

슬래브 두께가 다른 다층지지 RC 구조 시스템에서의 슬래브 시공 하중 분포

한상민¹, 김재요^{2*}

Slab Construction Load Distribution in a Multistory-shored RC Structure System with Different Slab Thickness

Sang-Min Han¹, Jae-Yo Kim^{2*}

Abstract: In recent times, accidents involving structural elements, formwork, and shore have been persistently occurring during concrete pouring, especially in multi-story reinforced concrete (RC) structures. In previous studies, research on construction load analysis was mainly conducted for cases where the thickness of all slabs is constant. However, when the thickness of some slabs is different, the variation in the stiffness of slab cross-sections can lead to different distributions of construction loads, necessitating further investigation. In this study, the slab thickness was set as a variable, and the analysis of the distribution of construction loads was conducted, taking into account the influence of changes in slab thickness on the concrete stiffness and structure. It was confirmed that not only the concrete material stiffness but also the slab cross-section stiffness should be considered in the estimation of construction loads when the slab thickness changes. As the slab thickness increases, the maximum construction load and maximum damage parameter on the layer with increased thickness significantly increase, and it was observed that a thicker slab results in a higher proportion of construction load.

Keywords: Slab construction load, Multistory-shored RC structure system, Different slab thickness

1. 서 론

일반적인 철근콘크리트(RC) 건물에서 타설된 슬래브 콘크리트는 완전히 경화하기까지 자신의 강도 및 강성을 충분히 발휘할 수 없으므로, 타설 후 일정 기간 동안에는 자중을 스스로 지탱하지 못하고 동바리로 연결된 하부층들로 자중의 전체 혹은 일부를 전달하게 된다(ACI Committee 347, 2005). 구조물에 작용하는 하중은 슬래브들의 자중과 시공 활하중(construction live load; 작업하중)이며, 이 작용 하중들은 슬래브의 재료 및 단면 강성에 따라 각 층에 분배되어 시공 하중으로 작용한다(Kim, 2009). 이 때, 타설 시점이 다른 슬래브들이 동바리에 의해서 함께 지지되어 있고 각 층 슬래브에 작용하는 시공 하중은 균등하지 않으며, 콘크리트의 강성비에 따라 시공 하중이 분배된다. 따라서, 시공 주기, 동바리지지 층 수와 같은 시공 조건과 양생 온도, 양생 기간과 같은 환경적 요인 등 다양한 변수에 의해 각 층 슬래브의 강성이 달라질 수 있으며 이에 따라 슬래브에 작용하는 시공 하중의 분포가 변화한다.

슬래브의 강성에 따라 시공 하중의 분포가 달라지는 특성에 따라 콘크리트의 발현 된 강도에 비해 시공 중 과도한 하중이 작용하지 않도록 구조설계 및 시공계획에 주의하여야 한다. 최근 콘크리트 타설 중 구조체, 거푸집 및 동바리 사고가 계속해서 발생하고 있으며, 특히 슬래브 두께가 증가하는 PIT층 상부 붕괴, 지하 주차장 붕괴 등 슬래브 두께가 변화하는 다층지지 RC 구조에서 붕괴 사고가 빈번하게 발생하였다. 이처럼 슬래브 두께가 특정 층에서 증가하는 경우 해당 층의 콘크리트 재료 강성과 단면 강성이 변화하기 때문에 시공 하중의 분포가 달라져 이를 시공 계획 및 안전성 검토에 반영하여야 한다.

시공 하중 평가에 관한 연구는 크게 시공 중 건물에서의 시공 하중 예측과 해석적 예측으로 나눌 수 있다. 시공 하중 예측을 통한 연구로는 슬래브와 동바리 하중을 추정하는 새로운 간편법을 제시하는 연구(Calderon et al., 2011)와 동바리 되세우기를 실시한 다층 건축구조물의 시공 하중을 예측하여 평가하는 연구(Chun et al., 2014) 등이 진행되었다. 시공 하중 예측의 연구로는 동바리 강성 효과 및 균열에 따른 슬래브 유효 단면 강성 저하 효과를 고려한 새로운 시공 하중 산정 방법을 개발한 연구(Hwang et al., 2010), 단계별 시공 하중을 산정한 뒤 슬래브 1개 층 자중과 재료 강성을 적용하여 시공 단계별 처짐을 분석(Kim and Park, 2017)하거나 유한 요소 모델을 통한 다층 지지 RC 구조 건물 시공 중 슬래브와 동바리의 하중

¹학생회원, 광운대학교 건축공학과 석사과정

²정회원, 광운대학교 건축공학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: kimjyo@kw.ac.kr

Dept. Architectural Engineering, Kwangwoon University, Seoul, 01897, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2024년 5월 31일까지 학회로 보내주시면 2024년 6월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

변화에 대한 수치적 연구(Alvarado et al., 2010) 등이 진행되었다. 이처럼 이전 연구에서는 모든 슬래브 두께가 일정한 경우의 시공 하중 분석에 대한 연구가 주로 수행되었으나 일부 슬래브의 두께가 다른 경우, 슬래브 단면 강성의 변화로 전체 슬래브 강성 비율이 달라져 시공 하중의 분포가 달라질 수 있기 때문에 슬래브 두께가 다른 상황에서 시공 하중의 변화를 고려한 연구가 요구된다.

따라서, 이 연구에서는 슬래브 두께를 변수로 설정하여 슬래브 두께 변화가 콘크리트 강성과 구조물에 미치는 영향을 고려하여 시공 하중의 분포를 예측하였다.

2. 시공 하중의 산정

이 연구에서는 간단한 계산을 통해 시공 하중을 산정할 수 있는 산정법인 간편법(Grundy and Kabaila, 1963)을 적용하여 시공 하중을 산정하였다. 간편법에서는 최상층 슬래브 타설 및 최하층 동바리 제거 등의 시공하중 분포 영향에 미치는 시공 작업이 이루어지는 경우, 슬래브 타설로 새롭게 추가되는 하중 또는 제거되는 동바리를 통해 전달되었다가 상부층들로 재분배되어야 하는 하중을 동바리로 연결된 슬래브들의 강성에 따라 분배하는데, 이 때 슬래브 콘크리트의 재령에 따른 탄성계수의 변화를 고려한다. 단면 결정 및 응력 계산에 사용되는 콘크리트 탄성 계수는 KDS 14 20 10(KSCS, 2021)의 활선 탄성 계수(E_c)를 사용하였다.

$$E_c = 0.077m_c^{1.5} \sqrt{f_{cm}} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

이 때, m_c 는 콘크리트의 단위 질량을 의미하며, f_{cm} 은 재령 28일 콘크리트의 평균 압축 강도를 의미한다. 콘크리트 재령에 따른 콘크리트 탄성 계수($E_c(t)$)는 다음 식과 같다.

$$E_c(t) = \sqrt{\beta_{cc}(t)} E_c \quad (2)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp[\beta_{sc}(1 - \sqrt{\frac{28}{t}})] \quad (3)$$

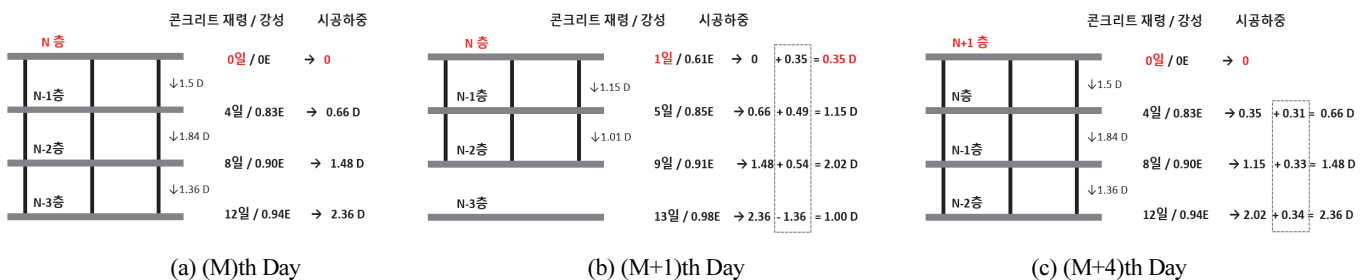


Fig. 1 Calculation of construction load by simplified method for constant slab thickness

β_{cc} 는 시간에 따라 강도가 발현되는 속도를 나타내는 계수이고, β_{sc} 는 시멘트 종류에 따른 상수이다. 이때, β_{sc} 는 1층 시멘트 습윤 양생의 0.35 값을 사용하였으며, 슬래브 두께 변화에 따른 영향만을 고려하기 위해 슬래브 두께 이외의 변수들에 대해서는 1층 공사 기간을 4일, 동바리 지지층 수 3개 층, 시공 활하중 $0.5D$ 작용 및 최상층 콘크리트가 타설되고 1일 후에 최하층 지지 동바리가 제거되는 시공 순서를 가정한 후 연구를 진행하였다.

Fig. 1은 모든 층에서 슬래브 두께가 일정한 경우 간편법에 의해 시공 하중이 산정되는 과정을 보여주고 있다. 콘크리트의 재령 별 강성은 28일 탄성계수에 대한 비율로 표시하였다. D 는 슬래브 1개 층 자중을 의미한다. M일에 새롭게 콘크리트가 타설된 N층은 경화되지 않아 자중을 스스로 지탱하지 못하므로, 동바리로 연결된 하부 층(N-1층~N-3층)에 각 층 강성 비율에 따라 하중이 분배된다(Fig. 1a). 1일 경과 후 최하층 동바리를 제거하고 N-3층에 자중 이외에 작용하던 $1.36D$ 의 하중은 상부 3개 층(N-2층~N층)에 각 층 강성 비율에 따라 재분배된다(Fig. 1b). M+4일에는 N+1층에 새롭게 슬래브가 타설되고, 이 때 추가되는 N+1층의 자중 $1.0D$ 는 경화되지 않은 최상층을 제외하고 하부 3개 층(N-2층~N층)의 각 층 강성 비율에 따라 나누어진다(Fig. 1c).

Fig. 2는 간편법에 의해 산정된 시공 하중의 변화를 나타낸 그림이다. 슬래브에 작용하는 시공 하중은 하부층으로 갈수록

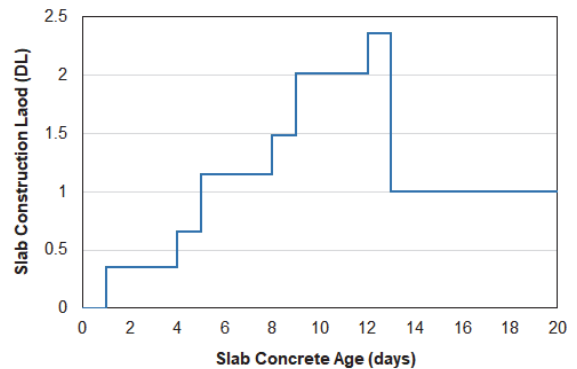


Fig. 2 Construction load according to concrete strength

록 증가하며, 최대 시공 하중은 최하층 동바리를 제거하기 직 전 $2.36D$ 로 나타났다. 간편법에서는 동바리와 기초의 강성을 무한 강성으로 가정하기 때문에 각 층 슬래브의 재료 강성인 콘크리트 재령에 따른 탄성계수의 비율만을 고려하여 산정된다.

따라서, 실제 시공 하중 측정 결과와 비교하여, 유한요소해석이나 슬래브/동바리 강성 비율을 반영한 시공 하중 산정 방법에 비하여 정확성이 낮은 것으로 알려져있다(Puente et al., 2007). 그러나 상세한 시공 방법이 결정되지 않은 구조설계 및 시공계획의 초기 단계에서는 간편법이 보다 실용적이고 적합한 예측법이 될 수 있다(Kim, 2009).

3. 슬래브 손상 변수

“2. 시공 하중의 산정”에서는 다층지지 RC 구조에서 간편법에 의하여 시공 하중을 산정하는 과정을 분석하였다. 그러나 슬래브 콘크리트가 타설되고 경화되는 중에는 콘크리트의 역학적 성질이 변화하는 과정이므로, 단순히 시공 하중의 크기만으로 슬래브 손상 등의 영향을 평가할 수 없다. 슬래브 콘크리트 재령이 클수록 슬래브를 구성하는 콘크리트의 강도와 탄성계수가 커지므로 동일한 시공 하중이 작용하더라도 균열 및 처짐이 감소한다. 보다 작은 시공 하중이 보다 작은 콘크리트 재령의 슬래브에 작용하는 경우가, 큰 시공 하중이 큰 콘크리트 재령의 슬래브에 작용하는 경우보다 슬래브에 발생하는

손상이 더 클 수 있다. 이처럼 슬래브 손상 등에 대한 영향을 고려하기 위해서는, 슬래브에 작용하는 시공 하중의 크기 뿐만 아니라 재령에 따른 콘크리트 역학적 성능의 변화를 함께 고려하여야 한다. 이 연구에서는 시공 하중과 콘크리트 재령에 따른 강도에 대한 지배조건을 결정하기 위하여, 슬래브의 손상 변수(Damage Parameter) K 를 다음과 같이 정의하였다(Kim, 2009).

$$K = \frac{w_t/w_D}{\sqrt{f_{c,t}/f_{c,28}}} \quad (4)$$

여기서, w_t : 슬래브 재령 t 일에서의 시공 하중 크기, w_D : 해당 슬래브 1개 층의 자중, $f_{c,t}$: 슬래브 콘크리트 재령 t 일에서의 압축 강도이다. 콘크리트의 인장 균열 강도 및 균열 모멘트는 압축 강도의 제곱근에 비례하므로, 압축강도의 제곱근에 대한 시공 하중의 비를 슬래브의 손상 변수로 정의한다. 콘크리트 재령이 28일 이상으로 강도를 충분히 발휘하며 ($f_{c,t} = f_{c,28}$), 동바리가 제거되어 자기 자신의 자중만을 지지하는($w_t = w_D$) 경우 손상 변수 $K=1$ 로 정의된다. 이 논문에서는 슬래브 시공 하중에 대한 지배 조건으로 슬래브 손상 변수 K 가 최대인 하중조건으로서 정의한다. Fig. 3은 슬래브 두께가 모두 일정한 경우 슬래브 손상 변수의 분포를 나타낸 그림이다. Fig. 2의 시공 하중 변화와 유사한 경향을 나타내나, 콘크리트 재령 및 강도 변화의 영향에 따라 시공 하중의 재령별 증가 비율과 슬래브 손상 변수의 재령별 증가 비율이 다를 수 있다.

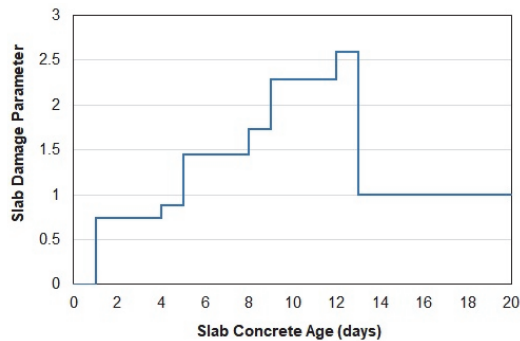


Fig. 3 Damage parameter according to concrete strength

4. 슬래브 두께 변화에 따른 시공 하중 변화

4.1 슬래브 재료 강성만을 고려한 시공 하중 산정

Fig. 4는 N층에서 슬래브 두께가 기존 슬래브 두께보다 1.5 배로 증가한 경우 간편법에 의해 시공 하중을 산정하는 과정을 보여주고 있다. “2. 시공 하중의 산정”에서와 마찬가지로 시공 하중 산정 과정에서 콘크리트 재령에 따른 슬래브 재료

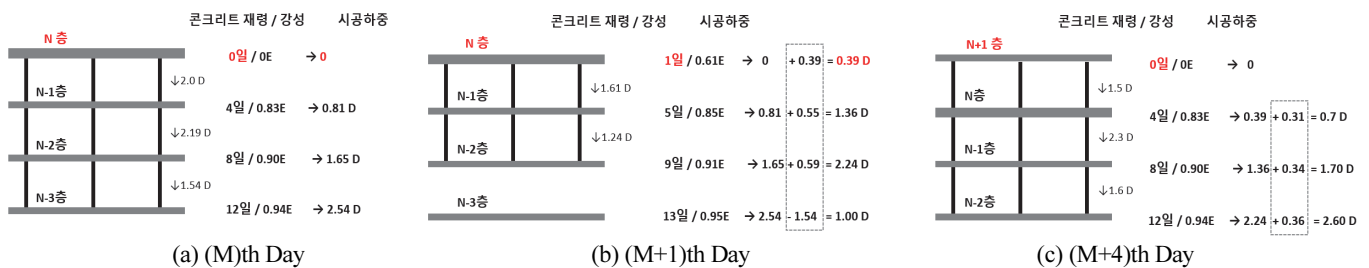


Fig. 4 Calculation of construction load considering E_c when constant slab thickness increase

강성의 비율만을 고려하여 시공 하중을 산정하였다.

Table 1 & 2는 N층의 슬래브 두께가 각각 1.5배와 2배로 증가했을 때 콘크리트 재령에 따른 층별 시공 하중과 손상 변수를 나타낸 표이다. 슬래브 두께가 1.5배로 증가하는 구조물의 시공 하중을 산정한 결과(Table 1) N층 상부층(N+1층~N+3층)에서는 N층 동바리 제거 직후 최대 시공 하중이 상대적으로 작게 나타났다. N-3층을 제외한 하부층(N-2층~N층)에서는 최대 시공 하중의 증가가 나타났으며 동바리 지지층 수 3개층으로 인해 N-3층에서는 N층 타설 직후 늘어난 자중에 대한 영향만이 최대 시공 하중에 영향을 미쳤다. 슬래브 손상 변수 또한 N층 상부층(N+1층~N+3층)에서는 상대적으로 작게 나타났다. N-3층은 늘어난 슬래브의 자중만이 영향을 미쳤으며, N층에서는 슬래브 1개 층의 자중 w_D 의 증가로 최대 손상 변수가 크게 감소하였다. N층의 슬래브 두께 증가로 인해, 동바리로 연결된 다층지지 슬래브 시스템에서 부담해야 하는 하중의 총량이 증가한다. 그러나, 콘크리트 재료 강성만을 고려하는 경우, N층에 비해서 콘크리트 강성이 큰 하부층(N-3층~N-1층)의 하중 부담 비율이 크게 증가하나, 콘크리트 강성이 작은 상부층(N+1층~N+3층)은 하중 총량 증가의 영향이 미미하다.

슬래브 두께가 2배로 증가하는 경우(Table 2) 슬래브 두께

가 1.5배로 증가했을 때와 비교하여 최대 시공 하중과 최대 손상 변수의 분포는 같은 경향을 보였으며 두께 증가에 따른 하중의 차이만이 최대 시공 하중과 최대 손상 변수에 영향을 미쳤다. 이때, 두께가 증가한 N층에서 더욱 많은 시공 하중의 분배가 이루어져야 함에도 가장 큰 시공 하중과 손상 변수는 N층이 아닌 N-1층에서 나타났다. 모든 층의 슬래브 두께가 동일한 구조물에서 시공 하중을 산정하는 경우 슬래브 단면이 모두 동일하여 슬래브 단면 강성을 고려하지 않고 콘크리트 재령에 따른 재료 강성의 비율만을 고려하여 시공 하중을 산정하였다. 하지만, 특정 층에서 두께가 달라지는 구조물의 경우 해당 층의 슬래브 단면 강성도 달라지기 때문에 이를 함께 고려할 필요가 있다.

4.2 슬래브 재료 강성과 단면 강성을 고려한 시공 하중 산정

슬래브의 강성은 재료 강성(재령에 따른 콘크리트의 탄성 계수)과 단면 강성(단면 2차 모멘트)의 곱으로서 정의할 수 있으며, 특히 슬래브 단면 강성은 슬래브 두께의 3제곱에 비례하므로, 슬래브 두께 변화의 큰 영향을 받는다. 따라서, 슬래브 단면 강성의 변화를 고려하여 두께가 N층에서 증가하는 경우의 강성을 구하면 기존 콘크리트 재료 강성만을 고려하

Table 1 Construction load and damage parameter considering $E_c(1.5D)$

Days	Construction Loads								Damage Parameter							
	Typical	N-3	N-2	N-1	N	N+1	N+2	N+3	typical	N-3	N-2	N-1	N	N+1	N+2	N+3
1	0.35	0.35	0.35	0.35	0.39	0.41	0.43	0.28	0.74	0.74	0.74	0.74	0.55	0.86	0.90	0.60
4	0.66	0.66	0.66	0.81	0.7	0.72	0.74	0.59	0.88	0.88	0.88	1.08	0.62	0.96	0.98	0.79
5	1.15	1.15	1.15	1.36	1.28	1.32	1.13	1.11	1.45	1.45	1.45	1.73	1.08	1.67	1.44	1.41
8	1.48	1.48	1.65	1.70	1.61	1.66	1.47	1.45	1.73	1.73	1.92	1.98	1.25	1.93	1.71	1.68
9	2.01	2.01	2.24	2.32	2.26	2.08	2.03	1.98	2.29	2.29	2.57	2.65	1.72	2.38	2.32	2.26
12	2.36	2.54	2.60	2.67	2.61	2.44	2.38	2.33	2.59	2.78	2.85	2.93	1.91	2.67	2.61	2.56
13	1.0	1.0	1.0	1.0	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Table 2 Construction load and damage parameter considering $E_c(2.0D)$

Days	Construction Loads								Damage Parameter							
	Typical	N-3	N-2	N-1	N	N+1	N+2	N+3	typical	N-3	N-2	N-1	N	N+1	N+2	N+3
1	0.35	0.35	0.35	0.35	0.44	0.47	0.51	0.22	0.74	0.74	0.74	0.74	0.46	0.99	1.07	0.74
4	0.66	0.66	0.66	0.97	0.75	0.78	0.81	0.53	0.88	0.88	0.88	1.29	0.50	1.04	1.09	0.88
5	1.15	1.15	1.15	1.58	1.41	1.49	1.12	1.07	1.45	1.45	1.45	2.01	0.89	1.89	1.65	1.52
8	1.48	1.48	1.82	1.92	1.74	1.83	1.46	1.41	1.73	1.73	2.12	2.24	1.02	2.13	1.91	1.79
9	2.01	2.01	2.48	2.63	2.51	2.16	2.04	1.95	2.29	2.29	2.84	3.0	1.43	2.47	2.54	2.45
12	2.36	2.71	2.83	2.98	2.86	2.51	2.40	2.30	2.59	2.97	3.11	3.27	1.57	2.75	2.82	2.74
13	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

는 경우와 비교하여 크게 달라진다. Table 3 은 콘크리트 재료 강성만 고려한 경우와 슬래브 단면 강성을 포함하여 강성을 구한 경우 슬래브 두께가 달라지는 N층에서의 강성 차이를 보여주는 표이다. 콘크리트 재료 강성만 고려한 경우 슬래브 두께가 증가해도 재령에 따른 강성이 변화하지 않는 것에 비하여, 슬래브 단면 강성을 포함하여 슬래브 콘크리트 강성을 산정한 경우 슬래브 강성이 크게 증가함을 볼 수 있다. 슬래브 강성의 비율에 의해 시공 하중을 분배하는 간편법의 경우 슬래브 단면 강성 고려 유무에 따라 시공 하중이 크게 달라진다.

Fig. 5는 N층에서 슬래브 두께가 기존 슬래브 두께보다 증가한 경우 콘크리트 재료 강성과 슬래브 단면 강성을 함께 고려하여 간편법을 이용해 시공 하중을 산정하는 과정을 보여 주고 있다. Fig. 4의 콘크리트 재료 강성만 고려한 경우와 비교

하여 M+1일에 N층의 강성 비율이 2.05로 기존 0.61의 3배 이상으로 증가하였으며, 이에 따라 N층의 시공 하중 또한 0.82D로 2배 이상으로 증가하였다. M+4일에는 재령 4일의 N층에서 각각 강성 비율은 0.83(Fig. 4c)과 2.79(Fig. 5c)로, 시공 하중은 0.31D, 0.61D가 증가하였다. Table 4 & 5는 슬래브 두께가 각각 1.5배와 2배로 증가했을 때 슬래브 단면 강성을 포함하여 시공 하중을 산정한 경우 슬래브 재료 강성 변화에 따라 층별 시공 하중과 손상 변수를 나타낸 표이다. 슬래브 두께가 1.5배 증가하는 경우(Table 4), 슬래브 두께가 증가한 N층에서는 강성의 비율이 크게 높아져 시공 하중과 최대 손상 변수가 큰 폭으로 증가하였으며, Table 1과 비교할 때 N-3층과 N층, N+3층을 제외한 모든 층에서 시공 하중과 최대 손상 변수가 모두 감소하는 경향을 나타내었다. N-3층의 경우

Table 3 Slab stiffness ratio considering E_c and E_cI

	Days	Constant Slab Thickness	Ratio Of Slab Stiffness			
			One Slab Thickness increase (1.5D)		One Slab Thickness increase (2.0D)	
			Considering E_c	Considering E_cI	Considering E_c	Considering E_cI
Floor N	0	0	0	0	0	0
	4	0.83	0.83	2.79	0.83	6.60
	8	0.90	0.90	3.05	0.90	7.23
	12	0.94	0.94	3.17	0.94	7.52
	28	1.0	1.0	3.375	1.0	8.0

Table 4 Construction load and damage parameter considering $E_cI(1.5D)$

Days	Construction Loads								Damage Parameter							
	Typical	N-3	N-2	N-1	N	N+1	N+2	N+3	typical	N-3	N-2	N-1	N	N+1	N+2	N+3
1	0.35	0.35	0.35	0.35	0.82	0.17	0.11	0.65	0.74	0.74	0.74	0.74	1.16	0.36	0.23	1.38
4	0.66	0.66	0.66	0.81	1.43	0.34	0.27	0.96	0.88	0.88	0.88	1.08	1.27	0.45	0.37	1.28
5	1.15	1.15	1.15	1.15	2.23	0.49	1.19	1.32	1.45	1.45	1.45	1.47	1.89	0.62	1.51	1.68
8	1.48	1.48	1.65	1.35	2.86	0.67	1.53	1.66	1.73	1.73	1.92	1.57	2.22	0.79	1.78	1.94
9	2.01	2.01	2.02	1.60	3.40	1.66	1.92	2.15	2.29	2.29	2.31	1.83	2.59	1.89	2.19	2.46
12	2.36	2.54	2.22	1.80	4.05	2.01	2.27	2.5	2.59	2.78	2.44	1.97	2.96	2.20	2.49	2.75
13	1.0	1.0	1.0	1.0	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

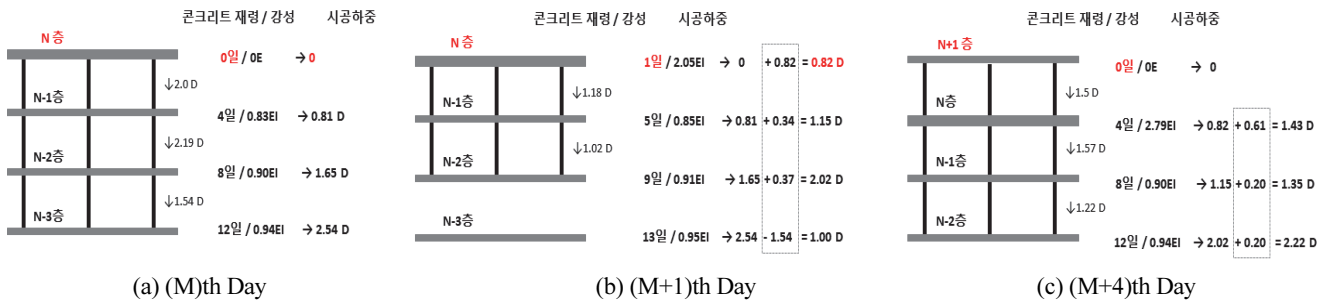


Fig. 5 Calculation of construction load considering E_cI when constant slab thickness increase

Table 5 Construction load and damage parameter considering $E_c I(2.0D)$

Days	Construction Loads								Damage Parameter							
	Typical	N-3	N-2	N-1	N	N+1	N+2	N+3	typical	N-3	N-2	N-1	N	N+1	N+2	N+3
1	0.35	0.35	0.35	0.35	1.25	0.09	0.04	0.78	0.74	0.74	0.74	0.74	1.33	0.18	0.08	1.65
4	0.66	0.66	0.66	0.97	2.04	0.18	0.13	1.09	0.88	0.88	0.88	1.29	1.36	0.24	0.17	1.45
5	1.15	1.15	1.15	1.19	2.99	0.23	1.22	1.39	1.45	1.45	1.45	1.51	1.90	0.29	1.55	1.77
8	1.48	1.48	1.82	1.29	3.80	0.33	1.56	1.73	1.73	1.73	2.12	1.51	2.21	0.38	1.82	2.02
9	2.01	2.01	2.06	1.42	4.24	1.50	1.89	2.21	2.29	2.29	2.35	1.63	2.42	1.72	2.16	2.53
12	2.36	2.71	2.17	1.53	5.05	1.85	2.24	2.56	2.59	2.97	2.38	1.67	2.77	2.03	2.46	2.81
13	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

동바리 지지층 수를 3개 층으로 설정하여 N층 슬래브 타설 직후 N층의 슬래브 강성이 고려되기 전에 N-3층의 동바리가 제거되므로 N층 슬래브 두께 증가에 의한 강성 변화의 영향이 나타나지 않았고, N층 슬래브 두께 증가에 따른 시공 하중 총량의 변화에 따른 영향만 발생하였다. N+3층의 경우 동바리 지지층 수를 3개 층으로 설정하여 강성의 변화로 인한 시공 하중 및 손상 변수의 변화는 없었으나 N층 동바리가 제거되는 시점에 강성 비율이 높은 N층에서 지지하고 있던 높은 시공 하중이 각 층으로 재분배되며 시공 하중과 손상 변수의 증가로 나타났다.

슬래브 두께가 2배로 증가하는 경우(Table 5), 슬래브 두께가 1.5배로 증가하는 경우와 마찬가지로, Table 2와 비교할 때 N-3층과 N층, N+3층을 제외한 모든 층에서 시공 하중과 손상 변수가 모두 감소하였으며, N층에서 대부분의 하중을 지지하여 시공 하중과 손상 변수가 크게 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, N층의 시공 하중이 재분배되는 시점에 기존 슬래브 두께가 일정한 경우와 비교하여 N층이 지지하던 높은 시공 하중이 재분배되는 영향으로 인해 N+3층에서 시공 하중과 손상 변수가 소폭 증가하는 모습을 보였다. Table 2 & 3에서 E_c 만 고려하는 경우 N-1층에서 가장 큰 시공 하중이 나타나고 N층에서의 최대 손상 변수가 감소하는 것과 달리 $E_c I$ 를 고려하는 경우 N층에서 가장 큰 시공 하중을 부담하며 동바리 지지층 수 3개 층으로 인해 슬래브 두께 증가에 비교적 영향을 적게 받는 N-3층과 N+3층을 제외한 모든 층에서 시공 하중이 감소하였으며, N층에서의 최대 손상 변수는 증가한 시공 하중의 영향을 받아 함께 증가하는 경향을 나타냈다.

5. 시공 하중의 분석

“4. 슬래브 두께 변화에 따른 시공 하중 변화”에서 슬래브 두께가 일정한 경우와 일정 층에서 슬래브 두께가 변화하는 경우에 대해서 콘크리트 재료 강성(E_c)만을 고려할 때와 슬래브

단면 강성을 함께 고려($E_c I$)할 때의 콘크리트 재령에 따른 시공 하중과 슬래브 손상 변수의 변화를 산정하였다. 슬래브 두께가 일정할 경우 모든 층에서 재령에 따른 콘크리트 재료 강성과 슬래브 콘크리트 단면 강성이 동일하여 최대 시공 하중과 손상 변수가 일정하게 나타났다. 슬래브 두께가 증가할 때, 강성 비율 산정에 콘크리트 탄성 계수 E_c 만 고려하는 경우 강성 비율의 변화가 없이 전체 시공 하중의 크기만 늘어나 각 층에 분배되는 층별 최대 시공 하중은 슬래브 두께와는 상관없이 동바리로 함께 지지되어 있는 슬래브 중 재령이 큰 슬래브일수록 높게 나타났고, 최대 손상 변수의 경우 N층을 제외한 모든 층에서 증가하지만 N층에서는 급격하게 감소하고 슬래브 두께가 증가한 N층이 아닌 N-1층에서 최대 시공 하중이 가장 크게 나타나는 등의 문제점이 나타났다. 이러한 문제점의 해결을 위해 콘크리트 재료 강성 E_c 뿐만이 아닌 슬래브 단면 강성을 포함한 $E_c I$ 를 고려하여 강성 비율을 산정하였다.

Fig. 6과 7은 각각 층별 시공 하중과 층별 손상 변수에 대해서 정리한 그래프이다. 그림에서, “Typical”은 전 층의 슬래브 두께가 일정한 경우의 시공 하중과 손상 변수를 나타내며, “1.5D”와 “2D”는 N층의 슬래브 두께가 각각 1.5배와 2배로 증가한 경우를, “Ec”와 “EcI”는 각각 콘크리트 재료 강성만을 고려하였을 때와 슬래브 단면 강성을 함께 고려하였을 때를 나타낸다. N층 하부층(N-3층~N-1층)에서는 각각 N층이 타설되는 시점(재령 12일, 8일, 4일)에 기존 슬래브 두께가 동일한 경우와 다르게 시공 하중의 변화가 나타났는데, N-3층에서는 동바리 지지층 수를 3개 층으로 설정하여 N층 타설 시점에 슬래브 두께의 하중만이 영향을 미쳐 큰 변화를 보이지 않아 생략하였다. 슬래브 단면 강성을 함께 고려하는 경우(EcI), 슬래브 두께가 두꺼운 N층에서 많은 시공 하중을 부담하기 때문에 N-2층과 N-1층에서는 N층 타설 시점 이후 시공 하중이 감소하는 변화를 나타냈다. N층 상부층(N+1층~N+3)층에서는 각각 N층 동바리가 제거되는 시점(재령 8일, 4일, 0일)까지 N층의 슬래브 두께 변화가 시공 하중 분배에 영향을 미쳤다. 슬

래브 단면 강성을 함께 고려하는 경우, N+1층과 N+2층에서는 N층 동바리가 제거되기 전 대부분의 시공 하중을 N층에서 지지하기 때문에 매우 적은 시공 하중이 분배되어 있었으나, N층 동바리가 제거되는 시점에 N층이 지지하던 하중이 재분배되어 최대 시공 하중이 증가하는 모습을 보였다. N+3층은 타설된 직후 N층 동바리가 제거되어 시공 하중이 재분배되며 기존 슬래브 두께가 일정한 경우보다 높은 시공 하중을 지지하며 초기의 재분배 된 하중의 영향이 해당 층 동바리가 제거되는 시점까지 영향을 이어갔다.

또한, 슬래브 두께가 2배 증가한 경우 1.5배 증가한 경우에 비하여 N층에서의 최대 강성 비율은 3.17과 7.52로 2배 이상의 차이를 나타냈으며, 강성 비율의 차이로 인한 최대 시공 하중은 4.05D와 5.05D로 나타났다. 이는 해당 재령의 구조물

에서 81%와 91%에 해당하는 시공 하중이며 슬래브 두께가 증가할수록 강성 비율과 부담하는 하중의 비율이 커지는 것을 의미한다.

Table 6은 강성 산정 시 고려 대상과 두께 증가량에 대하여 각 경우의 층별 최대 시공 하중과 최대 손상 변수를 나타내는 표이다. 모든 층에서 최대 시공 하중과 최대 손상 변수는 콘크리트 재령이 가장 큰 시점에 나타났으며, 최하부층 동바리가 제거되는 12일에 나타났다. 슬래브 두께가 증가하는 경우 콘크리트 재료 강성만 고려할 때, 시공 하중은 일정하게 증가하였으며 N층을 제외한 모든 층에서 손상 변수가 일정하게 증가하였으며 슬래브 두께가 증가하는 N층의 경우 자중의 증가로 손상 변수가 감소하는 경향을 나타냈다. 슬래브 단면 강성을 함께 고려할 때는 가장 많은 시공 하중이 두께가 증가한

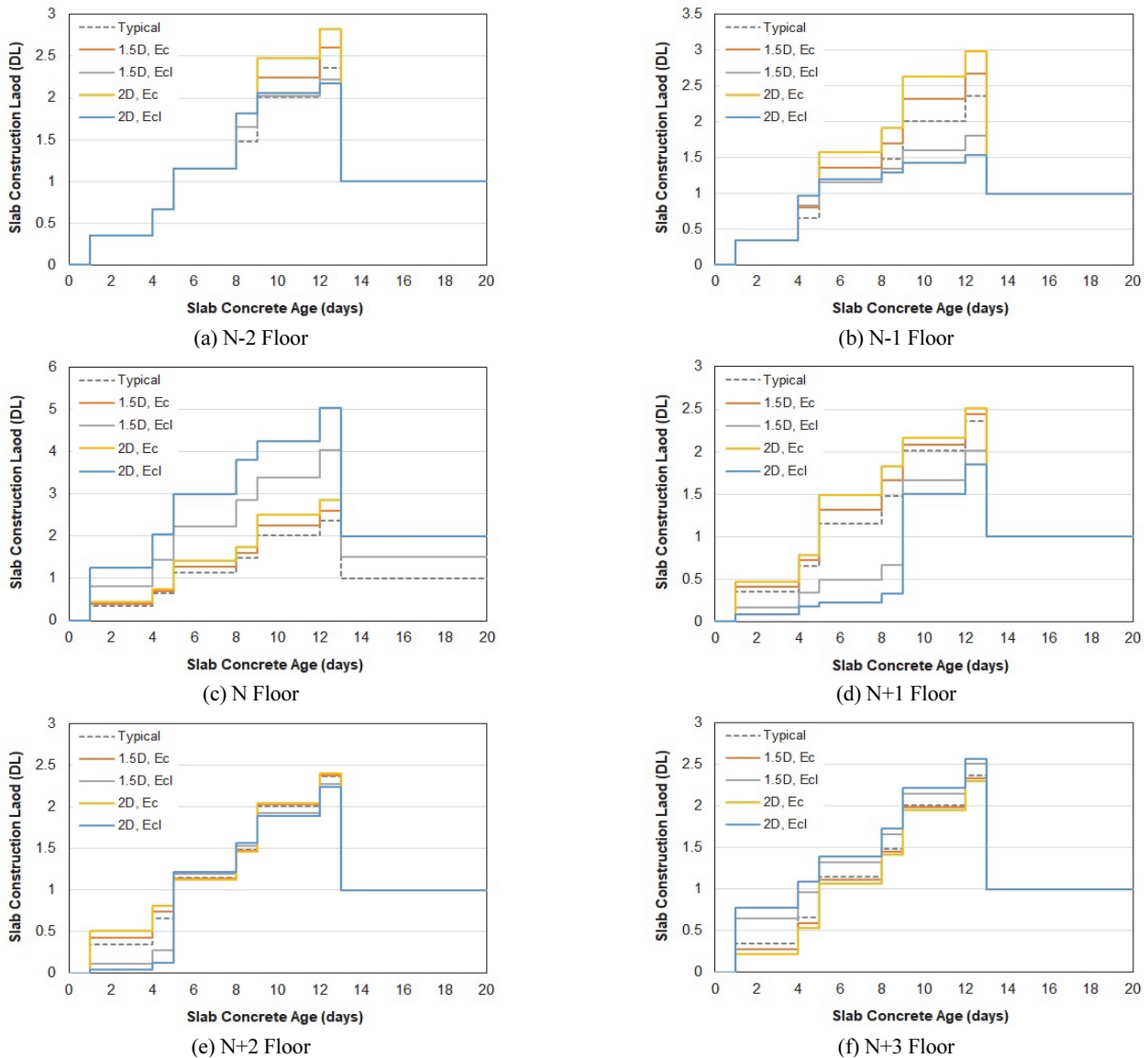
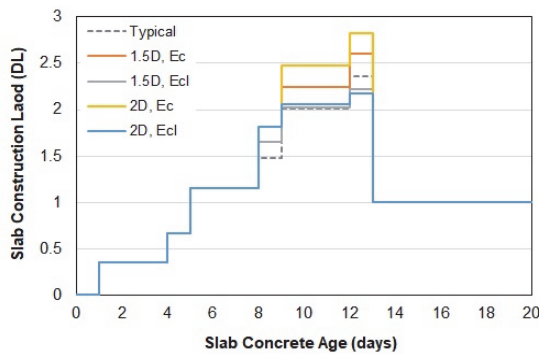


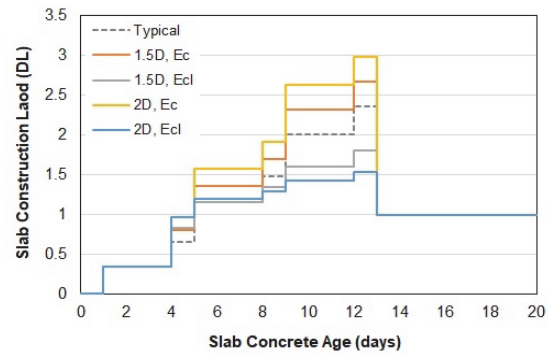
Fig. 6 Comparison of floor construction load based on specific conditions

Table 6 Maximum construction load and damage parameter ratio by floor

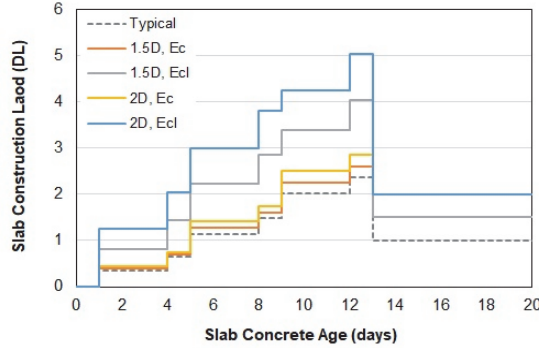
Floor	Constant Slab Thickness		One Slab Thickness increase (1.5D)				One Slab Thickness increase (2.0D)			
	Considering E_c		Considering E_c		Considering $E_c I$		Considering E_c		Considering $E_c I$	
	Max Construction Load	Max Damage Parameter	Max Construction Load	Max Damage Parameter	Max Construction Load	Max Damage Parameter	Max Construction Load	Max Damage Parameter	Max Construction Load	Max Damage Parameter
N+3	2.36	2.59	2.33	2.56	2.5	2.75	2.30	2.74	2.56	2.81
N+2	2.36	2.59	2.38	2.61	2.27	2.49	2.40	2.82	2.24	2.46
N+1	2.36	2.59	2.44	2.67	2.01	2.2	2.51	2.75	1.85	2.03
N	2.36	2.59	2.61	1.91	4.05	2.96	2.86	1.57	5.05	2.77
N-1	2.36	2.59	2.67	2.93	1.8	1.97	2.98	3.27	1.53	1.67
N-2	2.36	2.59	2.60	2.85	2.22	2.44	2.83	3.11	2.17	2.38
N-3	2.36	2.59	2.54	2.78	2.54	2.78	2.71	2.97	2.71	2.97



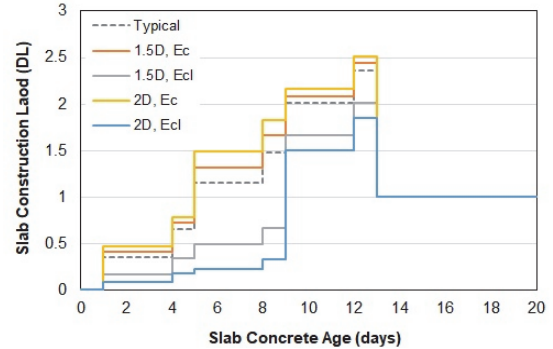
(a) N-2 Floor



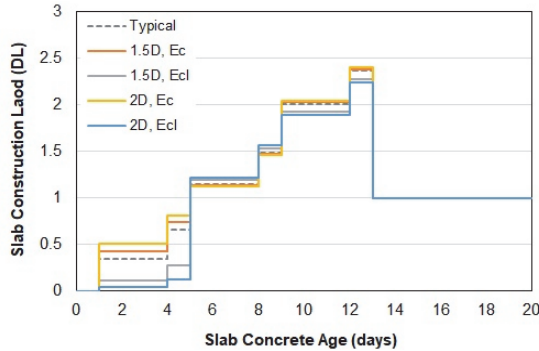
(b) N-1 Floor



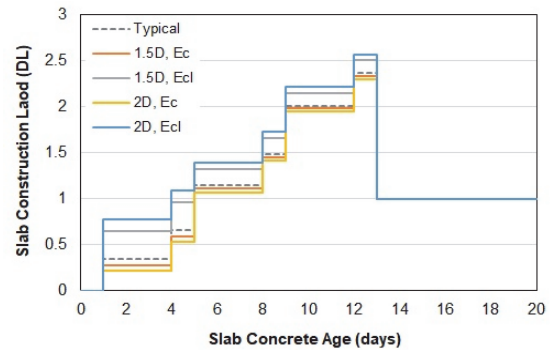
(c) N Floor



(d) N+1 Floor



(e) N+2 Floor



(f) N+3 Floor

Fig. 7 Comparison of floor damage parameter based on specific conditions

슬래브에 작용하였으며 동바리 지지층 수에 영향을 받지 않는 N+3층과 N-3층을 제외한 층에서는 시공 하중과 손상 변수가 상대적으로 감소하였고, N층의 경우 시공 하중이 크게 증가해 최대 손상 변수 또한 증가하는 모습을 보였다.

6. 결 론

이 연구에서는 다층지지 RC 구조 시스템의 특정 층에서 슬래브 두께가 증가하는 경우 시공 하중의 산정 과정과 슬래브의 두께 변화가 콘크리트 재료 강성 및 구조물에 미치는 영향에 대해서 분석하였다. 이에 따른 결론은 다음과 같다.

- 1) 슬래브 두께가 일정할 때 최대 시공 하중과 최대 손상 변수는 각 층에서 일정하게 나타난다.
- 2) 콘크리트 재료 강성만을 고려하여 시공 하중과 손상 변수를 산정하는 경우 두께가 동일하게 유지되는 일부 슬래브 들에서 최대 시공 하중과 최대 손상 변수가 증가하고 두께가 증가하는 슬래브의 최대 손상 변수는 감소한다.
- 3) 슬래브 단면 강성을 포함하여 슬래브 시공 하중을 산정하는 경우에는 슬래브 재료 강성만을 고려하는 경우에 비해 두께가 증가하는 슬래브에서 최대 시공 하중과 최대 손상 변수는 증가하고 두께가 동일한 슬래브에서는 감소한다.
- 4) 층별 슬래브 두께가 다른 다층지지 RC 구조 시스템에서는 콘크리트 재료 강성만 고려하여 시공 하중을 산정할 경우 강성 비율에 변화가 없이 전체 시공 하중의 크기만 늘어나기 때문에 유의미한 분석이 될 수 없으며, 콘크리트 재료 강성과 함께 슬래브 단면 강성을 함께 고려하여 시공 하중의 산정이 이루어져야 한다.
- 5) 슬래브 두께가 크게 증가할수록 두께가 증가하는 슬래브의 강성 비율이 높아져 해당 슬래브가 부담하는 최대 시공 하중의 비율이 증가한다.

따라서 본 연구에서 검토한 일정 층에서 슬래브 두께가 증가하는 다층지지 RC 구조 시스템의 경우 콘크리트 재료 강성과 슬래브 단면 강성을 함께 고려하여 시공 하중을 산정하여야 정확한 시공 하중 및 손상 변수를 산정할 수 있으며 슬래브 두께가 변화하는 층에서 최대 시공 하중과 최대 손상 변수가 크게 증가함을 알 수 있다. 이는 공사 기간, 동바리 지지층 수, 시공 활하중 등 특정 조건을 가정하여 진행한 연구이므로 모든 건축물의 다양한 조건에 적용할 수 있는 일반화된 내용이라 할 수 없으며, 추후 동바리 지지층 수, 시공 주기 등의 시공 변수와 슬래브 두께 증가 층수, 증가 두께, 전이층 보의 두께 증가에 따른 보의 강성 변화 등의 설계 변수 등 다양한 설계 및 시공 요인에 의한 시공 하중의 분석이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2022R1F1A1074540)과 2022년도 광주대학교 우수연구자 지원 사업에 의해 수행된 연구임.

References

1. ACI Committee 347 (2005), Guide for Shoring/Reshoring of Concrete Multi-story Buildings (ACI 347.2R-05), American Concrete Institute, ACI, Farmington Hills, MI, 3-7.
2. Carderon, P. A., Alvarado, Y. A., and Adam, J. M. (2011), A New Simplified Procedure to Estimate Loads on Slabs and Shoring during the Construction of Multistorey Buildings, *Engineering Structures*, 33(5), 1565-1575.
3. 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*, KCI, 26(3), 385-392 (in Korean, with English abstract).
4. Hwang, H. J., Hong, G. H., Park, H. G., Kim, Y. N., and Kim, J. Y. (2010), Effects of Shore Stiffness and Concrete Cracking on Slab Construction Load I: Theory, *Journal of the Korea Concrete Institute*, KCI, 22(1), 41-50 (in Korean, with English abstract).
5. Kim, J. Y., and Park, S. B. (2017), Analysis of Effects of Reshoring Works on Short and Long Term Deflections of Flat Plates, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 21(1), 40-48 (in Korean, with English abstract).
6. Alvarado, Y. A., Calderon, P. A., Gasch, I., and Adam, J. M. (2010), A Numerical Study into the Evolution of Loads on Shores and Slabs during Construction of Multistorey Buildings, Comparison of Partial Striking with Other Techniques, *Engineering Structures*, 32, 3093-3102.
7. Grundy, P., and Kabaila, A. (1963), Construction Loads on Slab with Shored formwork in Multistorey Buildings, *ACI Journal*, 60(12), 1729-1738.
8. KSCS (2021), Concrete Structure Analysis and Design Principles (KDS 14 20 10), 6-7 (in Korean).
9. Puente, I., Azkune, M., and Insausti, A. (2007), Shore-Slab Interaction in Multistorey Reinforced Concrete Buildings during Construction: An Experimental Approach, *Engineering Structures*, 29(5), 731-741.
10. 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 the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, COSEIK, 22(1), 25-34 (in Korean, with English abstract).

Received : 01/17/2024

Revised : 02/06/2024

Accepted : 02/13/2024

요 지 : 최근 콘크리트 타설 중 구조체, 거푸집 및 동바리 사고가 계속해서 발생하고 있으며, 특히 슬래브 두께가 증가하는 다층지지 RC 구조에서 붕괴 사고가 빈번하게 발생하였다. 이전 연구에서는 모든 슬래브 두께가 일정한 경우에 대한 연구가 주로 수행되었으나 일부 슬래브의 두께가 다른 경우, 슬래브 단면 강성의 변화로 전체 슬래브 강성 비율이 달라져 시공 하중의 분포가 달라질 수 있어 이에 대한 연구가 요구된다. 이 연구에서는 슬래브 두께를 변수로 설정하여 슬래브 두께 변화가 콘크리트 강성과 구조물에 미치는 영향을 고려하여 시공 하중의 분포를 분석하였으며, 슬래브 두께가 변화하는 경우 콘크리트 재료 강성 뿐만이 아닌 슬래브 단면 강성도 시공 하중 산정에 고려되어야 함을 확인하였다. 슬래브 두께가 증가 할 경우 두께가 증가하는 층에 작용하는 최대 시공 하중과 최대 손상 변수는 크게 증가하였으며 두께 증가가 클수록 더욱 높은 비율의 시공 하중이 작용함을 확인하였다.

핵심용어 : 슬래브 시공하중, 다층지지 RC 구조, 슬래브 두께 변화
