

철근콘크리트 고층건물 기둥의 부등축소량 해석 및 보정을 위한 시스템 개발

김선영^{1)*} · 김진근²⁾ · 김원중³⁾

¹⁾한국과학기술원 응용과학연구소 ²⁾한국과학기술원 건설 및 환경공학과 ³⁾순천대학교 컴퓨터학과

(2001년 9월 3일 원고접수, 2002년 3월 2일 심사완료)

System Development for Analysis and Compensation of Column Shortening of Reinforced Concrete Tall Buildings

Sun-Young Kim^{1)*}, Jin-Keun Kim²⁾, and Won-Jung Kim³⁾

^{1,2)} Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST, Daejeon, 305-701, Korea

³⁾ Dept. of Computer Science, Sunchon National University, Sunchon, 540-742, Korea

(Received September 3, 2001, Accepted March 2, 2002)

ABSTRACT

Recently, construction of reinforced concrete tall buildings is widely increased according to the improvement of material quality and design technology. Therefore, differential shortenings of columns due to elastic, creep, and shrinkage have been an important issue. But it has been neglected to predict the inelastic behavior of RC structures even though those deformations make a serious problem on the partition wall, external cladding, duct, etc. In this paper, analysis system for prediction and compensation of the differential column shortenings considering time-dependent deformations and construction sequence is developed using the objected-oriented technique. Developed analysis system considers the construction sequence, especially time-dependent deformation in early days, and is composed of input module, database module, database store module, analysis module, and analysis result generation module. Graphic user interface(GUI) is supported for user's convenience. After performing the analysis, the output results like deflections and member forces according to the time can be observed in the generation module using the graphic diagram, table, and chart supported by the integrated environment.

Keywords: tall buildings, differential shortening, analysis system, construction sequence, database

1. 서 론

최근 콘크리트 품질의 향상과 설계기법의 발달로 철근 콘크리트 고층 건물의 시공이 활발하게 진행되고 있다. 그러나 철골구조물과 달리 콘크리트 구조물은 사용기간 동안 탄성변형 뿐만 아니라 크리프 및 건조수축과 같은 시간의존적 비탄성 변형이 발생한다. 이러한 비탄성적 장기변형은 장기적으로 발생하여 기둥의 부등축소의 원인이 되어 구조물의 응력에 영향을 주게 된다. 특히 보와 슬래브의 단부에 추가적인 모멘트를 유발할 수 있으며 이로 인해 발생한 응력은 구조적인 문제가 될 수 있다. 또한 구조물의 사용성문제로 건물 외부의 커튼월, 수직배관 덕트, 슬래브의 경사, 칸막이벽의 균열 등과 같은 문제를 초래할 수 있다. 따라서 이러한 부등축소량을 정확하게 예측하고 그 영향을 시공 시 보정하는 것이 필요하다^{1,2)}.

고층구조물에서 발생할 수 있는 이와 같은 기둥의 부등

축소 영향을 대부분의 설계와 시공시 무시하는 경향이 있다. 그 이유로 첫째, 대부분의 실무자들은 구조물의 해석 시 시공단계를 고려하지 않기 때문이다. 즉, 완성된 골조에 하중을 동시에 재하하는 해석방법으로는 기둥의 부등축소량을 정확하게 평가할 수 없다. 둘째, 철근콘크리트 고층 건물에서 부등처짐은 탄성축소, 건조수축, 그리고 크리프 등에 의해 발생되지만 대개 탄성만을 고려하고 시간의존적 비탄성변형을 고려하지 않기 때문이다. 그러나 초기재령에서 발생한 장기변형은 탄성변형보다 훨씬 더 커져서 구조물에 심각한 문제를 일으킬 수 있다³⁾.

현재, 장기변형을 고려한 구조물의 부등축소 해석방법으로 골조를 구성하는 기둥을 독립부재로 취급하여 이들의 탄성 및 비탄성 응력해석을 수행한다. 이 때, 콘크리트의 시간의존적 변형특성을 고려하기 위한 방법으로 유효탄성계수법(effective modulus method), 수정유효탄성계수법(age-adjusted effective modulus method), 크리프율법(rate of creep method), 개선된 Dischinger법(improved dischinger method), 그리고 Step-by-Step Method등이 사용된다. 그러나 이와 같은 약산적인 방법은 실제의 변형을 제대로

* Corresponding author

Tel : 062-530-0250 Fax : 062-530-0250

E-mail : suny1190@hanmail.net

평가할 수 없고, 철근콘크리트 구조물의 일반적인 시공단계를 고려할 수 없다. 따라서 최근에 동바리의 설치 및 제거를 고려하여 시공단계를 일부 반영할 수 있는 2차원 골조해석프로그램이 개발되었다⁴⁵⁾. 그러나 이들 프로그램은 시공단계 중에서 reshoring을 고려함이 없이 거푸집 제거 및 shoring을 한 단계로 처리하기 때문에 동바리 제거 전의 초기재령에서 발생하는 변형을 반영하지 못한다. 그리고 시공 중에 구조물에 작용하는 추가하중 뿐만 아니라 실제 건물을 모델링하는 데에 불편한 점이 있다. 또한 Kim의 방법⁶⁾은 평면골조의 강성행렬 구성시, 축력에 의한 곡률변화를 반영하지 못한다. 그리고 시공단계별로 수행하는 해석시간 및 메모리의 제어에 문제가 있다.

본 연구에서는 시공 중에 구조물의 기하학적 모델에 영향을 줄 수 있는 거푸집, 동바리와 같은 가설공사의 영향을 고려하고 시간에 따른 콘크리트 기둥과 동바리의 축력 재분배 영향을 반영하는 해석 시스템을 제시한다. 그리고 개발된 해석 시스템에서의 기둥축소량의 평가와 보정방법을 제시한다.

2. 장기변형을 고려한 해석법 개발

2.1 개발시스템 구성

개발한 시스템은 철근콘크리트 고층 구조물에서 장기거

동을 고려한 시공단계 해석프로그램이다. 시스템 구조는 Fig. 1과 같이 Input module, Data base module, DB Store module, Analysis module, 그리고 Analysis result Generation module로 구성되어 있다. 시스템은 Pentium III 700 Mhz, Windows 2000환경에서 Visual basic 6.0 프로그램 통합 개발 도구를 사용하였다. 데이터베이스는 사용자에게 쉽도록 Microsoft사의 Access 2000을 사용하였으며, 시스템의 가장 핵심부분인 Analysis module은 효율적인 계산수행을 위하여 객체지향언어인 C++로 구현하였다.

Fig. 2와 같은 Input Module에서는 그래픽 사용자 인터페이스(graphic user interface, GUI)를 제공하여 사용자가 손쉽게 데이터의 입력, 수정, 검색 등을 수행할 수 있다.

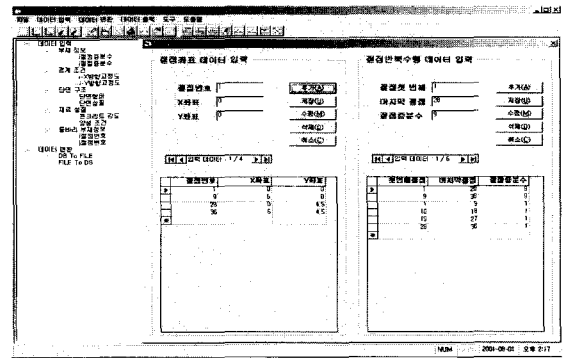


Fig. 3 Input window frame

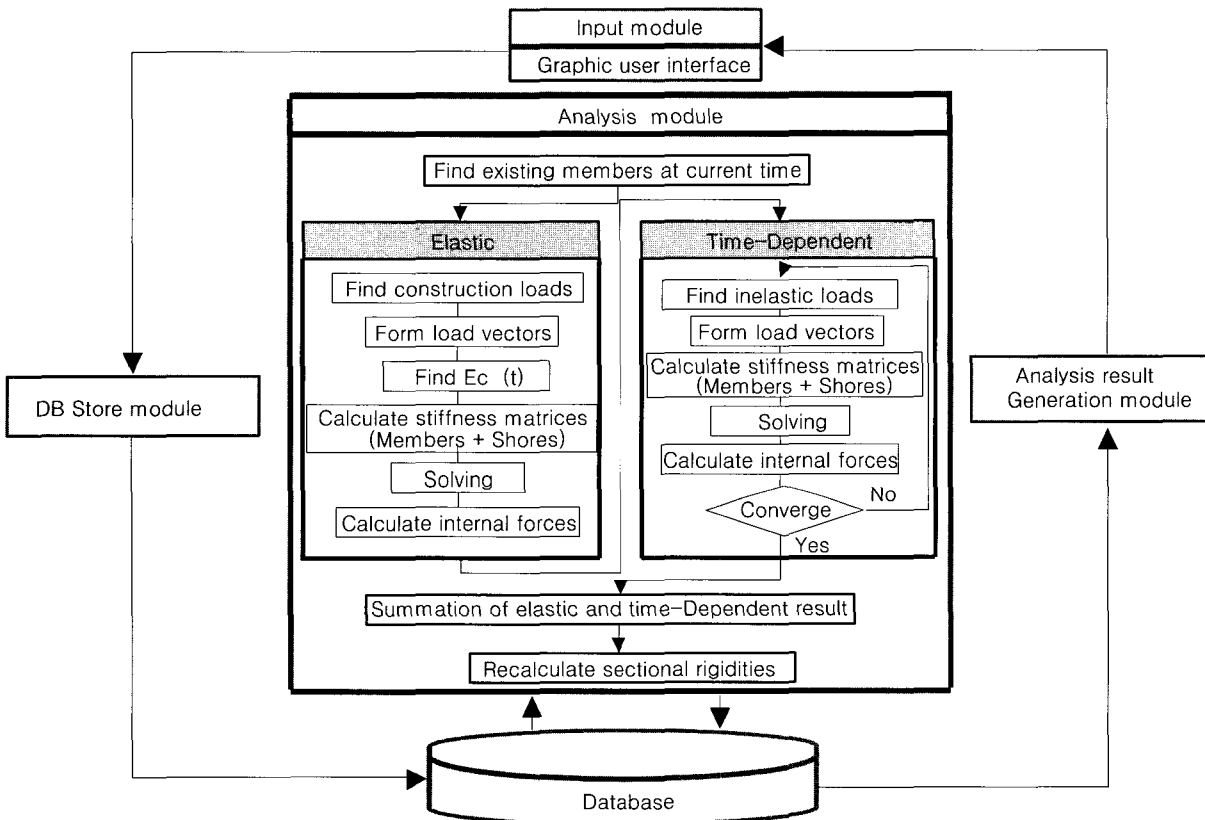


Fig. 1 Structure of developed system

사용자는 메뉴 도구바(tool bar), 계층적 목록(hierarchical category)을 이용하여 데이터를 입력할 수 있으며, 숙련된 사용자는 테이블(table) 형식의 입력창을 사용하여 빠른 시간에 데이터의 입력 및 수정 작업을 수행할 수 있다. 또한 입력데이터 파일이 존재하는 경우는 입력파일을 호출하여 직접 접근(direct access)하여 해석을 수행할 수 있다.

Database와 Database store module은 사용자가 데이터 입력을 완성하였을 때 데이터의 효율적인 저장과 관리를 위해 데이터를 데이터베이스로 변환하는 기능을 수행한다. 즉, Analysis module에서 사용할 Data file을 생성하고 Analysis module에서 수행된 출력 결과를 데이터베이스에서 관리하며 해석결과를 사용자가 접근할 수 있도록 일정한 양식을 갖춘 파일로 생성된다. 이 파일을 이용하여 타 프로그램과의 호환을 가능하게 하며 이를 통하여 전체적인 시스템 통합을 구현한다. 이와 같은 데이터베이스 시스템을 구축함으로써 모든 자료를 효과적으로 처리할 수 있으며 모든 입력 데이터의 직접적인 수정, 보완 작업을 용이하게 할 뿐만 아니라 공사진행의 단계별 반복해석을 보다 더 쉽게 한다. 이로써 모든 기능들이 유기적으로 연결되어 있기 때문에 시스템이 효과적으로 운영된다. 전체 Database schema 구조는 Fig. 3과 같다.

Analysis module은 시스템의 가장 핵심적인 부분으로 데이터베이스에 저장된 데이터를 이용하여 해석을 수행한다. 장기변형 해석법으로는 시간간격을 충분히 나눌 경우 가장 정확한 방법으로 알려진 Step-by-Step 방법을 사용한다. 데이터베이스에 저장된 파일(file)로부터 해석에 필요한 시공단계별 정보 즉, 현재 시공단계에서의 해석할 구조의 형태(절점과 부재)와 하중조건 등을 찾는다. 그리고 해석은 Fig. 1에서 알 수 있듯이 탄성해석과 시간의존적 비탄성 해석으로 나누어 수행한 뒤 전체적으로 합한다. 한편, 비탄성 해석에서는 임의의 시간에서 발생하는 콘크리트의 변형과 곡률(또는 비탄성 하중)을 곧바로 결정할 수 없기 때문에 식(1)과 같이 수렴(convergence)을 할 때까지 반복 수행한다. 수렴 후, 계산된 탄성해석결과와 비탄성 해석결과를 합해 다시 부재력을 계산하고 해석을 완료한다.

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta_{j,i}^{(n)} - \Delta_{j,i}^{(p)})^2}{\sum_{i=1}^N (\Delta_{j,i}^{(n)} - \Delta_{j,i-1})^2}} \leq tor \quad (1)$$

여기서, i = incremental step, N = 절점수, j = 절점번호, (n) = 현 단계, (p) = 이전 단계, $tor = 0.01$ (tolerance)

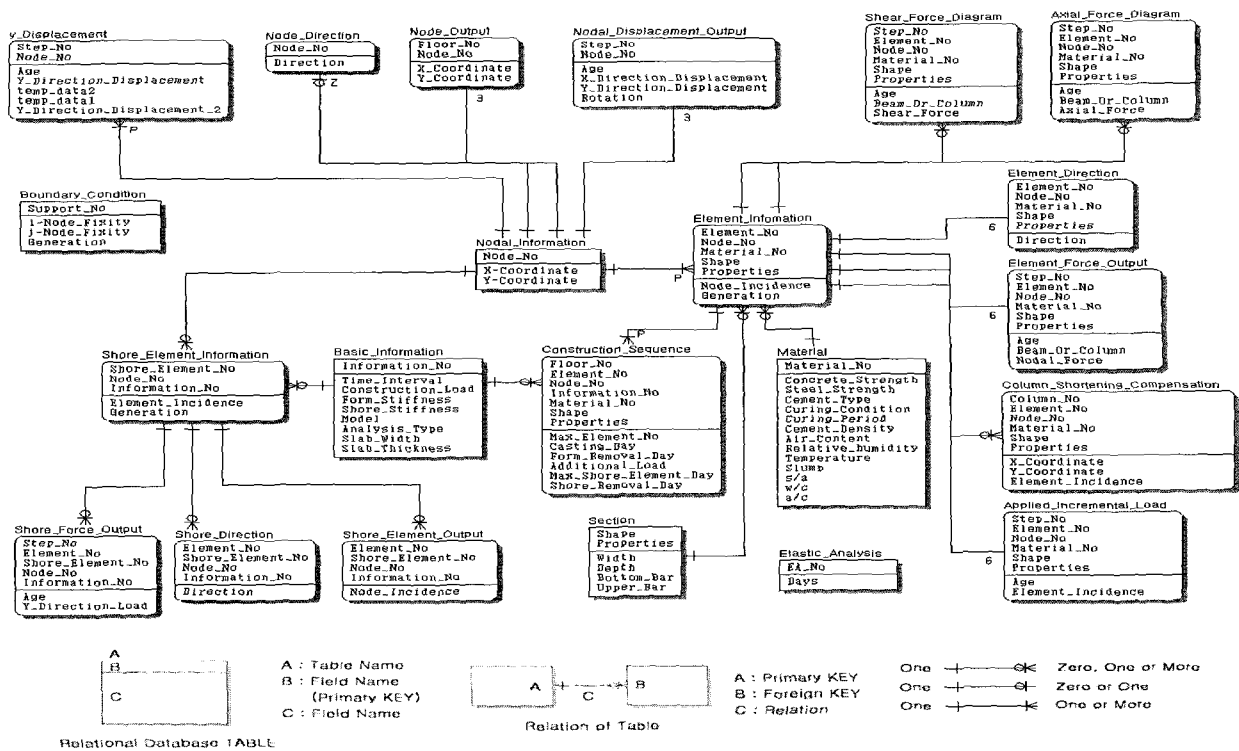


Fig. 3 Database schema structure of system

Analysis result generation module에서는 수행된 해석 결과를 사용자에게 출력하는 기능을 수행한다. 시공단계 별, 전체 재령별로 처짐, 부재력 등을 제공한다. 또한 고층 구조물에서의 시공에 필요한 기둥축소량 보정량을 계산하여 제공한다.

2.2 시공단계를 고려한 해석⁷⁾

철근콘크리트 골조 구조물의 일반적인 시공단계는 Fig. 4와 같이 표현할 수 있다. Stage I은 거푸집과 동바리를 가설한 후 콘크리트를 타설하는 시점이며, Stage II는 거푸집 제거 및 reshoring을 나타낸다. 이때 수직부재의 거푸집과 reshoring의 시간적 차이가 있을 수 있으나 대체적으로 짧은 시간의 차이이므로 이는 무시하기로 한다. Stage III는 동바리를 완전히 제거한 단계이며, Stage IV는 추가적인 외부하중이 구조물에 작용하는 경우이다.

대부분의 기존 연구에서는 거푸집과 동바리를 하나의 단계로 처리하였기 때문에 거푸집 제거 후의 reshoring은 무시하였다. 즉, Fig. 4에서 Stage II를 고려하지 아니하였고 Stage I에서 Stage III로 바로 진행된다고 가정하였는데, 이는 비록 거푸집이 제거되었다고 하더라도 동바리를 제거하기 전까지 모든 하중은 동바리가 저항하는 결과가 되어 실제 거동과는 크게 다르게 된다.

따라서 본 연구에서는 기둥 거푸집의 제거와 shoring 및 reshoring을 각각 별도로 고려하여 Fig. 4의 일반적인 시공단계를 모두 고려할 수 있도록 하였다. 시공단계의 고려와 시간에 따른 해석이 가능하기 위해서는 하중이 어떤 시점에 어떤 부재에 작용 또는 제거되는지를 주어진 임의의 시간단계에 대하여 구하고 이 값을 중첩의 원리를 적용하여 전체적으로 누적하여야 한다.

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

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

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

현재의 시간단계에서 식(2)와 같은 하중 식을 이용하여 전체 골조 해석을 수행하며, 해석결과로부터 임의의 i 층에서 발생하는 전체 처짐량 $U_i(t_a)$ 는 다음과 같이 모든 시간단계에서 구한 값의 누적량으로 표시된다.

$$U_i(t_a) = \sum_{k=1}^a u_i(t_k) \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

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

3. 유한요소해석

3.1 강성행렬의 구성

개발된 시스템은 철근콘크리트 골조 구조물에서 거푸집, 동바리와 같은 가설공사의 영향을 고려하여 장기변형을 해석한다. 따라서 Analysis module의 강성행렬은 철근콘크리트의 강성행렬, 동바리의 강성행렬, 그리고 거푸집의 강성행렬로 구성된다.

철근콘크리트 부재에서는 압축부와 인장부의 상이한 철근배근 및 인장부 콘크리트의 균열 등으로 인한 거동 차이 때문에 선요소를 사용할 경우에는 축력과 휨이 상호 관련이 있게 된다. 또한 Fig. 6에서 알 수 있듯이 콘크리트와 같은 비균질, 비등방성 재료는 축방향 하중이 없어도 휨에 의해서 휨변형 뿐만 아니라 축방향 변형이 식(4)와 같이 생긴다⁶⁾. 따라서 본 논문에서 사용된 철근콘크리트 선요소는 Fig. 5와 같이 6개의 자유도를 갖는다. 유도된 강성행렬은 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned} \epsilon(x, y) &= \epsilon_{cen} - y \frac{\partial^2 v(x)}{\partial x^2} \\ &= \frac{\partial u(x)}{\partial x} - y \frac{\partial^2 v(x)}{\partial x^2} \end{aligned} \quad (4)$$

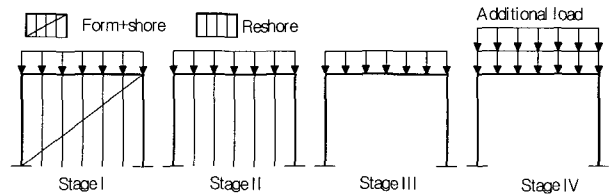


Fig. 4 Typical construction sequence with shore and form

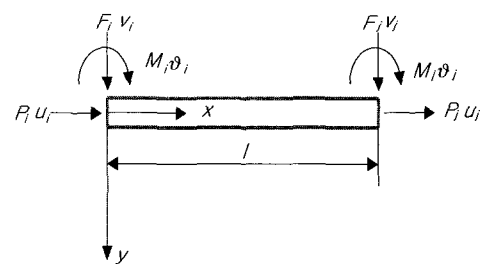


Fig. 5 Degree of freedom of line element

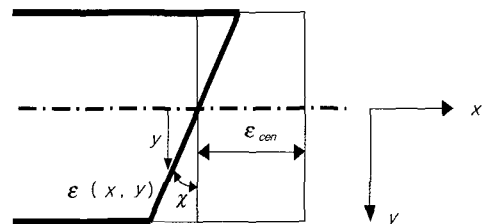


Fig. 6 Flexural strain of reinforced concrete

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

여기서, $EA = E_c A_c + \sum_i E_s A_{s_i}$,

$ER = E_c R_c + \sum_i E_s A_{s_i} y_i$

$EI = E_c I_c + \sum_i E_s A_{s_i} y_i^2$

E_c, A_c, R_c, I_c : 콘크리트 탄성계수, 단면적
단면1차모멘트, 단면2차모멘트

E_s : 철근의 탄성계수

동바리(shore)와 수직 거푸집은 일반시공현장에서 사용하는 steel pipe, 목재 등의 재료로 축력만을 전달하는 등방성 재료로 가정한다.

3.2 비탄성변형⁸⁾

3.2.1 크리프에 의한 비탄성변형

재령 τ 에서 하중을 받을 경우, Fig. 7과 같이 탄성변형 ϵ_e 와 곡률 χ_e 가 발생한다(B). 그리고 작용하중의 변화 없이 크리프에 의한 변형이 발생한다. 크리프계수를 ϕ 라고 하면 단면에 철근이 없고 콘크리트만 있는 단면에서의 변형과 곡률은 $\epsilon_e \phi$ 와 $\chi_e \phi$ 가 된다(C). 그러나 임의의 시간 t 에서 철근을 포함하고 있는 단면에서는 크리프 변형에 대한 철근의 구속효과에 의해서 단면의 중앙에서 발생하는 압축변형률과 곡률은 $\Delta\epsilon(t)$ 와 $\Delta\chi(t)$ 가 된다.

한편, 임의의 시간 t 에서 단면의 도심에서 y_i 만큼 떨어진 위치에서의 크리프에 의한 변형률 $\Delta\epsilon_i(t)$ 는 식(6)과 같고, 철근의 구속에 의한 변형성분 $\epsilon_{c r i}(t)$ 는 식(7)과 같다. 따라서 철근의 영향에 의해 콘크리트에 발생하는 변형률 $\epsilon_c(t)$ 는 C에서 B로 발생한 변형률에서 B에서 D까지 발생한 변형률을 합한다.

$$\Delta\epsilon_i(t) = \Delta\epsilon(t) - \Delta\chi(t)y_i \quad (6)$$

$$\epsilon_{c r i}(t) = -\epsilon_e \phi + \chi_e \phi y_i \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_c(t) &= \epsilon_{c r i}(t) + \Delta\epsilon_i(t) \\ &= (-\epsilon_e \phi + \chi_e \phi y_i) + (\Delta\epsilon(t) - \Delta\chi(t)y_i) \\ &= (\Delta\epsilon(t) - \epsilon_e \phi) - (\Delta\chi(t) - \chi_e \phi)y_i \end{aligned} \quad (8)$$

크리프가 발생하지 않는 철근의 변형률 $\epsilon_s(t)$ 는 B에서 D로 압축 변형으로 식(6)과 같이 형태가 같게 된다.

$$\epsilon_s(t) = \Delta\epsilon(t) - \Delta\chi(t)y_i \quad (9)$$

탄성하중에 의해 탄성 변형이 발생한 후에 작용하중의 변화없이 크리프에 의해 변형이 발생하므로 크리프에 의한 콘크리트 변형과 철근의 변형에 의해 발생하는 축력과 모멘트는 같다. 따라서 힘의 평형조건과 적합조건으로부터 최종적인 비탄성 변형률과 곡률을 구한다. 따라서 콘크리트에 작용하는 축력 $\Delta P_c(t)$ 와 철근에 작용하는 축력 $\Delta P_s(t)$ 는 식(10)과 식(11)이 된다.

$$\begin{aligned} \Delta P_c(t) &= \sum A_{c i} f_{c i} = \sum A_{c i} E_c(t) \epsilon_c(t) \\ &= \sum A_{c i} E_c(t) [(\Delta\epsilon(t) - \epsilon_e \phi) - (\Delta\chi(t) - \chi_e \phi)y_i] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_s(t) &= \sum A_{s i} f_{s i} = \sum A_{s i} E_s(t) \epsilon_s(t) \\ &= \sum A_{s i} E_s [(\Delta\epsilon(t) - \Delta\chi(t)y_i)] \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, $A_{c i}$ = layer, i 콘크리트 단면적

$f_{c i}$ = layer, i 위치에서의 응력

$E_c(t)$ = 재령 t 에서의 콘크리트 탄성계수

E_s = 철근의 탄성계수

마찬가지로 콘크리트에 작용하는 모멘트 $\Delta M(t)$ 와 철근에 작용하는 모멘트 $\Delta M_s(t)$ 도 식(12)와 식(13)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta M_c(t) &= \Delta P_c(t)y_i \\ &= \sum A_{c i} E_c(t) [(\Delta\epsilon(t) - \epsilon_e \phi) - (\Delta\chi(t) - \chi_e \phi)y_i] y_i \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \Delta M_s(t) &= \Delta P_s(t)y_i \\ &= \sum A_{s i} E_s [(\Delta\epsilon(t) - \Delta\chi(t)y_i)] y_i \end{aligned} \quad (13)$$

단면 내부에서 발생하는 축력 $\Delta P_c(t)$ 와 $\Delta P_s(t)$ 의 힘의 평형조건식에 식(10)과 식(11)을 대입 정리하면 식(14)

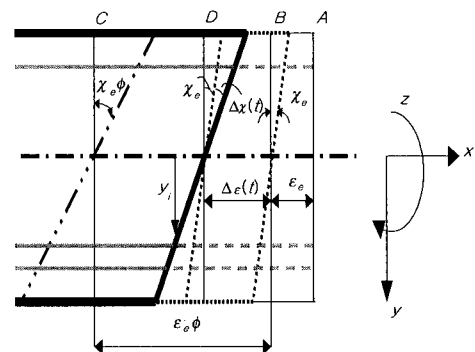


Fig. 7 Inelastic strain by creep

가 되고, 단면 내부에서 발생하는 모멘트 $\Delta M_c(t)$ 와 $\Delta M_s(t)$ 의 힘의 평형조건식에 식(12)와 식(13)을 대입 정리하면 식(15)가 된다.

$$(\sum A_{cs}E_c(t) + \sum A_{ss}E_s)\Delta\epsilon(t) - (\sum A_{cs}E_c(t)y_i + \sum A_{ss}E_s y_i)\Delta\chi(t) = \sum A_{cs}E_c(t)\epsilon_e\phi - \sum A_{cs}E_c(t)\chi_e\phi y_i \quad (14)$$

$$(\sum A_{cs}E_c(t)y_i + \sum A_{ss}E_s y_i)\Delta\epsilon(t) - (\sum A_{cs}E_c(t)y_i^2 + \sum A_{ss}E_s y_i^2)\Delta\chi(t) = \sum A_{cs}E_c(t)\epsilon_e\phi y_i - \sum A_{cs}E_c(t)\chi_e\phi y_i^2 \quad (15)$$

식 (14)와 식(15)을 행렬의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} EA & -ER \\ -ER & EI \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\epsilon(t) \\ \Delta\chi(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_c(t)A_c & -E_c(t)R_c \\ -E_c(t)R_c & E_c(t)I_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_e\phi(t, \tau_0) \\ \chi_e\phi(t, \tau_0) \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서, $\phi = \phi(t, \tau_0)$

3.2.2 건조수축에 의한 비탄성변형

임의의 시간 t 에서 건조수축에 의해 단면 내부에 발생하는 압축변형률과 곡률을 $\Delta\epsilon(t)$, $\Delta\chi(t)$ 라 하고 건조수축에 의해서 콘크리트에 발생하는 변형률을 $\epsilon_{sh} (= \epsilon_{sh}(t, \tau_0))$ 라고 하자. 재령 τ_0 에서 건조수축이 시작되는 경우, 임의의 시간 t 에서의 건조수축으로 인한 단면의 변형도는 $\Delta\epsilon_i(t)$ 는 식(17)과 같다. 건조수축은 작용하는 하중이 없으므로 콘크리트에 발생하는 건조수축변형과 철근의 변형에 의해 발생하는 축력과 모멘트는 같다. 즉, 철근이 없을 때 콘크리트에 발생하는 변형률은 Fig. 8에서 알 수 있듯이 크리프의 경우와 마찬가지로 식(18)과 같이 된다. 한편, 건조수축이 발생하지 않는 철근에는 A에서 B로 식(19)와 같은 압축변형률이 발생한다.

$$\Delta\epsilon_i(t) = \Delta\epsilon(t) - \Delta\chi(t)y_i \quad (17)$$

$$\epsilon_c(t) = -\epsilon_{sh}(t, \tau_0) + \Delta\epsilon(t) - \Delta\chi(t)y_i \quad (18)$$

$$\epsilon_s(t) = \Delta\epsilon(t) - \Delta\chi(t)y_i \quad (19)$$

힘의 평형조건과 식(18)과 식(19)의 적합조건을 이용해

정리하여 행렬식으로 표현하면 식(20)과 같다.

$$\begin{bmatrix} EA & -ER \\ -ER & EI \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\epsilon(t) \\ \Delta\chi(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_c(t)A_c \\ 0 \end{bmatrix} (\epsilon_{sh}(t, \tau_0)) \quad (20)$$

4. 예제해석

4.1 해석구조물의 형상 및 단면성능

해석구조물은 Fig. 9에서 알 수 있듯이 8m의 경간, 4m의 층고를 갖는 20층 철근콘크리트 구조물로 하였다. 구조체의 단면성질과 재료성질은 Table 1과 Table 2와 같다.

4.2 시공단계 및 작용하중

해석구조물은 15일 간격으로 1개층이 타설이 되고, 수직거푸집의 제거는 타설 후 3일이 경과되면 제거하고, 동바리는 35일이 경과되면 제거한다고 가정하였다. 고층구

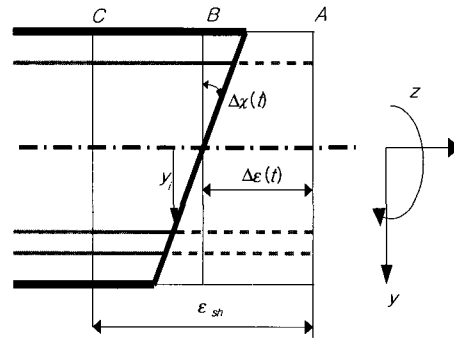


Fig. 8 Inelastic strain by drying shrinkage

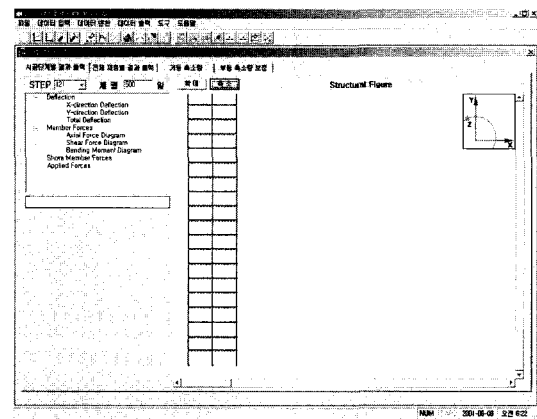


Fig. 9 Structure shape of example

Table 1 Material properties of example

Material type	Compressive strength (kg/cm ²)	Cement type	Curing condition	Curing time (day)	Relative humidity (%)	Slump (cm)	Cement (kg/m ³)	Air (%)	s/a (%)	w/c (%)	a/c (%)	Temp. (°C)
1(11~20F)	210	I	moisture	28	60	12	400	5	40.0	60	280.0	25
2 (1~10F)	250	I	moisture	28	60	12	450	5	40.0	55	280.0	25

조물의 시공 시, 최상층의 골조공사가 완료되기 전에 1층에서부터 마감공사가 수행된다. 따라서 본 해석에서는 10층 골조를 타설한 후에 마감공사가 뒤따르고 1개 층의 마감공사기간은 15일로 가정하였다. 또한, 골조공사 중에 설치하는 내외 마감재 등에 의한 부가하중(suspended load)은 140 kgf/m^2 , 가설재 등의 시공하중(construction live load)은 200 kgf/m^2 으로 가정하였다.

4.3 해석결과

콘크리트의 장기거동 예측 모델식으로 ACI 모델식⁹⁾, CEB-FIP 모델식¹⁰⁾, B3 모델식¹¹⁾, 그리고 콘크리트 설계 기준 모델식 모두를 고려할 수 있다. 본 연구에서는 ACI 모델식을 사용하였다. 또한 해석의 범위도 탄성변형 뿐만 아니라 크리프, 건조수축을 별도로 또는 조합하여 해석할 수 있고 본 연구에서는 모두 고려하였다.

도구메뉴에서 결과를 구하고자 하는 시공단계를 선택하면 Fig. 10과 같이 골조의 형태가 나타난다. 그림은 6층 골조의 시공단계를 나타낸 것으로 5층과 6층에는 동바리가 설치되어 있고 5층 이하에는 동바리가 없음을 알 수 있다. 따라서 모든 건물의 시공단계를 확인할 수 있으며, 이 상태에서 처짐을 구하고자 하면 해당 절점을 선택하고 축방향력, 전단력, 모멘트와 같은 부재력을 알고자 하면 해당 부재를 선택하면 된다. 그러면 현재 재령까지 발생한 처짐, 응력도 등을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 최종시공단계에서 1F, 5F, 10F, 15F, 20F의 기둥 축력을 나타낸 것이다. 저층 기둥과 고층기둥의 축력 차이를 쉽게 알 수 있다. Fig. 12는 1층 골조의 타설시간을 0으로 할 때, 재령 500일에서의 기둥 축소량을 chart와 table로 표현한 것으로 Y1과 Y3의 외측기둥보다 Y2의 내측기둥의 결과가 더 크게 나타난다.

철근콘크리트 기둥에서 발생하는 변형에서 그 층의 슬래브가 타설되기 이전에 발생하는 축소량(up to slab shortening)은 거푸집 설치 시에 보정이 되므로 큰 의미가 없으며, 슬래브 타설 후 상부층의 하중으로 인하여 발생하

Table 2 Sectional properties of elements

Section	Width (mm)	Depth (mm)	Area of tensile steel (mm ²)	Area of compression steel(mm ²)
Beam (1~20F)	400	600	3483	1935
Column 1 (1~5F)	800	800	4644	4644
Column 2 (6~10F)	700	700	3870	3870
Column 3 (11~15F)	600	600	3096	3096
Column 4 (16~20F)	500	500	2322	2322

는 축소량(subsequent shortening)의 보정이 중요하다. 따라서 Fig. 13의 화면과 좌측의 상단 테이블 메뉴는 타설 이후 기둥축소량을 나타낸 것이다. 그리고 하단의 테이블 메뉴는 각 기둥간의 부등축소량을 보정할 수 있는 기준 기둥열 선택 메뉴와 결과를 표현한다. 축소량 보정방법은 기준 기둥의 부등축소량에 대한 나머지 기둥의 상대적인 차로 계산하였다. 외측과 내측기둥의 부등축소량은 14층 부근에서 약 30%의 차이가 나타나고 있다.

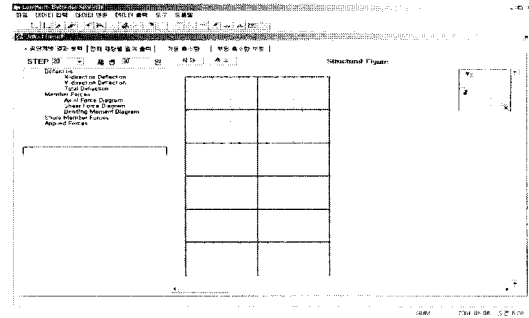


Fig. 10 Construction step with shore

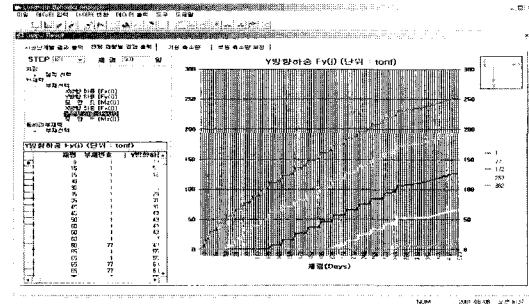


Fig. 11 Axial force with time step

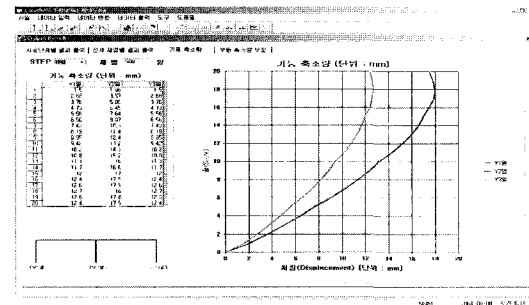


Fig. 12 Column shortening

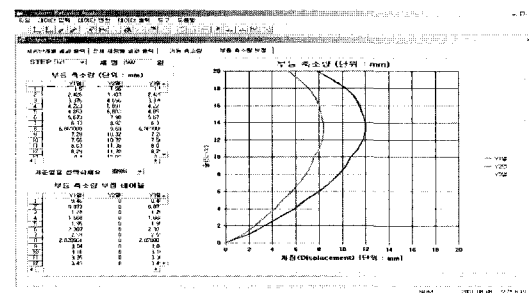


Fig. 13 Differential shortening

5. 결 론

철근 콘크리트 구조물의 장기거동과 시공단계를 고려하여 개발한 예측 시스템은 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 시공단계별로 해석을 반복해석을 수행함으로써 발생하는 수많은 데이터와 정보를 데이터베이스 설계를 통해 효율적인 시스템 관리가 이루어진다.

2) Graphic user interface(GUI) 환경의 지원에 의해 사용자가 데이터의 입력, 수정, 검색 작업을 쉽게 할 수 있으며 해석결과를 그래픽 다이어그램(graphic diagram), 테이블(table), 차트(chart) 등으로 확인할 수 있다.

3) 개발된 시스템은 거푸집과 동바리의 설치 및 제거를 포함하는 일반적인 시공단계를 고려할 수 있으며 기둥의 부등축소량을 예측할 수 있다.

4) 각각의 시공단계별로 발생하는 기둥의 부등축소량을 실제 실무에서 보정할 수 있도록 지원한다.

참고문헌

1. Ghosh, M. F. and Iyengar, H., "Column Shortening in Tall Structures Prediction and Compensation," Engineering Bulletin No. EB108D, Portland Cement Association, 1987, p.34.
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. 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.

4. 이태규, "균열단면을 고려한 철근콘크리트 구조물의 시간단계해석," 대한토목학회 논문집, 1998.
5. 김용빈, 김순철, 이수곤, "장기변형을 고려한 구조 해석에 관한 연구," 대한건축학회 논문집, 1998.4, pp.343~351.
6. 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.
7. 김선영, 이태규, 김진근, 이수곤, "크리프와 건조수축을 고려한 철근콘크리트 기둥과 동바리의 축력 재분배 해석법," 콘크리트학회 논문집, 제13권 6호, 2001. 12, pp.629~636.
8. 이태규, "균열단면을 고려한 철근콘크리트 보의 처짐에 대한 시간단계해석," 대한토목학회 논문집, 제18권 I-6호, 1998. 12, pp.811~818.
9. ACI Committee 209, "Prediction of Creep Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures," ACI Manual of Concrete Practice (ACI 209R-82), 1990.
10. CEB-FIP Model Code, Committee Euro International Beton, 1991.
11. Bazant, Z. P. and Panula, L., "Practical Prediction of Time Dependent Deformations of Concrete," *Materials and Structures*, Research and Testing(RILEM, Paris), Vol. 11, No. 65, Sept.-Oct. 1978.

요 약

최근 사용재료의 품질과 설계기법의 향상으로 철근콘크리트 고층구조물에 대한 시공이 활발히 이루어지고 있다. 그러나 대부분의 경우에 시간의존적 비탄성변형을 무시하고 있다. 특히 시공단계에서 발생하는 초기변형은 장기적으로 구조물에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 또한, 고층구조물에서 발생하는 부등축소는 탄성변형, 크리프, 건조수축 등이 조합되어 일어나기 때문에 고층구조물의 부등축소를 예측하고 실제 현장에서 보정하기 위해서는 장기거동에 대한 해석이 필수적이다.

본 연구에서는 동바리의 설치/제거를 포함한 실제적인 시공과정을 반영할 수 있는 2차원 골조해석 시스템을 개발하였다. 해석 시스템은 데이터베이스 설계기법과 그래픽 사용자 인터페이스(graphic user interface) 환경에서 개발되었으며, Input module, DB Store module, Database module, Analytical module, Analysis result generation module로 크게 구성되어 있다. 해석 시스템은 시공단계별로 해석을 반복해석을 수행함으로써 발생하는 수많은 데이터와 정보를 데이터베이스 설계를 통해 효율적인 시스템 관리를 한다. Graphic user interface(GUI) 환경의 지원에 의해 사용자가 데이터의 입력, 수정, 검색 작업을 쉽게 할 수 있으며 해석결과를 그래픽 다이어그램(graphic diagram), 테이블(table), 차트(chart) 등으로 확인할 수 있다. 개발된 시스템은 거푸집과 동바리의 설치 및 제거를 포함하는 일반적인 시공단계를 고려할 수 있으며 기둥의 부등축소량을 예측할 수 있으며, 각각의 시공단계별로 발생하는 기둥의 부등축소량을 실제 실무에서 보정할 수 있도록 지원한다.

핵심용어 : 고층구조물, 부등축소, 해석시스템, 시공단계, 데이터베이스