

재령보정유효탄성계수법에 의한 합성기둥 축소량 해석

Column Shortening Analysis of Composite Columns by Age-adjusted Effective Modulus Method

김 한 수* · 김 재 건** · 김 도 균***

Kim, Han-Soo · Kim, Jae-Keun · Kim, Do-Kyoon

ABSTRACT

The analysis method proposed by PCA is widely used in calculating the column shortening of reinforced and composite columns of a tall building. However, residual creep factor which relates creep strain of reinforced concrete to creep strain of plain concrete is based on Rate of Creep Method (RCM) which has theoretical defects and is considered obsolete. In this paper, a new equation for the residual creep factor based on Age-adjusted Effective Modulus Method (AEMM) which is considered exact and better than RCM is proposed. The residual creep factor by RCM is found to be higher than one by AEMM, which means current PCA method overestimates the shortening of a reinforced concrete column. By using the residual creep factor by AEMM, more exact column shortening of a tall building can be obtainable with a simple modification to PCA method.

Keywords: Column Shortening, Tall Building, Age-adjusted Effective Modulus Method

1. 서 론

현재 초고층 건물 기둥축소량 해석에 있어서 널리 사용되고 있는 해석 방법은 PCA(Portland Cement Association)에서 제안한 방법(이하 PCA 방법)(Fintel 등, 1987)으로 이 해석 방법은 그 해석 알고리즘이 간단하여 이해하기 쉽고 전산프로그램을 만들기가 용이한 장점이 있다. 또한 PCA 방법은 부재크기, 상대습도, 재하시의 재령, 철근의 효과, 경과시간 등과 같은 철근콘크리트 부재의 장기거동에 영향을 미치는 요인들을 독립된 계수 형태로 표현하고 있어 그 각각의 효과를 정량적으로 분석하기 좋은 장점도 가지고 있다. PCA 방법에서는 철근콘크리트 기둥의 장기거동 해석을 위하여 철근에 의한 잔류크리프계수를 사용하고 있는데, 이 잔류크리프계수는 크리프율법(Rate of Creep Method, 이하 RCM)을 이용하여 유도된 계수이다. RCM은 1930년대에 개발된 방법으로 이론적인 오류를 지니고 있어 근래에는 주로 사용되지 않는 방법이다.(Gilbert, 1988)

합성기둥의 철골을 등가의 철근으로 환산하여 PCA 방법을 이용하여 해석한 기둥축소량을 현장계측을 통

* 정회원 · 건국대학교 건축공학부 교수 E-mail: hskim@konkuk.ac.kr

** 정회원 · 현대건설 기술연구소 선임연구원 E-mail: kjk5577@hdec.co.kr

*** 정회원 · 현대건설 기술연구소 주임연구원 E-mail: dkkimm@hdec.co.kr

하여 얻은 실측값과 비교한 연구(김한수 등, 2003)에서는 기등축소 해석값이 실측값에 비하여 과다하게 계산됨을 밝히고 이를 개선할 수 있는 새로운 해석방법의 필요성을 제기하고 있다.

이에 본 논문에서는 합성기동의 철근비가 보통기동의 철근비보다 훨씬 높다는 점에 주목하고 PCA방법을 이용한 축소량 해석에 있어서 철근의 영향을 고찰하였다. 그 연구 결과로 기존에 사용되고 있는 PCA 방법의 장점을 유지하는 동시에 RCM보다 그 정확성이 뛰어나다고 알려져 있는 재령보정탄성계수법(Age-adjusted Effective Modulus Method, 이하 AEMM)에 의한 잔류크리프계수의 산정식을 제안하였다. 제안된 산정식에 의한 잔류크리프계수를 RCM에 의한 잔류크리프계수와 비교하여 그 차이를 살펴보고 기등축소량 해석, 특히 합성기동의 축소량 해석에 적용하여 보았다.

2. RCM에 의한 잔류크리프계수

현재 PCA방법에서 사용되고 있는 잔류크리프계수(residual creep factor)는 철근에 의한 크리프 변형 저감 효과를 계수의 형태로 나타낸 값으로 RCM의 해석방법에 그 기초를 두고 있으며(Fintel and Khan, 1969) 다 음식과 같다(Fintel 등, 1987).

$$CR_{rf} = \frac{1}{\rho \cdot \epsilon_{cr}^* \cdot E_s} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\rho \cdot n}{1 + \rho \cdot n} \cdot \epsilon_{cr}^* \cdot E_c(t_0)}\right) \quad (1)$$

여기서

$\rho = A_s/A_g =$ 철근비

$n = E_s/E_c(t_0) :$ 시간 t_0 일때 철근과 콘크리트의 탄성계수비

ϵ_{cr}^* 은 재하시점, 부피-면적비, 상대습도, 경과시간등을 고려한 크리프변형률을 나타낸다.

3. AEMM에 의한 잔류크리프계수

AEMM은 1967년 Trost에 의하여 제안되고 Bazant에 의하여 발전된 장기거동 해석방법으로, 1927년에 Faber에 의하여 제안된 유효탄성계수법(Effective Modulus Method)에 재령계수(aging coefficient)를 도입하여 크리프 변형을 가지는 콘크리트의 응력과 변형률을 비교적 정확하게 해석할 수 있는 방법이다.(Gilbert, 1988) AEMM에 의하면 콘크리트의 시간에 따른 변형률은 다음 식과 같이 나타내어진다.

$$\epsilon(t, t_0) = \frac{\sigma_0}{E_c(t_0)} [1 + \phi(t, t_0)] + \frac{\sigma(t) - \sigma_0}{E_c(t_0)} [1 + \chi(t, t_0)\phi(t, t_0)] \quad (2)$$

(2)식에서 재령계수 $\chi(t, t_0)$ 은 응력이 변화하는 상태에서 콘크리트의 재령에 따라 크리프 변형이 감소하는 효과를 나타내는 값으로 일반적으로 0.6에서 0.9사이의 값을 갖는다. 재령계수는 크리프 계수 $\phi(t, t_0)$ 에 의

하여 결정되므로 경과시간, 재하시의 재령, 상대습도, 크기효과와 같은 크리프 변형에 영향을 주는 모든 요인들의 영향을 받는다. 따라서 정확한 재령계수 값을 구하기 위해서는 크리프 계수를 이용한 수치적분을 수행하여야 한다. (Bazant, 1972) 하지만 일반적인 장기거동해석문제에 있어서는 0.8의 일정한 값을 사용하여도 비교적 타당한 해석 결과를 얻을 수 있다고 알려져 있다(Gilbert, 1988).

잔류크리프계수는 철근콘크리트 기둥에서 철근에 의한 크리프 변형의 감소 효과를 나타내는 계수로 철근에 의한 응력재분배가 발생하지 않을 때의 크리프 변형과 철근콘크리트에서의 크리프 변형의 비로 나타낼 수 있으며 이를 AEMM을 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 CR_{r,j} &= \frac{(n^* - n)}{C(t, t_0) \cdot E_s \cdot (1 + \bar{n}^* \rho)} \\
 &= \frac{(n^* - n)}{\epsilon_{cr}^* \cdot E_s \cdot (1 + \bar{n}^* \rho)}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

여기서

$$n = \frac{E_s}{E_c(t')}
 \tag{4}$$

$$n^* = n[1 + \phi(t, t')]
 \tag{5}$$

$$\bar{n}^* = n[1 + \chi(t, t')\phi(t, t')]
 \tag{6}$$

RCM에 의한 잔류크리프계수인 (1)식 대신에 AEMM에 의한 잔류크리프계수인 (3)식을 사용하면 기존의 PCA 방법의 근간을 그대로 유지하면서도 더 정확한 방법인 AEMM을 철근콘크리트의 장기거동 해석방법으로 사용할 수 있게 된다.

4. RCM과 AEMM에 의한 잔류크리프계수 비교

RCM에 의한 잔류크리프계수를 나타내는 (1)식과 AEMM에 의한 잔류크리프계수를 나타내는 (3)식에 의하여 구해진 잔류크리프계수를 비교하여 보았다.

철근비의 변화에 따른 두 방법에 의한 잔류크리프계수의 차이를 알아보기 위하여 5개의 특정 크리프의 값에 대하여 RCM으로 구한 잔류크리프계수에 대한 AEMM으로 구한 잔류크리프계수의 비율의 평균값을 구하여 그림[1]에 나타내었다. 여기서 잔류크리프계수의 비율의 평균값이란 재하 시점 t_0 과 재하 후 경과 시점 $(t - t_0)$ 이 각각 10일, 100일, 1000일, 10000일 때의 16개의 잔류크리프계수의 비율을 평균한 값이다. 이 평균값은 다양한 시간 상황에서의 잔류크리프계수 값의 차이를 나타낸다고 볼 수 있다.

그림[1]에서의 값을 보면 철근비가 증가될수록, 특정 크리프가 클수록 그 차이가 커짐을 알 수 있다. 일반적인 철근콘크리트 기둥에 해당하는 0.01에서 0.02정도의 철근비의 경우에는 5% 이하의 차이를 보이지만 SRC 합성기둥에 해당하는 0.10이상의 철근비인 경우에는 15%에 가까운 차이를 보이고 있다. 이는 기존의 PCA 방법에 의하여 합성기둥의 축소량을 예측할 경우 실측치보다 크게 산정된다는 기존의 연구(김한수 등, 2003) 결과와 일치한다. 따라서 RCM에 의한 기존의 PCA 방법보다는 AEMM에 의한 잔류크리프계수를 이

용한 방법이 실제의 축소량을 보다 정확하게 축소량을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

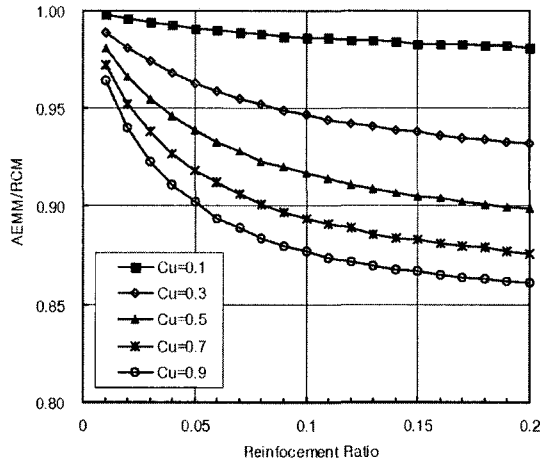


그림 1 AEMM과 RCM으로 구한 잔류 크리프 계수 평균값의 비율 (Cu는 특정 크리프를 나타내며 단위는 10^{-6} in/in/psi 이다.)

5. 기동축소량 해석 예제

제안된 잔류크리프계수가 초고층 건물 기동축소량 해석에 미치는 영향을 알아보기 위하여 다음과 같은 초고층건물의 기동축소량 해석 예제에 적용하여 보았다. 기동축소량 해석 은 철근비 0.02인 일반적인 RC기동과 철근비가 0.2인 SRC 합성기동을 대상으로 수행하였으며 기동의 단면 크기는 모두 800 x 800 mm의 정사각형으로 하였다. 가정한 콘크리트의 물성치는 설계압축강도 $f_{ck}=50\text{MPa}$, 극한 크리프 계수 $(\epsilon_{cr})_u = 0.6 \times 10^{-6}$ (in/in/psi), 극한건조수축변형률 $(\epsilon_{sh})_u = 800 \times 10^{-6}$ 로 하였다. 건조수축은 7일간의 습윤양생 후 시작되는 것으로 하였고 상대습도는 60%로 하였다. 콘크리트 모델은 PCA 방법에서 제안한 모델을 사용하였고 다만 잔류크리프계수만을 기존의 방법과 본 논문에서 제안한 방법으로 구분하여 적용하였다. 하중은 최대 설계하중의 40%를 5일 간격으로 타설 후 300일 까지 균등하게 1/60씩 재하하였다. 최대 설계하중의 40%는 RC기동의 경우에는 10,168kN, SRC기동의 경우에는 20,480kN으로 계산되었다. 해석은 5일 간격으로 1000일까지의 축소량을 계산하였으며 그 결과를 그림[2]에 나타내었다. 그림에서 RCM과 AEMM은 PCA의 방법 및 본 논문에서 제안한 방법에 따른 잔류크리프계수를 적용하였을 경우의 1층 기동에서의 탄성 변형율, 건조수축 변형율 및 크리프 변형율을 합한 총변형율을 나타내며 괄호안의 숫자는 기동 단면의 철근비를 나타낸다.

전체적으로 RC기동의 변형율이 SRC 기동의 변형율 보다 크게 발생하고 하중이 단계적으로 재하되는 300일까지는 거의 선형적으로 변형율이 증가하다가 그 이후부터는 완만하게 증가하는 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. 300일까지는 하중이 증가함에 따라 변형율이 증가되고 그 이후부터는 건조수축 및 크리프변형만이

발생하기 때문에 그림과 같은 양상을 보인다.

본 논문에서 제안한 AEMM에 의한 잔류크리프계수를 사용하였을 경우의 해석 결과가 RCM을 이용한 기존의 방법에 의한 결과보다 작은 값을 보여주고 있으며 그 차이는 RC기둥의 경우보다 SRC기둥의 경우가 더 크다는 점을 확인할 수 있다. 정확한 값의 비교를 위하여 1000일이 경과한 후의 변형율을 탄성변형율, 건조수축변형율, 크리프변형율로 구분하여 나타내보면 표[1]과 같다. 탄성변형은 잔류크리프계수의 영향을 받지 않으므로 두 방법에 의한 결과가 일치하고 있다. 잔류크리프계수의 영향을 받는 건조수축변형과 크리프변형으로 인한 변형율을 비교해보면 RC기둥의 경우에는 4.3%의 차이가 나는 반면에 SRC기둥의 경우에는 14.0%의 차이가 나고 있음을 알 수 있다.

이는 SRC기둥에 대하여 PCA방법에 의한 해석결과와 현장계측결과와 비교한 연구에서 해석값이 계측값보다 과다하게 축소량을 예측한다는 기존 PCA방법의 오류(김한수 등, 2003)를 본 논문에서 제안한 잔류크리프계수를 사용하여 해석의 정확도를 높일 수 있음을 보여준다.

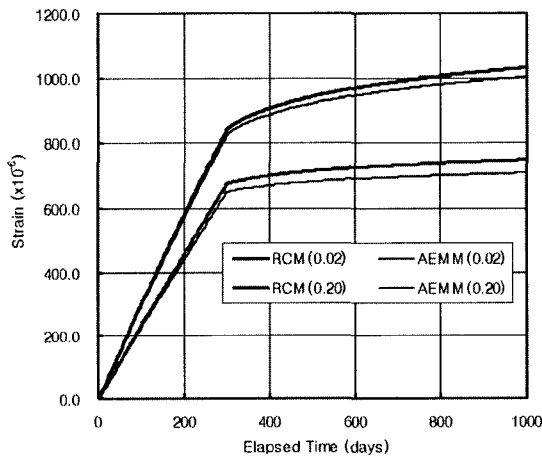


그림 2 타설 후 시간경과에 따른 RC기둥(철근비 0.02)과 SRC기둥(철근비 0.2) 기둥의 전체 축방향 변형율

표 1 예제 기둥의 타설 후 1000일 경과 시의 축방향 변형율(x10⁻⁶)

| | RC Column | | | SRC Column | | |
|-----------|-----------|--------|-----------|------------|-------|-----------|
| | RCM | AEMM | AEMM /REM | RCM | AEMM | AEMM /RCM |
| elastic | 404.4 | 404.4 | 100.0% | 464.8 | 464.8 | 100.0% |
| shrinkage | 218.0 | 208.8 | 95.8% | 90.8 | 78.0 | 85.9% |
| creep | 410.0 | 392.5 | 95.7% | 192.7 | 165.8 | 86.0% |
| total | 1032.4 | 1005.7 | 97.4% | 748.3 | 708.6 | 94.7% |

6. 결론

초고층건물 기둥축소량 해석방법으로 널리 사용되는 PCA 방법에서 철근에 의한 장기변형 감소 효과를 나타내는 잔류크리프계수의 새로운 계산 방법에 대하여 연구하였다. 기존 잔류크리프계수가 기반으로 하고 있는 RCM 보다 우수한 해석방법인 AEMM을 이용한 잔류크리프계수 산정식을 유도하였다. AEMM에 의한 잔류크리프계수보다 RCM에 의한 잔류크리프계수가 큰 값을 보이고 있어 기존의 기둥축소량 해석결과가 실제보다 축소량을 과대평가하고 있음을 알 수 있으며 이는 기존의 실측결과와 일치하는 결과이다. 특히 철근비가 큰 경우에는 약 15%정도의 차이를 보이고 있어, 합성기둥의 축소량을 예측하는 경우에는 AEMM으로 구한 잔류크리프계수의 적용 필요성이 더욱 커진다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

- 김한수, 조석희, 김도균 (2003) 초고층건물 RC코어와 SRC기둥의 기둥축소량 해석 및 현장계측, **대한건축학회논문집**, 19(11), pp.49-57
- Bazant, Z.P. (1972) Prediction of Concrete Creep Effects using Age-Adjusted Effective Modulus Method, *ACI Journal*, 69(4), pp.212-217.
- Fintel, M., Chosh S.K. and Iyengar H. (1987) *Column Shortening in Tall Structure-Prediction and Compensation*, Portland Cement Association
- Fintel, M. and Khan F.R. (1969). Effects of Column Creep and Shrinkage in Tall Structures-Prediction of Inelastic Column Shortening, *ACI Journal*, 66(12), pp.97-967.
- Gilbert, R.I. (1988) *Time Effects in Concrete Structures*, Elsevier