

# 시공단계를 고려한 철근콘크리트 고층건물 기둥의 부등축소량 해석

Prediction of Differential Column Shortening for  
Reinforced Concrete Tall Buildings



이태규\*

Lee, Tae-Gyu



김진근\*\*

Kim, Jin-Keun



송진규\*\*\*

Song, Jin-Gyu

## ABSTRACT

In this paper, the prediction method of the differential column shortening for cracked reinforced concrete tall buildings due to the construction sequence is presented. The cracked sectional properties from the strain and curvature of the sectional centroid is directly used. And the stiffness matrix of concrete elements considering the axial strain-curvature interaction effect is adopted. The creep and shrinkage properties used in the predictions were calculated in accordance with ACI 209, CEB-FIP 1990, and B3 model code. In order to demonstrate the validity of this algorithm, the prediction by the proposed method are compared with both the results of the in-situ test and the results by other simplified method. The proposed method is in good agreement with experimental results, and better than the simplified method.

keywords : Column shortening, Reinforced concrete, Time-dependent, Creep, Shrinkage, Crack

\* 정회원, 우송대학교 토목환경공학과 교수

\*\* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

\*\*\* 정회원, 현대건설(주) 기술연구소 선임연구원

·본 논문에 대한 토의를 1999년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 1999년 8월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

## 1. 서론

최근 동남아 지역을 중심으로 하여 콘크리트 구조재료로 이루어진 고층건물의 시공이 활발하게 진행되고 있다. 그러나 콘크리트 구조물은 철골 구조물과는 달리 탄성 변형량 뿐만 아니라 크리프 및 건조수축으로 인한 비탄성 변형이 장기적으로 발생하여 기둥의 부등축소량에 따른 수직변위를 예측하여 설계에 반영하는데 큰 어려움이 발생한다.<sup>(1)</sup>

고층건물에서 기둥의 부등축소량에 따른 영향은 크게 두가지로 구분된다.<sup>(2)</sup> 첫째는 건물의 사용성에 관한 것으로 건물외부의 커튼월, 수직배관덕트, 엘리베이터 레일 등에 영향을 미치며 인접한 수직부재간의 축소량 차이로 슬래브의 경사, 칸막이벽의 균열 등을 발생시킨다. 둘째는 구조적인 문제로 부등축소에 의한 추가적인 응력의 발생이다. 특히 슬래브의 경우 양단부 기둥의 축소량 차이에 따라 추가적인 단부 모멘트가 발생하여 구조물 전체의 안전성에 영향을 미치게 될 가능성이 존재하기 때문에 이러한 부등축소량을 정확하게 예측하고 그 영향을 사전에 제거하도록 시공할 필요가 있다.

현재 실무에서 일반적으로 사용되고 있는 고층건물의 부등축소량 예측은 다음과 같은 방법<sup>(3)</sup>으로 골조의 하중분담현상(frame action)을 고려하고 있다. 즉, 초기 탄성하중에 대한 전체 구조물의 골조 해석으로부터 얻어진 각 기둥의 하중을 사용하여 이를 주어진 기둥에 대한 탄성하중으로 취하며, 그 이후에는 각기의 독립적인 기둥들만에 의한 시간의존적(time-dependent) 비탄성 해석을 수행하고 있다. 그러나 골조의 하중분담은 탄성하중에 의해서만 이루어지는 것이 아니며 비탄성 하중에 대하여서도 마찬가지로 슬래브를 통한 하중분담이 이루어지기 때문에 실제적인 결과와는 많은 차이를 보이고 있다.

따라서 본 연구에서는 동바리의 설치/제거를 포함한 실제적인 시공과정을 고려하고, 또한 탄성하중은 물론 비탄성 하중의 변화가 슬래브를 통하여 양쪽 기둥으로 전달되는 현상을 고려하기 위한 골조 구조물 해석을 통하여 보다 정밀하게 기둥의 부등축소량을 예측하고자 한다.

## 2. 시공단계의 고려를 위한 해석 알고리즘

### 2.1 시공단계의 수치적 해법

시공과정을 고려하기 위하여서는 각 층마다의 계산된 값을 전체적으로 누적하여야 하기 때문에 겹침의 원리(principle of superposition)가 성립하여야 한다는 조건<sup>(4)</sup>이 필요하며, 실제적으로도 시공중에는 구조물 자체의 자중과 동바리에 의한 사하중의 작용위치 변경만이 존재할 뿐이므로 작용하중은 탄성범위 내에 존재하기 때문에 위의 조건은 타당하게 적용될 수 있다. 본 연구에서는 선요소(line element)를 사용한 2차원 골조 구조물에 대하여 해석하고자 하며, 동바리의 설치/제거 효과에 대한 고려는 단순화하여 Fig. 1과 같이 슬래브 전체에 등분포하중이 작용되는 것으로 가정하였다.<sup>(5)</sup>

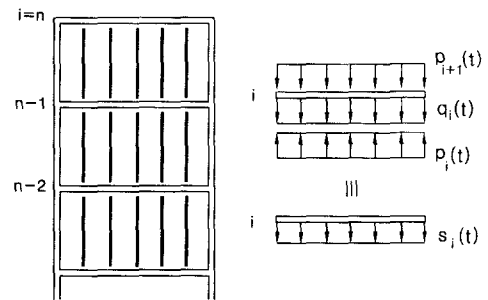


Fig. 1 Floor loads and shores in a building

구조물의 층을  $i$ 라 표시하고,  $t_i$ 는  $i$ 층의 타설일,  $t_i + \delta_i$ 는  $i$ 층의 동바리 제거일, 즉 강성을 발휘하여 변형이 발생하는 시점이라 표시하며,  $t_i$ 에서  $t_i + \delta_i$ 까지의 시간동안은  $i$ 층의 자중만이 동바리를 통해  $i-1$ 층으로 전달되는 것으로 가정한다. 위와 같은 가정하에 Fig. 2와 같은 임의의 시공단계에 대하여 설명하면 다음과 같다.

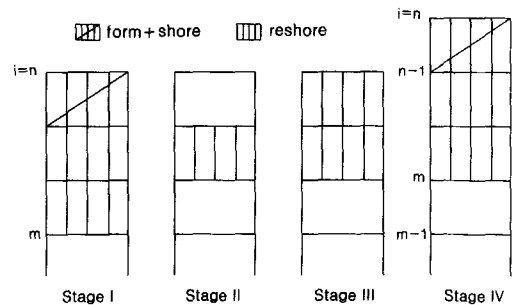


Fig. 2 Typical construction sequence with shores

현재의 시공단계 Stage I에서 시공단계가 바뀌면서 Stage II와 같이 아래층의 동바리는 완전히 제거되고 위층은 거푸집 해체를 위하여 동바리가 일시 제거된 상태이며, Stage III은 위층의 거푸집 해체후 동바리가 재설치되고 다시 Stage IV와 같이 새로운 층이 타설되는 과정을 나타내고 있다. 그러나 해석상의 간편화를 위하여 동바리가 제거되고 다시 설치되는 Stage II와 Stage III의 단계를 무시하고 Stage I에서 Stage IV로 바로 진행되는 것으로 가정하였다. 또한 각 층마다 타설시간이 다르며 재료특성이 다를 수 있기 때문에 층별로 재령 및 재료특성을 각기 다르게 산정할 수 있게 하였다.

동바리가 설치되어 있는 부재는 무한대의 강성을 가지는 것으로 보아 변형이 발생하지 않고<sup>(6)</sup> 사하중을 모두 지탱하는 것으로 가정하였으며, 이에 따라 각 층에서 발생하는 수직방향의 하중은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned}
 s_n &= Q_n - p_n = 0 \\
 s_{n-1} &= Q_{n-1} + p_n - p_{n-1} = Q_n \\
 s_{n-2} &= Q_{n-2} + p_{n-1} - p_{n-2} = Q_{n-1} \\
 &\vdots \\
 s_{m+1} &= Q_{m+1} + p_{m+2} - p_{m+1} = Q_{m+2} \\
 s_m &= Q_m + p_{m+1} = Q_m + Q_{m+1} \\
 s_{m-1} &= Q_{m-1} + p_m = Q_{m-1} - \sum_{i=m}^{n-1} Q_i \\
 s_{m-2} &= Q_{m-2} \\
 &\vdots \\
 s_1 &= Q_1
 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $s_i$ 는  $i$ 층의 하중,  $Q_i$ 는  $i$ 층의 사하중,  $p_i$ 는  $i-1$ 층의 동바리에 의한  $i$ 층 사하중의 상향 지지력,  $p_{i+1}$ 는  $i$ 층의 동바리에 의한  $i+1$ 층으로부터 내려오는 사하중의 하향 지지력,  $n$ 은 구조물이 타설된 최고층,  $m$ 은 현재의 시공단계에서 동바리가 설치된 가장 저층,  $m-1$ 은 이전 단계에는 동바리가 설치되어 있다가 현 단계에서 제거된 층을 의미한다.

단, 위의 식에서  $p_i$ 는 인장력을 받을 수 없으며, 이것을 모든 조건 ( $m < i \leq n$ )에 대하여 검토하여야 한다. 또한  $m-1$ 층은 이전단계까지는 동바리가 설치되어 있다가 현재단계에서 동바리가 제거된 상태이므로 그 층에서는 윗방향으로의 하중제거(unloading)가 발생된다.

동바리가 설치되어 있는 층들은 무한대의 강성이 가지고 변형이 발생되지 않는다고 가정하였기 때문에 강성을 발휘하며 변형이 발생하는 구

조물 위에 단순히 올려져 있다고 보고 구조물은  $1 \sim m$  층까지 만을 해석하며 각 층의 최종적인 하중량  $S_i$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 S_m &= \sum_{i=m}^n Q_i \\
 S_{m-1} &= Q_{m-1} - \sum_{i=m}^{n-1} Q_i \\
 S_{m-2} &= Q_{m-2} \\
 &\vdots \\
 S_1 &= Q_1
 \end{aligned} \quad (2)$$

## 2.2 시간단계해석(Step-by-step solution)

시공단계를 고려하여 시간에 따른 해석을 수행하기 위하여서는 하중이 어떤 시간에 어떤 부재에 작용 또는 제거되는지를 주어진 임의의 시간 단계에 대하여 구하고 이 값을 접침의 원리를 적용하여 전체적으로 누적하여야 한다.

따라서, 임의의 시간  $t_a$ 에서 새롭게 작용되는 하중량  $\Delta S_i(t_a)$ 은 다음과 같다.

$$\Delta S_i(t_a) = S_i(t_a) - S_i(t_{a-1}) \quad \text{for } i=1,2,\dots,m \quad (3)$$

여기서,  $S_i(t_a)$ 는 시간  $t_a$ 에서  $i$ 층에 작용되는 모든 하중을 의미한다.

현재의 시간단계에서 식(3)과 같은 하중을 사용하여 전체 골조 해석을 수행하며, 해석결과로부터 임의의  $i$ 층에서 발생하는 전체 처짐량  $U_i(t_a)$ 는 다음과 같이 모든 시간단계에서 구한 값의 누적량으로 표시된다.

$$U_i(t_a) = \sum_{k=1}^a u_i(t_k) \quad \text{for } i=1,2,\dots,m \quad (4)$$

여기서,  $u_i(t_k)$ 는 시간  $t_k$ 에서 작용되는 하중에 의한  $i$ 층에서의 처짐을 의미한다.

## 3. 유한요소 해법

### 3.1 강성행렬의 구성

축력과 휨을 동시에 받는 콘크리트 요소의 경우 기존의 강성행렬 유도방식은 축력에 의한 ( $2 \times 2$ ) 행렬과 휨에 의한 ( $4 \times 4$ ) 행렬을 단순히 각기의 자유도에 따라 조합하는 방식을 사용하므로써 ( $6 \times 6$ ) 행렬을 구성하고 있다<sup>(7)</sup>. 그러나 실제

로 철근콘크리트 부재에서는 압축부와 인장부의 상이한 철근배근 및 인장부 콘크리트의 균열 등으로 인한 거동 차이 때문에 선요소를 사용할 경우에는 축력과 휨이 상호 관련이 있게 된다. 따라서 본 논문에서는 처음의 유도단계에서부터 6 자유도를 고려한 상태로 유도된 식(5)와 같은 강성행렬<sup>(8)</sup>을 사용한다.

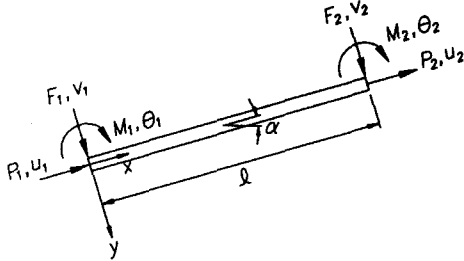


Fig. 3 Numbering of member end forces and displacements

$$[K] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & -\frac{ER}{l} & -\frac{EA}{l} & 0 & \frac{ER}{l} \\ & \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & 0 & -\frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ & & \frac{4EI}{l} & \frac{ER}{l} & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} \\ & & & \frac{EA}{l} & 0 & \frac{ER}{l} \\ \text{sym.} & & & & \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ & & & & & \frac{4EI}{l} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서,  $EA = E_c A_c + \sum_1^n E_s A_s$ ,  
 $ER = E_c R_c + \sum_1^n E_s A_s y_i$ ,  
 $EI = E_c I_c + \sum_1^n E_s A_s y_i^2$

또한,  $A_c, R_c, I_c$ 는 각기 콘크리트 단면의 단면적, 단면1차모멘트, 단면2차모멘트를 의미한다.

한편 시간단계의 고려에 따른 유한요소해법에 의한 크리이프와 건조수축에 대한 비탄성변형률의 계산은 각기 식(6)과 식(7)을 사용하였다.<sup>(9)</sup>

$$\begin{bmatrix} EA(t) & -ER(t) \\ -ER(t) & EI(t) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \epsilon(t) \\ \Delta k(t) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} E_c(t) A_c & -E_c(t) R_c \\ -E_c(t) R_c & E_c(t) I_c \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_e \phi(t, t_p) \\ k_e \phi(t, t_p) \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} EA(t) & -ER(t) \\ -ER(t) & EI(t) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \epsilon(t) \\ \Delta k(t) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} E_c(t) A_c \\ -E_c(t) R_c \end{bmatrix} \epsilon_{sh}(t, t_o) \phi(t, t_o) \quad (7)$$

여기서,  $\Delta \epsilon(t), \Delta k(t)$ 는 임의의 시간  $t$ 에서의

변형도와 곡률,  $t_p$ 는 하중의 재하시간,  $t_o$ 는 건조수축 시작시간,  $\epsilon_e, k_e$ 는 시간  $t_p$ 에서 탄성하중에 의한 단면 중앙에서의 변형도와 곡률,  $\epsilon_{sh}(t, t_o)$ 는 건조수축으로 인한 변형도,  $\phi$ 는 크리이프 계수를 의미한다.

### 3.2 단면력의 산정

선요소를 사용하여 골조해석을 수행하는 경우 균열단면을 고려하기 위하여 일반적으로 층상화 방법(layered method)을 사용하고 있다. 그러나 층상화 방법은 단면을 여러 개의 층으로 구분하기 때문에 매우 많은 양의 메모리가 필요하며 해석수행시간도 오래 걸리고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 사용되는 철근만을 층(layer)으로 고려하며 콘크리트 단면에 대해서는 균열 발생을 고려한 단면력을 직접 적용하는 방법을 사용한다. Fig. 4와 같이 임의의 시간  $t$ 에서의 최종적인 변형도와 곡률을 계산하고 이 값이 식(8)의 인장변형도<sup>(10)</sup>  $\epsilon_{cr}(t)$ 를 초과하는지를 검토하여 균열이 발생되지 않은 단면의 높이  $h'$ 를 계산한다.

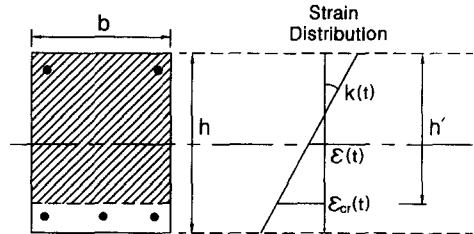


Fig. 4 Calculation of sectional properties

$$\epsilon_{cr}(t) = \frac{2.0\sqrt{\sigma_{ck}(t)}}{E_c(t)} \quad (8)$$

계산된  $h'$ 으로부터 균열을 고려한 단면력을 다음과 같이 계산하여 이들 값으로 식(5)의 강성행렬을 재구성하게 된다.

$$\begin{aligned} A_c &= bh' \\ R_c &= bh' y' \\ I_c &= \frac{bh'^3}{12} + bh' y'^2 \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,  $y'$ 은 단면 중앙에서 균열단면적  $bh'$ 의 중심까지의 거리를 의미한다.

#### 4. 예제 해석

개발된 프로그램의 효율성을 입증하기 위하여 첫 번째로 가상적인 시공단계를 고려하여 해석결과를 분석하였으며, 두 번째는 실제 구조물의 실측치를 사용하여 해석결과의 정확성을 평가하였다. 또한 프로그램에 의한 해석시 장기변형을 고려하기 위한 모델은 ACI 모델식(1978)<sup>(11)</sup>, CEB-FIP 모델식(1990)<sup>(12)</sup>, B3 모델식(1995)<sup>(13,14,15)</sup>의 3가지 모델식에 의한 결과를 각기 비교하였다.

##### 4.1 해석결과의 분석

좌측기둥과 우측기둥의 철근비를 다르게 하여 총고 4 m, 기둥간 간격 8 m의 1-bay 5-story 구조물에 대한 예제를 해석하였으며, 재료성질 및 단면성질은 Table 1 및 Table 2에 나타난 것과 같다. 시공단계는 Fig. 5와 같이 선택하였으며, 자중만을 고려하여 크리프와 건조수축이 모두 포함된 상태에서의 해석결과 및 모델식 종류에 따른 해석결과의 차이에 대한 분석을 실시하였다.

2층 바닥보의 중앙부 및 좌측 단부에서의 처짐량을 살펴보면 Fig. 6과 같으며, 그림에서 알 수 있듯이 좌측 단부의 처짐은 하중(자중)이 계속 증가되고 있기 때문에 시공단계가 진전됨에 따라 계속적으로 증가되는 추세에 있으나, 중앙부의 처짐은 2층의 동바리 제거전까지는 증가하다가 2층 동바리가 제거되는 70일 이후에는 하중의 제하(unloading)가 발생하므로 처짐량이 크게 감소되는 것을 볼 수 있다. 이후에는 시공과정에 따라 처짐량의 증가 혹은 감소가 반복되고 있으나 그 크기는 상대적으로 작게 나타나고 있다. 처짐량은 일반적인 탄성계수를 그대로 사용하는 ACI 모델을 적용한 경우가 가장 크게 나타나며, 탄성계수를 가장 크게 사용하는 B3 모델을 적용한 경우의 처짐량이 가장 적게 나타나고 있다.

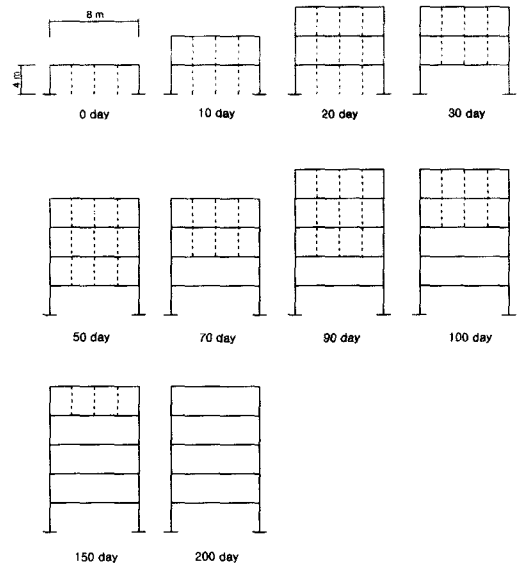


Fig. 5 Construction sequence of example

Table 2 Sectional properties of example

	Area (W×H) (cm)	Reinforcement (cm <sup>2</sup> )	
		Comp.	Tens.
Beam	30×40	10.0	20.0
Column (left)	50×50	50.0	50.0
Column (right)	50×50	10.0	10.0

2층 보의 시공단계에 따른 우측단부와 중앙부 모멘트 변화를 살펴보면 Fig. 7과 같다. 3층까지 타설된 후 1층의 동바리가 제거된 상태인 30일에서는 자중으로 인한 탄성 모멘트가 발생하며, 2층의 동바리가 제거된 70일에서는 2층에서도 강성을 발휘하여 상부의 하중(자중)을 직접 저항하기 때문에 2층 보의 저항 모멘트는 급격히 감소하게 된다. 이후의 5층 타설이나 3층에서부터의 동바리 제거시에는 2층에서는 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 한편 시간에 따른 모멘트의 증감 경향이 모델식에 따라 다르게 나타나는

Table 1 Material properties of example

Compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Cement type	Curing condition	Curing time (day)	Relative humidity (%)	Slump (cm)	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Air (%)	s/a (%)	w/c (%)	a/c (%)	Temp. (°C)
280	I	moisture	30	60	10	400	5	40.0	30	280.0	25

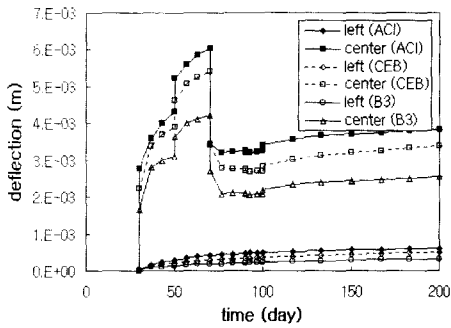


Fig. 6 Deflection of 2F beam

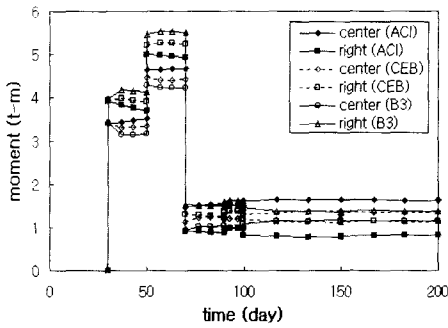


Fig. 7 Moment of 2F beam

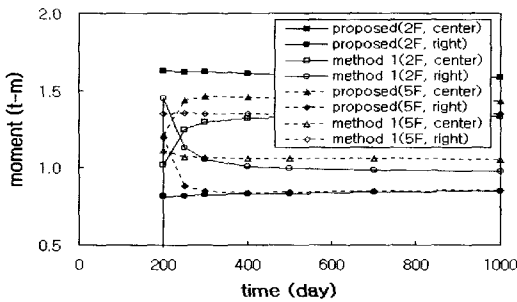


Fig. 8 Comparison with construction sequence

때, 이는 본 예제의 경우 크리이프와 건조수축으로 인한 모멘트의 방향이 반대로 나타나는데 주어진 재료조건하에서 ACI 모델식은 건조수축의 영향을 크게 산정하고, B3 모델식은 크리이프의 영향을 크게 산정하고 있기 때문이다.

시공단계를 무시하고 전체 구조물이 동시에 타설되었다고 가정하여 해석(method 1)한 경우에

대하여 2층 및 5층 바닥보의 모멘트를 비교하여 보면 Fig. 8과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 2층보의 경우 시공단계를 고려한 결과는 중앙점 및 우측 단부의 모멘트가 약간의 변화를 보이고 있는데 반해 시공단계를 무시한 결과는 탄성 모멘트 값도 차이를 보이고 시간에 따라서도 약 30% 정도로 증감의 폭이 큰 것으로 나타났다. 반대로 5층의 경우에는 시공단계를 고려한 모멘트가 시간에 따라 약 30% 정도 변화하는데 비해 시공단계를 무시한 결과는 탄성 모멘트도 다르게 시간에 따라서도 거의 비슷한 값을 가지는 것으로 나타났다. 따라서 시공단계를 고려하지 않고 탄성 및 장기해석을 수행하는 경우에는 실제적인 거동과는 많은 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

#### 4.2 Amatapula 건물 실측치(16)와의 비교

H건설에 의하여 실제 시공된 철근콘크리트 고층빌딩인 Amatapula 건물(51층)에 대한 해석을 실시하여 기존의 해석방법 및 실제 실측결과와의 차이에 대한 분석을 실시하였다. 여기서 기존의 해석방법이란 골조 구조물로서의 거동을 그대로 고려하는 것이 아니라 탄성해석으로부터 각 부재에 작용되는 하중을 구하여 기동 한 개만을 독립적으로 해석하는 간편해석을 의미한다.

Amatapula 건물은 중앙에 엘리베이터용 콘크리트 벽이 있으며, 각 기둥 사이의 간격은 5m이고 1층의 층고는 5.45 m, 2층 이상은 3m이며, 단면도는 Fig. 9와 같다.

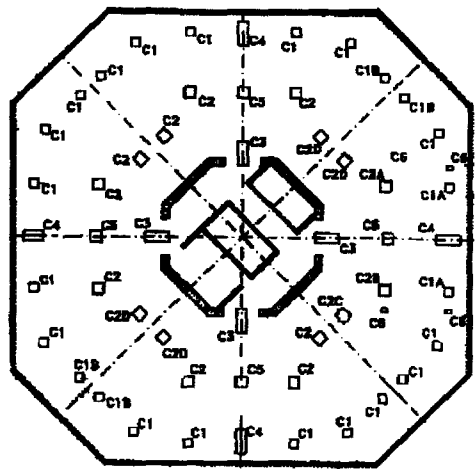


Fig. 9 Plan of building Amatapula

그림의 단면도에서 수평방향의 일점쇄선을 기준으로 한 골조해석을 실시하였다. 각 층별 기둥의 성질은 Fig. 10과 같으며, 그림에서 기둥에 적혀 있는 숫자는 단면 번호를 의미한다. 단면 및 재료의 성질은 Table 3 및 Table 4에 나타난 바와 같으며, 자세한 시공과정이 기록되어 있지 않아 매층당 5일 간격으로 연속적으로 타설되는 것으로 가정하였다.

매 층당 5일 간격으로 타설하는 것으로 가정하여 51층까지 시공이 완료되는데 255일이 소요되며, 구조물에 대한 실제 계측 시점은 최초 타설시작후 500일 이후이다. 따라서 500일이 경과하였을 경우의 각 기둥(C3, C4, C5)에서의 크리이프

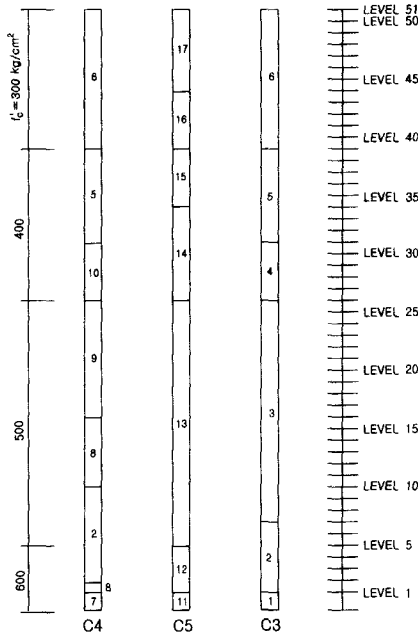


Fig. 10 Numbering of sectional properties for columns

Table 4 Sectional properties of building Amatapula

Sec. type	Area (W×H) (cm)	Reinforcement	Sec. type	Area (W×H) (cm)	Reinforcement
1	80×200	20D36	10	60×150	12D36
2	60×200	16D36	11	90×90	8D36
3	60×200	12D36	12	90×60	8D36
4	60×150	20D36	13	90×60	6D36
5	60×150	10D36	14	70×50	8D36
6	60×150	6D36+4D10	15	70×50	6D36
7	80×200	24D36	16	70×50	4D32+2D10
8	60×200	20D36	17	50×50	4D29
9	60×200	24D36	Slab	435×17	42.2 cm <sup>2</sup> 42.2 cm <sup>2</sup>

와 건조수축을 포함한 층별 전체 처짐량을 비교하면 Fig. 11~Fig. 13과 같다. 여기서 실측치가 1층 기둥의 처짐량을 원점으로 취하였기 때문에 계산치도 각 층별 처짐량에 1층의 처짐량을 빼준 값으로 취하였다.

그림에서 보면 외측부 기둥인 C4에서의 처짐량은 본 프로그램의 결과와 간편해석의 결과가 큰 차이 없이 비슷하게 나타나고 있다. 실측 처짐량과의 비교에서도 외기온도, 상대습도 등의 조건이 단순화되어 해석시 고려된 것을 감안하면 해석결과는 실측치와 유사한 것으로 볼 수 있다.

내측부 기둥인 C5 및 C3의 경우를 살펴보면, 기둥 C5에서는 본 프로그램의 해석결과가 간편해석의 결과보다 작게 나타나고 있으며, 기둥 C3에서는 반대로 본 프로그램의 해석결과가 간편해석의 결과보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 본 프로그램에 의한 골조해석에서는 기둥 C5에서의 비탄성하중이 기둥 C3으로 전달되는 현상이 발생하여 이와 같은 현상을 보이고, 간편

Table 3 Material properties of building Amatapula

Compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Cement type	Curing condition	Curing time (day)	Relative humidity (%)	Slump (cm)	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Air (%)	s/a (%)	w/c (%)	a/c (%)	Temp. (°C)
600	I	moisture	30	85	12	580	5	58.3	28	281.0	25
500	I	moisture	30	85	12	540	5	62.0	31	300.0	25
400	I	moisture	30	85	12	500	8	55.3	36	320.0	25
300	I	moisture	30	85	12	424	9	60.2	42	389.2	25
350 (Slab)	I	moisture	30	85	12	476	8	57.3	38	340.3	25

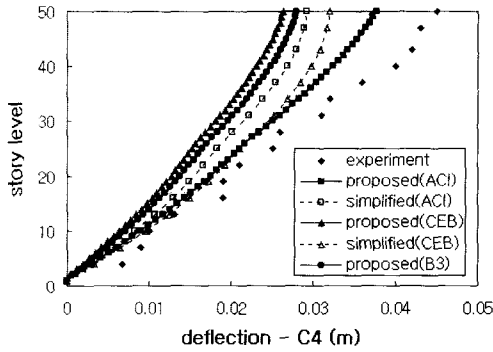


Fig. 11 Column shortening of column C4

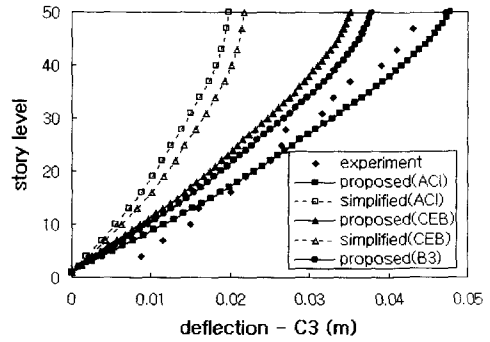


Fig. 13 Column shortening of column C3

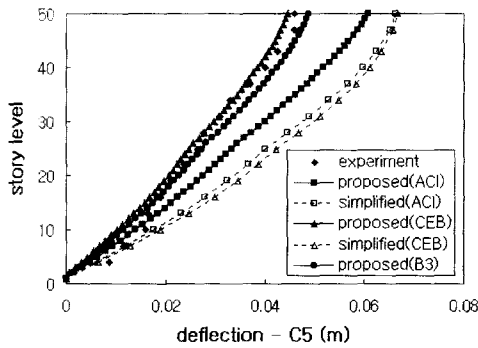


Fig. 12 Column shortening of column C5

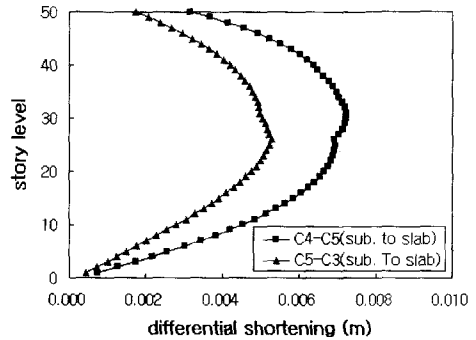


Fig. 14 Differential column shortening of C4-C5 and C5-C3

해석의 경우에는 슬래브를 통한 비탄성하중의 전달이 고려되지 않기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 Fig. 12 및 Fig. 13의 경우에서 실측 처짐량과 비교하여 보면 본 프로그램의 해석결과는 실측량과 비교적 일치하는 것으로 나타나는 것에 반하여 간편해석의 결과는 실측치와 상당한 차이를 보이고 있다.

타설후 500일에서의 각 인접기둥에 의한 부등축소량을 ACI 모델식에 의하여 살펴보면 Fig. 14와 같으며, 외부기둥에 인접한 경우(C4-C5)의 부등축소량이 내부기둥간에 인접된 경우(C5-C3)보다 약 30% 정도 크게 나타나고 있다. 또한 최대 부등축소량을 보이는 장소는 각각 30층과 26층으로 전체 건물의 중앙층 부근인 것으로 나타나고 있다.

## 5. 결론

시공단계를 고려한 철근 콘크리트 고층건물 기

둥의 부등축소량 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 철근콘크리트 고층건물의 시공단계를 고려하여 기둥의 부등축소량을 예측하는데 있어서 슬래브를 통한 양쪽 기둥으로의 비탄성하중 전달현상을 고려하기 위하여 2차원 골조해석을 수행하는 프로그램을 개발하였다.

2) 시공단계를 수치화하는데 있어 동바리 설치(shore)와 재설치(reshore)를 통합하여 고려하였으며, 각 층별 자중의 크기 및 거푸집 존치시간, 동바리 설치시간, 동바리가 설치된 층수 및 타설시간, 재료특성을 변수로 취급하여 임의의 상태에 대하여 적용할 수 있도록 일반화하였다.

3) 시간에 따른 해석을 수행함에 있어 전체 단면을 층으로 나누는 층상화 방법을 사용하지 않고 철근만을 층으로 구분하고 콘크리트 단면은 단면 중심에서의 변형도와 곡률을 이용하여 균열을 고려한 단면의 성질을 직접 사용하는 방식을 적용하여 정밀도를 저하시키지 않는 상태에서 해석시간을 단축하였으며, 축력과 휨의 상호작용에



의한 강성을 적용시켜 철근콘크리트 구조물의 특성을 보다 정확하게 고려하여 주었다.

4) 개발된 프로그램의 해석결과를 실제 구조물의 실측치와 비교하여 그 효율성을 검증하였다. 실측치와 비교해본 결과 본 프로그램의 해석결과는 기둥을 독립적으로 해석하는 간편해석에 의한 결과에 비하여 구조물의 실제거동에 보다 근접한 결과를 보이는 것으로 나타났다.

### 참고문헌

1. Ghosh, M.F., and Iyengar, H., "Column Shortening in Tall Structures-Prediction and Compensation," Engineering Bulletin No. EB108D, Portland Cement Association, 1987, 34pp.
2. Elimerie, M.M., and Joglekar, M.R., "Influence of Column Shortening in Reinforced Concrete and Composite Highrise Structures," ACI SP-117, 1989, pp.55~86.
3. 송화철, 유은중, 정석창, 주영규, 안재현, 박철림, "비탄성효과를 고려한 Plaza Rakyat 오피스동의 기둥부등축소량", 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제9권, 제2호, 1997, pp.475~480.
4. Zapata, M.A., and Bazant, Z.P., "Creep Deflections in Slab Buildings and Forces in Shores during Construction," ACI Journal, Vol. 83, No. 5, 1986, pp.719~726.
5. Grundy, P., and Kabaila, A., "Construction Loads on Slabs with Shored Formwork in Multistory Buildings," ACI Journal, Vol. 60, No. 12, 1963, pp.1729~1738.
6. Bazant, Z.P., "Theory of Creep and Shrinkage in Concrete Structures: A Precip of Recent Developments," Mechanics Today, Vol. 2, Pergamon Press, Elmsford, 1975, 93 pp.
7. Weaver, W., and Johnston, P.R., "Finite Elements for Structural Analysis," Prentice-Hall, New Jersey, 1984, 403pp.
8. Kim, J.K., and Lee, T.G., "Failure Behavior of Reinforced Concrete Frames by the Combined Layered and Nonlayered Method," Computers and Structures, Vol. 48, No. 4, 1993, pp.819~825.
9. 이태규, "균열단면을 고려한 철근콘크리트 구조물의 시간단계해석", 대한토목학회 논문집, 1998.
10. 건설교통부, "콘크리트 표준 시방서", 1996.
11. ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures," ACI Manual of Concrete Practice(ACI 209R-82), 1990.
12. "CEB-FIP Model Code," Comite Euro International du Beton, 1991.
13. Bazant, Z.P., and Murphy, W.P., "Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures-Model B3," Materials and Structures, Vol. 28, 1995, pp.357~365.
14. Bazant, Z.P., and Baweja, S., "Justification and Refinements of Model B3 for Concrete Creep and Shrinkage : 1. Statistics and Sensitivity," Materials and Structures, Vol. 28, 1995, pp.415~430.
15. Bazant, Z.P., and Baweja, S., "Justification and Refinements of Model B3 for Concrete Creep and Shrinkage : 2. Updating and Theoretical Basis," Materials and Structures, Vol. 28, 1995, pp.488~495.
16. 현대건설(주), "고층건물 기둥의 부등축소량 예측 및 모니터링 시스템 구축에 관한 연구", 보고서 No. 96STR06, 현대건설(주) 기술연구소, 1997년 12월, 149pp.

### 요 약

본 연구에서는 철근콘크리트 고층건물의 시공단계를 고려하여 기둥의 부등축소량을 예측하는데 있어서 슬래브를 통한 양쪽 기둥으로의 비탄성하중 전달현상을 고려하기 위하여 2차원 골조해석을 수행하는 프로그램을 개발하였다. 또한 시간에 따른 해석을 수행함에 있어 단면 중심에서의 변형도와 곡률을 이용하여 균열을 고려한 단면의 성질을 직접 사용하는 방식을 사용하여 정밀도를 저하시키지 않는 상태에서 해석시간을 단축하였으며, 축력과 휨의 상호작용에 의한 강성을 적용시켜 철근콘크리트 구조물의 특성을 보다 정확하게 고려하여 주었다. 해석모델로는 ACI 209, CEB-FIP 1990과 B3 모델을 사용하였다. 이렇게 개발된 프로그램의 해석결과를 기존의 간편해석에 의한 결과 및 실제 구조물의 실측치와 비교하여 그 효율성을 입증하였다.

(접수일자 : 1998. 5. 7)