



인장증강효과에 기반한 콘크리트 구조 부재의 사용성능 검증

이기열¹⁾ · 김민중²⁾ · 김 우²⁾ · 이화민^{3)*}

¹⁾순천제일대학교 토목과 ²⁾전남대학교 토목공학과 ³⁾순천향대학교 컴퓨터소프트웨어공학과

Serviceability Verification Based on Tension Stiffening Effect in Structural Concrete Members

Gi-Yeol Lee,¹⁾ Min-Joong Kim,²⁾ Woo Kim,²⁾ and Hwa-Min Lee^{3)*}

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Suncheon First College, Suncheon 540-744, Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

³⁾Dept. of Computer Software Engineering, Soonchunhyang University, Asan 336-745, Korea

ABSTRACT This paper is about proposal of a calculation method and development of an analytical program for predicting crack width and deflection in structural concrete members. The proposed method numerically calculate stresses in steel rebar using a parabola-rectangle stress-strain curve and a modified tension stiffening factor considering the effect of the cover thickness. Based on the study results, a calculation method to predict crack width and deflection in reinforced concrete flexural members is proposed utilizing effective tension area and idealized tension chord as well as effective moment-curvature relationship considering tension stiffening effect. The calculation method was applied to the test specimens available in literatures. The study results showed that the crack width and deflections predicted by the proposed method were closed to the experimentally measured data compared the current design code provisions.

Keyword : crack width, curvature, deflection, parabola-rectangle stress-strain curve, tension stiffening effect

1. 서 론

철근콘크리트 휨부재의 사용성 검토는 사용하중구간에서 발생하는 처짐, 균열폭, 피로 등이 허용하는 사용하중 범위 내에 존재하는지 예측하고 조사하는 것을 의미한다.¹⁾ 최근 콘크리트 구조물의 설계 및 시공 기술이 발전함에 따라 단면이 축소되고 대형화되면서 주인장 철근에 높은 인장력이 발생하기 때문에, 철근의 변형조건을 중요한 변수로 갖는 균열폭 및 처짐에 대해서 성능에 기반한 예측 및 허용한계를 정확하게 결정하는 과정의 중요성이 심화되고 있다.

한계상태설계법을 기반으로 하는 CEB-FIP Model Code 1990²⁾(MC 90)과 EUROCODE 2³⁾(EC 2)에서는 사용성능 검증을 위한 균열폭과 처짐 계산에 인장증강효과를 중요한 변수로 이용한다. 그런데 이들 설계기준에서 규정하는 인장증강효과는 전반부 연구⁴⁾에서 밝힌 바와 같이 피복두께의 변화에 따른 균열거동을 적절하게 평가하지 못하고 있다.

철근응력은 인장증강효과의 크기를 결정하는데 중요한 변수가 된다. MC 90과 EC 2 및 콘크리트구조설계기준-부록⁵⁾(KCI)에서는 사용성능 검증을 위한 철근응력 계산에 있어서 콘크리트 압축응력-변형률 관계를 선형으로 가정하는 탄성설계 개념을 이용한다. 그러나 부재 설계는 극한한계상태 검증 규정에 의해 수행되기 때문에 철근에 높은 응력이 유발되는 경우가 있다. 최승원 등^{6,7)}은 콘크리트의 응력-변형률 관계에 대해서 EC 2에서 제시하는 재료 모델을 기반으로 철근응력을 정확하게 계산하는 방법을 제안하였다. 그리고, 이 결과를 이용하여 처짐과 균열폭을 산정하고, MC 90과 EC 2에서 규정하는 인장증강효과 모델의 영향을 분석하였다.

콘크리트 구조 부재의 사용성능을 검증하기 위해서는 각 설계기준에서 규정하는 균열폭과 처짐 계산식을 이용하여야 한다. 그런데 이들 계산식은 다양한 변수 및 실험에 의한 경험식들을 포함하고 있기 때문에 계산 과정이 복잡해지는 단점이 있다.

이 연구에서는 사용성능 검증에 중요한 역할을 하는 인장증강효과를 정확히 평가하기 위하여 전반부 연구⁴⁾에서 제안한 피복두께의 변화에 따른 인장증강계수를 도입하였다. 그리고 철근응력을 정확하게 계산하기 위하여 콘크리트의 응력-변형률 관계를 포물-사각형(parabola-

*Corresponding author E-mail: leehm@sch.ac.kr

Received August 17, 2011, Revised November 20, 2011,

Accepted November 23, 2011

©2012 by Korea Concrete Institute

rectangle) 곡선(이하 p-r 곡선)으로 정의하였다. 이와 함께 p-r 곡선을 이용한 철근응력 산정과 이를 이용한 균열폭 및 처짐 산정 방법을 제안하고, 계산을 자동으로 수행할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 이로부터 각 설계기준들에서 제시하는 사용성능 규정을 평가하고, 제안된 인장증강효과를 이용한 사용성능 검증의 타당성을 확인하였다.

2. 설계기준별 사용성능 검증 규정

2.1 균열폭 계산

사용성능 검증을 위한 균열폭과 처짐 계산 방법은 Fig. 1(a)에 보인 철근콘크리트 부재의 직접인장실험 결과를 바탕으로 유도된 것이다.

균열폭은 Fig. 1(b)에 보인 것과 같이 부착응력이 전달되는 전달길이(transfer length) l_t 내에서 Fig. 1(c)와 같은 부착응력에 의해 균열면으로부터 철근의 매입길이 방향으로 발생하는 철근의 변형률 ϵ_{sx} 와 콘크리트의 변형률 ϵ_{cx} 의 상대적 차이가 균열면에 누적되는 합으로 정의된다.

$$w = 2 \int_{l_t} (\epsilon_{sx} - \epsilon_{cx}) dx \quad (1)$$

MC 90, EC 2 및 KCI 설계기준에서는 식 (1)을 기반으로 하여 Fig. 1(d)와 같이 평균변형률 개념을 이용하여 균열폭 계산식을 규정한다. 즉, 인접 균열 사이의 철근 평균변형률 ϵ_{sm} 과 콘크리트 평균변형률 ϵ_{cm} 의 차이에 건조수축에 의한 변형률 ϵ_{cs} 을 고려한 값에 전달 길이로부터 정의되는 최대균열간격 $s_{r, \max}$ 을 곱하여 설

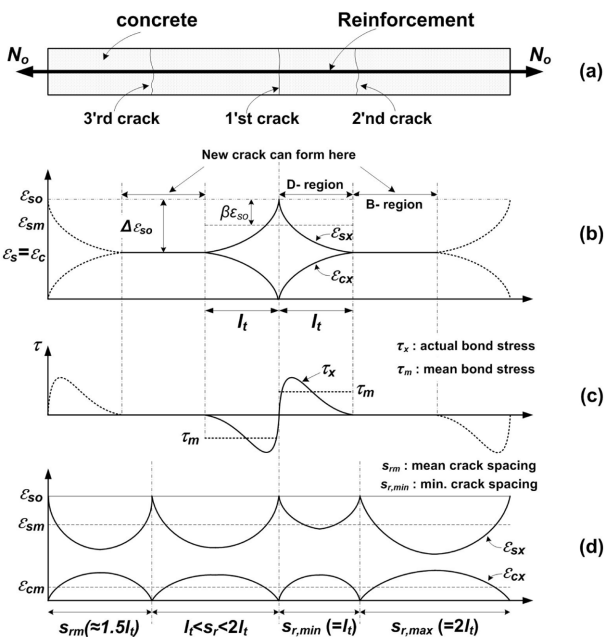


Fig. 1 Distribution of strain and bond stress in tension members (a) tension members (b) crack formation stage (c) bond stress at crack formation stage (d) stabilized cracking stage

계균열폭 w_k 을 계산하도록 다음과 같이 규정한다.

$$w_k = s_{r, \max} (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} - \epsilon_{cs}) \quad (2)$$

식 (2)에 대해서 철근과 콘크리트의 평균변형률 차이는 전반부 연구⁴⁾에서 제시한 MC 90의 평균변형률(인장증강효과)을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{f_{so}}{E_s} - \beta_l \frac{(1 + n\rho_{ef})f_{ct}}{E_s\rho_{ef}} \quad (3)$$

여기서, f_{so} 는 균열면에서의 철근 응력(MPa), f_{ct} 는 콘크리트의 평균 인장강도(MPa), E_s 는 철근의 탄성계수(MPa), n 은 탄성계수 비이다. β_l 는 부착 특성을 반영하는 상수로서, KCI 및 MC 90에서는 균열안정화단계에서 단기하중일때 0.6, 장기하중 또는 반복하중일때 0.38로 정의한다. EC 2에서는 Part I(general rules and rules for building)에서 하중형태에 따른 상수로서 단기하중일때 0.6, 장기하중일때 0.4로 정의하며, Part II(concrete bridges)에서는 하중형태의 구분없이 0.4로 정의한다.

그런데 식 (3)은 Fig. 2(a)-(c)에 보인 것과 같은 균열이 발생한 휨부재의 인장 영역 일부를 Fig. 2(d)와 같이 인장 현재(tension chord)로 이상화하여 앞에서 설명한 직접인장 부재의 거동을 적용한 것이다. 따라서 이 식을 단면 깊이에 따라 변하는 휨부재의 인장 현재에 적용하기 위해서는 Fig. 2(d)에 보인 인장철근을 포함하는 인장 현재에 대해서 Fig. 3과 같이 유효깊이 d_{ef} 를 갖는 음영으로 표시한 유효인장면적 $A_{c, ef}$ 로서 정의해야 한다. 따라서 유효인장철근비 ρ_{ef} 는 이상에서 결정된 콘크리트 유효인장면적을 이용하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\rho_{ef} = \frac{A_s}{A_{c, ef}} = \frac{A_s}{b \times d_{ef}} \quad (4)$$

여기서, A_s 는 유효인장면적 내에 있는 철근량(mm^2)이다. 최대균열간격은 균열안정화단계를 기준으로 KCI, MC

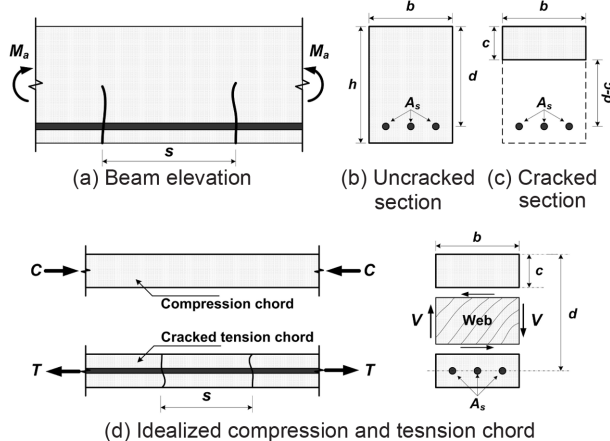


Fig. 2 Cracked RC flexural member and idealized chord model

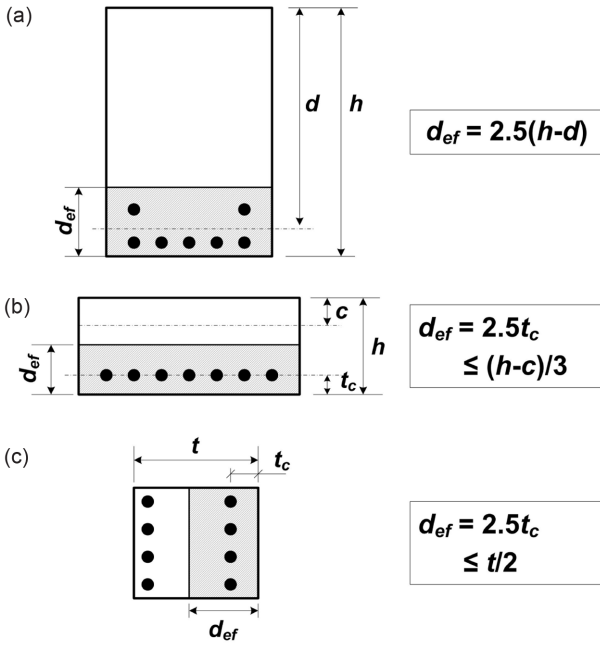


Fig. 3 Effective tension area, (a) beams dominantly subjected to flexure (b) slabs subjected to flexure (c) tension members

90 및 EC 2-Part II에서는 다음 식 (5a)로, EC 2-Part I에서는 식 (5b)와 같이 정의한다.

$$s_{r, \max} = \frac{d_b}{3.6\rho_{ef}} \quad (5a)$$

$$s_{r, \max} = 3.4c + 0.425e_1e_2\frac{d_b}{\rho_{ef}} \quad (5b)$$

여기서, d_b 는 철근 직경(mm), c 는 피복두께(mm), e_1 은 철근의 부착특성 계수로서 부착성능이 우수한 이형철근일때 0.8, 원형철근일때 1.6이고, e_2 는 변형률 분포 계수로서 휨일때 0.5, 순수 인장일때 1.0이다.

JSCE의 Standard specifications for concrete structures-2002 “Structural Performance Verification”⁸⁾(JSCE 02)에서는 기존의 균열폭 예측식과 최근의 연구 결과를 반영하여 휨균열폭(flexural crack width)을 다음과 같이 규정한다.

$$w = 1.1 j_1 j_2 j_3 [4c + 0.7(c_s - d_b)] \left(\frac{f_{s0}}{E_s} + \varepsilon_{csd} \right) \quad (6)$$

여기서, j_1 은 철근표면상수로서 이형철근일때 1.0, 원형철근일때 1.3이고, j_2 는 다음 식 (7a)로 계산되는 콘크리트 강도상수이며, j_3 는 다음 식 (7b)로 계산되는 인장철근 배치층(layer)에 대한 상수이다. 또한, c 는 피복두께(mm), c_s 는 인장철근 중심간의 거리(mm), ε_{csd} 는 건조수축과 크리프에 의한 압축변형률로서 일반적인 경우에는 150×10^{-6} , 고강도 콘크리트에서는 100×10^{-6} 으로 규정한다.

$$j_2 = \frac{15}{f_{ck} + 20} + 0.7 \quad (7a)$$

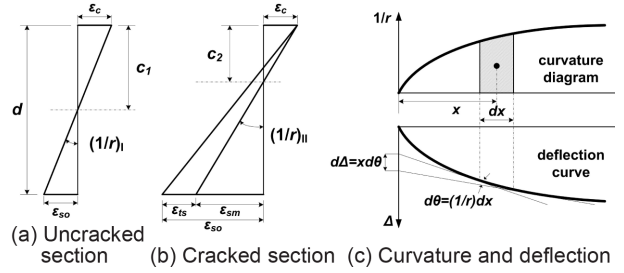


Fig. 4 Strain distribution and deflection curve

$$j_3 = \frac{5(n_l + 2)}{7n_l + 8} \quad (7b)$$

여기서, f_{ck} 는 설계기준 압축강도(MPa), n_l 은 인장철근의 배치층 수이다.

이와 다른 형태로 Gergly-Lutz⁹⁾는 많은 실험 자료를 대상으로 균열폭에 영향을 주는 주요 변수들을 통계분석하여 균열폭을 예측하는 식을 제안하였는데, 간편한 적용성 때문에 현재까지도 많이 사용되고 있다.

2.2 처짐 계산

휨을 받는 콘크리트 구조부재의 처짐 계산은 역학적으로 단면의 모멘트-곡률을 적분하는 것으로서, 곡률은 부재의 단위 길이당 각변화량에 해당한다. 그런데 부재 단면의 곡률은 균열 발생에 따라 그 크기가 변화하므로 균열발생 모멘트 M_{cr} 과 하중 증가에 따른 작용모멘트 M_a 에 의해서 $M_a < M_{cr}$ 인 비균열단면과 $M_a \geq M_{cr}$ 인 균열단면으로 구분하여야 한다.

Fig. 4(a)에 보인 비균열단면에서의 곡률 $(1/r)_I$ 은 탄성이론에 의한 역학적 방법에 의해 비교적 정확한 계산이 가능하다. 이와는 다르게 Fig. 4(b)에 보인 균열단면에서는 균열이 계속적으로 형성되어 변형이 크게 증가되는 균열형성단계와 안정화단계로 균열거동 특성을 구분하여야 한다. 그런데 사용성능 검증은 일반적으로 균열안정화단계에서 이루어지므로 이때의 곡률 $(1/r)_{II}$ 은 콘크리트의 인장증강효과를 고려한 주인장철근의 변형률을 이용하여 산정한다. 이상의 조건으로부터 균열발생 조건에 따른 곡률은 다음과 같이 정의된다.

$$\left(\frac{1}{r} \right)_I = \frac{\varepsilon_{s0}}{d - c_1} : \text{uncracked section} \quad (8a)$$

$$\left(\frac{1}{r} \right)_{II} = \left(\frac{\varepsilon_{s0}}{d - c_2} \right) - \left(\frac{\varepsilon_{ts}}{d} \right) : \text{cracked section} \quad (8b)$$

여기서, d 는 유효깊이(mm), c_1 과 c_2 는 균열단계에 따른 압축연단에서 중립축까지 거리(mm), ε_{s0} 는 인장철근의 변형률, ε_{ts} 는 인장증강효과에 의한 변형률이다.

식 (8)의 곡률을 적분하게 되면 Fig. 4(c)와 같이 단면 사이의 처짐각 변화량 $d\theta$ 를 구할 수 있고, 이 처짐각을 다시 적분하면 두 단면 사이의 처짐 Δ 를 계산할 수 있다.

$$\Delta = \int x d\theta = \iint x \left(\frac{1}{r}\right) dx \quad (9)$$

그런데, 휨모멘트를 받는 실제 부재에서는 균열이 발생한 단면과 일부 비균열 단면이 동시에 존재하게 된다. 이러한 조건에서 부재 전 경간에 걸쳐 곡률을 적분하여 처짐을 계산하는 과정은 상당히 복잡하다.

이러한 배경에서 MC 90과 EC 2에서는 다음과 같은 유효곡률 $(1/r)_e$ 을 도입하여 처짐을 간편하게 계산하도록 규정한다.

$$\left(\frac{1}{r}\right)_e = \xi \left(\frac{1}{r}\right)_{II} + (1 - \xi) \left(\frac{1}{r}\right)_I \quad (10)$$

여기서 ξ 는 인장증강효과를 포함하여 균열 발생 정도를 반영하는 분포계수로서 다음과 같다.

$$\xi = 1 - \beta \left(\frac{f_{scr}}{f_{so}}\right)^k \quad (11)$$

여기서, β 는 평균변형률에 영향을 주는 하중형태 계수로서 MC 90에서는 단기하중일때 0.8, 장기하중 및 반복하중일때 0.5이며, EC 2에서는 단기하중일때 1.0, 반복 장기하중일때 0.5이다. k 는 MC 90과 EC 2에서 2.0이다.

이상과 같이 식 (10)에 의해서 부재의 유효곡률이 계산되면 부재 중앙의 처짐 Δ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta = \eta L^2 \left(\frac{1}{r}\right)_e \quad (12)$$

여기서, η 는 하중 형태와 지점 조건에 따른 휨모멘트도의 형태에 따른 값¹⁰⁾이며, L 은 부재 유효경간 길이(mm)이다.

이와는 다르게 KCI와 JSCE 02에서는 식 (10)과 같은 유효곡률과 같은 개념으로서 Branson¹¹⁾이 제안한 다음과 같은 유효단면2차모멘트를 도입하여 처짐을 계산한다.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^\alpha I_{uncrack} + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^\alpha\right] I_{crack} \quad (13)$$

여기서, M_a 는 작용모멘트, M_{cr} 은 균열모멘트, $I_{uncrack}$ 은

비균열단면의 단면2차모멘트, I_{crack} 은 균열단면의 단면2차모멘트이다. α 는 KCI에서 3.0, JSCE 02에서 4.0이다.

식 (13)에 의해 유효단면2차모멘트가 결정되면 부재 중앙의 처짐 Δ 는 다음 식으로 계산한다.

$$\Delta = \eta L^2 \left(\frac{M_a}{E_c I_e}\right) \quad (14)$$

여기서 E_c 는 콘크리트 탄성계수이다.

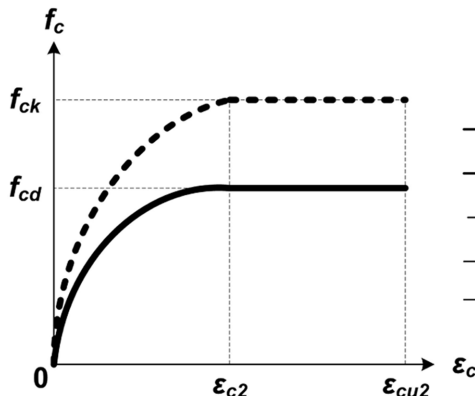
그런데 식 (13)은 단순히 작용하중과 균열모멘트의 관계로부터 휨강성을 계산하므로, 모멘트-곡률 관계를 적용하지 않고 처짐을 간편하게 계산할 수 있다. 이러한 편리성 때문에 KCI와 JSCE 02 및 많은 연구자들이 처짐 검토에 이용하고 있지만, 단순히 경험적 방법에 의해 제안된 유효단면2차모멘트는 재료특성, 하중조건이 다른 경우에 적용하기 위해서는 계수의 수정이나 별도의 계산 방법을 추가로 이용해야 하는 문제점이 있다.¹²⁾

3. 철근응력 산정

앞 절에서 고찰한 사용성능 검증을 위한 균열폭과 처짐 계산식에서 인장증강효과와 함께 중요한 역할을 하는 변수는 철근응력이라고 할 수 있다. 그런데 기존의 설계 기준들에서 철근응력 계산을 위해 적용하는 콘크리트의 응력-변형률 관계에 대해서 휨부재의 단면 설계에 적용하는 응력-변형률 관계 대신 탄성설계에 해당하는 선형 응력-변형률 관계를 적용하고 있다. 이 절에서는 사용성능 검증에 있어서도 휨부재의 해석과 설계에 적용하는 동일한 콘크리트 재료모델을 적용하여 철근응력의 계산이 가능하도록 하였다. 이를 위하여 MC 90 및 EC 2에서 압축 영역 콘크리트의 응력-변형률 관계로 정의하는 Fig. 5와 같은 포물-사각형 응력-변형률 곡선(parabola-rectangle stress-strain curve, p-r 곡선)에 대한 다음 식을 이용하였다.

$$f_c = f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c2}}\right)^n\right] \quad \text{for } 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{c2} \quad (15a)$$

$$f_c = f_{cd} \quad \text{for } \epsilon_{c2} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu2} \quad (15b)$$



| f_{ck} (MPa) | ≤ 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
|--------------------------------|-----------|-----|------|-----|-----|
| ϵ_{c2} (10^{-3}) | 2.0 | 2.3 | 2.4 | 2.5 | 2.6 |
| ϵ_{cu2} (10^{-3}) | 3.5 | 2.9 | 2.7 | 2.6 | 2.6 |
| n | 2.0 | 1.6 | 1.45 | 1.4 | 1.4 |

Fig. 5 Parabola-rectangle stress-strain curve for concrete

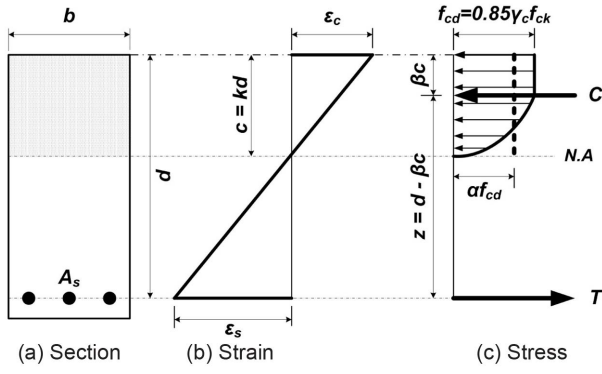


Fig. 6 Distribution of stress and strain for single RC beam

여기서, ε_{c2} 는 최대 응력점의 변형률, ε_{cu2} 는 극한한계변형률, n 은 상층 곡선부의 형상을 결정하는 지수로서, 이들 값은 Fig. 5의 표에 주어진 값이다.

f_{cd} 는 콘크리트 설계압축강도(MPa)로서, 다음과 같이 정의한다.

$$f_{cd} = \alpha_{cc}(f_{ck}/\gamma_c) \quad (16)$$

여기서, α_{cc} 는 장기거동의 영향을 고려하기 위한 유효계수로서 0.85, γ_c 는 콘크리트의 부분안전계수로서 사용한 계상태 검증시에는 1.0, 극한한계상태 검증시에는 1.5이다. 이 연구에서는 사용성능 검증을 위하여 1.0을 사용하였다.

콘크리트의 p-r 곡선을 이용하여 단철근 직사각형 휨부재의 철근응력을 계산하기 위한 단면의 응력 및 변형률 분포를 Fig. 6에 도해하였다.

Fig. 6(a)와 같은 보에 작용 휨모멘트 M 에 의해 인장철근과 압축 영역에 발생하는 합력의 크기는 다음과 같다.

$$C = \alpha f_{cd} b c \quad (17a)$$

$$T = A_s f_s / \gamma_s = \rho f_s b d / \gamma_s \quad (17b)$$

여기서, $\rho = A_s / b d$ 로 정의되는 휨인장 철근비이고, γ_s 는 철근의 부분안전계수로서 사용한계상태 검증시 1.0, 극한한계상태 검증시 1.15이다. 그리고 α 는 단면의 압축 합력을 계산하는데 필요한 계수로서, 압축 영역의 평균응력과 설계강도 f_{cd} 의 비로 정의한다. 이 연구에서는 Fig. 5와 같이 정의한 p-r 곡선에 의한 응력-변형률 관계 식 (15)를 적분하여 계수 α 를 압축측 콘크리트 연단 변형률 ε_c 만의 함수로 유도하여 다음과 같이 정의하였다.

$$\alpha = \frac{\varepsilon_c(6 - \varepsilon_c)}{12} \quad \text{for } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \quad (18a)$$

$$\alpha = \frac{3\varepsilon_c - 2}{3\varepsilon_c} \quad \text{for } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2} \quad (18b)$$

여기서, ε_c 는 연단에서의 콘크리트 변형률로서 천분율(%)

로 표현한다.

식 (17)에서 두 합력 사이의 거리인 모멘트 팔길이 z 는 다음과 같다.

$$z = d - \beta c = (1 - \beta k)d \quad (19)$$

여기서, $k = c/d$ 로 정의된 단면의 유효깊이에 대한 중립축 깊이의 비이다. 그리고 β 는 p-r 곡선으로 정의된 응력 분포의 합력 작용점 위치를 결정하는 계수로서, 압축 연단으로부터 측정된 작용점 깊이와 중립축 깊이의 비로 정의한다. 이 연구에서는 식 (15)로 정의한 응력-변형률 관계와 식 (18)로 정의한 α 를 이용하여 콘크리트 연단 변형률 ε_c 만의 함수로서 유도하여 다음과 같이 정의하였다.

$$\beta = \frac{(8 - \varepsilon_c)}{4(6 - \varepsilon_c)} \quad \text{for } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \quad (20a)$$

$$\beta = \frac{\varepsilon_c(3\varepsilon_c - 4) + 2}{2\varepsilon_c(3\varepsilon_c - 2)} \quad \text{for } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2} \quad (20b)$$

따라서 βc 는 압축 합력 C 의 작용점 위치로서 압축연단으로부터 거리가 되므로, 단면의 휨모멘트는 다음과 같다.

$$M = C z = \alpha f_{cd} \gamma (1 - \beta y) b d^2 \quad (21a)$$

$$M = T z = f_s A_s (1 - \beta y) d / \gamma_s \quad (21b)$$

식 (21b)을 이용하여 철근응력을 계산하기 위해 필요한 y 는 단면의 작용 휨모멘트의 크기에 따라 변하기 때문에 이 값을 구하기 위해서는 단면의 평형조건과 변형 적합조건을 만족할 때까지 시산법을 이용하여야 한다. 따라서 간편한 해석을 위하여 이 연구에서는 단면에 작용하는 휨모멘트의 상대적 크기(intensity)를 나타내는 다음과 같은 무차원 계수 m 을 도입하였다.

$$m = \frac{M}{f_{cd} b d^2} \quad (22)$$

이 계수 m 을 식 (21a)에 대입하여 다시 정리하면 다음과 같이 y 에 대한 해를 얻을 수 있다.

$$y = \frac{1 - \sqrt{1 - 4m\beta/\alpha}}{2\beta} \quad (23)$$

이상의 조건들로부터 철근응력을 계산하기 위하여 압축 연단 변형률 ε_c 를 가정하면, 식 (18)과 식 (20)에 의해 α 와 β 를 구할 수 있다. 이 값을 식 (23)에 대입하여 중립축 깊이비 y 를 계산한 후, 가정한 ε_c 와 함께 Fig. 6(b)의 단면 변형률 분포의 기하 조건에 대입하면 다음과 같이 인장철근의 응력이 결정된다.

$$f_s = E_s \varepsilon_s \left(\frac{1-y}{y} \right) \leq \frac{f_y}{\gamma_s} \quad (24)$$

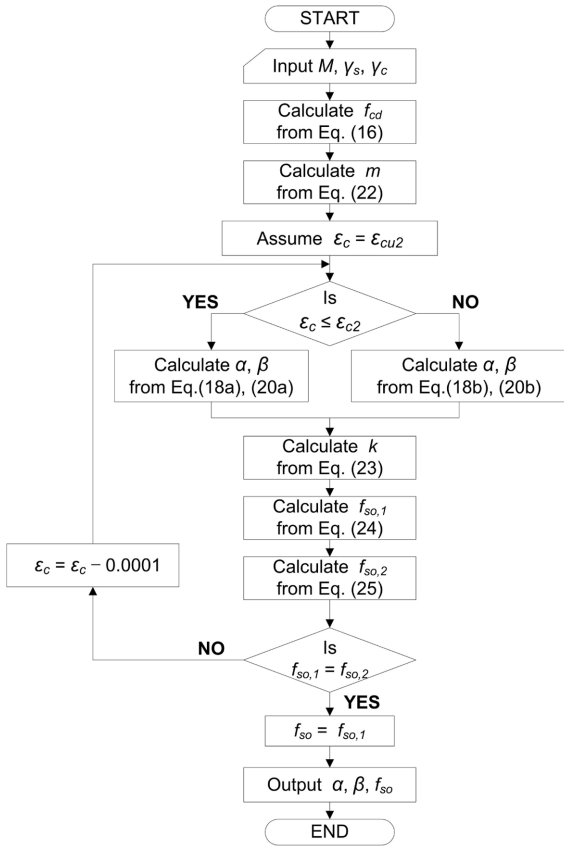


Fig. 7 Algorithm of steel stress calculation

식 (24)로 계산된 철근 응력이 식 (21b)의 휨모멘트 식에서 유도한 다음 식으로 구한 값과 동일하면 가정한 변형률과 이 값으로 계산한 응력은 작용 휨모멘트에 의해 발생한 값이다.

$$f_s = \frac{\gamma_s M}{A_s(1 - \beta y)} d \quad (25)$$

만약, 식 (24)와 식 (25)로 계산한 결과가 동일하지 않으면, 동일할 때까지 연단 변형률 ϵ_c 를 계속 변화시키며 반복 계산하는 시산법을 적용하여 철근 응력을 계산해야 한다. 이 연구에서 제안하는 이상의 과정에 의한 철근응력 계산 방법은 복잡한 수식과 시산법을 이용해야 하는 번거로움이 있다. 이 문제를 해결하기 위하여 Fig. 7에 보인 알고리즘으로 철근응력을 자동계산할 수 있도록 이 연구에서 개발한 균열폭과 처짐 계산 프로그램을 도입하였다.

4. 사용성능 검증

4.1 균열폭

콘크리트 구조 부재의 사용성능 검증을 위한 균열폭 계산 방법의 제안을 위하여 이 연구에서는 앞 절에서 설명한 콘크리트의 재료 특성을 p-r 곡선으로 반영하여 계산한 철근응력과 전반부 연구⁴⁾에서 제안한 인장증강 계수를 도입하였다. 즉, 균열폭 계산을 위한 식 (2)에 균열

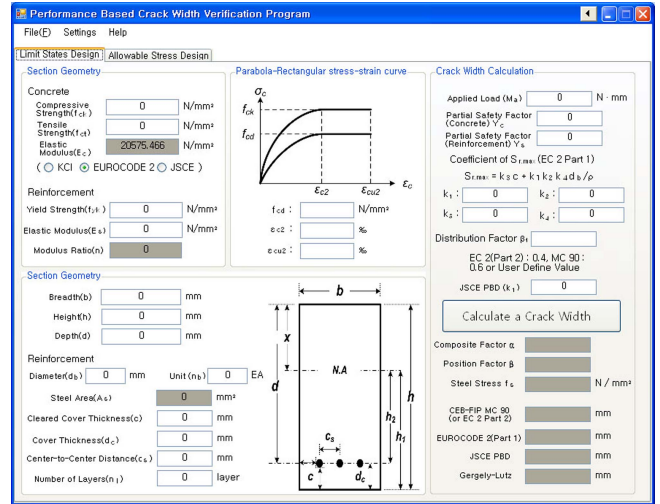


Fig. 8 Crack width calculation program

간격은 MC 90에서 제시하는 식 (4a), 철근과 콘크리트의 변형률 차이는 식 (3)에 전편 논문⁴⁾의 식 (5)를 계수로 반영하였다. 이와 함께 철근응력은 앞 절에서 설명한 계산 방법을 이용하였다. 그리고 계산의 자동화 및 정확성을 위하여 Fig. 8과 같은 균열폭 자동계산 프로그램을 개발하였다.

이 프로그램에는 이 연구에서 제안하는 방법 이외에 앞 절에서 고찰한 설계기준별 균열폭 계산식들과 Gergly-Lutz의 제안식에 의한 계산도 가능하도록 하여 검증의 신뢰성을 확보하였다.

이 연구에서 제안하는 균열폭 계산 방법 및 각 설계기준별 균열폭 계산식의 정확성을 확인하기 위하여 Bilal 등,¹³⁾ 강영진 등,¹⁴⁾ 고원준 등¹⁵⁾이 수행한 휨부재 실험 자료와 비교하여 Fig. 9에 정리하였다. 균열폭 계산에 사용된 상수는 각 설계기준에서 규정하는 값을 이용하였으며, 모든 실험체에서 Fig. 3 및 식 (5)에 의한 유효철근비를 적용하였다. 그리고 설계기준에 적용하는 철근응력은 선형 탄성해석 방법을 이용하여 계산하였다.

Fig. 9를 살펴보면, 이 연구에서 제안하는 방법을 이용하여 계산한 균열폭은 시험체마다 차이는 있지만 사용성능을 평가하는 균열안정화단계에서 다른 설계기준 규정보다 실험 결과를 비교적 정확하게 예측함을 알 수 있다. 그러나 EC 2, JSCE 02의 계산식과 Gergly와 Lutz의 제안식은 균열폭을 상대적으로 과대평가하고 있으며, 이와는 반대로 MC 90은 실험 결과를 과소평가하는 것으로 나타났다.

여기서 특기할 사항은 MC 90과 EC 2-Part 1의 규정으로 계산한 결과가 상이하다는 것으로서, 균열폭 계산을 위한 철근과 콘크리트의 평균변형률 차이는 식 (3)으로서 같지만, 균열간격을 계산하는 식이 서로 다르기 때문이라 판단된다. 즉, MC 90은 유효철근비와 철근직경만을 변수로 갖지만, EC 2-Part 1은 피복두께를 추가로 포함하여 균열간격을 계산하기 때문에 균열간격이 상대적으로 크게 평가된다.

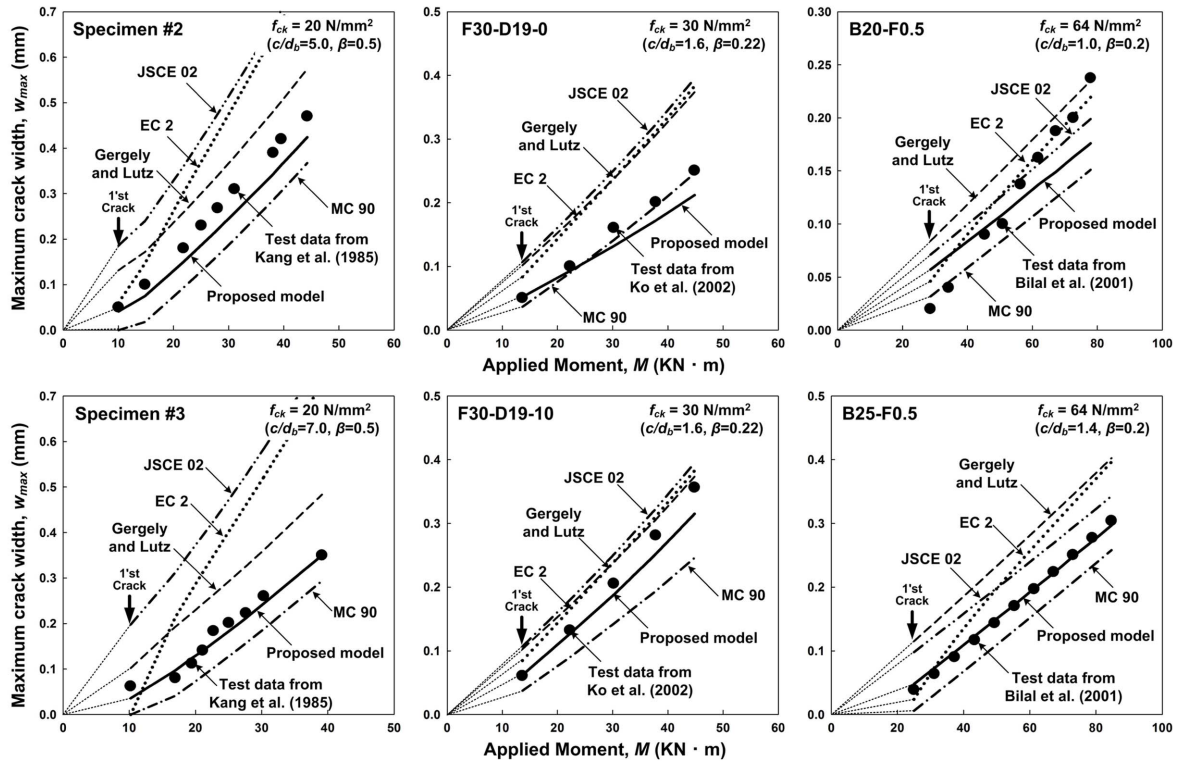


Fig. 9 Comparison of proposed crack width calculation method vs various design codes

Table 1 Statistical analysis of crack width calculation results

| | MC 90 | EC 2 (Part 1) | JSCE 02 | Gergly & Lutz | Proposed model |
|---------|-------|---------------|---------|---------------|----------------|
| Mean | 0.697 | 1.474 | 1.820 | 1.599 | 0.954 |
| Var. | 0.056 | 0.210 | 0.573 | 0.329 | 0.117 |
| St. dev | 0.237 | 0.458 | 0.757 | 0.574 | 0.342 |
| CV | 0.340 | 0.311 | 0.416 | 0.359 | 0.359 |

이 연구에서 제안하는 방법과 설계기준 규정의 정확성과 신뢰도를 자세히 파악하기 위하여 계산값과 실험 결과의 비를 이용하여 통계분석을 실시하여 Table 1에 정리하였다. 통계분석 결과를 살펴보면, 이 연구의 제안 방법은 다른 설계기준 규정과 비교하였을 때 예측 결과의 정확성 및 신뢰도가 양호함을 확인할 수 있다. 그러나 MC 90과 EC 2-Part 1은 신뢰도는 비교적 양호하지만 정확성이 부족하며, JSCE 02와 Gergly와 Lutz의 제안식은 정확성과 신뢰도가 모두 부족한 것으로 나타났다.

이상의 결과를 종합하면, 콘크리트의 비선형 재료특성을 반영한 철근응력 계산 과정과 피복두께의 영향을 반영한 인장증강효과를 이용하는 이 연구의 균열폭 계산 방법은 부재의 사용성능을 비교적 정확하게 검증할 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 처짐

처짐 계산 방법의 제안을 위하여 균열폭 계산과 동일

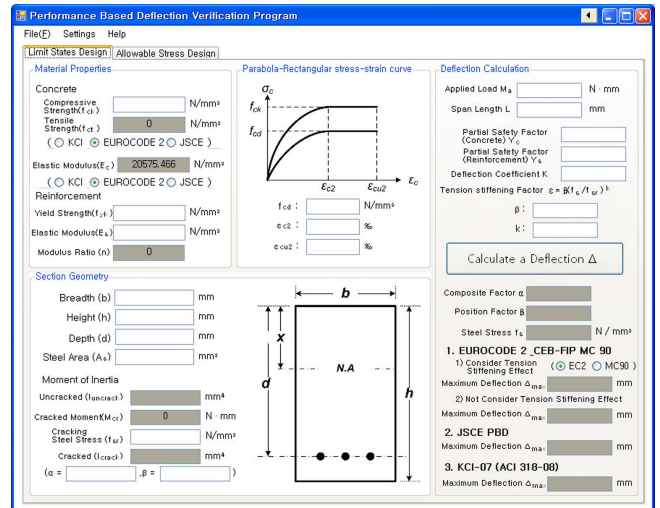


Fig. 10 Deflection calculation program

한 방법을 사용하였다. 즉, 처짐 계산을 위한 식 (12)에 식 (11)로 정의되는 계수를 도입하여 유효곡률 식 (10)을 정의하였다. 이때 사용되는 함수 k 는 전반부 연구⁴⁾에서 제안한 식 (7)을 이용하였다. 그리고, 철근응력은 앞 절에서 설명한 계산 방법을 이용하였으며 계산의 자동화를 위하여 Fig. 10과 같은 처짐 자동계산 프로그램을 개발하였다. 프로그램에는 이 연구에서 제안하는 계산 방법 이외에 앞 절에서 고찰한 설계기준별 처짐 계산도 가능하도록 하여 검증의 신뢰도를 확보하였다.

전편 논문⁴⁾에서 제안한 인장증강 계수와 앞 절에서 제시한 철근응력 계산 방법을 이용하는 이 연구의 처짐 계산식 및 설계기준 규정을 검증하기 위하여 Alwis 등,¹⁶⁾

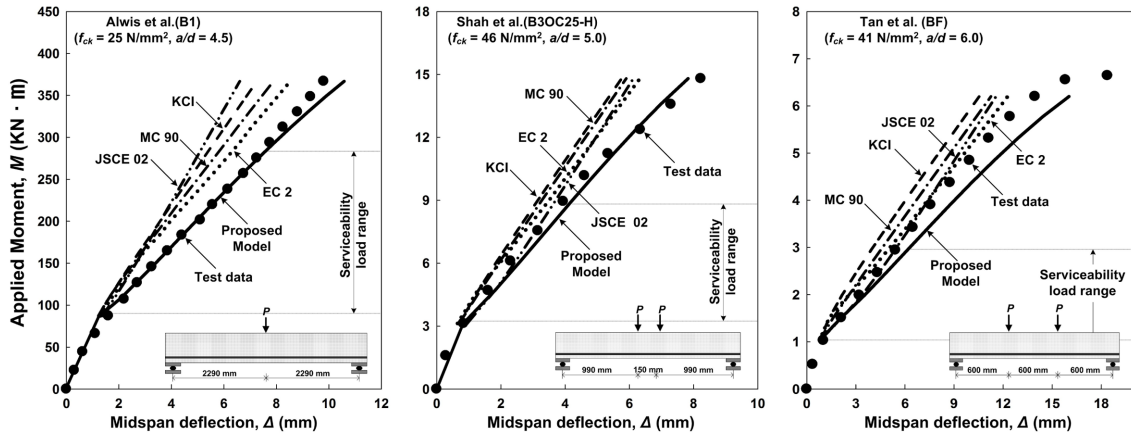


Fig. 11 Comparison of proposed deflection calculation method vs various design codes

Table 2 Statistical analysis of deflection calculation results

| | MC 90 | EC 2 | JSCE 02 | KCI | Proposed model |
|---------|-------|-------|---------|-------|----------------|
| Mean | 0.804 | 0.846 | 0.850 | 0.756 | 1.033 |
| Var. | 0.004 | 0.005 | 0.019 | 0.004 | 0.010 |
| St. dev | 0.061 | 0.073 | 0.139 | 0.066 | 0.100 |
| CV | 0.076 | 0.086 | 0.164 | 0.088 | 0.097 |

Shah 등¹⁷⁾ 및 Tan 등¹⁸⁾이 수행한 실험 자료와 비교하여 Fig. 11에 정리하였다. 이들 실험 자료는 콘크리트 압축 강도 f_{ck} , 부재의 기하학적 조건, 하중 형태 및 전단경간-유효깊이 비 a/d 가 서로 다른 실험체를 대상으로 선정하였다.

Fig. 11을 살펴보면, 이 연구에서 제안하는 처짐 계산 방법으로 예측한 결과는 사용성능 검증을 위한 사용하중 구간에 해당하는 $1.5 \leq M_a/M_{cr} \leq 3$ 범위¹⁹⁾에서 다른 설계기준 규정들에 비하여 실험 결과를 비교적 정확하게 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 사용하중 구간인 $3M_{cr}$ 이후 하중단계에서도 예측 결과의 정확성이 계속 확보되고 있음을 알 수 있다. 이와는 다르게 MC 90, EC 2, KCI 및 JSCE 02 설계기준의 처짐 계산식들은 실험 결과를 상대적으로 과소평가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 차이는 현행 설계기준에서 이용하는 선형탄성해석에 의한 철근응력 계산 결과가 비교적 낮게 평가되기 때문이라 판단된다. 이와 함께 유효곡률의 크기를 결정하는 식 (11)의 분포계수 ξ 가 피복두께의 영향을 적절하게 반영하지 못하고 있기 때문이라 판단된다.

이 연구에서 제안하는 처짐 계산 방법과 각 설계기준들의 처짐 계산 규정의 정확성과 신뢰도를 알아보기 위하여 실험값과 계산값의 비를 이용하여 통계분석을 실시하고 그 결과를 Table 2에 정리하였다.

통계분석 결과를 살펴보면, 이 연구에서 제안하는 처짐 계산 방법과 EC 2는 다른 설계기준 규정과 비교하였을 때 예측 결과의 정확성 및 신뢰도가 모두 양호함을

확인할 수 있다. 그러나 MC 90은 신뢰도는 비교적 양호하지만 정확성이 부족하며, 유효단면2차모멘트를 이용하는 KCI는 다른 설계기준과 비교하여 신뢰도는 유사하지만 정확성이 상대적으로 부족함을 알 수 있다. JSCE 02는 다른 설계기준들과 비교하여 정확성은 양호하지만, 신뢰도가 크게 떨어지는 것으로 나타났다.

이상의 결과를 종합하면, 균열폭 계산과 동일하게 콘크리트의 비선형 재료특성을 반영한 철근응력 계산 과정과 피복두께의 영향을 반영한 인장증강효과를 이용하는 이 연구의 처짐 계산 방법은 부재의 사용성능을 비교적 정확하게 검증할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 연구는 콘크리트 구조 부재의 사용성능 검증을 위한 균열폭 및 처짐을 정확하게 산정할 수 있는 계산 방법을 제안한 것이다. 이를 위하여 콘크리트의 비선형 재료특성을 반영한 철근응력 계산 알고리즘을 개발하고, 전반부 연구에서 제안한 피복두께의 영향을 반영할 수 있는 수정된 인장증강효과를 이용하였다. 즉, 철근과 콘크리트의 평균변형률 차이를 계산하는 수식과 유효곡률에 적용되는 분포계수를 각각 수정 제안한 것이다. 이와 함께, 수정된 인장증강 계수와 콘크리트의 재료특성을 고려한 철근응력 계산법에 의해 방법 및 설계기준 규정에 의한 균열폭과 처짐을 자동으로 계산할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 이상의 제안 방법 및 프로그램을 이용하여 균열폭과 처짐을 계산하여 실험 자료와 비교한 결과, 다른 설계기준들의 규정보다 예측값의 정확성 및 신뢰도가 우수한 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것입니다(과제번호 : 2010-0022773). 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Kelvin, F. and Peter, H. B., "Tension Stiffening and Cracking of High-Strength Reinforced Concrete Tension Members," *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 4, 2004, pp. 447~456.
2. CEB-FIP, *CEB-FIP Model Code 1990*, Comite Euro-International Du Beton, Paris, 1991, pp. 247~251.
3. European Committee for Standardization, *Eurocode 2-Design of Concrete Structures*, European Committee for Standardization, Brussels, 2002, pp. 124~131.
4. 이기열, 김민중, 김우, 이화민, "피복두께를 고려한 철근 콘크리트 인장부재의 인장증강효과," 콘크리트학회 논문집, 23권, 6호, 2011, pp. 791~797.
5. 국토해양부, 콘크리트구조설계기준, 한국콘크리트학회, 2007, pp. 340~348.
6. 최승원, 김우, "콘크리트 응력-변형률 관계에 기반한 철근콘크리트 부재의 처짐 산정," 대한토목학회 논문집, 30권, 4A호, 2010, pp. 383~389.
7. 최승원, 양준호, 김우, "철근콘크리트 부재의 처짐과 균열폭에 대한 인장증강효과의 영향," 콘크리트학회 논문집, 22권, 6호, 2010, pp. 761~768.
8. JSCE, *Standard Specifications for Concrete Structures-2002, Structural Performance Verification*, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, 2005, pp. 107~129.
9. Gergely, P. and Lutz, L. A., "Maximum Crack Width in Reinforced Concrete Flexural Members," *Causes, Mechanism, and Control of Cracking in Concrete ACI Special Publication SP-20*, ACI, Michigan, 1968, pp. 87~117.
10. Eibl, J., *Concrete Structures Euro-Design Handbook*, Ernst & Sohn, 1994, pp. 244~249.
11. Branson, D. E., *Deformation of Concrete Structures*, McGraw-Hill, Newyork, 1977, 546 pp.
12. 장일영, "철근콘크리트 부재의 부착특성을 고려한 휨모멘트-곡률관계에 대한 연구," 콘크리트학회 논문집, 3권, 4호, 1991, pp. 97~106.
13. Bilal, S. H. and Mohamad, H. H., "Effect of Fiber Reinforcement on Bond Strength of Tension Lap Splices in High-Strength Concrete," *ACI Structural Journal*, Vol. 98, No. 5, 2001, pp. 638~647.
14. 강영진, 오병환, "철근콘크리트 휨부재의 균열폭 및 균열간격의 결정," 대한토목학회 논문집, 5권, 4호, 1985, pp. 103~111.
15. 고원준, 박선규, "부착특성을 고려한 철근콘크리트 부재의 휨 균열폭 산정," 대한토목학회 논문집, 22권, 4-A호, 2002, pp. 825~835.
16. Alwis, W. A. M., "Trilinear Moment-Curvature Relationship for Reinforced Concrete Beams," *ACI Structural Journal*, Vol. 87, No. 3, 1990, pp. 276~283.
17. Shah, S. P. and Shrikrishna, M. K., "Response of Reinforced Concrete Beams at High Strain Rates," *ACI Structural Journal*, Vol. 95, No. 6, 1998, pp. 705~715.
18. Tan, K. H., Paramasivam, P., and Tan, K. C., "Instantaneous and Long-Term Deflections of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams," *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 4, 1994, pp. 384~393.
19. 김우, 김진근, 오병환, 정란, 최완철, 콘크리트구조설계, 동화기술, 2007, pp. 260~261.

요약 이 논문은 철근콘크리트 구조부재의 사용성능 검증을 위한 균열폭과 처짐을 산정할 수 있는 새로운 계산 방법을 제안하고 이를 자동으로 계산할 수 있는 프로그램을 개발한 것이다. 이를 위하여 콘크리트의 재료특성을 포물-사각형 응력-변형률 곡선으로 반영한 철근응력과 피복두께의 영향을 반영한 인장증강 계수를 이용한 곡률을 계산할 수 있는 수치 모델링을 실시하였다. 이와 함께 균열폭과 처짐을 계산하는데 필요한 인장증강효과와 유효인장단면적은 균열이 발생한 휨부재 단면의 인장영역을 인장 현재로 이상화하여 정의하였다. 그리고 수정된 인장증강 계수를 이용하여 유효곡률을 계산하였다. 제안된 균열폭과 처짐 산정 방법을 이용하여 여러 연구자들이 수행한 실험 자료를 계산한 결과, 현행 설계기준들의 규정보다 실험값을 비교적 정확하게 예측하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 균열폭, 곡률, 처짐, 포물-사각형 응력-변형률 곡선, 인장증강효과