

RC 짧은보($a/d < 2.5$)의 순간처짐 산정에 대한 연구

Instantaneous Deflection calculation Incorporated with Internal Force State Factor In RC short beams($a/d < 2.5$)

오 현 철^{*}
Oh, Hyun Chul

정 제 평^{**}
Jeong, Jae Pyong

김 우^{***}
Kim, Woo

ABSTRACT

This paper describes an attempt to develop a new equation to calculate deflection for reinforced concrete deep beams($a/d < 2.5$). The main idea incorporated with this equation is the internal force state factor(α) which is able to express global state of internal force flow in cracked reinforced concrete beams subjected to shear and bending. A new equation for deflection calculation using internal force state factor(α) provides more exact result of deflection in reinforced concrete deep beams than the equation predicted by the current code provisions.

1. 서 론

철근콘크리트 구조물에서 처짐은 구조물의 기능적인 측면 뿐 아니라 사용성의 측면 등에서 중요한 인자로 인식되어져 많은 분야의 설계 및 시공에 활용키 위한 연구들이 계속되어지고 있는 분야이다. 현재 적용되고 있는 처짐공식으로는 ACI CODE, ACI-SEASC(UBC) CODE, CEB CODE, Trost Method 등이 있고, 이러한 방법들의 기본원리인 평균단면2차모멘트 개념(ACI Committee 435)이나 평균곡률의 개념(CEB-FIP MC 90, Euro code) 등은 모두 탄성이론을 기초한 변형전의 평면은 변형 후에도 평면으로 유지된다는 평면보존법칙을 전제로 하고 있다. 그러나 경간이 짧은보 일수록 전단에 의한 뒤틀(warping)현상이 현저해지면서 평면보존법칙을 적용하는데 한계가 있다. 따라서 탄성응력 범위 안에서도 휨응력은 선형으로 분포 하지 않고, 내부모멘트 팔길이(z)가 휨균열이후에 짧아지는 아치현상이 현저해지며, 하부 인장재인 철근의 변형률이 기존 탄성보이론에 의한 값보다 훨씬 커져 보의 곡률이 크게 증가하게 된다. 그러므로, 이러한 짧은보($a/d < 2.5$)의 처짐 함수에는 기존의 처짐 영향인자보다 아치 작용에 의한 철근의 변형률의 처짐 인자로의 반영이 필요하게 된다. 본 연구는 이러한 짧은 보의 처짐을 아치현상을 설명하는 내력상태계수(α)를 이용하여 하부 인장재인 철근의 변형률로부터 곡률을 유도하고 이를 이용한 처짐을 계산하여 기존이론 및 실제 처짐과 비교 분석하여 새로운 처짐산정식을 제안하고자 한다.

* 정회원, 전남대학교 토목공학과 석사과정
** 정회원, 전남대학교 토목공학과 박사과정
*** 정회원, 전남대학교 토목공학과 교수

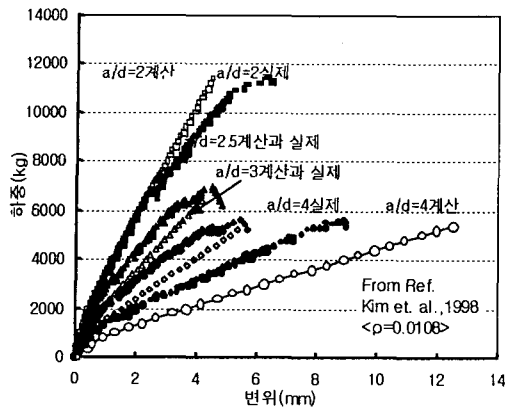


그림 1 실제처짐과 계산처짐의 비교

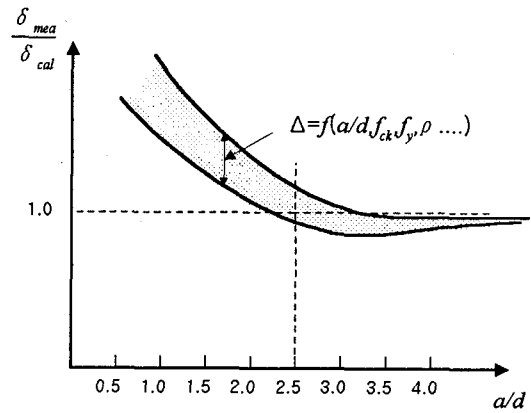


그림 2 계산처짐에 대한 실제처짐 비의 양상

실제로 그림 1과 같이 현 설계규정에 제안된 ACI 처짐값과 실험으로 측정된 값의 차이를 보면 다른 보들과는 다르게 짧은 보에서는 처짐이 과소산정되고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 그림 2에 잘 나타나 있다. 물론, 실제 측정된 시험체의 콘크리트 압축강도나 철근비 혹은 철근의 항복강도 등에 의하여 그 양상의 차이를 보여 그림 2와 같이 그 양상의 범주가 넓게 분포하여 정량적인 표현은 불가능 하였지만, 휨파괴의 양상을 나타내는 긴 보에 비하여 전단파괴의 위험이 있는 짧은 보에서의 처짐은 안전측으로 설계에 반영하지 못하고 있음을 잘 보여주고 있다.

2. 짧은보의 처짐 영향인자

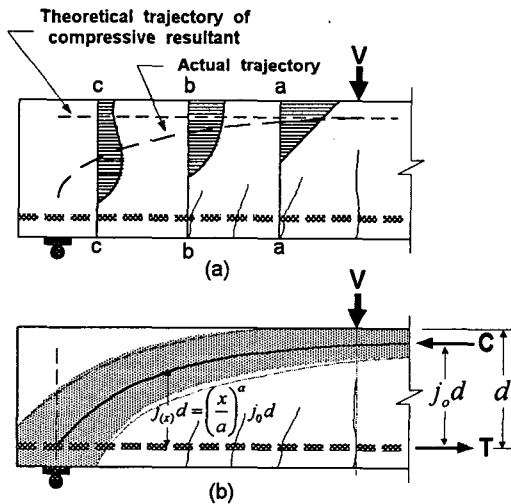


그림 3 휨균열이 발생된 철근콘크리트 보의 내력분포
(a) 압축응력의 실제 분포와 압축합력점의 궤적
(b) 아치모델(Kim et al., 1998)

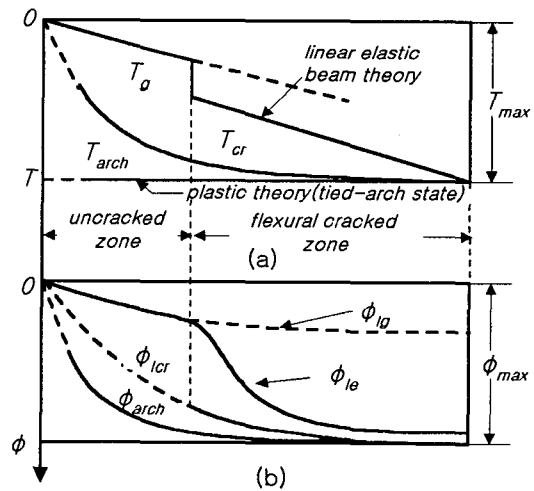


그림 4 철근인장력 증가와 곡률의 변화
(a) 아치현상을 고려한 철근인장력 증가
(b) 각 내력상태에 따른 곡률의 변화

철근콘크리트보에서 균열이 발생하고 난 후의 응력상태는 고전이론으로 접근하는데 큰 한계를 갖고 있다. 즉 보에 균열이 발생하고 난 후의 응력분포는 고전이론에 의한 분포와는 크게 상이하며, 중립축의 위치는 지점쪽에 가까울수록 아래로 이동하게 된다. 따라서, 콘크리트 압축력선의 궤적은 그림 3(a)와 같이 아치모양과 비슷하게 된다. 이것을 보의 아치현상이라 한다. 이때 기존이론에서 일정하게 변하지 않던 내부모멘트 팔길이(j_d)가 지점으로 갈수록 작아지게 되고, 이러한 현상은 다음 식과 같이 표현되는 철근인장력이 증가하는 상태로 나타나게 된다.

$$T = \frac{M}{j_{(x)}d} \quad (1)$$

아치현상은 많은 연구들^(2,4)에 의하여 특히 짧은보에서 현저히 나타나는 것으로 알려져 있다. 전단경간이 짧은 보에서는 철근의 부착이 소실되는 파괴 직전의 하중단계에서 균열된 부분을 제외한 콘크리트 리브(rib)와 철근으로 된 타이(tie)로 구성되는 타이드-아치작용이 현저하게 나타난다. 이는 짧은보의 휨균열 후의 하중상태에서 하중점과 지점을 연결하는 대각부재로 주응력방향이 형성된다는 의미이다. 또 이때의 내부모멘트 팔길이(j_d)는 변화 폭이 매우 심하고 이로 인한 철근 인장력의 증가 또한 그림 4(a)와 같이 현저히 나타남을 알 수 있다. 인장축의 철근력이 증가하게 되면 철근의 변형률이 증가하게 되고, 이때 전체적인 보의 처짐을 표현하는 곡률(Φ_{arch})은 그림 4(b)와 같이 지점에 가까울수록 유효단면의 곡률 Φ_{ie} 뿐 아니라 균열단면의 곡률 Φ_{cr} 값보다 훨씬 큰값으로 나타남을 알 수 있다. 이러한 차이를 정량화 하여 처짐산정에 반영하기 위해서는 아치현상에 의한 내력상태의 변화를 정량적으로 반영할 수 있는 표현기구의 필요성이 제기 된다. 최근에 발표된 Kim의 연구¹⁾에서는 지금까지의 아치현상에 대한 개념적이고 정성적이던 한계를 벗어나 이러한 아치현상을 정량적으로 표현하려는 식을 유도하고 그 과정을 설명하였다. 그는 그림 3(b)와 같이 실험을 통하여 압축합력선의 궤적을 조사하고 그것을 같은 지수함수 형태의 곡선으로 표시하였다.

$$j_{(x)}d = \left(\frac{x}{a}\right)^\alpha j_o d \quad 0 < \alpha \leq 1.0 \quad (2)$$

여기서, $j_o d$ 는 순수 휨구간에서 선형 탄성이론으로 계산한 모멘트 팔길이이고, $j_{(x)}d$ 는 지점에서 x 만큼 떨어진 단면의 실제 모멘트 팔길이이고, a 는 전단 경간이다. 이 함수식은 휨균열 발생 후의 철근콘크리트보의 내력상태를 종합적으로 보여줄 수 있는 식으로 이 식에서 변수인 ' α '를 내력상태계수로 정의하였다. 본 연구에서 사용되는 내력상태계수(α)는 Kim의 연구¹⁾에서 제시한 α 값을 바탕으로 하중이 증가하면서 변해가는 처짐을 표현하기 위하여 하중이력에 따른 α 를 계산하여 사용하였다.

3. 처짐산정

3.1 처짐산정의 기본가정

본 연구에서는 다음과 같은 몇 가지 가정 하에서 내력상태계수(α)를 이용한 처짐식을 제안 하였다. 중립축에서부터 철근까지 거리를 내력상태계수(α)의 함수로 가정한다. 즉, 짧은보에서는 아치(arch) 효과로 인한 내력상태의 변화이외에는 다른 변수 없이 중립축이 변화한다는 것이다. 여기서 중립축의 위치는 식 (2)로 표현된 그림 5(a)에 나타낸 것과 같이 압축합력점의 궤적과 유사한 형태로 변한다고

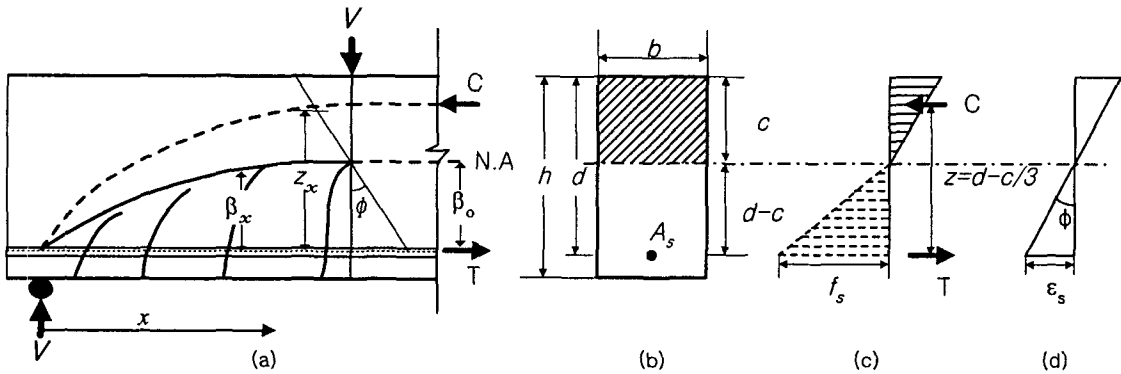
가정한다. 그러므로, Kim의 연구¹⁾에서 제안된 식 (2)로부터 중립축의 위치 β_x 를 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\beta_x = \left(\frac{x}{a}\right)^a \beta_o \quad (3)$$

또 균열이 완전히 진전하여 균열단면인 상태임을 전제하고 다음 식과 같이 철근의 인장변형률을 이용하여 곡률(ϕ)을 계산할 수 있다.

$$\phi = \frac{\epsilon_s}{d-c} = \frac{\epsilon_s}{\beta_x} \quad (4)$$

여기서, ϵ_s 는 아치현상이 반영된 철근의 변형률이며, $c = kd = (-np + \sqrt{(np)^2 + 2np})d$ 로 계산된 값을 사용한다.



3.2 처짐공식 유도

식 (1)로부터 $T_s = \left(\frac{a}{x}\right)^a \cdot T_o$ 와 같고, 이식을 식 $\epsilon_s = T_s / E_s A_s$ 에 대입하여 철근변형률(ϵ_s)를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon_s = \frac{T_o}{A_s \cdot E_s} \left(\frac{a}{x}\right)^a \quad (5)$$

식 (1)과 식 (3),(5)를 식 (4)에 대입하여 단면의 곡률을 구할 수 있다.

$$\phi = \frac{V \cdot a^{2a}}{A_s \cdot E_s \cdot z_o \cdot \beta_o} \cdot x^{1-2a} \quad (6)$$

이 곡률을 두 번 적분하고 경계조건을 도입하여 처짐을 구하면 다음과 같이 표현된다.

$$\delta_{(x)} = K \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \left\{ \frac{1}{(1+\lambda)} \cdot x^{(1+\lambda)} - \left(\frac{L}{2}\right)^\lambda \cdot x \right\} \quad (7)$$

여기서, $K = \frac{V \cdot a^{2a}}{A_s \cdot E_s \cdot z_o \cdot \beta_o}$ 이고, $\lambda = (2-2a)$ 이다.

위와 같은 일반식으로부터 지점으로부터 $L/2$ 지점의 최대처짐은 식 (7)의 x 값에 $L/2$ 를 대입하면 다음과 같이 표현된다.

$$\delta_{\max} = \frac{a \cdot K}{-\lambda} \cdot \left(\frac{L}{2}\right)^\lambda + \frac{a^{(1+\lambda)} \cdot K}{\lambda \cdot (1+\lambda)} \quad (8)$$

3.3 결과 분석

본 연구에서는 Kim의 연구¹⁾에서 수행 되어진 전단경간 대 유효깊이의 비(a/d)가 2이고 휨 철근비가 각각 0.0108, 0.0194인 2개보의 처짐을 실제값과 ACI 기준에 제시된 계산값 그리고 본 연구에서 제안한 내력상태계수의 개념을 도입한 처짐 산정식으로 구한 값들을 그림 6, 그림 7과 같이 비교하였다. 현행설계기준이나 본 연구에서 제안한 계산값들은 모두 하중이력에 따른 처짐값을 정확히 표현하기 위해 단위하중에 따른 처짐량의 증가분을 누적시키는 방법으로 처짐을 산정하였다.

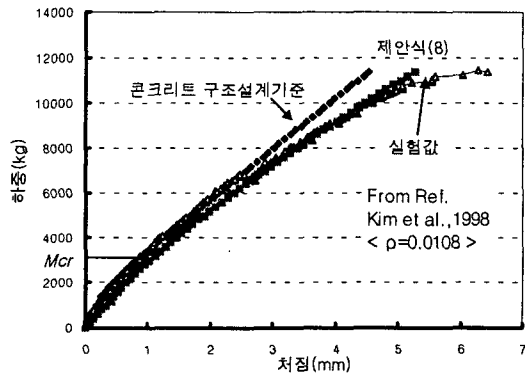


그림 6 $a/d=2$ 이고 철근비가 1%인 RC보

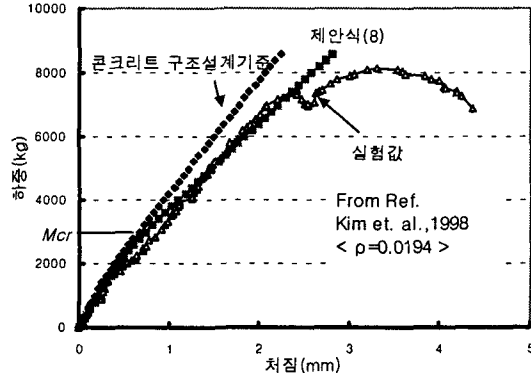


그림 7 $a/d=2$ 이고 철근비가 2%인 RC보

균열 발생 전까지의 처짐은 세 가지 경우가 거의 동일한 양상을 보이나 균열하중(M_{cr})이후부터는 그림 6, 그림 7에서 보인 바와 같이 보의 아치효과를 주 요인으로 설명했던 잉여처짐 증가의 요인들을 기존의 처짐식에서는 제대로 반영하지 못하여 최종 처짐 단계에서는 상당한 차이를 보이고 있음을 알 수 있었다. 그러나 아치효과 등의 처짐 증가 요인들을 내포할 수 있다고 정의되어진 내력상태계수(α)를 이용하여 유도된 본 연구의 처짐 제안식은 초기 단계에서부터 최종 처짐 단계에 이르기까지의 실제 처짐과 매우 유사한 양상을 나타내고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 현행 설계기준의 짧은 보($a/d < 2.5$)에서의 처짐 산정에 관한 규정과 그 과정상에 고려되지 않고 있는 내력상태변화에 대하여 조사하였고, 이를 표현할 수 있는 내력상태계수(α)의 정의로부터 이것을 이용하여 새로운 처짐 산정식을 제안하였다. 연구를 진행하면서 얻은 몇 가지 결론을 정리하면 다음과 같다.

1. 짧은 보($a/d < 2.5$)의 처짐 산정에 있어서 현행설계기준에서 제시하고 있는 방법은 실제 처짐을 정확히 표현하고 있지 못했다. 그림 1과 같이 짧은 보에서는 처짐을 과소하게 산정하는 경향을 나타내고 있었다.
2. 현행 콘크리트구조 설계기준(ACI 기준)에서는 아치 현상과 인장강성효과와 같은 RC보의 내력상태에 영향을 주는 요인들에 대한 연구들이 정성적인 연구의 한계를 벗어나지 못하고 있는 실정인어서

이러한 현상들을 정확히 처짐산정에 반영하지 못하고 있었다.

3. 짧은 보의 처짐은 내력상태계수가 1에 도달할수록 즉, 아치작용이 현저하게 일어날 수록 기존의 처짐공식을 적용하기 힘든 복잡한 단면 응력상태가 나타나므로 이를 고려할 수 있는 방법으로 철근 인장력 증분에 의한 곡률을 계산하여 처짐을 유도 할 수 있다.
4. RC보의 복잡한 내력상태를 표현할 수 있는 내력상태계수로 짧은 보의 내력상태변화에 따른 처짐의 증감을 감안하여 보다 정확한 처짐을 구할 수 있는 처짐 산정식을 식 (8)과 같이 제안한다.

내력상태계수를 사용하여 유도되어진 처짐 산정식에 관해서는 많은 자료와 실험을 통해서 검증하고 검토하여 수정 보완하여야겠지만, 무엇보다도 본 연구의 큰 의미는 현행설계기준의 짧은 보의 처짐산정에서 간과하고 있는 아치효과 등에 의한 처짐 증가현상을 신중히 검토하고 설계에 반영하도록 상기시키는데 있다 할 것이다. 짧은 보의 처짐 증가의 요인들에 대한 것들을 충분히 고려하지 못한 기존식들의 부족함을 증명하기에는 제시된 시험체의 수량이 미비한 점이 없지는 않으나, 처짐 산정에 있어서 안전측으로 계산되어지지 않을 경우에 생길 수 있는 위험성을 고려할 때 더 정확한 계산을 위한 실험과 연구들이 계속되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 R01-1999-0132)지원으로 수행된 결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Kim,DJ., Kim, W., and White, R. N., "Prediction of Reinforcement Tension Produced by Arch Action in RC Beams" ASCE Journal of Structural Engineering, V.124 No. 6, Jun. 1988 pp. 611 - 622.
2. Kotsovos, M.D., "Fracture Process of Concrete Under Generalized Stress States," Materiaux et Constructions, Vol.12, No.72, Dec. 1979, pp.431-446.
3. Richard T. Horton and Maher K. Tadros., "Deflection of Reinforced Masonry Members," ACI Structural Journal, V.87, No. 4, July-August 1990, pp.453-463.
4. Kini, G.N.J., "The Riddle of Shear Failure and Its Solution," ACI Journal, Vo.61, No. 4, Apr. 1964, pp.441-467.