} \right) \times \frac{I_{mg}}{I_{me,i}} \quad (9b)$$

$$= \left\{ \sum_{k=1}^i \left(\delta_{me}(DL, E_c) \times \Delta LF_k \times \frac{E_c}{E_{c,k}} \right) \right\} \times \frac{I_{mg}}{I_{me,i}}$$

여기서, I_{cg} 와 I_{mg} 는 각각 주열대와 중간대에서의 전단면 2차모멘트이고, $I_{ce,i}$ 와 $I_{me,i}$ 는 각각 i 단계의 주열대와 중간대에서의 유효단면 2차모멘트값이다.

- 8) i 단계에서 슬래브 중앙부의 처짐 δ_i 는 식 (2)의 교차보법에 의하여 주열대와 중간대 처짐의 합으로서 산정된다.

$$\delta_i = \delta_{c,i} + \delta_{m,i} \quad (10)$$

- 9) 각 시공단계에서의 처짐 증가값($\Delta\delta_i$)에 t_i 일부터 발생하는 지속하중에 의해 생긴 순간처짐에 크리프와 건조수축에 의한 장기처짐 효과를 곱한 값을 누적하여 t_i 일까지의 장기처짐을 산정한다.

$$\delta_i = \sum_{i=1}^n \left[\Delta\delta_i \times \left(1 + \frac{\xi(t-t_i)}{1+50\rho'} \right) \right] \quad (11)$$

단, $(t-t_i) \leq 18$ 일 때 $\xi(t-t_i) = 0.02 \times (t-t_i)$
 $(t-t_i) > 18$ 일 때 $\xi(t-t_i) = 0.35 \times \ln(t-t_i) - 0.65$

여기서, ρ' 은 슬래브 주열대 및 중간대의 압축철근비이고, ξ 는 장기변형에 대한 시간경과계수이다.

- 10) 시공단계별로 4) - 9)의 과정을 반복한다. 이 때, 시공하중이 감소하는 경우, 처짐은 탄성 회복되는 것으로 가정한다.

$$\delta_i = \delta_{i-1} + \delta_e(\Delta LF_i, E_{c,i}) \quad (12)$$

여기서, δ_e 는 시공하중 감소에 따른 하중변화 ΔLF_i 와 해당 시공단계의 탄성계수 $E_{c,i}$ 에 의해 결정되는 탄성처짐값이므로, δ_e 와 ΔLF_i 는 음(-)의 값을 가진다.

3. 변수에 따른 처짐 연구

3.1 적용 대상

앞에서 제안한 플랫폼 플레이트의 장기처짐 산정법을 적용하여 다양한 설계 및 시공 조건에 따른 장단기 처짐값의 변화를 분석하기 위하여, 순경간 길이 8m×8m인 내부 경간 플랫폼 플레이트를 적용 대상으로 가정하였다. 최

Table 2 Material Properties

Concrete		Reinforcement		
Comp. Strength (MPa)	Elastic Modulus (MPa)	Yield Strength (MPa)	Tension Reinforcement Ratio	
f_{ck}	E_c		Column Strip	Middle Strip
30	28,576.8	400	Top 0.69% Bottom 0.29%	Top 0.22% Bottom 0.20%

상층 콘크리트 타설 후 1일에 최하부 동바리가 제거되는 시공순서를 가정하여, 슬래브 층당 시공주기 및 동바리 지지 층 수 변화에 따라 “간편법”(Grundy and Kabaila, 1963)을 통하여 슬래브 시공하중의 변화를 정의하였다. 또한, 장기적인 처짐값 산정을 위해, 마감하중 및 활하중 작용 시점을 가정하여 적용하였으며, 계산의 단순화를 위하여 슬래브 자중에 비례하는 것으로 가정하였다. 최하층 동바리를 제거한 이후 80일 시점에 마감하중(0.35DL)이 작용하여 총 사용하중은 1.35DL이 되는 것으로, 130일 이후부터 활하중(0.34DL)이 재하되어 1.69DL의 사용하중이 작용하는 것으로 가정하였다.

4일 시공주기 및 4개 층 동바리지지, 슬래브 두께 240mm, 시공활하중 0.5DL과 Table 2에서 제시된 콘크리트 강도 및 철근비를 기본 조건으로 가정하였으며, 각 변수 조건을 변화하며 슬래브 시공 중 처짐 변화 및 장기 처짐값을 분석하였다.

3.2 변수 연구 방법

변수 연구는 시공주기, 동바리 지지층수, 콘크리트 강도, 슬래브 두께, 시공활하중, 인장철근비, 압축철근비에 대하여 각각의 조건을 달리하여 실시하였으며, 시공단계를 고려하여 “2. 시공단계별 슬래브 처짐 산정법”에서 제시된 산정과정에서 따라 플랫폼 플레이트 중앙부 처짐을 산정하였다.

구조설계기준에서는 플랫폼 플레이트의 활하중에 의한 순간 처짐을 $l/360$ (=22.2mm), 모든 지속하중에 의한 장기 처짐과 활하중에 의한 순간처짐의 합을 $l/480$ (=16.7mm)로 제한하고 있다. 설계기준에서 제시하는 사용성 제한값과의 비교를 위하여, 각 변수 조건에 따른 해석 결과를 이용하여 지속하중에 의한 장기처짐값과 활하중에 의한 순간처짐값의 합을 식 (13)과 같이 산정한다.

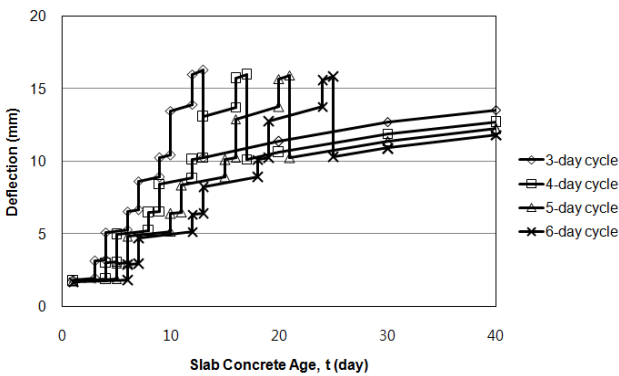
$$\delta_{long} = \delta_{res} \times \frac{\xi_1}{1 + 50\rho'} + \delta_{SDL} \times \frac{\xi_2}{1 + 50\rho'} + \delta_{LL} \quad (13)$$

여기서 δ_{long} 은 지속하중의 장기처짐값과 활하중의 순간처짐값의 합으로서, 장기처짐값의 산정은 5년 이상의 시점으로 한다. δ_{res} 는 해당 슬래브의 위에 세워져 있던 동바리를 제거함으로써, 상부층들의 슬래브 하중에 의한 처짐이 제거되고, 해당 슬래브 자중만으로 발생한 잔류처짐을 의미한다. δ_{SDL} 는 마감하중 작용에 의한 순간처짐 증가값, δ_{LL} 는 활하중 작용에 의한 순간처짐 증가값으로서, 처짐해석 결과에 의해 얻어지는 값들이다. ρ' 은 압축 철근비이며, ξ_1 은 잔류처짐에 대한 시간경과계수로서 콘크리트 타설 후 동바리 제거까지의 기간 동안에 발생하는 장기처짐 효과는 δ_{res} 에 포함되어 있으므로 초기 약 30일 정도의 시간경과 효과를 무시하기 위하여, 5년 이상에 대한 시간경과계수값 2.0에서 1개월에 해당하는 시간경과계수값 0.5를 제하고 1.5만을 적용한다. ξ_2 는 마감하중에 대한 시간경과계수로서 작용시점부터 처짐을 계산하므로 5년 이상에 대한 시간경과계수값 2.0을 그대로 적용한다.

“3.1 적용대상”에서 제시한 기본조건에 대한 시공 중 최대처짐, 잔류처짐, 활하중에 의한 순간처짐, 지속하중 장기처짐과 활하중 순간처짐의 합에 대한 값을 Table 3에서 보여 주고 있으며, 가정한 기본조건에서는 설계기준의 최대허용처짐값을 초과하지 않음을 알 수 있다.

3.3 변수 연구 결과

3.3.1 시공주기의 영향



(a) Short-term Deflections

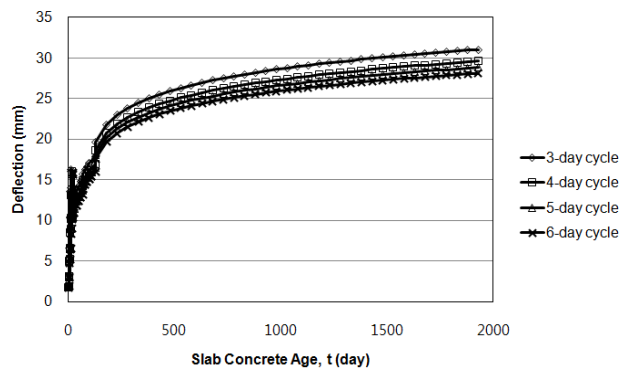
Table 3 Deflections of Basic Model

1. Maximum Deflection during Construction	15.97mm
2. Residual Deflection	10.18mm
3. Immediate Deflection due to Live Load ($\leq l/360=22.2$)	1.65mm
4. Sum of Long-term Deflections due to all Sustained Loads and Immediate Deflection due to Live Load ($\leq l/480=16.67$)	16.66mm

슬래브 층당 시공주기를 3일~6일 주기로 변화시키며, 처짐 변화를 분석하였다. Fig. 3과 같이, 시공주기에 따라 처짐이 발생하는 시기에 차이가 있지만 시공 중 최대처짐값 및 잔류처짐값, 장기처짐값은 비슷한 양상을 보였다. 시공주기가 짧아질 경우 재료의 강도가 충분히 발휘되지 못한 상태에서 하중을 받으므로, 시공주기가 길어졌을 때 보다 처짐값이 증가할 수 있으며, 동바리 제거 시점의 탄성계수 발현값이 작으므로, 잔류처짐값이 증가함으로써 장기처짐값이 증가할 수 있으나, 그 영향은 크지 않은 것으로 분석되었다.

3.3.2 동바리 지지층수의 영향

동바리 지지 층 수를 3개 층, 4개 층, 5개 층으로 적용하여 분석한 결과, Fig. 4와 같이 지지층수가 증가할수록 처짐이 감소하였다. 4개 층 지지인 기본모델의 결과에 비하여, 3개 층 지지를 적용한 경우 시공 중 최대처짐값과 잔류처짐값은 각각 약 1.04mm (7%)와 0.67mm(7%)가 증가하였다. 이에 반해, 동바리가 5개 층 지지된 경우, 시공 중 최대 처짐값과 잔류처짐값은 각각 약 0.58mm(4%), 0.29mm(3%)가 감소하였다. 동바리 지지층수가 증가할수록 장기처짐값(지속하중에 의한 장기처짐 + 활하중에 의한 순간처짐)도 감소하였다. 이는 Fig. 1(b)와 같이, 동



(b) Long-term Deflections

Fig. 3 Deflection Changes according to Construction Cycle

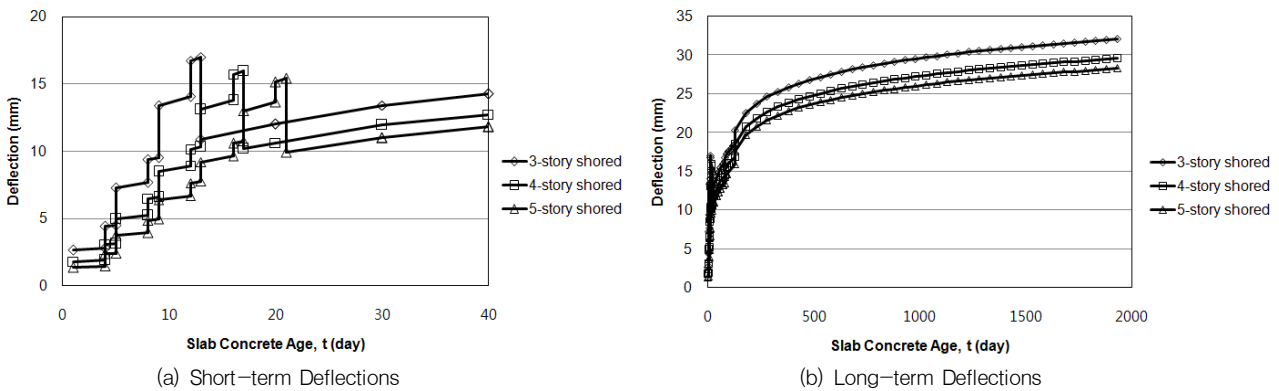


Fig. 4 Deflection Changes according to the Number of Shored Floors

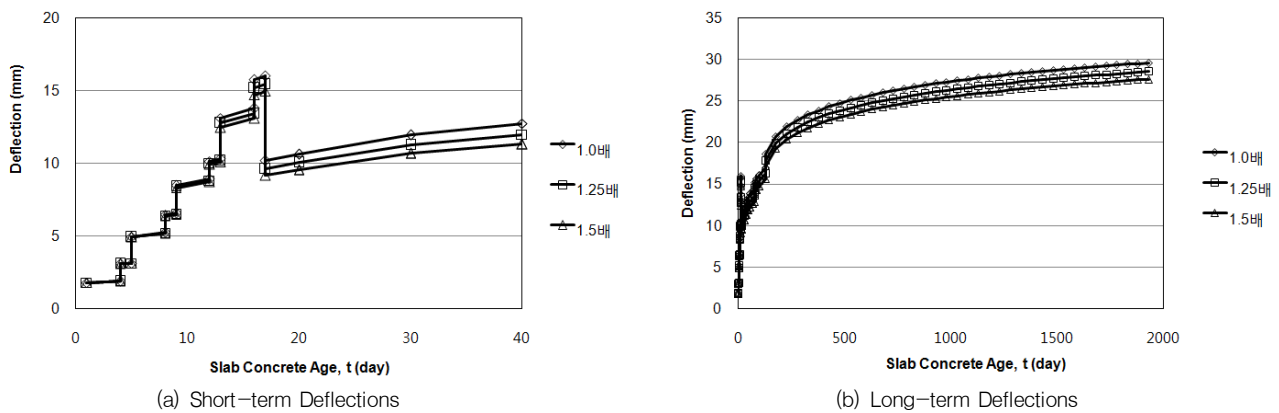


Fig. 5 Deflection Changes according to Ratio of Tension Reinforcement

바리 지지층 수가 증가할수록 시공하중이 감소하고, 최대 시공하중이 작용하는 시점의 슬래브 콘크리트 재령도 증가하여, 시공하중에 의한 슬래브 손상 및 처짐이 감소하였기 때문이다. 시공 중 슬래브 손상의 감소는 슬래브 단면의 유효단면2차모멘트의 감소를 완화시킴으로써, 마감하중 및 활하중의 작용에 따른 처짐도 상대적으로 적게 발생시켰고, 궁극적으로 장기 처짐이 감소되었다.

3.3.3 인장철근비의 영향

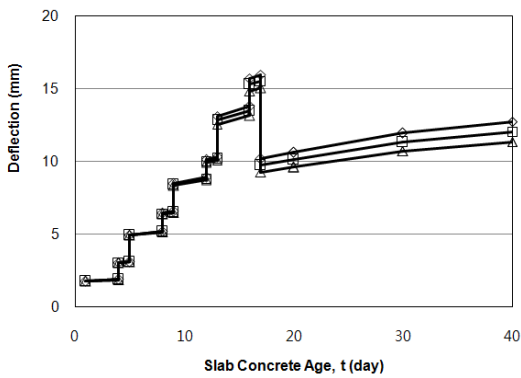
인장철근비 변화에 따른 처짐 변화는 Fig. 5와 같다. 기본 모델에 비하여 인장철근비를 1.25배와 1.5배로 증가한 경우, 시공 중 최대처짐값은 각각 0.56mm(4%)와 1.03mm(7%)가 감소하였고, 잔류처짐값은 각각 0.56mm(6%)와 1.04mm(10%)가 감소하였다. 장기 처짐의 측면에서도 인장철근비를 1.5배로 늘렸을 때 0.85mm(5%)의 처짐 감소 효과를 보였다. 인장철근비가 증가되면, 균열 단면의 단면2차모멘트가 증가하면서 유효단면2차모멘트가 증가함으로써 슬래브 처짐에 대한 저항 성능이 커지게 되었다.

3.3.4 압축철근비의 영향

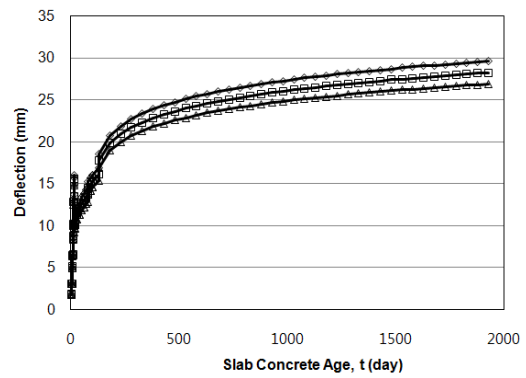
Fig. 6은 기본모델에 적용된 슬래브 중앙부 압축측의 0.2% 수축온도철근비를 0.4%까지 증가시켰을 때의 처짐 변화를 보여주고 있다. 시공 중 최대처짐값과 잔류처짐값은 모두 0.92mm(각각 6%와 9%에 해당)씩 소폭 감소하였다. 그러나, 장기처짐값은 2.03mm(12%)가 감소하여, 인장철근비를 1.5배로 증가시켰을 때의 장기처짐값 감소량과 비교하였을 때, 장기처짐에 대해서는 압축철근비의 증가에 따른 효과가 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 압축철근비를 증가할 경우 균열단면의 단면2차모멘트가 소폭 증가하며, 식 (11)과 같이 장기처짐 감소에 대하여 압축철근비가 기여하는 역할이 크기 때문이다.

3.3.5 콘크리트 강도의 영향

Fig. 7은 슬래브 콘크리트 강도를 24MPa, 30MPa, 35MPa, 40MPa로 변화하였을 경우의 처짐 변화를 보여주고 있다. 콘크리트 강도를 변경함에 따라 장기처짐값이 -1.67mm(10%)~+1.18mm(7%)로 비교적 큰 변화를

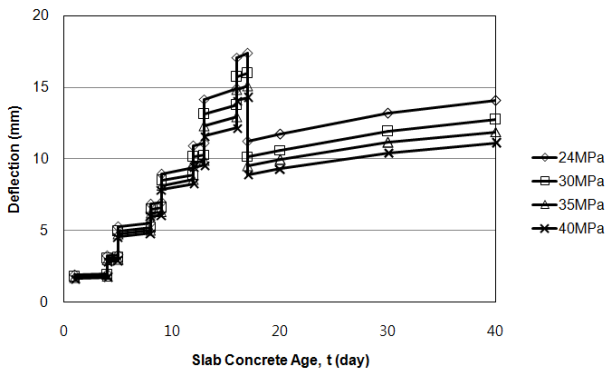


(a) Short-term Deflections

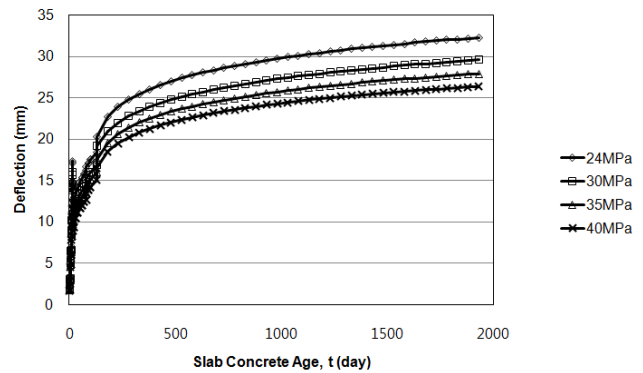


(b) Long-term Deflections

Fig. 6 Deflection Changes according to Ratio of Compression Reinforcement

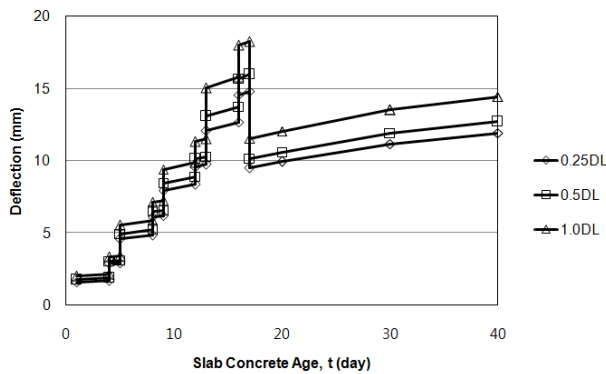


(a) Short-term Deflections

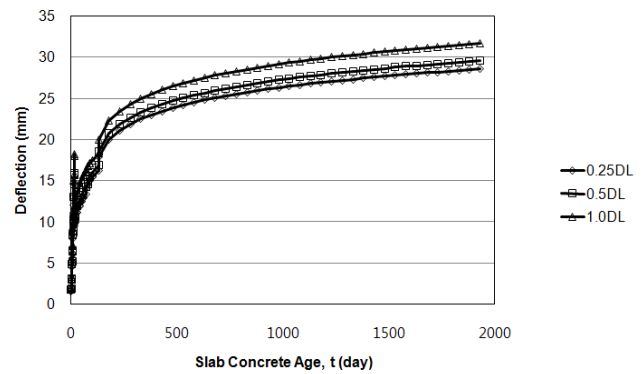


(b) Long-term Deflections

Fig. 7 Deflection Changes according to Concrete Strength



(a) Short-term Deflections



(b) Long-term Deflections

Fig. 8 Deflection Changes according to Construction Live Load

보였다. 이는 균열모멘트의 증가로 인한 균열 시점 지연 및 유효단면2차모멘트가 증가가 슬래브 처짐 에 큰 효과가 있음을 보여준다.

3.3.6 시공활하중

시공활하중을 0.25DL, 0.5DL, 1.0DL로 변화하였을 때,

시공활하중이 증가 할수록 LF_i 의 증가로 인해 Fig. 8과 같은 결과를 보였다. 시공하중을 2배로 늘렸을 때는 시공 중 최대처짐값 및 장기처짐값이 각각 2.28mm (14%)와 1.13mm(7%)가 증가하였고, 1/2배로 줄였을 때는 각각 1.15mm(7%)와 0.58mm(3%)의 감소를 보였다. 시공활하중의 증가는 시공 중 슬래브의 손상을 증가시키고, 이에

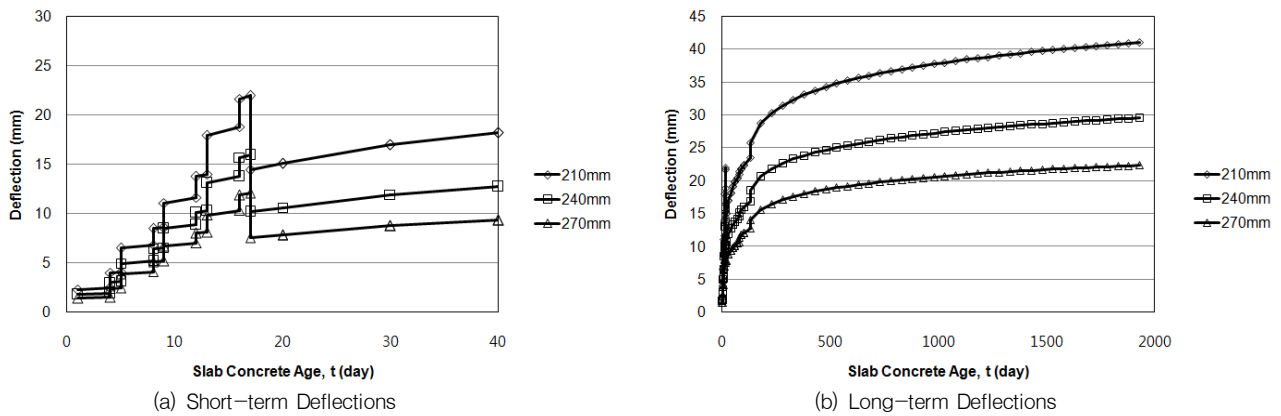


Fig. 9 Deflection Changes according to Slab Thickness

Table 5 Summary of Parametric Study

parametric condition		deflection (mm)	maximum deflection during construction (δ_{con}) / concrete age corresponding to maximum deflection	residual deflection (δ_{res})	immediate deflection due to live load (δ_{LL})	sum of long-term deflections due to all sustained loads and the immediate deflection due to live load (δ_{long})
control model			15.97 (100%) / 17일	10.18 (100%)	1.65 (100%)	16.66 (100%)
construction cycle	3 days/story		16.28 (102%) / 13일	10.30 (101%)	1.70 (103%)	16.78 (101%)
	4 days/story		15.97 (100%) / 17일	10.18 (100%)	1.65 (100%)	16.66 (100%)
	5 days/story		15.95 (100%) / 21일	10.28 (101%)	1.63 (99%)	16.87 (101%)
	6 days/story		15.88 (99%) / 25일	10.35 (102%)	1.63 (99%)	17.04 (102%)
the number of shored stories	3 stories		17.01 (107%) / 13일	10.85 (107%)	1.72 (104%)	17.35 (104%)
	4 stories		15.97 (100%) / 17일	10.18 (100%)	1.65 (100%)	16.66 (100%)
	5 stories		15.39 (96%) / 21일	9.89 (97%)	1.62 (98%)	16.44 (99%)
tension reinforcement ratio	ρ_0		15.97 (100%) / 17일	10.18 (100%)	1.65 (100%)	16.66 (100%)
	$1.25\rho_0$		15.41 (96%) / 17일	9.62 (94%)	1.60 (97%)	16.21 (97%)
	$1.5\rho_0$		14.94 (93%) / 17일	9.14 (90%)	1.56 (95%)	15.81 (95%)
compression reinforcement ratio	0.002		15.97 (100%) / 17일	10.18 (100%)	1.65 (100%)	16.66 (100%)
	0.003		15.52 (97%) / 17일	9.73 (96%)	1.62 (98%)	15.61 (94%)
	0.004		15.05 (94%) / 17일	9.26 (91%)	1.58 (96%)	14.63 (88%)
compressive strength of concrete	24MPa		17.36 (109%) / 17일	11.23 (110%)	1.62 (98%)	17.84 (107%)
	30MPa		15.97 (100%) / 17일	10.18 (100%)	1.65 (100%)	16.66 (100%)
	35MPa		15.09 (94%) / 17일	9.53 (94%)	1.55 (94%)	15.95 (96%)
	40MPa		14.28 (89%) / 17일	8.92 (88%)	1.46 (88%)	14.99 (90%)
construction live load	0.25DL		14.82 (93%) / 17일	9.53 (94%)	1.62 (98%)	16.08 (97%)
	0.5DL		15.97 (100%) / 17일	10.18 (100%)	1.65 (100%)	16.66 (100%)
	1.0DL		18.28 (114%) / 17일	11.55 (113%)	1.72 (104%)	17.79 (107%)
slab thickness	210mm		22.01 (138%) / 17일	14.44 (142%)	2.31 (140%)	22.75 (137%)
	240mm		15.97 (100%) / 17일	10.18 (100%)	1.65 (100%)	16.66 (100%)
	270mm		12.11 (76%) / 17일	7.54 (74%)	1.24 (75%)	12.73 (76%)

따른 I_g 값의 저하로 시공 중 처짐 및 장기 처짐이 증가하였으며, 특히 시공 중 처짐에 대한 영향이 컸다.

3.3.7 슬래브 두께의 영향

Fig. 9는 기본모델에서 슬래브 두께를 $\pm 30\text{mm}$ 씩 변화

시킨 경우에 대한 처짐 변화를 보여주고 있다. 슬래브 두께를 210mm로 감소한 경우, 시공 중 최대처짐값과 장기 처짐값은 각각 6.04mm(38%)와 6.09mm(37%)가 증가하였고, 슬래브 두께를 270mm로 증가한 경우 시공 중 최대처짐값과 장기처짐은 각각 3.86mm(24%)와 3.93mm

(24%)가 감소하여, 슬래브의 장단기 처짐 모두 큰 변화가 발생하였다.

슬래브 두께가 증가함에 따라 자중이 증가하지만, 단면 2차모멘트가 크게 증가하여 처짐량이 감소하였으며, 이 연구에서 선정된 변수 중에서 슬래브 처짐에 가장 큰 영향을 주었다.

4. 변수 연구 결과 분석

Table 5는 “3. 변수에 따른 처짐 연구”에서의 변수연구를 통해 산정된 시공 중 최대처짐값(δ_{com}), 잔류처짐값(δ_{res}), 활하중에 의한 순간처짐값(δ_{LL}), 지속하중에 의한 장기처짐과 활하중에 의한 순간처짐의 합(δ_{long})을 나타낸 것으로, 기본 조건에 대한 처짐값을 기준으로 하여 변수연구를 통해 산정된 처짐값과 이에 따른 비율을 백분율로 환산하여 제시하고 있다. 또한, 시공 중 최대처짐이 발생하는 시점을 콘크리트 재령 기준으로 함께 제시하고 있다.

설계조건 뿐만 아니라 시공조건의 변화에 따라, 플랫 플레이트의 장단기 처짐값이 변화할 수 있는 것으로 분석되었다. 동바리 지지 층수가 증가할수록, 시공활하중값이 감소할수록, 콘크리트강도가 증가할수록, 압축철근비가 증가할수록, 인장철근비가 증가할수록, 슬래브 두께가 증가할수록 슬래브의 단기처짐 및 장기처짐은 모두 감소하였다. 특히, 슬래브 두께의 변화는 슬래브의 시공 중 처짐은 물론 장기처짐의 변화에 매우 큰 영향을 주었으며, 콘크리트 강도 변화도 장단기처짐에 비교적 큰 영향을 주었다. 압축철근비의 변화는 시공 중 처짐에 대한 영향은 적었으나, 장기처짐의 변화에는 비교적 큰 영향을 주었다.

5. 결론

이 연구에서는 플랫 플레이트의 시공하중 및 균열효과를 고려한 시공단계처짐해석법에 크리프 및 건조수축에 의한 장기처짐효과를 적용하여 변수 연구를 실시하였다. 시공하중 변화에 따른 시공단계를 정의하고, 각 시공단계별로 슬래브 모멘트, 탄성 처짐, 유효단면2차모멘트를 계산하여, 탄성 처짐을 유효단면강성값에 의해 비탄성 처짐으로 증폭한 후 장기처짐계수를 적용하였다. 시공단계별로 산정된 탄성처짐값에 적절한 계수를 적용하여 전체 처짐을 산정하는 과정으로서, 유한요소해석 또는 비탄성해

석, 반복 계산 등의 복잡한 작업 없이 단순 계산 과정을 통하여 플랫 플레이트의 시공 중 처짐값 및 시공 후의 잔류 처짐값을 산정하였다.

제안한 장기처짐산정법의 적용을 통하여, 플랫 플레이트의 장단기 처짐성능에 대한 다양한 설계변수 및 시공변수의 영향을 분석하였다. 변수연구 결과, 설계조건 뿐만 아니라 시공조건에 의해서도 플랫 플레이트의 단기 및 장기 처짐값이 변화하였으며, 이는 구조설계 및 시공계획의 단계에서 시공조건의 변화를 포함하여 처짐성능을 검토할 필요가 있음을 의미한다. 장기적인 처짐 제어를 위해서는 슬래브 두께가 가장 지배적인 변수이며, 콘크리트 강도와 압축철근비도 비교적 큰 영향을 주는 변수로 분석되었다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(과제번호 2011-0010411).

참고문헌

1. 강성훈, 최경규, 박홍근, “시공 하중의 영향을 받는 플랫 플레이트의 최소 두께”, 한국콘크리트학회논문집, 제15권 5호, 2003, pp.650-661.
2. 김재요, “플랫 플레이트 시스템의 처짐에 대한 시공 중 과하중의 영향 평가를 위한 실용해석 기법의 적용”, 한국전산구조공학회 논문집, 제22권 1호, 2009, pp.25-34.
3. 김재요, 임주혁, 박홍근, “시공하중 및 균열 효과를 고려한 플랫 플레이트의 처짐 산정”, 한국콘크리트학회논문집, 제21권 6호, 2009, pp.797-804.
4. 한국콘크리트학회, 콘크리트 구조설계기준, 기문당, 2007, pp.523.
5. 황현중, 박홍근, 홍건호, 임주혁, 김재요, “슬래브의 시공하중에 대한 동바리 강성 및 슬래브 균열의 영향 I: 이론”, 한국콘크리트학회 논문집, 제22권 1호, 2010, pp.41-50.
6. 황현중, 홍건호, 박홍근, 김용남, 김재요, “슬래브의 시공하중에 대한 동바리 강성 및 슬래브 균열의 영향 II: 계측 및 비교”, 한국콘크리트학회 논문집, 제22권 1호, 2010, pp.51-58.
7. ACI Committee 209, “Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures (ACI 209R-92)”, American Concrete Institute, 1997, pp.77.
8. ACI Committee 318, “Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08)”, American Concrete Institute, 2008, pp.473.
9. ACI Committee 347, “Guide for Shoring/Reshoring of Concrete Multistory Buildings (ACI 347.2R-05)”, American Concrete Institute, 2005, pp.18.
10. ACI Committee 435, “Control of Deflection in Concrete Structures (ACI 435R-95)”, American Concrete Institute,

2003, pp.77.

11. Gardner, N. J. and Fu, H. C., "Effects of High Construction Loads on the Long-Term Deflections of Flat Slabs", ACI Structural Journal, vol. 84, No. 3, 1987, pp.349-360.
12. Grundy, P. and Kabaila, A., "Construction Loads on Slab with Shored Formwork in Multistory Buildings", ACI Journal, vol. 60, No. 12, 1963, pp.1729-1738.
13. Rangan, B. V., "Estimation of Slab Deflections in Flat Plate Buildings", ACI Journal, vol. 83, No. 2, 1986, pp.269-273.
14. Scanlon A. and Murray D. W., "Practical Calculation of

Two-Way Slab Deflections", Concrete International, 1982, pp.43-50.

15. Vollum R. L., Moss R. M. and Hossain T. R., "Slab Deflection in the Cardington In-Situ Concrete Frame Building", Magazine of Concrete Research, vol. 54, No. 1, 2002, pp.23-34.

(접수일자 : 2011년 7월 6일)
 (수정일자 : 2011년 10월 4일)
 (심사완료일자 : 2011년 10월 10일)

요 지

보에 의해 지지되지 않는 RC 플랫 플레이트는 강도 조건이 아닌 사용성의 지배를 받을 수 있다. 특히, 양생 초기의 슬래브에 발생하는 과하중과 인장 균열은 시공 중 플랫 플레이트에 심각한 처짐을 발생시키며, 시공 순서와 슬래브 처짐의 영향은 플랫 플레이트에서 중요한 요소이다. 이 연구에서는 시공단계, 콘크리트의 균열 및 장기처짐 효과를 고려하여 슬래브의 처짐을 산정한다. 제안된 방법을 사용하여 플랫 플레이트의 처짐에 대한 변수연구가 실시되었다. 슬래브의 시공주기, 동바리 지지층수, 인장 및 압축철근, 콘크리트 강도, 시공 활하중, 슬래브 두께를 변수로 하여, 시공 중 즉시처짐과 시공 완료 후 장기처짐에 대하여 조사하였다. 산정 결과는 건축구조설계기준에서 제시된 사용성 제한값과 비교하였다.

핵심 용어 : 플랫 플레이트, 장기처짐, 시공하중, 균열, 철근콘크리트