

플랫 플레이트 구조의 장단기 처짐 제어에 대한 동바리 재설치 작업의 효과 분석

김재요^{1*}, 박수범²

Analysis of Effects of Reshoring Works on Short and Long Term Deflections of Flat Plates

Jae-Yo Kim^{1*}, Soo-Beom Park²

Abstract: RC flat plates may be governed by a serviceability as well as a strength condition, and a construction sequence and its impact on the distributions of gravity loads among slabs tied by shores are decisive factors influencing short and long term behaviors of flat plate. Over-loading and tensile cracking in early-aged slabs significantly increase the deflection of a flat plate system under construction, and a reshoring work may be helpful in reducing slab deflections by controlling the vertical distributions of loads in a multi-shored flat plate system. In this study, a effect of reshoring works on short and long term deflections of flat plate systems are analyzed. The slab construction loads with various reshoring schemes and slab design and construction conditions are defined by a simplified method, and the practical calculation of slab deflections with considering construction sequences and concrete cracking and long term effects is applied. From parametric studies, the reshoring works are verified to reduce slab deflections, and the optimized conditions for the reshoring works and slab design and constructions are discussed.

Keywords: Flat plate, Deflection, Reshoring, Construction load, Long term effect

1. 서 론

국내 주상복합 건축물에서 빈번히 사용되는 플랫 플레이트 시스템은 층고 저감 및 시공성 향상, 비교적 자유로운 평면계획이 가능하다는 장점을 지니고 있다. 그러나 작은 휨강성으로 인하여 강도가 아닌 처짐에 의해 부재 설계가 지배 받을 수 있어 철저한 구조 검토와 정밀도 높은 시공이 요구된다. 특히 시공 중 새롭게 타설된 슬래브 콘크리트는 강도 및 강성을 충분히 발휘할 수 없으므로, 일정기간 자중을 스스로 지탱하지 못하고 동바리로 연결된 하부층으로 자중의 전체 혹은 일부를 전달하게 된다. 타설 시점이 다양한 여러 층 슬래브들이 하나의 시스템을 구성하게 되고, 이 시스템을 구성하는 슬래브들에 작용 되는 시공하중은 지속적으로 변하게 되며 조건에 따라 자중의 2배가 넘는 시공하중의 영향을 받게 된다(Hwang et al., 2010). 동바리를 통하여 전달되는 시공하중으로 인하여 조기재령 슬래브에 과도한 하중이 작용함으로써, 처짐과 균열이 심화될 수 있으며, 이러한 조기재령 슬래브의 균열손상은 장기적인 사용성 저하를 유발할 수 있다(Gardner and Fu, 1987; Vollum et al., 2002; Kang et al., 2003).

동바리 재설치 공법(ACI Committee 347, 2005)은 동바리를 임시 제거한 후 다시 동바리를 설치하는 방법이다. 일반적으로, 동바리 재설치 작업은 거푸집 해체를 위하여 동바리를 일시적으로 해체하면서 수행되는 작업이나, 슬래브가 자중을 스스로 지지하게 유도함으로써 하부 층 슬래브의 시공하중을 경감시키기 위하여 계획할 수도 있다. 또한 필요한 위치에 따라 재배치함으로써 동바리 물량 절감을 기대할 수 있다. 건축공사표준시방서(AIK, 2013)에서는 동바리의 재설치를 허용하고 있으며, 재설치된 동바리는 슬래브 또는 구조부재의 자중 및 시공하중을 지지할 수 있도록 구조물에 전달되는 하중 계산을 위한 절차 및 계획을 수립하도록 하고 있다.

시공 중인 다층 건축물에 대해 동바리 재설치에 따른 시공하중 저감효과와 처짐 제어 효과가 일부 검증되었으나(Kang et al., 2013; Chun et al., 2014), 이전 연구에서는 동바리 재설치에 대한 시공조건을 고려하여 최대 시공하중, 시공 중 최대 처짐만을 분석하였다. 그러나, 동바리 재설치 적용 위치와 시점만을 변수로 설정하여 분석하였기 때문에 일반적인 슬래브 설계조건과 시공조건에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서, 위와 같은 조건들을 변수로 추가하여 각 변수가 동바리 재

¹정희원, 광운대학교 건축공학과 부교수, 교신저자

²정희원, 광운대학교 학사과정

*Corresponding author: kimjyo@kw.ac.kr

Department of Architectural Engineering, Kwangwoon University, 20, Gwangun-ro, Nowon-gu, Seoul 01897, Republic of Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

설치에 미치는 영향을 분석하고, 또한 처짐 제어 측면에서도 시공 중 최대 처짐만을 고려할 것이 아니라, 사용성과 밀접한 관련이 있는 장기 처짐에 대한 처짐 제어의 영향을 함께 분석할 필요가 있다.

이 연구에서는 주요 설계 및 시공조건과 동바리 재설치 시공조건에 따라 플랫폼 플레이트의 장단기 처짐 변화값을 분석한다. 시공주기 및 동바리 지지 층 수, 콘크리트 압축강도, 동바리 재설치 적용 위치 및 시점 등에 따른 처짐 제어에 대한 변수연구를 수행하여, 시공 중 최대처짐 및 장기처짐 변화를 비교하고, 각각의 변수들의 영향분석을 통하여 동바리 재설치 최적조건을 분석한다.

2. 동바리 재설치를 고려한 시공하중 및 처짐 산정

2.1 동바리 재설치를 고려한 시공하중 산정

이 연구에서는 간단한 수계산 만으로 시공하중을 산정할 수 있는 시공하중 산정법인 간편법(Grundy and Kabaila, 1963)을 적용하여 시공하중을 산정하였다. 동바리의 무한강성을 가정하고, 슬래브의 균열 효과를 고려하지 않아 정밀성이 비

교적 낮을 수 있으나 가장 많이 사용되고 있는 시공하중 산정법이다.

동바리 재설치 작업에 대한 시공하중 분배 효과를 분석하기 위해 동바리 재설치 적용 위치 및 시점을 고려하였다. 슬래브 시공조건을 동바리 지지층 수 4개 층, 시공주기 6일로 설정하였고, 동바리 재설치 시공조건을 적용 위치측면으로는 상부 첫 번째층, 두 번째층, 세 번째층 3가지 변수로, 적용 시점 또한 최하부층 동바리 제거 1일후, 2일후, 3일후에 대하여 각각 총 9가지 모델을 설정하였다(Kang et al., 2013). 각 경우에 대하여 슬래브에 작용되는 시공하중을 단순해석 방법을 의해 콘크리트의 재령에 따라 강성을 고려하여 시공하중을 산정하였다. 여기서, 슬래브 한 개층 자중을 DL로 표현하였으며, 시공 활하중의 크기는 DL의 배수인 0.5DL로 가정하였다.

재설치 없이 동바리를 계속 존치하는 경우와 재설치를 실시한 경우의 시공과정을 Fig. 1에서 보여주고 있다. Fig. 1(a)는 재설치 없이 동바리를 계속 존치하는 경우(이하 Non-Reshore)의 시공과정을 보여주고 있다. N층 슬래브 콘크리트 재령 1일에 N-4층 동바리를 제거하고 시공주기 6일에 따라 한 층씩 타설되는 시공과정을 보여준다. Fig. 1(b)는 N층 슬래브 콘크리트 재령 1일에 N-4층 동바리를 제거하고 1일후에 N층 지지 동바리를 재설치 하는 경우(이하 Reshore)의 시공과정을 보여주고 있다.

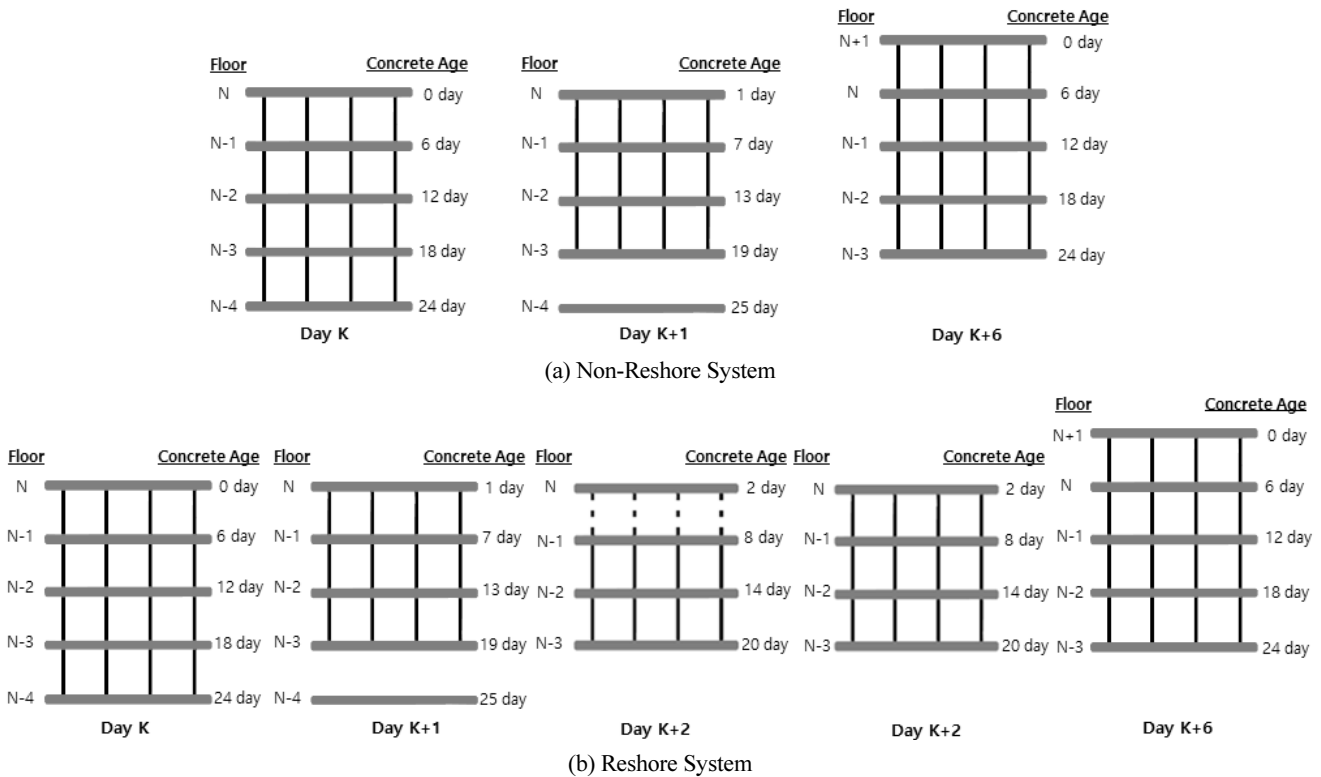


Fig. 1 Construction Sequences for Non-Reshore and Reshore Systems

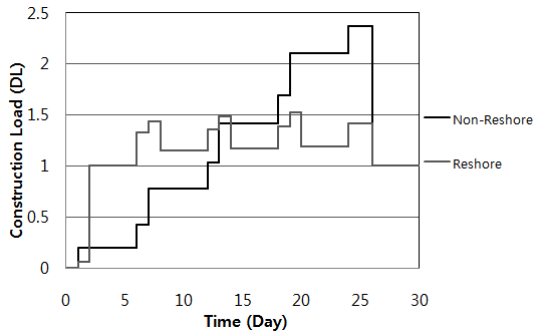


Fig. 2 Comparison of Construction Loads for Non-Reshore and Reshore Models

Fig. 2는 “Non-Reshore”과 “Reshore”의 시공하중 산정 결과를 비교하여 나타내고 있다. 슬래브에 작용하는 최대 시공하중은 재설치 없이 동바리를 계속 존치하는 경우 재령 24일에 2.37 DL이며, 재설치를 실시하는 경우 재령 19일에 1.52 DL로 평가되었다. 재설치를 실시하지 않을 경우 하중이 하부 층으로 지속적으로 누적되어 동바리가 설치된 최하층의 바닥판에 가장 큰 하중이 작용됨을 알 수 있다. N층 슬래브 재령 1일에 N-4층 지지 동바리를 제거하고 1일 후 N층 지지 동바리를 재설치 하는 경우에는 각 층의 슬래브에 동일한 크기의 최대 시공하중을 갖는다.

즉, 재설치에 의해 각 층 슬래브는 자중을 스스로 지지하고, 새롭게 타설되는 슬래브의 하중을 각각 분산하여 지지한다. 재설치를 실시하는 것이 슬래브에 작용하는 최대 시공하중을 감소시키지만, 초기 재령에서 높은 하중이 작용되는 문제점이 발생할 수 있다.

2.2 동바리 재설치를 고려한 처짐 산정

콘크리트 타설과 동바리 설치 및 제거 등의 작업을 고려하여 시공하중의 변화와 슬래브 콘크리트 재료 성질의 변화를 반영하여 장단기 처짐을 산정한다.

이 연구에서는 기존연구(Kim, 2009; Kim et al., 2009; Choi et al., 2012; Choe et al., 2012)의 슬래브 처짐 산정 과정을 적용한다. 각 시공단계별 탄성계수와 시공하중의 비율에 따른 계수 및 유효단면 2차모멘트값 변화에 따른 증폭계수를 적용하여 탄성처짐값으로부터 직접 슬래브의 즉시처짐값을 산정하는 처짐해석법을 적용한다(Kim, 2009; Kim et al., 2009). 또한, 설계기준(ACI Committee 318, 2011; KCI, 2012)에서 제시하는 시간 경과계수를 적용하여 장기처짐값을 산정한다. 이때, 플랫플레이트의 중앙부 처짐값은 교차보법(crossing beam method)에 의하여 산정한다. 교차보법에서는 각 방향의 주열대와 중간대를 연속보로 간주하고 각각의 처짐을 계산하여 중첩함으로써, 슬래브 중앙부의 처짐을 산정할 수 있다.

먼저 주요 시공단계별로 시공하중을 산정한 뒤 플랫 플레이트 각 지점의 단위 폭 당 모멘트를 직접설계법에 따라 산정한다. 슬래브 1개층 자중(DL)과 28일 재료강성(E_c)를 적용하여 주열대의 탄성처짐값(δ_{ce})과 중간대의 탄성처짐값(δ_{mc})을 산정한 뒤, 해당 시공단계의 시공하중 및 재령에 따른 탄성계수를 비례적으로 적용하여, 각 시공단계별로 탄성처짐 증가값과 모멘트값을 결정한다.

시공단계에서의 처짐 증가값에 지속하중에 의해 생긴 순간 처짐의 크리프와 건조수축에 의한 장기 처짐 효과를 곱한 값을 누적하여 장기 처짐을 산정한다. 시공단계별로 탄성처짐 증가값과 모멘트값을 정하는 단계부터 장기 처짐을 산정하는 과정을 반복하며, 이때 시공하중이 감소하는 경우를 처짐의 탄성이 회복되는 것으로 가정한다.

3. 분석 대상

위에서 제시한 슬래브 처짐 산정법을 적용하여 장단기 처짐값의 변화를 분석하기 위해서, 슬래브 설계 조건을 순경간 8×8 m 내부경간 플랫 플레이트를 적용 대상으로 하였다. 또한 장기적인 처짐값 산정을 위해, 마감하중 및 활하중 작용 시점을 가정하여 적용하였으며, 계산의 단순화를 위해 슬래브 자중에 비례하는 것으로 가정하였다. 최하층 동바리 제거 80일 시점에서 마감하중(0.35 DL)이 작용하여 총 사용하중은 1.35 DL이 되는 것으로, 130일 이후부터 활하중(0.34 DL)이 재하되어 1.69 DL의 사용하중이 작용하는 것으로 가정하여 처짐값을 산정한 후, 장기 처짐 계수를 적용하여 장기 처짐값을 산정하여 분석하였다. 동바리 재설치 적용 위치 및 시점에 따른 장단기 처짐의 변화를 분석하기 위하여 이전 연구(Choi et al., 2012; Choe et al., 2012)와 동일한 대상을 적용하였다.

6일 시공주기 및 4개 층 동바리지지, 슬래브 두께 240 mm, 시공활하중 0.5 DL과 Table 1에서 제시된 콘크리트 강도 및 철근비를 기본 조건으로 가정하였으며, 동바리 재설치 적용 위치 및 시점을 변화하며 슬래브 시공 중 처짐 변화 및 장기 처짐값을 분석하였다.

이 연구에서는 이전 연구(Kang et al., 2013)에서 고려하지

Table 1 Assumptions for Properties of Concrete and Re-bar

Concrete		Re-bar		
Comp. Strength (MPa)	Elastic Modulus (MPa)	Yield Strength (MPa)	Reinforcement Ratio (%)	
			Column Strip	Middle Strip
30	28,576.8	400	Top 0.69 Bottom 0.29	Top 0.22 Bottom 0.20

않았던 장기 처짐의 효과를 분석하기 위해 지속하중에 의한 장기 처짐값과 활하중에 의한 순간처짐값의 합을(δ_{long}) 식 (1) 과 같이 산정한다.

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

여기서, δ_{res} 는 슬래브 자중만으로 발생한 잔류처짐을 의미하며, δ_{SDL} 은 마감하중 작용에 의한 순간처짐 증가값, δ_{LL} 은 활하중 작용에 의한 순간처짐 값, ρ 은 압축철근비이다. ξ_1 은 잔류처짐에 대한 시간경과계수로, δ_{res} 에 포함되어있는 초기 약 30일 정도의 시간경과를 무시하기 위하여, 5년 이상에 대한 시간경과계수값 2.0에서 1개월에 해당하는 시간경과계수 0.5를 제하고 1.5만을 적용하였으며 ξ_2 는 마감하중에 대한 시간경과계수로, 작용 시점부터 처짐을 계산하므로 5년 이상에 대한 시간경과계수값 2.0을 그대로 적용하였다(Choi et al., 2012; Choe et al., 2012).

4. 동바리 재설치 조건에 따른 처짐제어 효과

4.1 동바리 재설치 시공변수 설정

“3. 분석 대상”에서 기술한 슬래브 설계조건 및 시공조건에 대하여, 적용위치 및 시점에 대한 동바리 재설치 시공조건에 따른 영향을 Table 2에 요약하였다. 동바리 재설치 시공조건에 따른 9가지 모델과 동바리 재설치를 적용하지 않은 기본모델(Original 모델)의 총 10가지 해석모델들에 대해서, 각각의 시공단계를 고려하여 “2.2 동바리 재설치 처짐산정 과정”에서 제시된 산정과정에 따라 플랫폼 플레이트 중앙부 장단기 처

짐을 산정하였다. Table 2에서 시공 중 최대 처짐값은 해당 슬래브에 동바리가 설치되어 시공하중을 분담하는 과정에서 발생한 최대 처짐값으로서 공사가 완료되기 전 시공 과정에서 발생하는 최대 처짐을 의미하며, 시공하중이 제거되더라도 슬래브의 균열 손상에 의한 잔류변형으로 존재할 수 있다. 또한, 표에서 제시된 장기변형값은 식 (1)에 의해 산정된 값으로서 장기처짐 성능을 평가할 수 있는 값이다.

4.2 동바리 재설치 시공조건에 대한 변수 연구 결과

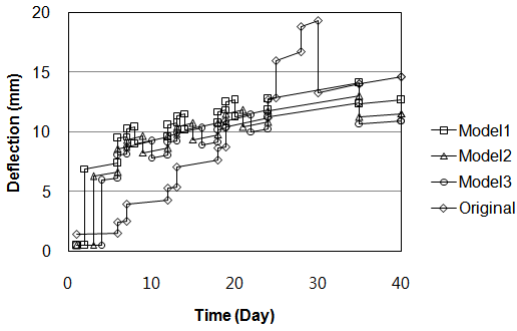
Table 2는 동바리 재설치를 적용하는 위치 및 시점에 따라서 변수 연구를 통해 산정된 시공 중 최대 처짐값과 장기 처짐값을 요약하여 나타내고 있으며, 동바리 재설치를 적용하지 않은 Original 모델과 비교하고 있다. 각각의 재설치 작업에 대한 모델과 Original 모델의 처짐값 비교를 통하여 처짐 제어의 효율성을 백분율로 나타내어 분석하였다.

동바리 재설치 시공조건에 대하여 위치 측면에서 상부 첫 번째층, 두 번째층, 세 번째층 3가지 변수로, 적용 시점을 최하부층 동바리 제거 1일후, 2일후, 3일후로 변화시키며, 처짐 변화를 분석하였다. 이전 연구(Kang et al., 2013)와 마찬가지로 시공 중 최대 처짐값은 동바리 재설치를 적용한 모든 경우에서 Original 모델 보다 약 2.44 mm (13.4%) ~ 6.75 mm (37.1%)가 감소하였다. Fig. 3(a), (c), (e)와 같이, 동바리 재설치 적용 위치에 따라 처짐이 발생하는 시기에 차이가 있고, 시공 중 최대 처짐값 또한 동바리 재설치 적용 위치가 하부 층으로 내려갈수록 처짐값이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 적용시점 측면에서는 모든 경우에 있어서 적용 시점이 늦어질수록 시공 중 최대처짐값이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

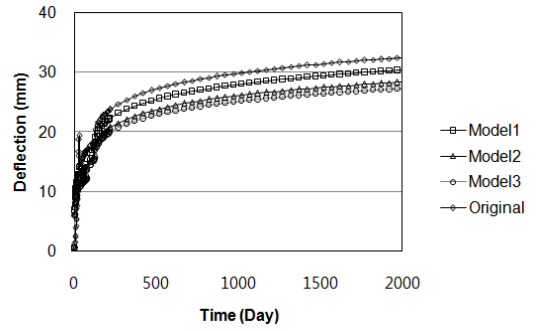
이번 연구에서 추가된 장기 처짐의 경우 Model 1을 제외한 모든 경우에 대해서 장기 처짐값이 약 0.27 (2.4%) ~ 2.07 mm (10.7%)가 감소하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 3(b), (d)와

Table 2 Summary of Short and Long-Term Deflections for Reshoring Models

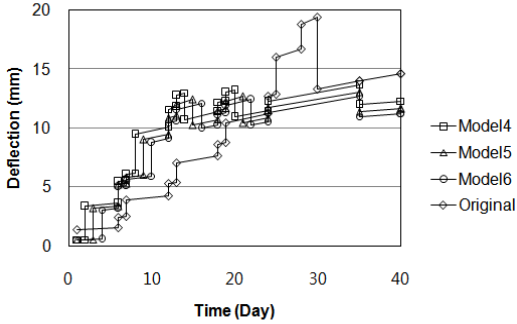
Model	Reshoring Floor	Reshoring Date	Max. Deflection during Construction (mm)	Long-Term Deflection (mm)
Original	Non-Reshoring		18.22 (100%)	19.40 (100%)
Model 1	1 st downward floor from top slab	1 st day after removing lowest shores	12.81 (70.3%)	19.45 (100.2%)
Model 2	1 st downward floor from top slab	2 nd day after removing lowest shores	11.87 (65.1%)	18.06 (93.1%)
Model 3	1 st downward floor from top slab	3 rd day after removing lowest shores	11.47 (62.9%)	17.33 (89.3%)
Model 4	2 nd downward floor from top slab	1 st day after removing lowest shores	13.21 (72.5%)	19.01 (97.9%)
Model 5	2 nd downward floor from top slab	2 nd day after removing lowest shores	12.68 (69.5%)	18.14 (93.5%)
Model 6	2 nd downward floor from top slab	3 rd day after removing lowest shores	12.45 (68.3%)	17.64 (90.9%)
Model 7	3 rd downward floor from top slab	1 st day after removing lowest shores	15.78 (86.6%)	19.13 (98.6%)
Model 8	3 rd downward floor from top sla	2 nd day after removing lowest shores	15.53 (85.2%)	18.71 (96.4%)
Model 9	3 rd downward floor from top sla	3 rd day after removing lowest shores	15.55 (85.3%)	18.50 (95.6%)



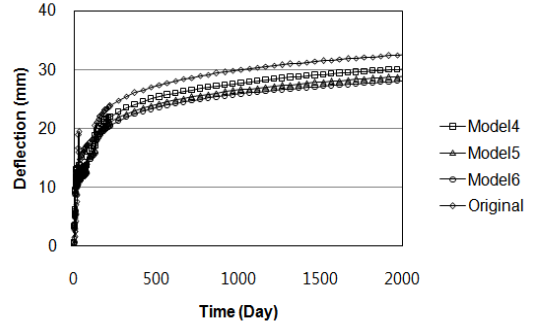
(a) Short-Term Deflections When Reshored on 1st Downward Floor from Top Slab



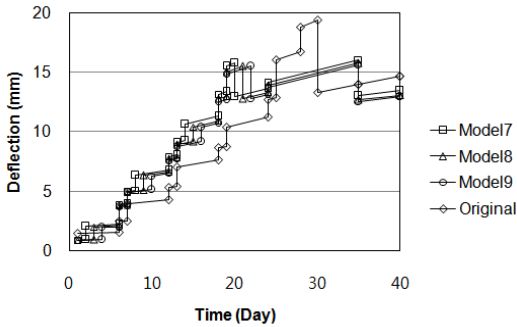
(b) Long-Term Deflections When Reshored on 1st Downward Floor from Top Slab



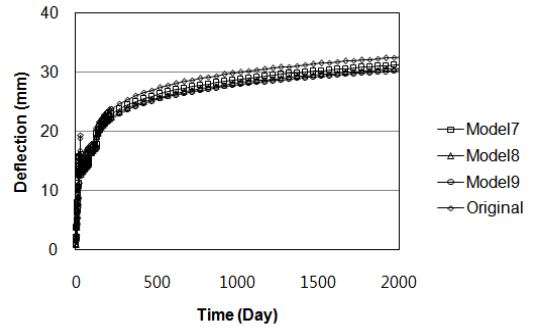
(c) Short-Term Deflections When Reshored on 2nd Downward Floor from Top Slab



(d) Long-Term Deflections When Reshored on 2nd Downward Floor from Top Slab



(e) Short-Term Deflections When Reshored on 3rd Downward Floor from Top Slab



(f) Long-Term Deflections When Reshored on 3rd Downward Floor from Top Slab

Fig. 3 Short and Long-Term Deflections Regarding Reshoring Floor and Date Conditions

(f). 적용위치 상부 첫 번째층 최하부 층 동바리 제거 1일후에 동바리 재설치를 적용하는 경우인 Model 1의 경우 기본 모델에 비해 장기 처짐값이 약 0.05 mm (0.2%)가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 초기 재령에서 높은 하중이 작용하는 문제점으로 인하여 장기 처짐값이 증가 된 것으로 분석된다. 그 외 모든 경우에 있어서 시공 중 최대처짐과 마찬가지로 동바리 재설치 적용 시점이 늦어질수록 장기 처짐값이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

동바리 재설치 최적 위치 및 시점으로는 상부 첫 번째층 동바리를 최하부 층 동바리 제거 후 3일후시점에 재설치하는 경

우에 시공 중 최대처짐은 물론 장기 처짐에도 처짐제어 효과가 가장 큰 것으로 나타났다.

5. 설계 및 시공조건을 고려한 처짐제어효과

5.1 설계 및 시공변수 설정

“4. 동바리 재설치 조건에 따른 처짐제어 효과”에서는 슬래브 설계조건 및 시공조건을 고정시키고 동바리 재설치 시공조건만을 변수로 설정하여 처짐제어에 대한 효과를 살펴보

았다. 이 장에서는 슬래브 설계조건 및 시공조건을 변수에 포함하여 동바리 재설치의 처짐 제어 효과에 대해 분석해 보고자 한다. 추가되는 변수는 콘크리트 압축강도, 층당 시공주기, 동바리 지지 층수이다. 콘크리트 압축강도는 24 MPa, 30 MPa, 35 MPa, 40 MPa의 총 4가지를 변수로 선정하였고, 층당 시공 주기는 3일, 4일, 5일, 6일 총 4가지 변수로, 동바리 지지 층수는 3개 층 지지, 4개 층 지지, 5개 층 지지 총 3가지의 변수를 설정하였다. 이러한 슬래브 설계 및 시공조건을 적용한 48가지의 해석모델 각각에 대하여, Table 2에 제시된 동바리 재설치 시공조건에 따른 10가지 해석을 수행하게 되므로, 총 480가지의 변수모델이 구성된다.

5.2 변수 연구 결과

5.2.1 종합 분석

Table 3은 앞서 기술한 슬래브 설계 및 시공조건에 대한 48가지 변수모델을 나타낸다. 각각의 경우에 대하여 동바리 재설치 시공 조건 9가지의 경우를 적용하여 각각 식 (1)에 의한 장기 처짐값을 산정하고, 산정된 9가지의 처짐 결과 중에서 최소 장기처짐이 발생하는, 즉 처짐 제어효과가 가장 큰 동바리 재설치 위치 및 시점을 처짐값과 함께 나타내었다. 또한, 동바리 재설치에 대한 장기 처짐 제어 효과를 분석하기 위하여 동바리 재설치를 적용하지 않은 기본 모델(Original Model)과의 장기 처짐 값 비교를 통하여 처짐 제어의 효율성을 백분율로 나타내어 분석하였다.

Table 3에서, 동바리 재설치에 따른 장기처짐 제어효과를

Table 3 Summary of Long-Term Deflections

Slab Design and Construction Conditions			Results for Reshores		Reshoring Location and Date for Minimizing Deflection		Effect of Reshoring Work	
Concrete Strength (MPa)	Construction Cycle (day)	No. of Shored Floors	Maximum Construction Load (DL)	Long-Term Deflection (mm)	Reshoring Location (downward from top slab)	Reshoring Date (after removing lowest shores)	Decrease of Deflection (mm)	Ratio of Deflection (%)
24	3	3	1.73	21.14	1st floor	3rd day	23.49	90.0
		4	1.53	19.43	1st floor	3rd day	21.65	89.7
		5	1.42	19.49	1st floor	3rd day	22.68	85.9
	4	3	1.73	19.57	1st floor	3rd day	24.10	81.2
		4	1.53	18.40	1st floor	3rd day	21.25	86.6
		5	1.41	18.74	1st floor	3rd day	20.66	90.7
	5	3	1.73	19.70	1st floor	3rd day	22.54	87.4
		4	1.52	18.59	1st floor	3rd day	21.18	87.8
		5	1.41	18.45	1st floor	3rd day	20.78	88.8
	6	3	1.73	19.91	1st floor	3rd day	22.33	89.2
		4	1.52	18.84	1st floor	3rd day	21.46	87.8
		5	1.4	18.95	1st floor	3rd day	21.03	90.1
30	3	3	1.73	19.17	1st floor	3rd day	20.65	92.8
		4	1.53	17.35	1st floor	3rd day	19.30	89.9
		5	1.42	17.54	1st floor	3rd day	20.51	85.5
	4	3	1.73	17.65	1st floor	3rd day	21.33	82.7
		4	1.53	16.36	1st floor	3rd day	19.16	85.4
		5	1.41	17.45	1st floor	3rd day	18.66	93.5
	5	3	1.73	17.68	1st floor	3rd day	20.18	87.6
		4	1.52	16.80	1st floor	3rd day	19.19	87.5
		5	1.68	16.90	2nd floor	3rd day	18.78	90.0
	6	3	1.73	17.82	1st floor	3rd day	20.11	88.6
		4	1.52	17.33	1st floor	3rd day	19.40	89.3
		5	1.68	17.07	2nd floor	3rd day	19.02	89.7

Table 3 Summary of Long-Term Deflections (Continue)

Slab Design and Construction Conditions			Results for Reshores		Reshoring Location and Date for Minimizing Deflection		Effect of Reshoring Work	
Concrete Strength (MPa)	Construction Cycle (day)	No. of Shored Floors	Maximum Construction Load (DL)	Long-Term Deflection (mm)	Reshoring Location (downward from top slab)	Reshoring Date (after removing lowest shores)	Decrease of Deflection (mm)	Ratio of Deflection (%)
35	3	3	1.73	17.72	1st floor	3rd day	19.12	92.7
		4	1.53	16.20	1st floor	3rd day	17.90	90.5
		5	1.67	16.36	2nd floor	3rd day	19.02	86.0
	4	3	1.73	16.26	1st floor	3rd day	19.83	82.0
		4	1.53	15.66	1st floor	3rd day	17.79	88.0
		5	1.67	16.17	2nd floor	3rd day	17.39	93.0
	5	3	1.73	16.24	1st floor	3rd day	18.71	86.8
		4	1.52	16.10	1st floor	3rd day	17.86	90.1
		5	1.9	15.91	3rd floor	3rd day	17.49	91.0
		6	1.73	16.33	1st floor	3rd day	18.66	87.5
		4	1.82	16.13	2nd floor	3rd day	18.07	89.3
		5	1.9	16.08	3rd floor	3rd day	17.69	90.9
40	3	3	1.73	15.98	1st floor	3rd day	17.41	91.8
		4	1.53	15.36	1st floor	3rd day	16.38	93.8
		5	1.67	15.30	2nd floor	3rd day	17.40	87.9
	4	3	1.73	14.72	1st floor	3rd day	18.10	81.3
		4	1.53	14.86	1st floor	3rd day	16.29	91.2
		5	1.9	15.12	3rd floor	3rd day	15.87	95.3
	5	3	1.73	15.04	1st floor	3rd day	17.14	87.7
		4	1.52	15.26	1st floor	3rd day	16.31	93.6
		5	1.9	14.78	3rd floor	3rd day	15.91	92.9
		6	1.73	15.35	1st floor	3rd day	17.08	89.9
		4	1.82	15.17	2nd floor	3rd day	16.46	92.2
		5	1.9	15.15	3rd floor	3rd day	16.09	94.2

살펴보자면 48가지 모든 경우에 대하여 동바리 재설치 미적용 모델 대비 약 4.7~18.8% 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 동바리 재설치 시공조건에 대한 최적조건을 분석해 본 결과, Table 2의 결과와 마찬가지로 대부분의 경우 상부 첫 번째 층 동바리를 최하부 층 동바리 제거 후 3일 시점에 재설치하는 경우 장기처짐 저감 효과가 가장 컸다. 동바리 재설치 시점으로는 모두 공통적으로 최하부층 동바리 제거 3일 후에 적용하는 경우가 처짐 제어 효과가 가장 큰 것으로 판별되었다. 이는 조기에 동바리를 재설치하는 경우 콘크리트 강도 및 강성이 충분히 발휘되지 않은 상태에서 자중을 부담하여야 하므로 시공 중 발생하는 처짐이 커지고, 동바리 제거 시점의 잔류처짐값이 증가함에 따라 장기 처짐값이 증가하는 것으로 분석할 수 있다. 동바리 재설치 최적 위치는 비교적 강도가 낮은 24 MPa와 30 MPa의 경우에서는 대부분의 경우 상부 첫 번째

층에 적용하는 경우가 가장 효과가 좋았다. 하지만, 35 MPa, 40 MPa의 경우에는 시공주기 및 동바리 지지층수에 따라서 상이한 결과가 나타났다. 콘크리트 강도 35 MPa의 경우 시공주기 3일 혹은 4일이며 동바리 지지 층수 5개층일 때 상부 두 번째층에서 동바리 재설치하는 것이 장가처짐이 가장 감소하는 최적 위치인 것으로 확인되었고, 시공주기 5일, 6일 두 번째 층에서 동바리 지지 층수 5개층 경우에는 상부 세 번째 층이 최적 재설치 위치로 나타났다. 콘크리트 강도 40 MPa의 경우에도 이와 비슷한 양상을 나타냈다. 이러한 경향은 슬래브 설계 및 시공조건의 복합적인 영향의 결과로 분석된다. 콘크리트 강도가 증가할수록 균열 모멘트 증가에 따른 균열 시점 지연 및 유효단면 2차 모멘트 증가가 발생하고, 동바리 지지 층수 증가에 따라 최대시공하중 작용시점의 콘크리트 재령이 증가하여 슬래브 손상이 감소하며, 시공주기가 길어지는 경우에

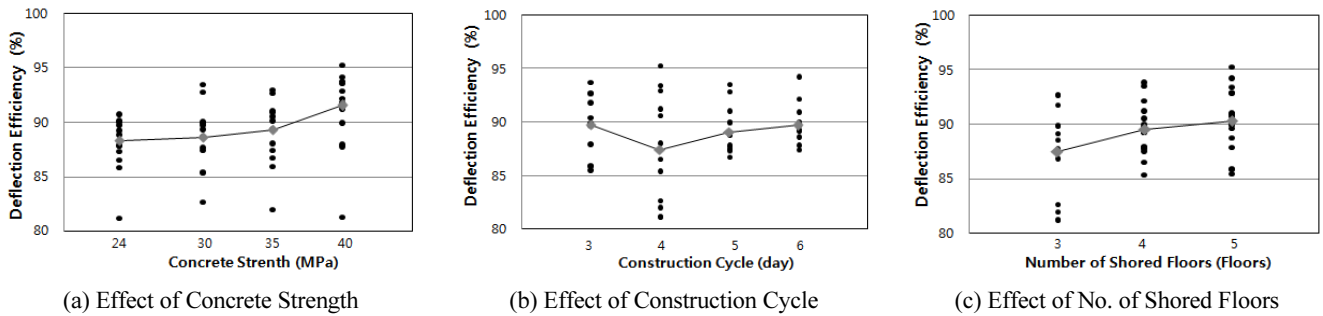


Fig. 4 Effects of Slab Design and Construction Conditions

는 슬래브 콘크리트의 재령 증가 증가하는 영향이 발생한다. 이러한 요인들의 복합적인 영향으로 인해 장기처짐 제어를 위한 동바리 재설치 위치 및 시점에 대한 최적 조건이 변화된 것으로 분석된다.

이전 연구(Kang et al., 2013)에서 동바리 재설치에 의한 시공 하중 저감효과를 분석한 결과, 동바리 재설치가 상부 층에 적용되는 경우, 즉 슬래브 콘크리트의 초기 재령에서 재설치 되는 경우 시공하중감소 효과가 큰 것으로 나타났다. 이 논문에서는 추가적으로 장기적인 사용성 확보의 측면에서 동바리 재설치의 효과를 분석하였으며, 슬래브 콘크리트 강도가 낮은 경우에 있어서는 상부 첫 번째층에 동바리 재설치를 적용하는 경우에 처짐 저감 효과가 가장 좋았지만, 콘크리트 강도가 증가하고 동바리 지지 층수 와 시공주기가 늘어날 수록 시공하중 저감효과에 따른 동바리 재설치의 효과보다 슬래브 설계 및 시공조건이 장기 처짐에 미치는 영향이 더 큰 것으로 확인되었다.

Fig. 4는 각 변수별 동바리 재설치 최적조건을 분석하기 위하여, Table 3에 제시된 동바리 재설치 미적용에 따른 장기처짐 대비 동바리 재설치를 적용한 처짐값의 비율을 백분율로 나타낸 그래프이다. 이 값이 작을수록 처짐 제어 효과가 크다는 것을 나타내고, 값이 클수록 처짐 제어 효과가 미비하다는 것을 나타낸다.

5.2.2 콘크리트 강도의 영향

Fig. 4(a)는 슬래브 콘크리트 강도가 24 MPa, 30 MPa, 35 MPa, 40 MPa로 변화하였을 경우의 처짐 제어 효과 변화를 보여주고 있다. 콘크리트 강도가 증가함에 따라 동바리 재설치에 따른 장기처짐값의 재설치 미시행 처짐값에 대한 비율의 평균값이 증가하는 것을 보여주고 있다. 강도가 증가 할수록 동바리 재설치에 따른 처짐 제어 효과가 감소하는 것으로 판단된다. 이는 콘크리트 강도 증가에 따라 균열모멘트의 증가로 인한 균열 시점 지연 및 유효단면2차모멘트가 증가가 발생함으로써 동바리 재설치를 적용하지 않은 기본 모델이 사용성이 높았기 때문에 동바리 재설치의 영향이 감소한 것으로 판단된다. 따라서, 동바리 재설치 조건의 측면에서는 슬래브 콘크

리트 강도가 작을수록 동바리 재설치 효과가 크다는 것을 확인하였다.

5.2.3 시공주기의 영향

Fig. 4(b)는 슬래브 층당 시공주기를 3일, 4일, 5일, 6일로 변화하였을 경우의 동바리 재설치에 따른 처짐 제어 효과의 변화를 보여주고 있다. 시공주기 4일의 경우 슬래브 설계 및 시공조건에 따라 처짐 제어 효과의 편차가 큰 것을 확인하였다. 또한 시공주기의 영향에 따른 일정한 경향을 확인할 수 없었는데, 이는 시공주기가 동바리 재설치의 적용변수로서의 영향은 크지 않은 것으로 분석할 수 있다. 다만 시공주기 4일의 경우에는 동바리 지지층수 3개 층의 경우에 동바리 재설치의 효과가 가장 크다는 것을 확인하였다.

5.2.4 동바리 지지 층수의 영향

Fig. 4(c)는 동바리 지지 층수를 3개 층, 4개 층, 5개 층으로 변화하였을 경우의 동바리 재설치에 따른 처짐 제어 효과의 변화를 보여주고 있다. 동바리 지지층수가 증가할수록 처짐 비율의 평균값이 증가하는 것을 보여주고 있다. 지지층수가 증가할수록 처짐 제어효과가 감소하는 것으로 판단된다. 동바리 지지층 수가 증가할수록 시공하중이 감소하고, 최대 시공하중이 작용하는 시점의 슬래브 콘크리트 재령도 증가하여, 동바리를 재설치하지 않더라도 시공하중에 의한 슬래브 손상 및 처짐이 감소효과가 크다. 즉, 동바리 지지 층수가 증가할수록 시공 중 과하중의 영향이 감소하기 때문에 동바리 재설치의 영향이 감소된 것으로 판단할 수 있다.

6. 결론

이 연구에서는 플랫 플레이트를 대상으로 슬래브 시공조건 및 설계조건에 따라 콘크리트 타설과 동바리 설치 및 제거 등의 작업을 고려하여 시공하중을 산정하고 장단기 처짐을 분

석하였다. 동바리 재설치를 실시한 경우 시공 중 과하중의 영향이 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 시공 중 처짐 및 장기 처짐을 저감시키는 효과를 확인하였다.

동바리 재설치 작업의 최적조건을 분석하기 위하여, 슬래브 콘크리트 강도, 동바리 지지 층 수, 층당 시공주기의 조건과 동바리 재설치의 시공조건을 연계하여 장기 처짐에 대한 영향을 분석하였다. 변수연구 결과, 최상부층을 지지하는 동바리를 재설치하는 것이 슬래브 처짐 저감에 가장 효과적이며, 재설치하는 동바리가 지지하는 슬래브 콘크리트의 재령이 높아질수록 처짐이 더 감소하는 것을 확인하였다. 또한, 슬래브 콘크리트 강도가 낮을수록, 동바리 지지층수가 적을수록 동바리 재설치에 따른 처짐 저감 효과가 크다는 것을 확인하였으며, 슬래브 층당 시공주기의 경우 동바리 재설치 변수로 큰 영향이 없는 것으로 분석되었다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 광운대학교 연구년에 의하여 연구되었음.

References

ACI Committe 318 (2011), Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 473.

ACI Committe 347 (2005), Guide for shoring/Reshoring of Concrete Multistory Buildings (ACI 347.2R-05), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 3-7.

AIK (2013), Standard Specifications for Building Construction, Architectural Institute of Korea, Seoul, 58-70.

Choe, M. M., Choi, S. M., Eom, T. S., and Kim, J. Y. (2012), An Analysis on Short and Long-Term Deflections of Flat Plates Considering Construction and Design Conditions, *Journal of Architectural Institute of Korea (Structure)*, 28(8), 69-77.

Choi, S. M., Eom, T. S., and Kim, J. Y. (2012), Parametric Study on Long-Term Deflections of Flat Plates Considering Effects of Construction Loads and Cracking, *Journal of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 16(1), 44-54.

Chun, S. C., Tak, S. Y., Lee, S. H., Sho, K. H., and Ha, T. H. (2014), Evaluation of Construction Loads of Slabs and Shores with Removing Shores and Placing Reshores, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 26(3), 385-392.

Gardner, N. J. and Fu, H. C. (1987), Effects of High Construction Loads on the Long-Term Deflections of Flats Slabs, *ACI Structural Journal*, 84(3), 349-360.

Grundy, P. and Kabaila, A. (1963), Construction Loads on Slab with Shored Formwork in Multistory Building, *ACI Journal*, 60(12), 1729-1738.

Hwang, H. J., Park, H. G., Hong, G. H., Im, J. H., and Kim, J. Y. (2010), Effects of Shore Stiffness and Concrete Cracking on Slab Construction Load I: Theory, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 22(1), 41-50.

Kang, S. H., Choi, K. K., and Park, H. G. (2003), Minimum Thickness Requirements of Flat Plate Affected by Construction Load, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 15(5), 650-661.

Kang, S. M., Eom, T. S., and Kim, J. Y. (2013), Reshoring effects on deflections of multi-shored flat plate systems under construction, *Structural Engineering and Mechanics*, 45(4), 455-470.

KCI (2012), Concrete Structure Code, Korea Concrete Institute, Seoul, 523.

Kim, J. Y. (2009), Applications of Practical Analysis Scheme for Evaluating Effects of Over-Loads during Construction on Deflections of Flat Plate System, *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 22(1), 25-34.

Kim, J. Y., Im, J. H., and Park, H. G. (2009), Calculations of Flat Plate Deflections Considering Effects of Construction Loads and Cracking, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 21(6), 797-804.

Vollum, R. L., Moss, R. M., and Hossain, T. R. (2002), Slab Deflection in the Cardington In-Situ Concrete Frame Building, *Magazine of Concrete Research*, 54(1), 23-34.

Received : 09/01/2016

Revised : 09/26/2016

Accepted : 10/04/2016

요 지 : RC 무량판 구조는 강도 뿐만 아니라 사용성 조건에 지배받을 수 있으며, 시공 과정 및 이에 따른 동바리로 연결된 슬래브들 간의 중력하중의 분포가 무량판의 장단기 거동에 영향을 주는 중요한 요소로 작용할 수 있다. 조기재령 슬래브에 과하중이 작용하여 균열이 발생하는 경우 시공 과정에서 무량판 구조의 처짐이 크게 증가할 수 있으므로, 동바리 재설치를 통해 다중지지 슬래브에서 하중의 수직 분포를 조절하는 것은 처짐을 감소시키는 데 도움이 될 수 있다. 이 연구에서는 무량판 구조의 장단기 처짐에 대한 동바리 재설치 작업의 영향을 분석한다. 다양한 동바리 재설치 조건과 슬래브 설계 및 시공 조건에 따른 슬래브 시공하중이 간편법에 의하여 정의되고, 시공 과정과 콘크리트의 균열 및 장기 효과를 고려한 슬래브 처짐 실험해석법을 통해 장단기 처짐이 산정된다. 변수연구를 통하여 동바리 재설치 작업의 슬래브 처짐 저감효과를 검증하며, 슬래브 처짐을 위한 동바리 시공과 슬래브 설계 및 시공에 대한 최적 조건을 분석한다.

핵심용어 : 플랫 플레이트, 처짐, 동바리 재설치, 시공하중, 장기 효과