

철근콘크리트 휨재의 장기처짐 예측을 위한 간략 평가

Simplified Evaluation of Long-Term Deflection of Reinforced Concrete Flexural Members

장 동 운* · 강 지 훈* · 채 승 윤* · 김 재 요**** · 엄 태 성****

Chang, Dong-Woon · Kang, Jee-Hoon · Chae, Seung-Yoon · Kim, Jae-Yo · Eom, Tae-Sung

요 약

지속하중을 받는 철근콘크리트 휨부재는 크리프, 건조수축 등 장기거동에 의하여 처짐이 증가된다. ACI318-08, KCI 2007 등 현행 구조설계기준의 장기처짐 평가방법은 인장 및 압축 철근비, 배근상세, 재료 강도 등 설계변수에 따른 장기처짐의 변화를 합리적으로 고려하기 어렵다. 본 연구에서는 장기거동에 의한 힘의 평형조건과 변형률 적합조건을 사용하여 크리프와 건조수축에 의한 철근콘크리트 균열단면의 장기변형을 예측하는 간략 평가식을 제안하였다. 장기변형 평가 시 콘크리트와 철근은 선형탄성거동을 가정하였고, 시간에 따른 콘크리트와 철근 사이의 응력재분배를 고려하기 위하여 재령보정탄성계수법을 적용하였다. 변수연구 및 검증 결과, 철근콘크리트 휨재의 장기처짐은 설계변수의 영향으로 달라질 수 있고, 제안된 방법은 이러한 장기처짐의 변화를 비교적 정확하게 예측하는 것으로 나타났다.

keywords : 장기거동, 단면해석, 크리프, 건조수축, 철근콘크리트

1. 서 론

크리프 및 건조수축에 대한 장기거동 모델이 ACI 318 및 209, CEB-FIP, EC2, PCA 등의 설계기준에 반영되고 컴퓨터를 이용한 수치해석 기술이 발전하면서, 콘크리트의 장기 응력-변형률 관계에 근거한 철근콘크리트 부재의 장기처짐 예측방법이 제시되었다. (Yu and Winter 1960, Samra 1997, 김진근 등 1998) 이들 방법은 철근콘크리트 단면에서 힘의 평형, 변형률 적합조건을 모두 고려하여 장기처짐을 고려하는 장점을 갖는다. 하지만 반복계산과 같은 복잡한 계산을 수반하므로, 기둥과 보의 장기변형을 평가하는 방법으로 실무에서 사용하기 어렵다.

보, 슬래브 등 휨부재의 장기처짐을 평가하는 간략 방법으로는 ACI 318 및 KCI 2007, Mari et al. 2010 등의 제안식을 사용할 수 있다. 이들 방법들은 반복계산 없이 간단한 계산식으로 크리프와 건조수축에 의한 휨재의 장기처짐을 계산할 수 있으므로 편리하다. 그러나 이들 계산식에서 크리프와 건조수축의 영향을 고려하는 주요 계수들은 명확한 역학이론으로부터 제시되기 보다는, 실험결과에 의존한 경험식을 사용하고 있다. 따라서 인장 및 압축철근비, 배근 깊이, 재료 강도 등에 의하여 복합적으로 영향을 받는 철근콘크리트 부재의 장기변형을 합리적으로 평가하기 어렵다.

* 쌍용건설 건축기술부, safety@ssyenc.com

** 정희원, 광운대학교 건축공학과, kimjyo@kw.ac.kr

*** 정희원, 대구가톨릭대학교 건축학부, tseom@cu.ac.kr

본 연구에서는 힘의 평형조건과 변형률 적합조건을 사용하여 크리프와 건조수축에 의한 철근콘크리트 균열단면의 장기변형을 예측하는 간략 평가식을 제안하였다. 장기변형 평가시 콘크리트와 철근은 선형탄성거동을 가정하였고, 시간에 따른 콘크리트와 철근 사이의 응력재분배를 고려하기 위하여 재령보정탄성계수법(age-adjusted effective modulus method)을 적용하였다.

2. 균열단면 장기곡률

철근콘크리트 단면에 압축력이 장기간 작용하는 경우, 콘크리트에는 즉시 탄성변형과 더불어 크리프 및 건조수축 등의 장기변형이 추가로 발생된다. 반면 철근은 크리프 및 건조수축 변형이 없으므로, 콘크리트와 철근에 변형률의 차이가 발생된다. 따라서 변형적합조건에 의하여 시간이 경과됨에 따라 콘크리트의 압축력은 감소하고 철근의 압축력은 증가한다. 시간 t 에서 콘크리트의 총 장기변형률 ϵ_c 는 재령보정탄성계수법에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_c = \epsilon_{c0} [1 + \phi] + \frac{\Delta\sigma_c}{E_{c0}} [1 + \chi\phi] + \epsilon_{sh} \quad (1)$$

여기서, ϵ_c = 시간 t_0 로부터 t 까지의 장기재하 동안 발생된 콘크리트 장기변형률, σ_{c0} , E_{c0} = 재하가 시작되는 시간 t_0 에서 콘크리트의 압축응력 및 탄성계수, $\Delta\sigma_c$ = 시간 t_0 로부터 t 까지의 재하기간 동안 감소된 콘크리트의 압축응력(= $\sigma_c - \sigma_{c0}$), σ_c = 장기재하가 종료되는 시간 t 에서 콘크리트 압축응력, ϵ_{c0} = 시점 t_0 에서의 콘크리트 즉시 탄성변형률(= σ_{c0}/E_{c0}), ϕ = 시간 t_0 로부터 t 까지의 크리프계수, χ = 재령보정계수(= 0.8), ϵ_{sh} = 시간 t_0 로부터 t 까지의 재하기간 동안의 자유 건조수축량.

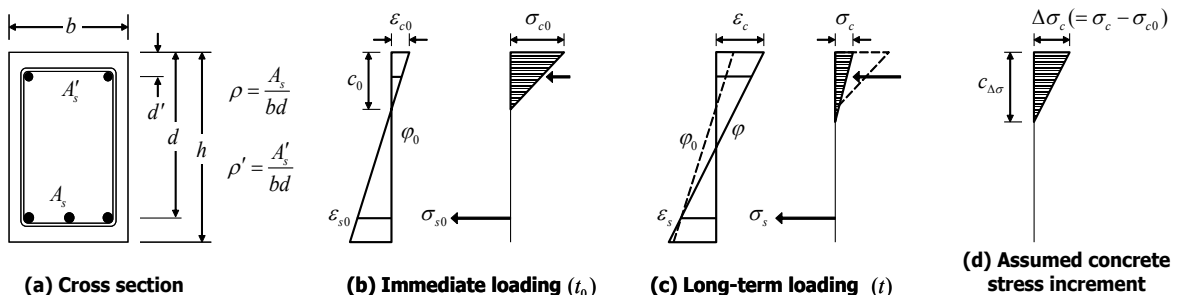


그림 1 휨부재의 단기 및 장기재하에 의한 응력과 변형률

한편, 그림 1(a), (b), (c)는 각각 철근콘크리트 휨재의 단면, 시간 t_0 와 t 에서 휨모멘트를 받는 철근콘크리트 휨재(보 또는 슬래브) 균열단면의 변형률 및 응력을 보여준다. 철근콘크리트 휨재는 복근단면이다. 시간 t_0 에 재하된 휨모멘트에 의하여 발생된 즉시곡률은 ψ_0 이고, 이때 압축대 콘크리트 최외단의 즉시 탄성변형률 및 응력은 각각 ϵ_{c0} , σ_{c0} 이고 인장철근의 변형률과 응력은 각각 ϵ_{s0} , σ_{s0} 이다. (그림 1(b) 참조) 시간 t 에서 장기곡률은 ψ 이고, 압축대 콘크리트 최외단의 장기변형률과 응력은 각각 ϵ_c , σ_c 이고 인장철근의 장기변형률과 응력은 각각 ϵ_s , σ_s 이다. (그림 1(c) 참조) 일반적으로 장기변형이 발생한 경우 콘크리트의 응력과 변형률의 중립축이 일치하지 않는다. 따라서 그림 1(c)에 나타난 응력 및 변형률의 중립축 위치를 서로 다르다. 간편한 휨재의 장기변형 평가를 위하여 다음의 세 가지 가정을 사용하였다.

- 1) 균열단면에서 콘크리트의 인장응력을 무시한다.
- 2) 시간 t_0 에서의 인장철근의 즉시 탄성변형률 ϵ_{s0} 와 시간 t 에서 인장철근의 장기변형률 ϵ_s 는 같다. 다시 말해, 휨모멘트가 장기간 재하되더라도 인장철근의 응력 및 변형률은 콘크리트의 장기변형에 관계없이 일정하다.
- 3) 시간 t_0 로부터 t 까지의 재하기간 동안 감소된 콘크리트 압축응력 증분의 분포는 그림 1(d)와 같이 삼각형으로 가정한다.

그림 1(d)에 나타낸 바와 같이 재하가 종료되는 시간 t 에는 응력재분배로 인하여 최외단 콘크리트의 압축 응력이 $\Delta\sigma_c$ 만큼 감소된다. 따라서 시간 t_0 로부터 t 까지의 재하기간 동안 감소된 콘크리트의 압축력 ΔP_c 와 증가된 압축철근의 압축력 ΔP_s 는 다음과 같다.

$$\Delta P_c \approx \frac{1}{2} \Delta\sigma_c (b c_{\Delta\sigma}), \quad \Delta P_s = (\psi - \psi_0)(d - d') E_s A_s' \quad (2)$$

여기서, b = 휨재 단면의 너비, $c_{\Delta\sigma}$ = 즉시 및 장기거동에 의한 콘크리트 응력증분의 깊이(그림 1(d) 참조), A_s' = 압축철근의 단면적, d = 단면 유효깊이, d' = 압축철근의 순피복두께. 시간 t_0 로부터 t 까지의 재하기간 동안 철근콘크리트 단면에 작용하는 축력과 모멘트는 항상 일정하므로, 식(1)의 감소된 콘크리트 압축력과 증가된 철근 압축력에 의한 축력 및 휨모멘트 증분이 0가 되어야 한다. 이러한 평형조건식과 식(2)를 정리하여 식 (1)에 대입하면, 철근콘크리트 휨재의 장기곡률을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\psi = \psi_0 + K_{crF} \psi_0 + K_{shF} \left(\frac{\epsilon_{sh}}{d} \right) \quad (3)$$

$$K_{crF} = \frac{\left(\frac{c_0}{d} \right) \phi}{1 + \frac{2}{3} n \rho' \left(\frac{d}{d'} - 1 \right) (1 + \chi \phi)}, \quad K_{shF} = \frac{1}{1 + \frac{2}{3} n \rho' \left(\frac{d}{d'} - 1 \right) (1 + \chi \phi)} \quad (4)$$

여기서, K_{crF} 과 K_{shF} 는 크리프 및 건조수축에 의한 휨변형확대계수이다. 식(3) 및 (4)에 나타난 바와 같이, 철근콘크리트 휨재의 장기처짐은 콘크리트 초기강성(E_{c0} 또는 n), 배근상세(d 및 d'), 압축철근비(ρ'), 즉시재하에 의한 중립축 거리(c_0) 등의 영향을 받는다.

3. 장기처짐 평가식

철근콘크리트 휨재의 장기처짐은 지지조건을 고려하여 각 단면위치에서 장기거동에 의한 장기곡률을 적분함으로써 계산할 수 있다. 간편한 계산을 위하여 근사적으로 장기거동에 의한 곡률분포를 포물선으로 가정하여 계산한다. Fig. 5는 단순보, 일단연속보, 양단연속보의 장기처짐 계산을 위하여 가정한 곡률분포를 보여주는데, 각각의 곡률에 대하여 이중적분으로 구한 보 중앙부의 장기처짐 Δ 은 다음과 같다.

$$\text{단순보 또는 슬래브:} \quad \Delta = \frac{5}{48} \psi_M l^2 \quad (5)$$

$$\text{일단연속 보 또는 슬래브:} \quad \Delta = \frac{5}{48} \psi_M l_0^2, \quad l_0 \approx \left[0.2 \left(\frac{\psi_M}{\psi_R} \right) + 0.64 \right] l \quad (6)$$

$$\text{양단연속 보 또는 슬래브:} \quad \Delta = \frac{1}{96} (\psi_L + 10\psi_M + \psi_R) l^2 \quad (7)$$

여기서, l_0 = 일단연속 부재에서 곡률이 0인 지점 사이의 길이(그림 2(b)), ψ_M , ψ_R , ψ_L = 각각 부재 중앙

부, 우측 지점, 좌측 지점에서의 장기곡률로서(그림 2), 식(3)으로부터 결정된다.

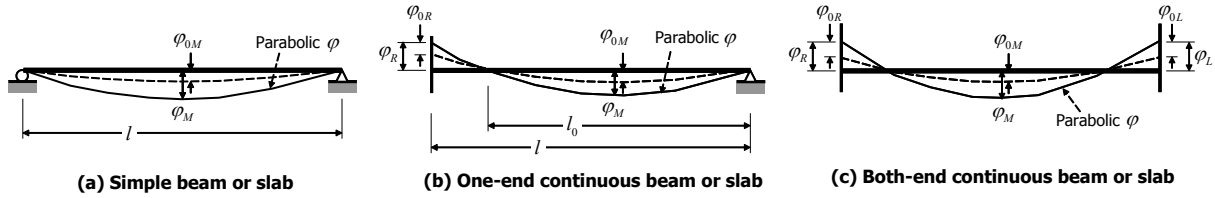


그림 2 지점 조건에 따른 장기곡률 분포 및 처짐 계산

요약 및 결론

지속하중을 받는 철근콘크리트 휨부재는 크리프, 건조수축 등 장기거동에 의하여 처짐이 증가된다. ACI318-08, KCI 2007 등 현행 구조설계기준의 장기처짐 평가방법은 인장 및 압축 철근비, 배근상세, 재료강도 등 설계변수에 따른 장기처짐의 변화를 합리적으로 고려하기 어렵다. 본 연구에서는 장기거동에 의한 힘의 평형조건과 변형률 적합조건을 사용하여 크리프와 건조수축에 의한 철근콘크리트 균열단면의 장기변형을 예측하는 간략 평가식을 제안하였다. 향후 다양한 실험 자료에 대한 제안식의 검증을 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호: 09 첨단도시 A01)에 의해 수행되었음.

참고문헌

- ACI Committee 209.** Prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures. ACI 209R-02, American Concrete Institute, 1997.
- ACI Committee 318,** Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-08) and Commentary (ACI318R-05), American Concrete Institute, 2008.
- CEB** (Comite Euro-International Du Beton), CEB-FIP model code 1990. Bull. d'Inf. N213/214. Thomas Telford, 1993.
- CEN.** Eurocode 2. Design of Concrete Structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. En1992-1-1, Euro. Comm. Stand., Brussels. 2004.
- Mari, R. A., Bairan, J. M., and Duarte, N.** "Long-term deflections in cracked reinforced concrete flexural members", Engineering Structures, 32(6), 2010.
- Yu, W.-W., and Winter, G.,** "Instantaneous and Long-Time Deflections of Reinforced Concrete Beams Under Working Loads", Journal of the American Concrete Institute, 32(1), 1960, pp.30-50.
- Samra, R. M.,** "Renewed Assessment of Creep and Shrinkage Effects in Reinforced Concrete Beams", ACI Structural Journal, 94(6), 1997, pp.745-751.
- 이상순, 김용빈, 김진근, 이수관,** "크리프에 의한 철근콘크리트 보의 처짐 예측", 한국콘크리트학회논문집, 10(6), 1998, pp.253-260.