

# 플랫 플레이트 시스템의 처짐에 대한 시공 중 과하중의 영향 평가를 위한 실용해석 기법의 적용

## Applications of Practical Analysis Scheme for Evaluating Effects of Over-Loads during Construction on Deflections of Flat Plate System

김 재 요†

Kim, Jae-Yo

(논문접수일 : 2008년 8월 11일 ; 심사종료일 : 2008년 10월 14일)

### 요 지

큰 휨 지지력을 제공하는 테두리 보가 없이 기둥과 바닥판만으로 구성된 플랫 플레이트 시스템은 응력 조건뿐만 아니라 사용성 조건에 의하여 구조적 성능이 결정될 수 있다. 시공 순서 및 그에 따른 동바리로 연결되어 있는 슬래브들 간의 시공 하중 분포에 대한 영향이 플랫 플레이트의 단기 및 장기 성능에 대한 중요한 영향 요소가 될 수 있다. 이 연구에서는 슬래브 처짐 산정을 위하여, 선형해석 프로그램을 이용하여 시공 순서 및 콘크리트 균열효과를 고려할 수 있는 실용해석 기법을 제시한다. 구조설계기준에서 제시하고 있는 1방향 휨부재의 처짐 산정을 위한 유효단면 2차 모멘트의 개념을 2방향 슬래브 시스템인 플랫 플레이트의 유한요소해석에 확장하여 적용한다. 플랫 플레이트 시스템의 처짐에 대한 시공 중 과하중의 영향을 분석하기 위하여, 간편법에 의하여 산정된 시공 하중의 지배조건들에 대하여 제안된 실용해석 기법을 적용한다.

**핵심용어** : 플랫 플레이트, 처짐, 시공 하중, 균열

### Abstract

RC flat plate, which has no large flexural stiffness by boundary beams, may be governed by serviceability as well as strength condition. A construction sequence and its impact on distributions of construction loads among slabs tied by shores are decisive factors on immediate and long term performances of flat plate. The over-loading and tensile cracking in early-aged slabs significantly increase the deflection of flat plate system. In this study, for slab deflections, the practical analysis scheme using a linear analysis program is formulated with considering construction sequence and concrete cracking effects. The concept of the effective moment of inertia in calculating deflections of one-way bending member, that is presented in structural design codes, is extended to the finite element analysis of the two-way slab system of flat plates. Effects of over-loads during construction on deflections of flat plate system are analyzed by applying the proposed practical analysis scheme into the critical construction load conditions calculated from the simplified method.

**Keywords** : flat plate, deflection, construction load, crack

### 1. 서 론

근래 국내 건축물에서는 층고 절감 및 시공성 향상이라는 장점으로 인하여 플랫 플레이트 시스템의 사용이 증가하였다. 플랫 플레이트의 경우, 강도뿐만 아니라 슬래브 처짐 등의 사용성이 구조설계를 좌우하는 경우가 많으며, 구조설계 기준에서는 별도의 계산없이 처짐 기준을 만족할 수 있는 슬

래브 최소 두께를 제공하고 있다(대한건축학회, 2005; ACI Committee 318, 2005). 또한, 기준은 사용성에 대한 요구 성능을 증명하는 구조 계산을 통하여 슬래브 두께를 줄일 수 있도록 허용하고 있으며, 특히 최근에는 고강도 콘크리트의 사용, 고성능 컴퓨터를 기반으로 하는 정밀해석 및 설계능력을 보유한 전산 소프트웨어의 사용에 의하여 사용성 요구 성능을 만족하나 규준에서 제시한 경간/두께 비 지침을 초과하

† 책임저자, 정회원 · 광운대학교 건축공학과 조교수  
Tel: 02-940-5637 ; Fax: 02-940-5190  
E-mail: kimjyo@kw.ac.kr

• 이 논문에 대한 토론을 2009년 4월 30일까지 본 학회에 보내주시던 2009년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

는 경우가 빈번하게 발생하고 있다.

보가 없이 기둥과 바닥판만으로 구성된 바닥 시스템인 플랫 플레이트는 시공 하중에 큰 영향을 받을 수 있다. 동바리를 통하여 전달되는 슬래브 자중 및 시공 하중으로 인하여 초기 재령의 슬래브에 과도한 하중이 작용함으로써, 구조 안전성뿐만 아니라 사용성에도 영향을 미칠 수 있다. 완전히 경화되지 않은 슬래브에 발생한 이러한 초기 손상은 슬래브 경화 후에도 존재함으로써 슬래브 자중 및 마감하중, 적재하중 등에 의한 즉시 처짐은 물론 장기 거동에 큰 영향을 미칠 수 있다. 강성훈 등(2003)의 연구에서는 시공 하중의 크기뿐만 아니라 초기 재령 콘크리트 강도에 영향을 미치는 시공 하중의 재하 시기가 시공 중 구조 안전성 및 균열, 단/장기 처짐에 더욱 치명적일 수 있음을 밝히고 있다. 따라서, 계획 및 시공 과정에 시공 하중 및 구조 안전성/사용성에 영향을 줄 수 있는 영향 요소들에 대한 고려들이 포함되어야 하며, 설계 및 해석에서의 가정들이 성립할 수 있도록 시공 과정에 대한 지속적인 조절 프로그램이 계획되어야 한다. 조기 균열을 최소화하고, 슬래브 재령 초기의 과하중(over-loads)을 피할 수 있도록 시공 및 양생 방법에 대한 주의 깊은 계획이 요구된다. 또한 시공 주기에 포함되는 슬래브들에 적절한 하중 분배가 이루어지도록 동바리 설치/제거/재설치의 과정이 균형을 이루어야 한다.

이를 위해서는 플랫 플레이트의 거동에 대한 시공 순서 및 방법의 영향을 반영할 수 있고, 콘크리트 균열 발생 등을 고려하여 처짐을 정밀하게 예측할 수 있는 비선형 해석 기법을 적용해야 한다. 그러나 구조설계 및 현장시공 기술지원을 담당하는 실무엔지니어의 입장에서 비선형해석 프로그램은 익숙하지 않은 해석도구이며, 특히 재료 성질 및 단면 특성, 시공 일정 등 시공 중 과하중에 따른 슬래브의 즉시 처짐에 영향을 미칠 수 있는 요소들이 확정되지 않은 구조설계나 도면/대안 검토, 시공계획의 단계에서 비선형해석 프로그램을 사용하는 것은 효율성이 떨어진다. 따라서, 실무 엔지니어가 쉽게 사용할 수 있는 기존의 선형해석 프로그램을 이용하여 시공 중 과하중, 균열 발생 등을 모두 고려할 수 있는 해석 기법이 요구된다.

이 연구에서는 시공 중 슬래브의 과하중 작용 현상을 분석하고, 이를 반영한 처짐 분석방법을 제안하고자 한다. 시공 주기 및 재료 성질을 고려하여 시공 중 동바리에 의하여 지지된 슬래브들 간의 하중 분포를 분석하고, 슬래브에 작용하는 시공하중을 콘크리트 재령에 따라 결정한다. 설계 단계 및 시공계획 수립/검토 단계에서 시공 중 과하중과 균열 발생을 고려한 슬래브의 처짐값 계산을 위하여 선형 구조해석 프로그램을 이용한 실용해석 방법을 제안한다.

## 2. 해석기법

### 2.1 기본 개념

본 연구에서는 일반 실무 엔지니어들이 쉽게 응용 가능한 해석방법의 제안을 위하여 범용 구조해석 프로그램을 이용한 선형해석 과정에 균열 및 비선형 개념을 적용한 실용해석기법을 제안한다. 특히, 구체적인 재료 물성 혹은 시공 일정 등이 정해지지 않은 설계 단계 및 시공계획 수립/검토 단계에서의 적용 타당성을 고려하여 구조설계 기준에서 제시하는 재료 성질 및 처짐 산정과정을 적용한다. 개념적으로 구조설계기준(대한건축학회, 2005)에서 제시하는 1방향 휨부재의 처짐 산정 과정을 2방향 슬래브의 유한요소해석에 확대 적용한다. 슬래브에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하고, 균열 모멘트보다 큰 모멘트가 작용하는 요소에 대하여 균열에 의한 휨강성 저하를 고려한 유효 단면 2차 모멘트를 적용함으로써, 균열 발생에 따른 단면 강성 저하 및 처짐 증가 현상을 나타낸다. 이 과정을 간단히 요약하면 다음과 같다.

- 1) 계획된 슬래브 시공 주기 및 방법을 고려하여(혹은 가정하여), 시공 중 균열에 따른 슬래브 단면 강성 저하 및 처짐을 극대화할 수 있는 시공 하중의 지배조건(슬래브 콘크리트 재령 및 하중 크기)을 결정한다.
- 2) 시공 하중 지배조건에 따른 슬래브 재령( $t$ )에 해당하는 시공 하중과 재료 및 단면 성질을 이용한 선형해석을 수행한다.
- 3) 해석 결과, 각 요소에 작용하는 모멘트( $M_a$ )를 휨균열을 발생시키는 균열모멘트( $M_{cr}$ )와 비교한다.

$$M_{cr} = \frac{0.63 \sqrt{f_{ct}} I_g}{y_t} \quad (1)$$

여기서,  $f_{ct}$  : 슬래브 콘크리트 재령  $t$ (일)에서의 압축강도,  $I_g$  : 철근을 무시한 콘크리트 전체 단면의 중심축에 대한 단면 2차 모멘트,  $y_t$  : 철근을 무시한 전체 단면적의 중심축에서 인장측 연단까지의 거리이다.

- 4)  $M_a$ 가  $M_{cr}$ 보다 큰 경우, 해당 요소는 균열이 발생하는 것으로 가정하고 단면 휨강성은 균열을 고려하여 저하된 유효 단면 2차 모멘트( $I_e$ )로 정의한다.

$$I_e = \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left[ 1 - \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \quad (2)$$

여기서,  $I_{cr}$  : 균열 단면의 단면 2차 모멘트이다.

- 5) 유효 단면 2차 모멘트를 유한요소해석에 적용하기 위하여, 유효 단면 두께( $t_e$ )를 정의한다.

$$t_e = \sqrt[3]{\frac{12I_{cr}}{b}} \quad (3)$$

여기서,  $b$  : 요소 단면의 폭이다.

- 6) 균열 발생 요소의 유효 단면 두께를 고려하여, 2)의 해석을 다시 수행한다. 유효 단면 2차 모멘트  $I_e$ 가 감소되어야 하는 요소가 더 이상 발생하지 않을 때까지, 즉 균열에 따른 슬래브 유효 단면 강성의 분포와 휨모멘트의 분포가 수렴할 때까지 2)~5)의 과정을 반복 계산한다.

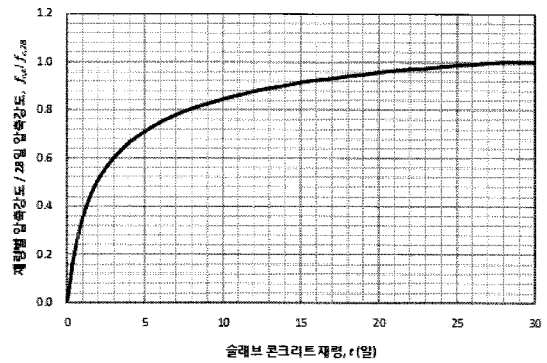
위의 2)~6)의 과정을 통하여, 각 요소의 균열 발생 여부를 확인하고, 설계기준에서 제시하는 유효 단면 2차 모멘트를 적용함으로써 균열에 따른 휨강성 저하 및 처짐 증가 현상을 반영할 수 있으며, 반복 계산을 통하여 균열 슬래브의 휨강성 분포 변화에 따른 휨모멘트의 재분배가 이루어질 수 있다. 슬래브 콘크리트의 경화 중 휨균열에 의한 단면 강성의 저하는 회복되지 않으므로, 시공 중 지배하중조건에 의한 각 요소의 단면 2차 모멘트는 시공 하중이 감소된 후 뿐만 아니라 지속하중이 작용하는 장기 거동에서도  $I_e$ 를 그대로 유지한다. 또한, 콘크리트 재령 증가에 따른 강성 증가에 의한 슬래브 처짐 회복은 발생하지 않으며, 시공 하중 감소에 따른 처짐의 회복만 고려한다.

시공 중 균열의 발생 및 처짐 분석을 위해서 콘크리트 재령에 따른 재료성질은 재료실험결과를 이용하거나 구조설계기준(대한건축학회, 2005)에서 제시한 식에 따라 정의한다. 재령  $t$ 에서의 콘크리트 압축강도( $f_{ct}$ ) 및 탄성계수( $E_{ct}$ )는 다음과 같이 정의한다.

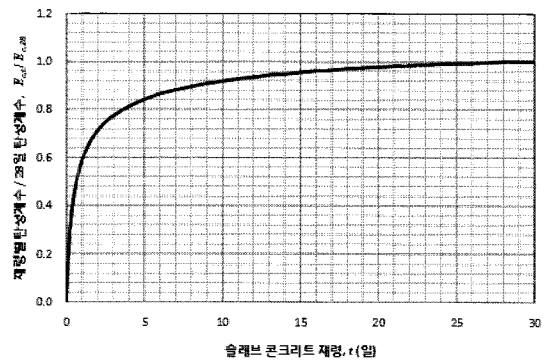
$$f_{ct} = f_{c,28} \times \beta_{cc}(t) \leq f_{c,28} \quad (4)$$

$$E_{ct} = 2.15 \times 10^4 \sqrt[3]{f_{c,28}/10} \times \sqrt{\beta_{cc}(t)} \leq E_{c,28} \quad (5)$$

여기서,  $f_{c,28}$  : 콘크리트의 28일 압축강도(MPa)로서 사용성 평가를 위해서 실제 강도를 사용하여야 하며, 실제 강도를 알 수 없는 설계 및 시공계획단계에서는 설계기준강도  $f_{ck}$ 에 8MPa를 더한 값을 사용한다(대한건축학회, 2005).  $\beta_{cc}(t)$  : 시간에 따른 강도발현속도를 나타내는 계수(=  $\exp[\beta_{sc}(1 - \sqrt{28/t})]$ )이며, 1종 시멘트를 사용하는 경우



(a) Compressive Strength Development



(b) Elastic Modulus Development

그림 1 Material Properties with Concrete Ages (KBC 2005)

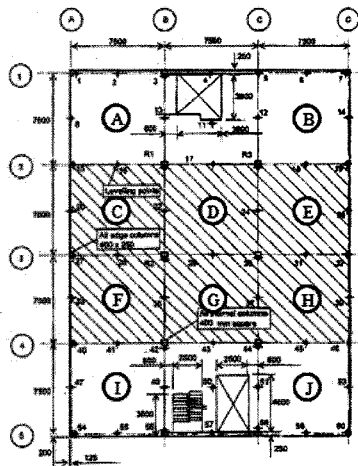
$\beta_{sc}=0.25$ 이다. 그림 1은 28일 압축강도에 대한 재령별 압축강도값의 비율과 28일 탄성계수에 대한 재령별 탄성계수값의 비율을 보여주고 있다.

## 2.2 검증

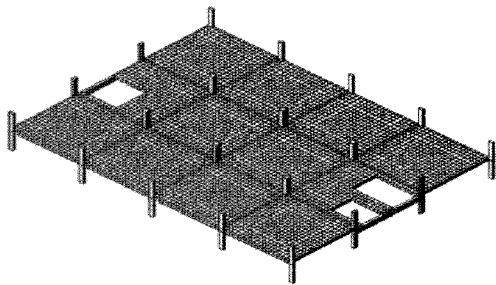
플랫 플레이트 처짐 성능 분석을 위한 실용해석기법의 적용을 위하여 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS-GEN 7.4.0을 사용한 3차원 구조해석 모델이 구성된다. 벽체 및 슬래브는 플레이트 요소로서 기둥 및 보의 보요소로서 모델링된다. 또한, 슬래브에 작용하는 바닥하중은 플레이트 요소에 면의 압력하중(pressure load) 형태로 작용하며, 벽체 및 기둥의 상·하부 지지조건은 층 중간지점에서 힌지단으로 정의된다(단, 상부 지지점의 수직방향 이동은 허용함). 제안된 실용해석기법의 검증을 위하여 초기 재령의 연속 스펠 플랫 플레이트에 대한 실험 결과 및 기존의 비선형해석 프로그램에 의한 해석결과와 비교를 수행한다.

### 2.2.1 실험 결과 비교

Vollum 등(2002)은 6층 규모의 3스팬×4스팬 플랫 플레



(a) Geometry of Slabs



(b) 3-D Analysis Model

그림 2 Flat Plate System in Cardington Test

표 1 Material Properties and Reinforcement of 3rd Floor Slab in Cardington Test

Concrete				Reinforcement		
Compressive Strength(MPa)		Elastic Modulus(MPa)		Yield Strength (MPa)	Reinforcement Ratio	
$f_{c,28}$	$f_{c,2}$	$E_{c,28}$	$E_{c,2}$		Top	Bottom
41.6	19.8	37,750	33,000	400	0.13~0.63%	0.23~0.64%

이트 시스템에 대한 계측을 수행하였다(그림 2). 이 실험의 3층 슬래브에서 계측된 처짐값을 제안된 해석 방법에 의한 처짐 해석 결과와 비교하였다. 대상 건물의 플랫 플레이트 시스템의 스패ん 길이는 7.5m이고 슬래브 두께는 250mm이며, 내부 기둥과 테두리 기둥의 크기는 각각 400mm×400mm, 400mm×250mm이다. 콘크리트가 완전히 경화되기 전의 시공 중 조건인 재령 2일 시점에 6.75kN/m<sup>2</sup>(슬래브의 자중의 1.125배; 1.125DL)을 지지하는 시공 하중 조건으로서 슬래브의 재료 및 배근 정보는 표 1과 같다. 각 슬래브의 위치별로 최대처짐에 대한 계측값과 해석결과값은 표 2에 정리되어 있으며, 해석결과값에 대한 계측값의 비( $\Delta_{test} / \Delta_{analysis}$ )를 통하여 비교하고 있다. 전체적으로 유사한 결과를 보여주고 있으나, 제안된 해석 기법이 슬래브 처짐값을

표 2 Comparisons of Analysis Results with Deflections of Cardington Test

Location		Measured Deflection ( $\Delta_{test}$ )	Analyzed Deflection ( $\Delta_{analysis}$ )	$\Delta_{test} / \Delta_{analysis}$
Corner Slab	A	7.85mm	7.91mm	0.992
	B	7.50mm	7.54mm	0.995
	I	6.24mm	7.81mm	0.799
	J	6.40mm	7.90mm	0.810
Edge Slab	C	5.89mm	6.21mm	0.948
	E	5.05mm	6.18mm	0.817
	F	5.20mm	6.21mm	0.837
	H	5.25mm	6.26mm	0.839
Internal Slab	D	3.35mm	3.99mm	0.840
	G	3.70mm	3.95mm	0.937

과대평가하는 것으로 나타나 있다. 그러나 계측에서 발생할 수 있는 오차를 감안한다면 충분히 허용할 수 있는 수준이다.

### 2.2.2 비선형해석 프로그램 결과 비교

제안된 해석 기법의 유효성을 검증하기 위하여 Park 등 (1997)에 의해 개발된 슬래브 비선형해석 프로그램의 결과와 비교한다. 철근콘크리트의 재료모델로서 소성이론과 파괴모델의 통합방법을 사용하는 이 비선형해석법은 압축파괴와 인장균열에 대한 다중파괴기준을 사용함으로써 철근콘크리트의 주요 거동 특성인 인장균열에 의한 인장응력의 저하와 다축 압축에 의한 압축강도의 증가현상을 동시에 나타낼 수 있다. 유한요소해석을 위한 요소모델로서 면대거동과 휨거동을 나타낼 수 있는 9절점의 쉘요소를 사용하여 슬래브의 처짐을 나타낼 수 있으며, 슬래브의 거동에 대한 이 비선형해석 프로그램의 유효성은 슬래브 실험결과들과의 비교를 통해 검증되었다(Park 등, 1999).

스패ん 길이 6.0m, 두께 170mm의 정방형 플랫 플레이트에 대하여, 기존의 비선형 프로그램과 제안된 실용해석 기법에 의한 해석 결과들을 비교한다. 하중 및 지지조건의 대칭

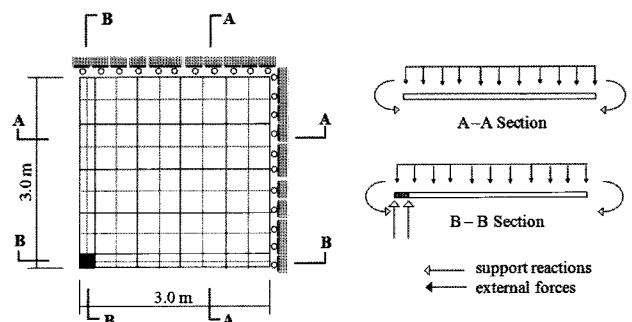


그림 3 Finite Element Model of Typical Flat Plate

표 3 Material Properties and Reinforcement for Comparison with Existing Nonlinear Analysis

Concrete			Reinforcement		
Comp. Strength (MPa)	Tensile Strength* (MPa)	Elastic Modulus (MPa)	Yield Strength (MPa)	Reinforcement Ratio	
$f_{ck}$	$f_t$	$E_c$		Column Strip	Middle Strip
24	2.4	23,000	400	Top 1.04 / 0.14% Bottom 0.42%	Top 0.32 / 0.14% Bottom 0.28%

\* Tensile strength is used for the nonlinear analysis.

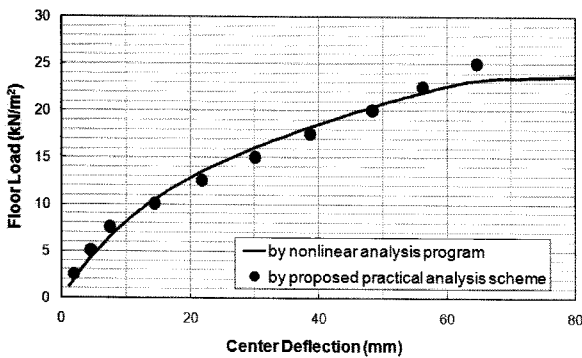


그림 4 Comparison of Existing Nonlinear Analysis and Proposed Analysis Results

성을 이용하여 그림 3과 같은 1/4 축소모델을 사용하여 해석이 수행되었으며, 단면 및 재료 성질은 표 3에 요약되어 있다. 그림 4는 슬래브에 작용하는 바닥하중과 슬래브 중심의 처짐값의 관계에 대하여, 두 해석 방법에 의한 결과들을 비교하고 있다. 제안된 실험해석 기법에 의해 얻어진 하중과 변형의 관계가 기존의 비선형해석법에 의한 결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 보여 주고 있다. 제안된 해석법은 유효 단면 강성을 적용한 선형해석을 사용하고 있어, 콘크리트의 파괴에 의한 중국 하중(ultimate load)을 나타낼 수 없다. 그러나 약 6.0DL(=24.5kN/m<sup>2</sup>) 정도의 바닥하중이 작용할 때까지 하중과 슬래브 처짐의 관계를 정확히 예측하고 있으므로, 시공 하중 혹은 사용 하중에 대한 슬래브의 처짐값 추정에 적용 가능한 해석 기법이라 할 수 있다.

### 3. 시공 하중

#### 3.1 시공 하중 산정

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. 즉, 시공 중 타설 시점이 다양한 여러 층 슬래브들이 하나의 시스템을 구성하고, 이 시스템은 인접 층 슬래브들을 연결하는 동바리들에 의해 결합되어 있다. 이때 시스템에 작용하는 하중은 연결된 슬래브들의 자중과 시공하중(construction live load)이며, 이 작용 하중들은 슬래브들의 강성비에 따라 각 층에 분배되어 시공 하중(construction load)으로서 작용한다. 시공 주기(construction cycle) 및 동바리 지지 층 수에 따라, 각 층 슬래브 콘크리트의 재령에 따른 강성비에 의해 슬래브에 작용하는 시공 하중이 결정된다. 따라서, 슬래브 콘크리트의 재령에 따라 발현된 강도에 비하여 시공 중 과하중(over-load)이 작용하지 않도록 구조설계 및 시공 계획에 주의를 기울여야 한다.

ACI Committee 347(2005)은 Grundy 등(1963)이 제안한 “간편법(simplified method)”을 통하여 슬래브의 시공 하중을 결정하는 가이드라인을 제시하고 있다. 그림 5는 4일 시공 주기 및 동바리 4개층 지지인 경우에 대하여, 간편법에 의한 시공 하중 산정 과정을 보여주고 있다. 콘크리트 재령별 강성은 건축구조설계기준(대한건축학회, 2005)에 따라 28일 탄성계수에 대한 비로 표시하였으며, DL은 슬래브 1개층 자중(self-weight)을 의미한다. 시공하중 0.5DL 및 최상부층 콘크리트 타설 후 1일에 최하부층 동바리가 제거되는 시공순서를 가정하였다. N일에 새롭게 타설된 K층 슬래브는 타설 직후 미경화된 상태로써 자중을 지지할 수 없으므로, 동바리로 연결된 하부층들(K-1층~K-4층)이 K층의 자중을 분담하여 지지하고 있다(그림 5a). N+1일에 최하부층의 동바리가 제거됨으로써, K-4층이 자신의 자중 이외에 부담하고 있던 1.32DL의 하중은 상부 4개층(K층~K-3층)에 강성비에 따라 분배된다(그림 5b). 마찬가지로, N+4일

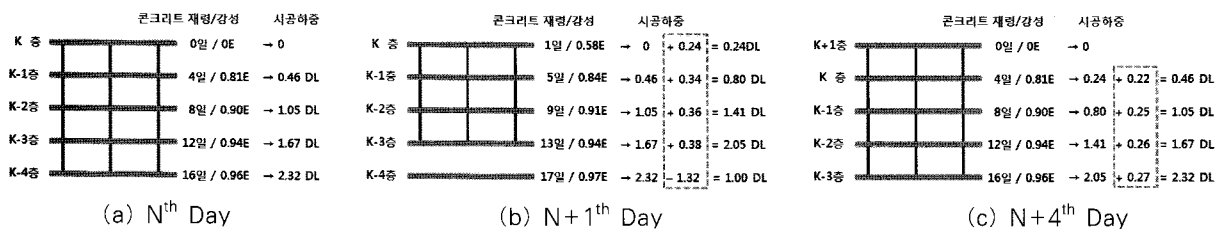


그림 5 Construction Loads by Simplified Method - 4-Day Construction Cycle & 4 Shored Floors

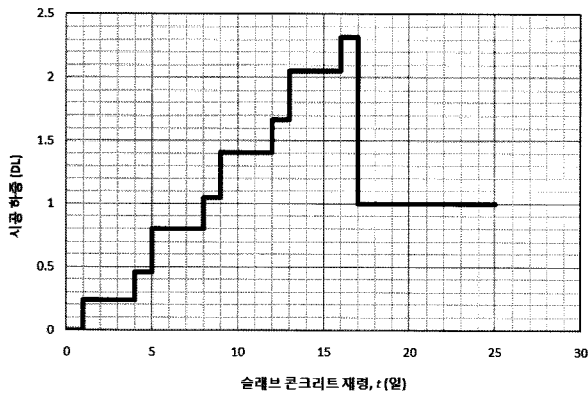


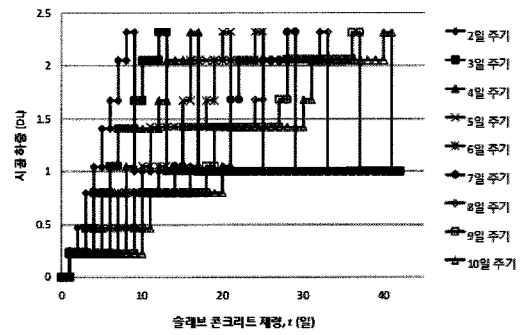
그림 6 Construction Loads with Concrete Ages - 4-Day Construction Cycle & 4 Shored Floors

에 K+1층 슬래브 타설에 의하여 부가된 추가하중 1.00DL은 아직 하중지지능력이 없는 K+1층 슬래브를 제외한 하부 4개층(K층~K-3층)에 강성비에 따라 분배되어 누적된다(그림 5c). 이에 대한 전체 과정을 정리하여 콘크리트 재령에 따른 시공 하중의 변화를 그림 6에서 보여주고 있다. 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 시공 주기 및 동바리 지지층 수에 따라 달라질 것이다("3.2 시공 하중 분석"에서 기술).

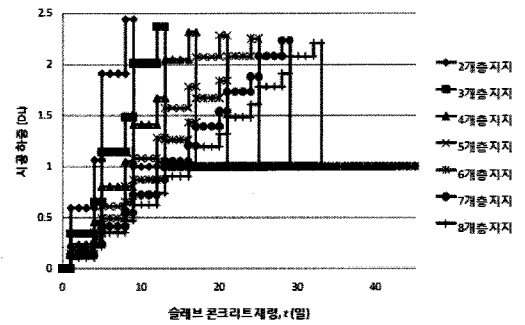
간편법에서는 동바리와 기초의 무한강성을 가정하므로 동바리와 슬래브, 기초, 수직지지 부재들 간의 재료 강성 및 단면 강성의 상대적인 차이 및 위치에 따른 시공 하중의 수직/수평적 분포를 고려하지 못하고 콘크리트 재령에 따른 각 층 슬래브 재료 강성의 상대적인 차이만을 고려한다. 따라서, 실제 계측 결과와 비교할 때, 유효요소해석 혹은 동바리/슬래브 상대 강성을 반영한 시공 하중 예측법에 비하여, 간편법 결과의 정확성이 보다 낮은 것으로 알려져 있다(Puente 등, 2007). 그러나, 상세한 시공 방법이 결정되지 않은 구조설계 및 시공계획의 초기 단계에서는 간편법이 보다 실용적이고 적합한 예측법이 될 수 있다.

### 3.2 시공 하중 분석

간편법에 의하여 시공 주기 및 동바리 지지 층 수에 따른 시공 하중을 분석한다. 그림 7(a)는 4개층 지지인 경우에 대하여 2일~10일 시공 주기에 따른 콘크리트 재령별 시공 하중을 보여 주고 있다. 시공 주기의 변화에 대하여 최대 시공 하중값은 거의 유사하나, 시공 주기가 길어질수록 최대 시공 하중값에 대응하는 슬래브 콘크리트 재령이 크다. 그림 7(b)

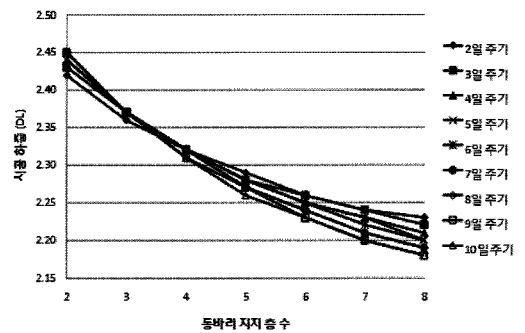


(a) Construction Loads for 4 Shored Floors

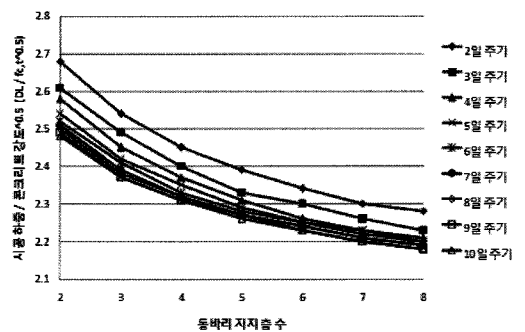


(b) Construction Loads for 4-Day Construction Cycle

그림 7 Variations of Construction Loads with Construction Cycle or Number of Shored Floors



(a) Maximum Construction Load



(b) Maximum Damage Parameter

그림 8 Maximum Construction Loads and Maximum Damage Parameter on Slabs

표 4 Maximum Construction Loads

		Construction Cycle(Day)								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Number of Shored Floors	2	2.42	2.43	2.44	2.44	2.44	2.45	2.45	2.45	2.45
	3	2.36	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37
	4	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32	2.31	2.31
	5	2.29	2.28	2.28	2.28	2.28	2.27	2.27	2.27	2.26
	6	2.26	2.26	2.25	2.25	2.25	2.24	2.24	2.23	2.23
	7	2.24	2.24	2.23	2.23	2.22	2.21	2.21	2.20	2.20
	8	2.23	2.22	2.21	2.20	2.20	2.19	2.19	2.18	2.18

All values mean the coefficients for DL.

표 5 Maximum Slab Damage Parameter

		Construction Cycle(Day)								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Number of Shored Floors	2	2.68	2.61	2.58	2.54	2.52	2.51	2.50	2.49	2.48
	3	2.54	2.49	2.45	2.42	2.41	2.39	2.38	2.37	2.37
	4	2.45	2.40	2.37	2.35	2.33	2.32	2.32	2.31	2.31
	5	2.39	2.33	2.31	2.29	2.28	2.27	2.27	2.27	2.26
	6	2.34	2.30	2.26	2.25	2.25	2.24	2.24	2.23	2.23
	7	2.30	2.26	2.23	2.23	2.22	2.21	2.21	2.20	2.20
	8	2.28	2.23	2.21	2.20	2.20	2.19	2.19	2.18	2.18

는 4일 시공 주기에 대하여, 2개층~8개층의 동바리 지지 층 수에 따른 콘크리트 재령별 시공 하중을 보여주고 있다. 동바리 지지 층 수가 많아질수록 최대 시공 하중은 감소하며, 최대 시공 하중에 대응되는 슬래브 콘크리트 재령이 커진다. 그림 8(a)와 표 4는 동바리 지지 층 수 및 시공 주기에 따른 최대 시공 하중을 정리하고 있다. 그러나 슬래브 콘크리트가 경화되고 있는 과정으로서 콘크리트의 역학적 성질이 변화하고 있는 과정이므로, 단순히 하중의 크기만으로 슬래브 손상을 평가할 수는 없다. 슬래브 재령이 클수록 콘크리트의 강도 및 탄성계수가 커지므로 동일한 하중에 대하여 균열 발생 및 처짐이 감소한다. 보다 작은 하중이 콘크리트 재령이 보다 작은 슬래브에 작용하는 경우, 큰 하중이 큰 재령의 슬래브에 작용하는 경우보다 슬래브에 대한 손상이 더 클 수도 있다. 따라서, 슬래브 처짐에 대한 동바리 지지 층 수 및 시공 주기의 영향을 고려하기 위해서는 시공 하중의 크기 뿐만 아니라, 콘크리트 재령에 따른 강도 및 강성 성능을 함께 고려하여야 한다. 이 연구에서는 시공 중인 플랫폼 플레이트 시스템의 시공 하중에 대한 지배조건을 결정하기 위하여, 슬래브의 손상 변수(damage parameter)  $K$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$K = \frac{w_t / w_{DL}}{\sqrt{f_{ct} / f_{c28}}} \quad (6)$$

여기서,  $w_t$  : 슬래브 재령  $t$ 일에서의 시공 하중,  $w_{DL}$  : 슬래브 1개 층의 자중이다. 슬래브의 처짐 성능은 휨균열 발생 및 유효 단면 2차 모멘트의 적용에 의하여 결정된다. 따라서, 콘크리트의 인장균열강도 및 균열모멘트는 압축강도의 제곱근에 비례하므로(식 (1)), 압축강도의 제곱근에 대한 시공 하중의 비를 슬래브의 손상 변수로서 정의한다. 식 (6)에서, 상부 층 연결 동바리가 제거되어 슬래브가 자신의 자중만 지지하고( $w_t = w_{DL}$ ), 콘크리트 재령이 28일 이상으로서 자신의 강도를 충분히 발휘할 수 있는 경우( $f_{ct} = f_{c28}$ ), 슬래브 손상 변수  $K=1$ 로서 정의된다.  $K$ 가 클수록 슬래브의 균열 손상 가능성이 커지고 처짐이 증가한다. 표 5 및 그림 8(b)는 동바리 지지 층 수 및 시공 주기에 따른 슬래브의 최대 손상 변수를 정리하고 있다. 동바리 지지 층 수가 많을수록 혹은 시공 주기가 길어질수록 최대 손상 변수가 일관성 있게 작아지고 있다. 즉, 동바리 지지 층 수가 많아지고 시공 주기가 길어질수록, 슬래브 균열 손상 및 처짐 증가 유발 가능성이 작다는 것을 명확하게 보여주고 있다. 이 논문에서는 슬래브 시공 하중의 지배조건으로서, 슬래브 손상 변수  $K$ 가 최대인 하중조건(콘크리트 재령을 함께 고려함)으로서 정의한다.

#### 4. 처짐에 대한 영향

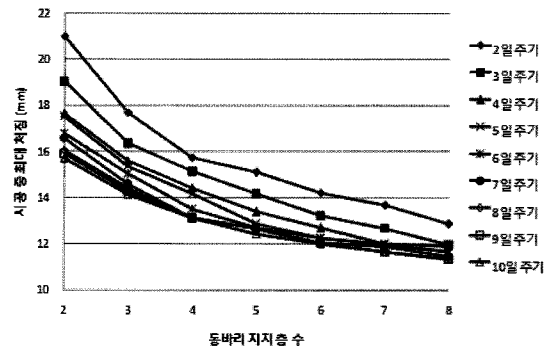
시공 하중의 영향을 분석하기 위하여, 이 논문에서 제안한 슬래브 처짐의 실용 해석 기법을 간편법 및 슬래브 손상 변수에 의하여 결정된 시공 하중의 지배조건들에 적용한다. 슬래브 시공 주기 및 동바리 지지 층 수에 따른 각 지배조건들에 대하여 다음 두 단계의 해석 과정을 통하여 시공 하중의 영향을 분석한다.

- 1) 1단계 : 최대 손상 변수에 해당하는 슬래브 콘크리트 재령 및 시공 하중에 대하여, “2.1 기본개념”에서 제시된 해석 과정을 적용하여 유한요소해석을 수행한다.
- 2) 2단계 : 최대 시공 하중이 작용한 시점으로부터 1일 뒤 상부 동바리가 제거되면서 자신의 자중(DL)을 제외한 추가하중이 제거된다(그림 6). 이러한 제하(unloading)에 따른 처짐의 회복을 고려하기 위하여, 하중 감소 및 재료 강성의 변화를 고려하여 처짐 회복값을 결정한다. ACI Committee 435(2003)에서는 지속하중에 의한 처짐은 다음 식 (7)과 같이 시공 하중에 의한 처짐값에 하중 및 탄성계수를 비례적으로 적용하여 정의한다.

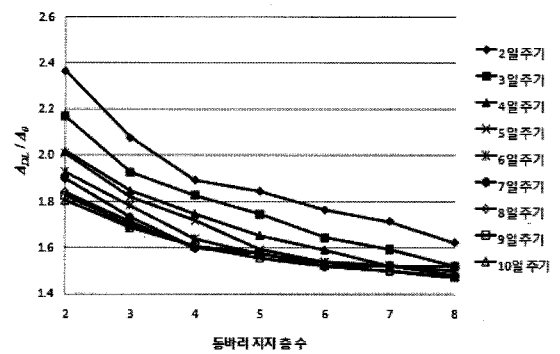
$$\Delta_{DL} = \frac{w_{DL}}{w_{const}} \Delta_{const} \frac{E_{c, const}}{E_{c, DL}} \quad (7)$$

여기서,  $w_{const}$  : 시공 하중으로서 지배하중조건에 의하여 결정되는 하중값,  $\Delta_{DL}$  : 지속하중인 슬래브 자중에 의한 처짐,  $\Delta_{const}$  : 시공 하중  $w_{const}$ 에 의한 처짐으로서 1단계에서 결정된 슬래브 처짐값,  $E_{c, const}$  : 시공 하중  $w_{const}$  작용 시점의 콘크리트 탄성계수,  $E_{c, DL}$  : 해당 슬래브의 시공 종료 시점으로서 부가된 시공 하중이 모두 제하되고 슬래브 자중만 작용하게 되는 시점(시공 하중  $w_{const}$  작용 시점 + 1일)의 탄성계수값이다.

이상과 같이, 시공 중 슬래브 경화 과정에서의 시공 하중에 따른 단면 강성 저하를 고려한 슬래브 자중에 의한 처짐값을 산정할 수 있다. 추가적인 마감하중(SDL)과 적재하중(LL)에 따른 처짐값은 시공 중 저하된 요소별 유효단면 2차 모멘트를 그대로 유지한 채, DL+SDL과 DL+SDL+LL을 순차적으로 작용하여 추가적인 단면 강성의 저하를 고려(하중 증가에 따른 유효단면 2차 모멘트의 감소를 반영하여 “2.1 기본개념”의 해석과정 적용)함으로써 유한요소해석에 의



(a) Maximum Deflections during Construction



(b) Increases of Deflection by Construction Load

그림 9 Results of Deflection Analyses with Considering Effects of Construction Loads

한 처짐을 산정한다. 이 연구에서는 시공 중 손상 단면 강성을 적용하여 슬래브의 자중에 대한 처짐 증가를 분석함으로써, 시공 하중에 의한 처짐 영향을 평가한다. 적용모델로서는 그림 3 및 표 3에 제시된 단면 및 재료 성질을 갖는 스패 길이 6m 및 두께 170mm의 연속 스패 플랫 플레이트 시스템을 사용한다.

그림 9는 시공 주기 및 동바리 지지 층 수에 따른 시공 하중의 영향을 고려한 처짐 해석의 결과를 보여 주고 있다. 그림 9(a)는 앞서 기술한 2단계 해석과정 중 1단계 해석의 결과로서, 시공 중 최대 처짐을 보여주고 있다. 표 4와 같이 시공 중 슬래브 1개 층 자중의 2배 이상의 하중이 작용하며, 콘크리트의 강도 및 강성이 완전히 발현되지 않은 시공 중의 상태이므로, 시공 하중의 영향을 고려하지 않은 슬래브 자중에 의한 처짐  $\Delta_0$ (=3.54mm)와 비교할 때 매우 크게 증가하였음을 알 수 있다. 그림 9 (b)는 해석 과정 중 2단계의 결과로서, 제하 후 슬래브가 1개 층 자신의 자중만을 지지하는 경우의 처짐( $\Delta_{DL}$ )을  $\Delta_0$ 에 대한 비로서 나타내고 있다. 슬래브 1개 층 자중(DL)의 동일한 하중에 대해서, 콘크리트 경화 중 시공 하중의 영향에 의한 단면 강성의 저하로 인해 처짐이 증가한 효과를 명확하게 보여주고 있으며,  $\Delta_{DL}$ 이  $\Delta_0$



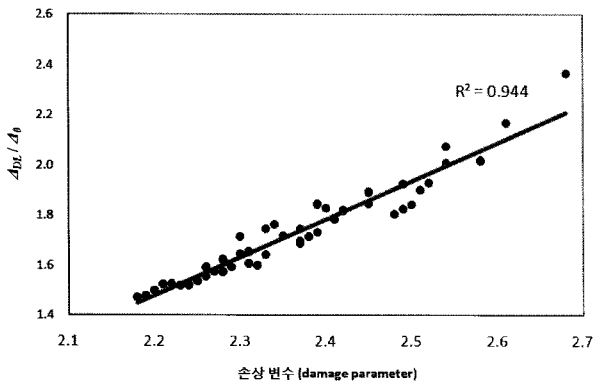


그림 10 Relation between Damage Parameter and Increase of Deflection by Construction Load

의 최소 1.5배 이상으로 증가하였음을 알 수 있다. 시공 주기 및 동바리 지지 층 수에 따라, 최대 시공 하중의 크기 및 최대 하중의 작용 시점(콘크리트 재령)이 다양하게 분포하며, 이러한 변수에 의하여 처짐 증가 효과가 다르게 발생한다. 따라서, 이를 단순화하여 정리하고, 앞서 언급한 손상 변수의 효과를 검증하기 위하여, 각 조건별로 손상 변수와 처짐의 증가비의 관계를 그림 10과 같이 정리하였다. 손상 변수와 처짐 증가비는 거의 선형적인 관계를 보여주고 있으며, 다음과 같은 식 (8)로서 상호 관계를 정의할 수 있다.

$$\Delta_{DL} / \Delta_0 = 1.52 K - 1.86 \quad (8)$$

이와 같이, 시공 주기 및 동바리 지지 층 수에 따른 슬래브 손상 변수를 통하여 시공 하중에 의한 슬래브 처짐 증가를 표현할 수 있으며, 손상 변수가 시공 하중의 영향을 나타낼 수 있는 지표가 될 수 있다. 즉, 식 (6)과 같이 시공 하중의 크기 뿐만 아니라, 균열 발생 및 처짐에 영향을 줄 수 있는 콘크리트 압축강도를 함께 고려함으로써, 슬래브의 시공 중 과하중 작용 및 처짐 영향을 판단할 수 있고, 이를 통하여 적절한 구조설계와 시공계획을 이룰 수 있다.

### 5. 결 론

휨강성이 작은 바닥 시스템인 플랫 플레이트에서는 동바리 지지 층 수 및 시공 주기 등의 시공 방법에 따른 시공 하중이 슬래브의 단기 및 장기 처짐의 사용성에 큰 영향을 줄 수 있다. 이러한 시공 하중은 슬래브 콘크리트의 강도가 완전히 발휘되기 전에 작용하므로 치명적일 수 있으며, 시공 중 과하중에 의하여 발생한 휨균열은 슬래브에 큰 손상을 유발할 수 있다. 따라서, 구조설계 및 시공계획 단계에서 시공 하중에 대한 고려를 통하여 적절한 설계 및 시공 방법이 결정되

어야 한다. 이를 위하여 이 연구에서는 다양한 슬래브 처짐 해석들을 바탕으로 다음과 같은 결론들을 도출하였다.

- 1) 설계기준에서 제시하는 1방향 휨부재의 처짐 산정과정을 플랫 플레이트의 유한요소해석에 적용하였으며, 실험 및 비선형 해석 결과들과의 비교를 통하여 제안된 해석기법의 유효성을 검증하였다.
- 2) 동바리 지지 층 수가 적을수록 슬래브에 작용하는 최대 시공 하중은 증가하며, 최대 시공 하중이 작용하는 시점의 슬래브 콘크리트 재령도 작아진다. 시공 주기의 변화에 대하여 최대 시공 하중값은 유사하나, 시공 주기가 짧을수록 최대 시공 하중에 대응하는 슬래브 콘크리트 재령이 작다. 일반적으로 시공 중 슬래브에는 자중의 2배 이상의 하중이 작용하였다.
- 3) 시공 하중이 슬래브에 미치는 영향은 슬래브 콘크리트 재령에 따른 강도와 시공 하중의 크기를 함께 고려하여 결정되어야 한다. 따라서, 콘크리트의 인장강도 및 균열모멘트값에 비례하는 압축강도의 제공근으로 시공 하중을 나눈 값으로서 슬래브 손상 변수를 정의하였으며, 시공 주기가 짧고 동바리 지지 층 수가 적을수록 슬래브 손상 변수는 증가하였다.
- 4) 시공 중 슬래브의 처짐은 시공 하중의 영향에 의하여 크게 증가하며, 휨균열에 의한 단면 강성의 저하가 발생한다. 시공 하중의 영향을 고려할 경우 슬래브 자중에 의한 처짐은 시공 하중을 고려하지 않은 경우에 비하여 최소 1.5배 이상으로 증가하였다.
- 5) 시공 하중에 따른 슬래브 처짐값의 증가율은 슬래브 손상 변수가 클수록 증가하며, 선형적인 관계로서 정의할 수 있다.

이러한 결론들을 바탕으로 다음과 같은 향후 연구를 제시한다. 이 연구에서는 최대 손상 변수에 따른 지배하중조건만을 고려하였으나, 시공 하중 이력을 고려한 슬래브의 처짐을 검토할 필요가 있으며, 크리프에 의한 시공 중 처짐 증가 및 장기 처짐에 대한 추가 연구가 필요하다.

### 참 고 문 헌

강성훈, 최경규, 박홍근 (2003) 시공 하중의 영향을 받는 플랫 플레이트의 최소 두께, 한국콘크리트학회논문집, 15(5), pp.650~661.  
 대한건축학회 (2005) 건축구조설계기준, 기문당, 서울, p.597.  
 ACI Committee 318 (2005) *Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI 318-05)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 436pages.

- ACI Committee 347** (2005) *Guide for Shoring/Reshoring of Concrete Multistory Buildings(ACI 347.2R-05)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, p.18.
- ACI Committee 435** (2003) *Control of Deflection in Concrete Structures(ACI 435R-95)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, p.89.
- Grundy P., Kabaila A.** (1963) Construction Loads on Slab with Shored Formwork in Multistory Buildings, *ACI Journal*, 60(12), pp.1729~1738.
- Park H., Kim E.H.** (1999) RC Flat Plate under Combined In-Plane and Out-of-Plane Loads, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 125(10), pp.1136~1142.
- Park H., Klingner R.E.** (1997) Nonlinear Analysis of RC Members Using Plasticity with Multiple Failure Criteria, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 123(5), pp.643~651.
- Puente I., Azkune M., Insausti A.** (2007) Shore-Slab Interaction in Multistory Reinforced Concrete Buildings during Construction: An Experimental Approach, *Engineering Structures*, 29(5), pp.731~741.
- Vollum R.L., Moss R.M., Hossain T.R.** (2002) Slab Deflection in the Cardington In-Situ Concrete Frame Building, *Magazine of Concrete Research*, 54(1), pp.23~34.