

철근콘크리트 장주 교각의 시간에 따른 거동

Long-Term Behaviors of Reinforced Concrete Pier Structures Considering Long Column Effects

정 현 수* 김 수 만**
Jung, Hyun Soo Kim, Su Man

ABSTRACT

For reinforced concrete column under sustained loads, the member suffers additional lateral deflection due to creep. This deflection leads to additional bending in the member, which in turn causes the column to deflect still further. Therefore the secondary moment due to additional deflection causes an increase in primary moment and the strength of column is reduced. And also creep buckling may occur.

On this study, nonlinear analysis of reinforced concrete long column including crack effects is carried out and then the strength of long column is reevaluated.

1. 서론

콘크리트 재료의 물성치는 재령에 따라 비탄성적으로 변화하는 특성을 지니고 있다. 이러한 특성은 콘크리트의 크리프와 건조수축에 의해 주로 야기된다. 이러한 크리프와 건조수축 현상은 시간에 따라 콘크리트 단면 내에서의 응력 및 변형률의 변화와 처짐의 증가를 유발한다.

콘크리트의 크리프와 건조수축은 변형을 증가시키고 응력의 재분배를 가져오지만 강도에 영향을 미치지 않는다고 본다. 그러나 지속적인 편심축하중을 받는 기둥의 경우 크리프와 건조수축에 의한 변형이 $P-\Delta$ 효과를 증대시켜 이로 인해 강도가 감소되는 효과를 나타낸다. 특히 새장비가 상대적으로 큰 철근콘크리트 장주의 경우 축력과 휨이 지속적으로 작용될 때 추가적인 하중의 증가 없이도 시간이 지남에 따라 횡변위의 증가로 부재 모멘트가 증가하여 초기에는 안전하던 부재가 파괴에 이르기까지도 하고 심지어는 횡처짐이 지나치게 과대하여 좌굴을 초래하기도 한다.

이와같이 철근콘크리트 장주는 크리프의 2차적인 효과에 의한 영향을 크게 받는 대표적인 구조부재이므로 안전성과 사용성의 확보를 위해서 콘크리트의 균열을 포함한 재료의 비선형성과 콘크리트 크리프에 대한 장기거동을 고려한 보다 정밀한 해석이 요구된다.

본 연구에서는 전 연구실험에서 얻은 크리프, 건조수축량을 기연구된 경험식에 대입하여 크리프와 건조수축량을 추정하였고, 또한 기존 해석용 프로그램을 수정·보완하여 균열을 포함한 철근콘크리트 장주교각의 비선형 해석을 수행하였다. 그리고 강도에 미치는 영향을 분석하여 현행 설계기준에 대한 타당성을 검토하였다.

2. 크리프계수 및 건조수축변형률 추정

*정희원, 수원대학교 토목공학과 석사과정

**정희원, 수원대학교 토목공학과 교수

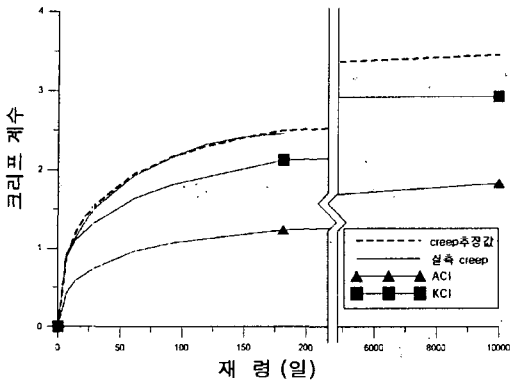


그림 2.1 크리프 비교(추정값, 실측값, ACI, KCI)

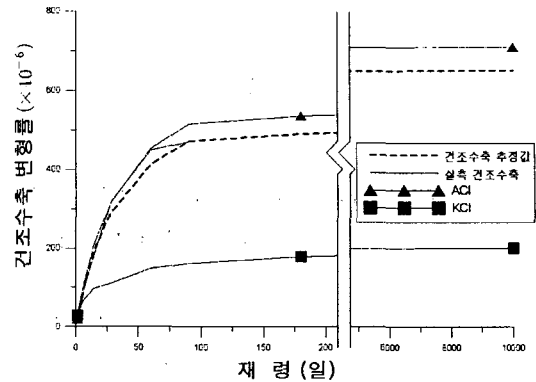


그림 2.2 건조수축 비교(추정값, 실측값, ACI, KCI)

식 2.1은 크리프계수를 추정하기 위해 사용된 Meyers의 쌍곡선 멱함수식이다. 이 식에 단기실험된 크리프계수를 대입하여 얻은 추정값과 ACI, KCI 모델로 추정된 값을 그림 2.1에 도시하였다.

ACI, KCI 모델로 추정된 크리프량은 단기실험으로 추정된 크리프량에 비해 작았는데 특히 ACI 모델은 크리프계수를 매우 과소하게 추정하였다. 그 중 단기실험으로 추정된 재령 30년일 때 크리프 계수 3.46을 선택하였다.

$$\phi(t, \tau) = \frac{2.35(t-\tau)^{0.6}}{10+(t-\tau)^{0.6}} \phi(28+\tau, \tau) \dots\dots\dots (2.1)$$

식 2.2는 건조수축변형률을 추정하기 위해 사용된 Meyers의 지수 및 쌍곡선식이다. 이 식에 단기실험된 건조수축변형률을 대입하여 얻은 추정값과 ACI, KCI 모델로 추정된 값을 그림 2.2에 도시하였다.

$$\epsilon_{sh}(t) = \frac{t}{\alpha+t} \epsilon_{sh}^*$$

여기서, α : 습윤양생시 35, 증기양생시 55 ϵ_{sh}^* : 최종 건조수축변형률

$$\epsilon_{sh}(t) = \frac{1.39t}{35+t} \epsilon_{sh}(91) \dots\dots\dots (2.2)$$

추정된 건조수축변형률의 크기는 ACI 모델, 단기실험, KCI 모델로 추정된 값 순서로 컸는데 이중 KCI 모델은 건조수축변형률을 매우 과소하게 추정하였다. 그 중 단기실험으로 추정된 재령 30년일 때 건조수축변형률 653×10^{-6} 을 선택하였다.

3. 시간해석 이론(AEMM)

임의시간 t 에서 전체 변형률은 f_0 에 의해 발생된 변형률과 점진적으로 작용한 응력증분 $\Delta f(t)$ 에 의해 발생된 변형률 및 건조수축변형률의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon(t) &= \frac{f_0}{E_c(\tau_0)} [1 + \phi(t, \tau_0)] + \frac{\Delta f(t)}{E_c(\tau_0)} [1 + \chi(t, \tau_0)\phi(t, \tau_0)] + \epsilon_{sh}(t) \\ &= \frac{f_0}{E_e(t, \tau_0)} + \frac{\Delta f(t)}{E_c(t, \tau_0)} + \epsilon_{sh}(t) \dots\dots\dots (3.1) \end{aligned}$$

여기서 $E_e(t, \tau_0)$ 는 유효탄성계수이고, 이는 다음과 같이 주어진 재령-보정된 유효탄성계수이다.

$$\bar{E}_e(t, \tau_0) = \frac{E_c(\tau_0)}{1 + \chi(t, \tau_0)\phi(t, \tau_0)} \dots\dots\dots (3.2)$$

재령계수 $\chi(t, \tau_0)$ 는 다음과 같다.

$$\chi(t, \tau_0) = \frac{f_0}{f_0 - f(t)} - \frac{1}{\phi(t, \tau_0)} \dots\dots\dots (3.3)$$

4. 철근콘크리트 장주의 시간해석

고정단과 롤러로 연결된 장주가 초기편심 e_0 에서 압축력 P 를 받으면 시간 τ_0 에서 δ_i 만큼 기둥은 횡 방향으로 처지게된다. 기둥의 하단부에서의 휨모멘트는 Pe_0 이다. 그러나 기둥의 상단부에서의 모멘트는 $P(e_0 + \delta_i)$ 이다. 그러므로 부재의 횡방향 처짐은 내력을 증가시키는 요인이 된다. 장주에서 2차모멘트 $P\delta_i$ 는 초기의 1차모멘트 Pe_0 보다 몇 배 더 클 수 있고 하중저항능력은 같은 단면의 단주보다 훨씬 떨어질 것이다. 매우 긴 장주에서는 상대적으로 적은 압축하중에서도 불안정한 파괴가 발생할 수 있다. 즉, 부재 단면의 강도에 이르기 전에 좌굴이 발생할 수 있다. 지속하중을 받는 철근콘크리트 기둥은 크리프로 인해 추가의 횡방향 처짐을 받는다. 이러한 시간에 따른 변형은 부재에서 추가모멘트를 발생시키고 이 추가모멘트는 기둥을 더 처지게 하는 문제를 발생시킨다. 지속하중을 받는 동안 추가처짐 $\Delta\delta$ 는 상단부 롤러단에서 발생할 것이다. 시간에 따른 2차모멘트($P(\delta_i + \Delta\delta)$)의 점진적인 증가는 장주에서는 크리프 좌굴을 일으킬 수 있다. 일단고정타단롤러인 기둥에서 2차모멘트($P\delta$)에 의해 발생된 기하학적 비선형은 다음과 같은 방법으로 모델화되어진다.

(1) 부재는 초기에 축하중 P 와 1차모멘트 Pe_0 를 받는다. 부재하단(A)과 부재상단(C) 단면의 초기변형률의 분포와 곡률을 계산한다.

(2) 기둥은 그림 4.1과 같이 캔틸레버 변형을 하고 부재상단에서 ($\kappa_A, \kappa_B, \kappa_C$)로부터 횡방향 처짐 δ_0 는 (1)에서 계산된 초기곡률은 식 (4.1)과 같이 구할 수 있다.

$$\delta_0 = -\frac{L^2}{6}(\kappa_A + 2\kappa_B) \dots\dots\dots (4.1)$$

(3) 롤러에서 추가모멘트 증분(Pe_0)은 1차모멘트에 더해지고 C에서의 단면은 다시 해석되어진다. 새로 계산된 2차모멘트(Pe_1)를 1차모멘트에 합한 후 재계산하고 i 번째 반복 후 롤러에서 횡방향변위가 δ_i 에 수렴할 때까지 계산한다. 수렴은 i 번째 반복($\delta_i - \delta_{i-1}$)에서 상단부에서 계산된 추가횡방향변위가 1차모멘트에 의해 발생된 변위보다 0.001보다 적게 나타날 때 완성된 것으로 본다.

(4) 앞에서 결정된 초기거동에 따라 시간해석이 시작된다. A, B, C에서 곡률과 변형률의 시간에 따른 변화가 계산되고 초기에 C에서 $P, P(e_0 + \delta_i)$ 는 일정하게 유지된다고 가정한다. 각 단면에서 시간에 따른 변위의 증가($\Delta\delta_i$)는 2차모멘트의 추가증분 $P\Delta\delta_i$ 를 발생시키며 반복과정은 $\Delta\delta$ 에 수렴할 때까지 반복한다. 여기서 시간에 따른 2차모멘트의 증분은 롤러에서 재령-보정된 단면에 적용하고 초기에 균열된 단면에 대해 중립축 깊이가 시간에 따라 일정하게 유지된다고 가정한다.

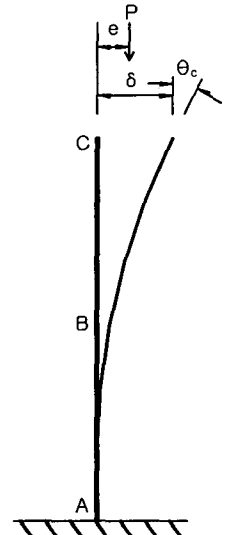
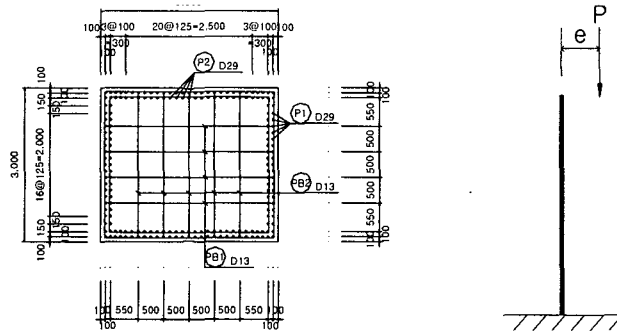


그림 4.1 캔틸레버 변형

5. 선정된 모델의 해석

그림 5.1의 단면을 가진 장주교각의 상단부 롤러에서 발생하는 초기 1차모멘트와 2차모멘트, 그리고 지속하중을 받는 동안 발생하는 추가처짐에 의한 시간에 따른 모멘트 ($P(e_0 + \delta_i + \Delta\delta)$)를 고려하여 해석하였다. 해석결과 세장비가 77일 때 시간에 따른 크리프 좌굴이 발생하였고, 113일 때 초기 하중에 의한 철근 항복이 발생하였다.



$E_s = 200000MPa$, $E_c = 24400MPa$, $f_{ck} = 35MPa$, $f_y = 300MPa$, $P = 20.6MN$, $e = 2400mm$

그림 5.1 선정된 해석모델의 제원

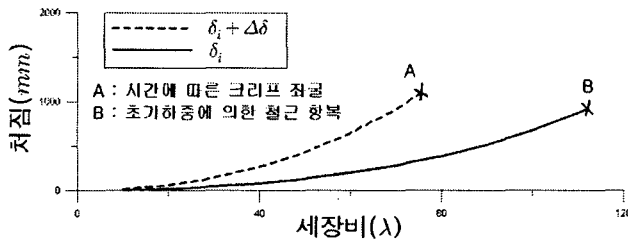


그림 5.2 세장비에 따른 초기처짐 및 장기처짐과 좌굴

6. 결론

- 1) 크리프와 건조수축량을 추정된 결과 ACI 모델은 크리프를 과소하게 추정하였고, KCI 모델은 건조수축을 과소하게 추정하였다.
- 2) 세장비가 113 이상일 때 초기 하중에 의한 철근 항복이 나타났고, 지속하중을 받는 장주교각의 시간에 따른 처짐증가로 인해 발생된 추가모멘트를 고려하여 시간해석을 수행한 결과 세장비가 77 이상일 때부터 크리프 좌굴이 발생하였다.
- 3) 지속하중이 클수록 크리프의 영향이 크고, 세장비 증가에 따른 처짐 증가의 비가 매우 크다. 따라서 주로 지속하중에 지배를 받는 장주교각은 시간해석이 필요하다.
- 4) 현행 설계기준은 세장비가 100을 초과하는 경우 엄밀해석을 추천하고 있다. 그러나 본 연구결과에 따르면 세장비 77에서 좌굴이 일어났으므로 엄밀해석을 요하는 최소 세장비 기준이 보다 낮게 재검토되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김수만, 권기주, 이평석, "기존 원전용 콘크리트와 다성분계 고유동 콘크리트의 장·단기거동 비교 실험 연구", 한국구조물진단학회지 30호.
2. 이평석, "원전 구조물용 다성분계 고유동 콘크리트 개발에 관한 연구", 2004.
3. 한국콘크리트학회, "콘크리트구조설계기준", 2003.
4. 김수만, 철근콘크리트, 양서각, 2005.
5. 선성웅, "건조수축 및 크리프 영향을 고려한 철근콘크리트 휨부재의 시간에 따른 구조거동", 1999.
6. R. I. GILBERT, Time Effects in Concrete Structures, ELSEVIER, 1988.
7. A. Ghali and R. Favre, Concrete Structures:Stresses and Deformations 2nd edition, E&FN SPON, 2002.
8. A.A Manaseer, Adam Neville Symposium : "Creep and Shrinkage-Structural Design Effects", ACI international SP-194.