

철근콘크리트 보의 균열 폭과 처짐 관계

Correlation Between Crack Widths and Deflection in Reinforced Concrete Beams

강 주 오¹⁾ 김 강 수^{2)*} 이 득 행³⁾ 이 승 배⁴⁾
Kang, Ju Oh Kim, Kang Su Lee, Deuck Hang Lee, Seung Bea

Abstract

The member deflection is one of the most important considerations for the serviceability evaluation of reinforced concrete (RC) structures, and the concept of the effective moment of inertia has been generally used for its estimation. However, the actual service load applied on an existing RC beam may not be easily obtained, for which the estimation of beam deflection by existing methods can be difficult to obtain. Therefore, based on the correlation between cracks and deflection in a RC beam, this study proposed a method to estimate the deflection of RC beams directly from the condition of cracks not using the actual loads acting on the member as its input data. The proposed method extensively utilized the relationships among sums of crack widths, average strains, and curvatures, and modification factors obtained from regression analysis were also introduced to improve its accuracy. The deflections of members were successfully estimated by the proposed method independent from applied loads, which was also easy to apply compared to the existing methods based on the effective moment of inertia.

Keywords : Deflection, Crack width, Flexural Rigidity, Curvature, Effective Moment of Inertia

1. 서론

모든 건축 구조물은 소요강도를 만족하는 동시에 그 용도에 적합한 사용성을 확보하도록 설계되어야 한다. 현재 설계기준에서 철근콘크리트 구조부재의 소요강도는 극한강도 설계법에 의하여 산정되며, 사용하중상태에서 발생하는 처짐, 균열폭 및 진동 등이 제한된 허용범위 내에 있는지에 대한 여부에 따라 사용성이 검토된다. 일반적으로 사용성은 과도한 균열이나 처짐 등이 발생하지 않도록 제한함으로써 확보될 수 있다(한국콘크리트학회, 2007; ACI Committee 318, 2005; Collins and Mitchell, 1991).

최근 장경간 구조가 증가됨에 따라서 철근콘크리트 휨부재의 처짐 및 균열 문제는 구조물의 용도에 적합한 사용성을 확보하기 위하여 매우 중요한 문제로 인식되고 있다. 철근콘크리트 휨 부재에 균열이 발생하게 되면 휨강성이 저하되고 이는 곧 처짐의 증가를 초래하기 때문에 처짐과 균열 사이에는 상호 밀접한 연관관계가 있다. 그러나, 균열 발생에 따른 휨강성의 저하는 균열 발생 구간, 균열 높이 및 균열 폭에 따라서 매우 복잡한 양상으로 나

타나기 때문에 한 개의 철근콘크리트 부재에서도 정확한 휨강성을 산정하는 것이 쉽지 않다.

휨부재의 처짐산정에 필요한 휨강성을 구하기 위하여 설계기준을 포함한 기존의 여러 연구에서는 유효단면2차모멘트 개념을 적용하고 있다(한국콘크리트학회, 2007; ACI Committee 435, 1966; Branson, 1965; Branson and Trost, 1982; Macgregor and Wight, 2006). 그러나 기존의 유효단면2차모멘트를 적용한 방법들이 여러 영향인자들을 제한적으로 반영하기 때문에 이미 여러 연구자들에 의하여 수정이 필요하다는 보고들이 있었다(Branson, 1965; Branson 1982; Chen, 1982; Chen, 1988; Collins and Mitchell, 1991). 본 연구에서는 기존의 유효단면2차모멘트 개념을 수정 보완하기 보다는 균열폭과 처짐과의 상관관계를 통하여 부재의 처짐을 산정할 수 있는 새로운 방법을 모색하고자 하였다.

즉, 유효단면2차모멘트를 이용하여 처짐을 산정하는 기존의 방법과 달리 균열폭과 처짐과의 상관관계를 고찰하여 이를 바탕으로 부재의 처짐을 직접적으로 산정할 수 있는 방법을 제안하고자 하였다. 또한, 총 17개의 단순지지

1) 정회원, 서울시립대학교 건축학부 석사과정

2) 정회원, 서울시립대학교 건축학부 부교수

3) 정회원, 서울시립대학교 건축학부 석사과정

4) 정회원, 인하대학교 건축학부 박사과정

* Corresponding author : kangkim@uos.ac.kr 02-2210-5707

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2010년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

된 철근콘크리트 보에 대한 실험을 수행하고 사용하중단계에서 극한상태까지의 균열폭과 처짐을 측정하여 상관관계를 분석하였으며, 실험결과와의 비교를 통하여 제안된 균열폭을 이용한 처짐예측식의 정확성을 검증하였다.

2. 기존연구

철근콘크리트 부재는 콘크리트의 재료적 특성으로 인하여 발생하는 균열때문에 단면2차모멘트가 일정하지 않고 변화하는 특성이 있다. 따라서, 정확한 처짐을 산정하기 위해서는 반드시 균열에 의한 강성 감소의 영향을 잘 반영해야 한다. 철근콘크리트 휨 부재에 균열이 발생하면 Fig. 1(ACI Committee 435, 1966)과 같이 휨 강성이 줄어들게 되며, 균열전에 비하여 작은 하중증가에도 곡률이 급격히 증가하게 된다. 일반적으로 보의 휨 강성은 단면2차모멘트(I)와 콘크리트의 탄성계수(E_c) 및 부재의 길이로 표현할 수 있으며, 균열 발생 후 단면2차모멘트와 탄성계수는 하중증가에 따라 감소하게 된다. 현행기준에서는 사용성 검토시에 재료의 응력상태를 탄성으로 가정하여 탄성계수는 일정하다고 가정하고, 균열에 따른 단면2차모멘트를 작용하중의 크기에 따라서 전단면, 유효단면 및 균열단면으로 구분하여 제시하고 있다. 즉, Fig. 2에 나타낸 것과 같이 균열 전에는 전단면적을 이용한 단면2차모멘트(I_g)를 사용하고, 균열 후에는 균열모멘트의 3배이상의 하중이 작용하는 경우에는 균열단면2차모멘트(I_{cr}), 3배 이하인 경우에는 I_g 와 I_{cr} 사이의 값을 가지는 유효단면2차모멘트(I_e)를 적용한다. 콘크리트구조설계기준(한국콘크리트학회, 2007; ACI Committee 318, 2005)의 유효단면2차모멘트(I_e) 계산식은 Branson(1965), Branson and Trost(1982) 및 ACI Committee 435(1966)가 제안한 방법을 사용하고 있으며, 등분포 하중을 받는 단순보의 경우에 유효단면2차모멘트(I_e)를

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g \quad (1)$$

로 구한다. 여기서, M_{cr} 은 균열모멘트, M_a 는 최대모멘트, I_{cr} 은 균열단면2차모멘트, I_g 는 전단면2차모멘트, y_t 는 도심에서 인장축 최외단까지의 거리이다.

Al-Zaid et al.(1991)은 1점 또는 2점 집중하중 및 등분포하중을 받는 철근콘크리트 보에 대한 실험을 수행하고, 유효 단면2차모멘트(I_e)를

$$I_e = \left(\frac{L_{cr}}{L}\right)^{m'} I_{cr} + \left[1 - \left(\frac{L_{cr}}{L}\right)^{m'}\right] I_g \quad (2)$$

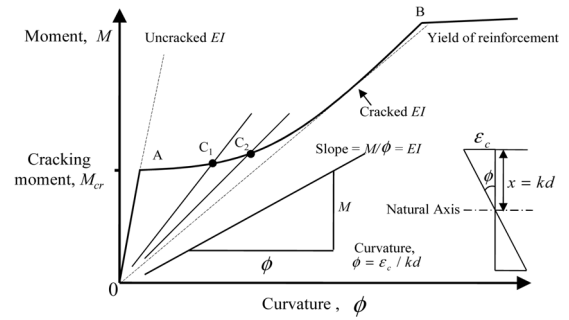


Fig. 1 Moment-curvature relationship and change in flexural stiffness

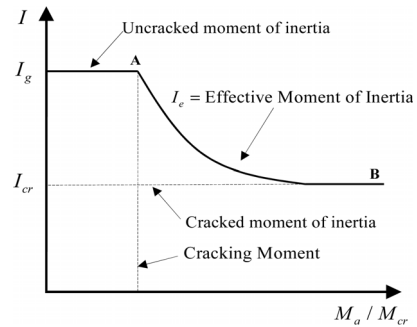


Fig. 2 Variation of moment of inertia

으로 제안하였으며, 여기서, L 은 부재의 길이, L_{cr} 은 균열이 발생한 길이, m' 은 인장철근의 영향과 작용하중을 고려한 계수로서 $\beta M_{cr}/M_a$ 이고, β 는 0.8ρ 로 계산되며, ρ 는 인장철근비이다.

Al-Shaikh and Al-Zaid(1993)은 Al-Zaid et al.(1991)의 선행 연구를 바탕으로 철근비에 대한 영향을 수정하여 유효단면2차모멘트(I_e)를

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^m I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^m\right] I_{cr} \quad (3)$$

으로 제안하였으며, 여기서 m 은 $3 - 0.8\rho$ 이다.

Fikry and Thomas(1998)는 실험 및 해석을 통하여 균열단면2차모멘트의 측정된 실험값이 이론값에 비해 작게 측정된 것을 근거로 균열단면2차모멘트의 근사식(I_{cre})을

$$I_{cre} = (\alpha + \beta n \rho)(bd^3/12) \quad (4)$$

으로 제안하였고, 여기서, α 와 β 는 철근과 콘크리트의 탄성계수비(n)과 인장철근비(ρ)의 영향을 고려한 계수이며 Table 1에 나타낸 바와 같다. 이로부터 유효 단면2차모멘트(I_e)를

$$I_e = I_{cre} + (I_g - I_{cre}) e^{\phi} \quad (5)$$

Table 1 Factors for calculation of I_{cre}

Range	α	β
for $n\rho \leq 1.9\%$	0.003	$\beta=0.095$
for $1.9\% < n\rho \leq 5\%$	0.05	$\beta=0.07$
for $5\% < n\rho \leq 17\%$	0.16	$\beta=0.05$
for $17\% < n\rho \leq 32\%$	0.50	$\beta=0.03$
for $n\rho > 32\%$	0.80	$\beta=0.02$

으로 제시하였으며, 여기서, ϕ 는 실험적으로 결정된 계수로서 $\rho > 1\%$ 일 경우, $-(M_a/M_{cr})(L_{cr}/L)\rho$, $\rho \leq 1\%$ 일 경우, $-(M_a/M_{cr})(L_{cr}/L)$ 이다.

Akmaluddin and Thomas(2006)는 Fikry and Thomas(1998)의 I_{cre} 와 계수 ϕ 를 수정하여 유효단면2차모멘트의 근사식을

$$I_e = I_{cre} + (I_g - I_{cre}) e^{\phi} \quad (6)$$

로 제시하였으며, 여기서, I_{cre} 와 계수 ϕ 는 각각

$$I_{cre} = (0.1618 + 0.0418n\rho)(bd^3/12) \quad (7)$$

$$\phi = -\left(\frac{M_a}{M_{cr}}\right)\left(\frac{L_{cr}}{L}\right)(8.478 - 9.0607\rho + 2.842\rho^2) \quad (8)$$

이다. 이승배 등(2008)은 모멘트 분포 및 콘크리트의 유효인장단면적의 영향을 고려하여 Al-Zaid et al.(1991) 및 Al-Shaikh and Al-Zaid(1993)가 제안한 식을 수정하여 유효 단면2차모멘트를 계산하는 방법을 제시하였다.

$$I_e = \left(\frac{L_{cr}}{L}\right)^{m'} I_g + \left[1 - \left(\frac{L_{cr}}{L}\right)^{m'}\right] I_{cr} \quad (9)$$

여기서, m' 은

$$m' = 99\rho\left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right) - 2.345 \times 10^{-3} \sqrt{A} \geq 0 \quad (10)$$

이고, A 는 콘크리트의 유효인장단면적이다. 이외에도 최근 박미영 등(2009)은 변분법을 이용한 유효단면2차모멘트를 제안하였다.

이상에서 제시한 기존의 유효단면2차모멘트들은 비교적 간략한 방법으로 처짐을 예측할 수 있는 장점이 있지만, 주요 영향인자들이 제한적으로 고려되거나 서로 다른 방법으로 고려되어 차이가 남을 알 수 있다. 또한, M_a 를 이용하여 작용하중의 크기를 반영하고 있기 때문에 처짐의 산정을 위하여 정확한 작용하중의 크기가 필요함을 알 수 있다. 그러나, 기존 건물을 안전진단할 경우에는 균열

을 유발한 하중을 정확히 산정하는 것이 어려울 때가 많다. 반면에 육안으로 직접 확인이 가능한 균열상황과 균열폭 측정장비를 통하여 비교적 명확하게 균열폭을 측정할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 측정된 균열폭을 이용하여 부재의 처짐을 역으로 측정할 수 있는 방법을 제안하고자 하는 것이며, 이 방법을 이용하면 하중 산정이 불확실한 경우에 별도의 처짐 측정 없이도 비교적 용이하게 처짐을 유추할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 실험계획 및 결과분석

3.1 실험 계획

철근콘크리트 보의 균열폭과 처짐과의 상관관계를 분석하기 위하여 Table 2에 보이는 바와 같이 총 17개의 실험체를 제작하였으며, 주요 변수는 콘크리트의 압축강도, 주인장 철근의 피복두께 및 철근량으로 하였다. 또한, 주인장 철근의 직경과 주근의 비부착 여부도 추가적인 변수로 고려하여 실험체를 제작하였다. 콘크리트 압축강도는 24MPa의 일반강도와 70MPa의 고강도로 하였고, 주인장 철근은 SD400 재질의 4-D13, 5-D16, 3-D19, 2-D25를 사용하였으며, 압축 철근으로는 SD400 재질의 2-D13을 사용하였다. 보의 유효깊이는 290mm 및 310mm이고, A3계열의 실험체들은 비부착 구간이 균열폭과 처짐에 미치는 영향을 고려하기 위하여 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 부재의 중앙부 1600mm 구간에 인위적인 비부착 구간을 배치하였다. 실험체 지점간 거리는 4400mm이고, 단면의 크기는 폭 250mm, 높이 350mm로 하였다. 각 실험체의 제원 및 배근 상세는 Table 2 및 Fig. 4 및 5에서 보이는 바와 같으며, 다만, Fig. 4 및 5에서 3-D19로 표현된 주인장철근은 한 실험체의 예일 뿐이며, Table 2에 보이는 바와 같이 각 실험체 마다 다르다. 콘크리트의 압축강도 시험 결과 일반강도 시험체는 28.0MPa, 고강도 시험체는 76.4MPa의 평균 압축강도를 가진 것으로 나타났다.

3.2 실험 방법

실험체는 Fig. 6 및 7에서 보이는 바와 같이 분당 5kN의 가력속도로 실험체의 상부에 2점 집중하중으로 단조 가력하였다. 실험체의 변위 측정을 위해 Fig. 8과 같이 지점, 가력점에서 지점 쪽으로 700mm 떨어진 곳, 가력점 및 중앙부에 LVDT를 설치하였다. 매 초당 하중 및 부재의 변위 등을 데이터로거를 통해 수집하였으며, 각 하중 단계마다 균열의 발생 및 진전 상황을 실험체에 직접 표기하였다. 각 실험체는 균열폭과 형태를 화상처리 할 수 있는 균열 측정기를 사용하여 실험체의 하단부로부터 0~50mm 구간에서 발생하는 모든 균열의 균열폭을 10kN 단위로 측정하여 데이터를 저장하였다.

Table 2 Details of specimens

Specimens		Notation	f_{ck} (MPa)	Concrete cover at the center of bar(mm)	Number and Diameter of Bar	A_s (mm ²)	ρ	existence & nonexistence of de-bonded bar
G	X	A0	24	40	4-D13	508	0.0066	0
		A0			5-D16	995	0.0128	0
		A0			3-D19	861	0.0111	0
		A3			3-D19	861	0.0111	3 EA
	Y	A0		2-D25	1014	0.0131	0	
		A0		4-D13	508	0.0070	0	
		A0		3-D19	861	0.0119	0	
		A3		3-D19	861	0.0119	3 EA	
H	X	A0	70	40	4-D13	508	0.0066	0
		A0			5-D16	995	0.0028	0
		A0			3-D19	861	0.0111	0
		A3			3-D19	861	0.0111	3 EA
	Y	A0		2-D25	1014	0.0131	0	
		A0		4-D13	508	0.0070	0	
		A0		3-D19	861	0.0119	0	
		A0		2-D25	1014	0.0014	0	

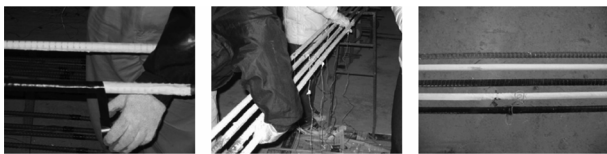


Fig. 3 De-bonding process of longitudinal bars

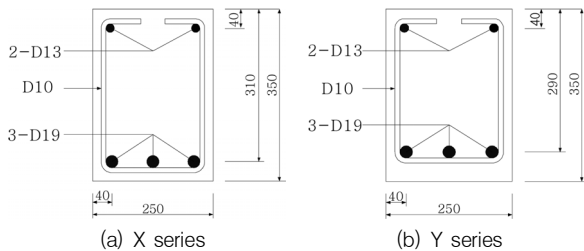


Fig. 4 Section details of specimens

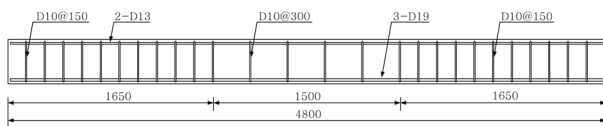


Fig. 5 Reinforcing details of specimens

3.3 실험결과분석

Fig. 9는 각 실험체의 하중-중앙부 처짐 곡선을 보여 주고 있다. 보통강도와 고강도 실험체 모두 균열하중까지는 완전탄성거동을 하다가 균열이후에 강정저하가 발생하면서 비선형거동을 나타내었으며, 항복강도에 이른 후에는 하중의 증가가 거의 없이 변위만 지속적으로 증가하



Fig. 6 Test set-up

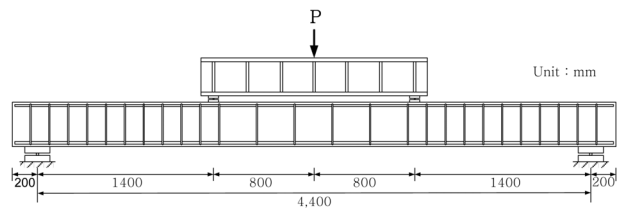


Fig. 7 Support and loading condition

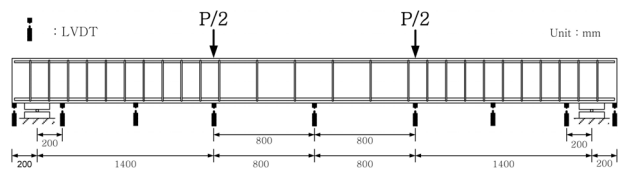
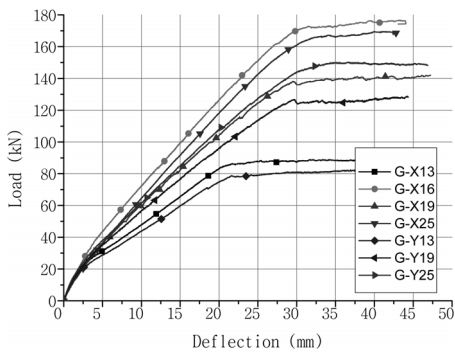
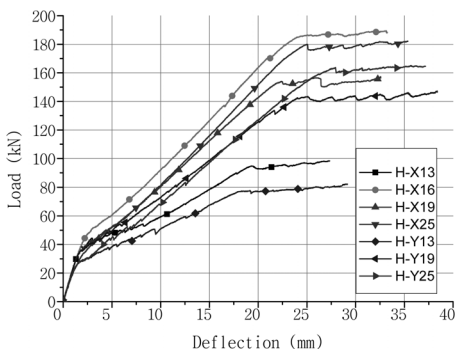


Fig. 8 Location of deflection measurement

는 전형적인 휨 거동을 보였다. 균열 발생 후에는 철근비와 압축강도가 높을수록 휨강도가 크게 나타났으며, 피복



(a) G series



(b) H series

Fig. 9 Load-Deflection curve

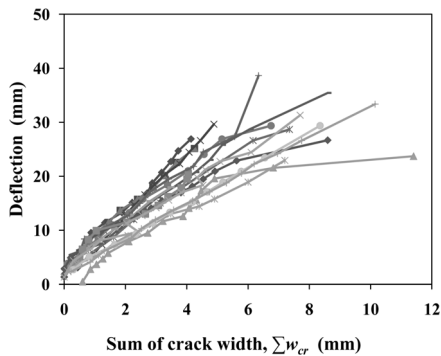
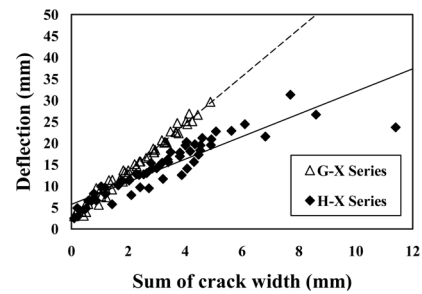


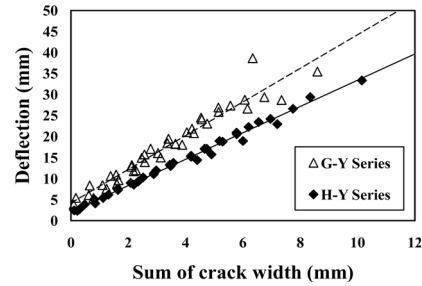
Fig. 10 Effect of sum of crack width on deflection

두께가 커질수록 철근의 유효깊이가 작아져 휨강도가 작아지는 양상을 보였다.

Fig. 10에는 실험체들의 항복하중 이전 단계까지의 균열폭의 합($\sum w_{cr}$)과 처짐과의 관계를 나타낸 것이며, 사용하중 하에서 균열폭의 합과 처짐은 거의 비례적인 상관관계가 있음을 알 수 있다. Fig. 11에는 실험의 주요변수인 콘크리트압축강도와 피복두께에 따른 균열폭의 합과 처짐의 상관관계를 나타내었다. Fig. 11(a)와 (b)는 각각 피복두께가 40 mm 및 60 mm 일때 콘크리트압축강도에 따른 균열폭의 합-처짐관계를 보통강도 실험체와 고강도 실험체를 구분하여 나타낸 것이다. 실험결과는 동일한 피복두께일 때 콘크리트의 압축강도가 클수록 작은 처짐을 나타내었으며, 선형 추세선을 보면 균열폭의 합과 처짐이



(a) 40 mm cover specimens with different concrete compressive strength



(b) 60 mm cover specimens with different concrete compressive strength

Fig. 11 Sum of crack width and deflection

일정한 비례관계가 있음을 알 수 있다.

4. 처짐 모델의 제안 및 검증

앞서 언급된 바와 같이 Fig. 10과 11의 실험 분석결과를 바탕으로 철근콘크리트 보의 균열폭의 합과 처짐은 일정한 상관관계가 있음을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 이와 같이 비교적 명확한 처짐-균열폭 합의 상관관계를 바탕으로 수평부재의 처짐을 산정할 수 있는 방법을 제안하고자 하였다.

4.1 기본 처짐모델

일반적으로 철근콘크리트 휨부재의 처짐은 휨변형에 의한 기여가 대부분이며, 전단력에 의한 처짐은 거의 무시할 수 있다(Gere, 2009). 또한, 초기 휨균열은 Fig. 12에 보이는 바와 같이 최대모멘트구역부근에서 발생되게 되고, 점차 확산되어가는 경향을 보인다. 따라서 Fig. 13에 나타난 것과 같이 부재의 길이방향으로 곡률의 분포는 균열이 발생된 부분에서 크게 증가하며, 균열구간 이외에서의 곡률은 균열구간내의 곡률에 비하여 매우 작을 것이다 (Chen, 1982; Chen, W. F. and Han, 1988; Harajli and Kanj, 1991). 이러한 가정을 바탕으로 본 연구에서는 Fig. 12 및 13에 나타난 것과 같이 l_{cr} 로 나타낸 균열구간내에서 모든 변형이 집중되는 것으로 가정하고, 이러한 가정을 통하여 Fig. 13의 이상화된 곡률분포를 얻을

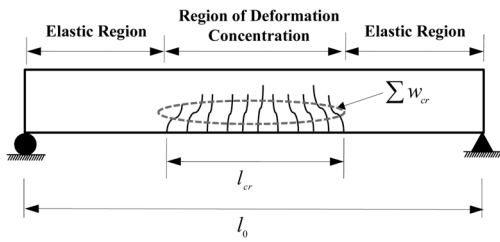


Fig. 12 Typical patterns of flexural cracks

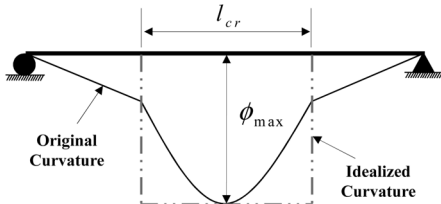


Fig. 13 Curvature variation and its idealization

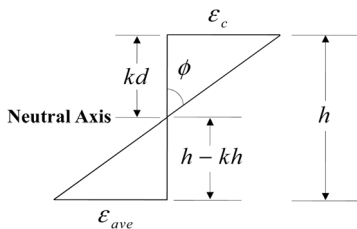


Fig. 14 Longitudinal strain in cracked region

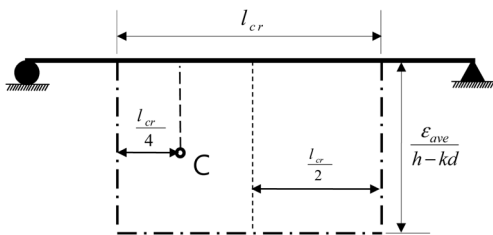


Fig. 15 Average curvature in cracked region

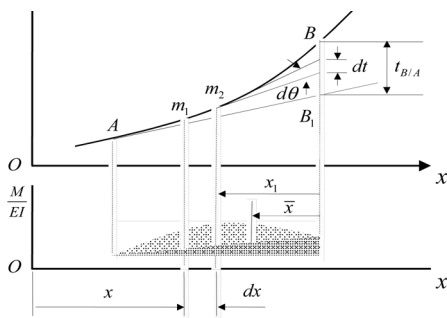


Fig. 16 Moment-area theorem

수 있다. Fig. 13에 나타낸 이상화된 곡률분포를 바탕으로 균열길이내에 단면의 변형률분포는 모두 같다고 가정할 수 있으므로, Fig. 14 및 15에 나타난 것과 같이, 인장측 최외단에서 측정된 균열폭의 합($\sum w_{cr}$)을 균열이 발생된 구간의 길이(l_{cr})로 나누어 균열구간내 평균변형률

(ϵ_{ave})을

$$\epsilon_{ave} = \frac{\sum w_{cr}}{l_{cr}} \quad (11)$$

으로 산정할 수 있고, 균열구간내 곡률(ϕ_{ave})은

$$\phi_{ave} = \frac{\epsilon_{ave}}{h - kd} \quad (12)$$

으로 계산할 수 있다. 여기서, h 는 부재의 깊이, kd 는 중립축의 깊이이며,

$$k = -n\rho \pm \sqrt{(\rho n)^2 + 2\rho n} \quad (13)$$

로 결정할 수 있다. 여기서, ρ 는 인장철근비이다.

이렇게 결정된 균열길이내에 평균곡률을 이용하여 모멘트면적법(Fig. 16)을 적용하면, 부재의 처짐(δ_{cr})은

$$\delta_{cr} = \bar{X} \int_A^B \phi dx \quad (14)$$

이 되며(Gere, 2009), 여기서 $\bar{X} = l_0/2 - l_{cr}/4$ 이다(Fig. 15 참조). 따라서, \bar{X} 및 식 (12)에 나타난 ϕ_{ave} 를 식 (14)에 대입하여 정리하면 부재의 처짐(δ_{cr})은

$$\begin{aligned} \delta_{cr} &= \left(\frac{l_0}{2} - \frac{l_{cr}}{4} \right) \frac{\epsilon_{ave}}{h - kd} \frac{l_{cr}}{2} \\ &= \left(\frac{l_0}{2} - \frac{l_{cr}}{4} \right) \frac{\sum w_{cr}}{2(h - kd)} \end{aligned} \quad (15)$$

이 된다.

4.2 기본 처짐모델의 보완

Fig. 17은 실험에서 측정된 처짐값(δ_{Exp})과 식 (15)에 의해 산정된 처짐값($\delta_{Eq.(15)}$)의 비를 균열구간의 길이와 경간길이의 비(l_{cr}/l_0)에 대하여 나타낸 것이다. 균열구간의 길이가 전체 경간길이의 약 30%이상인 경우에는 처짐비($\delta_{Exp}/\delta_{Eq.(15)}$)가 l_{cr}/l_0 에 관계없이 거의 일정한 값을 갖는 반면, 약 30% 이하인 경우에는 처짐비가 크게 달라지는 것을 알 수 있다. 이것은 작은 균열폭을 가진 적은 수의 균열이 발생된 낮은 하중상태에서는 균열이 처짐에 미치는 기여도 보다는 탄성변형에 의한 처짐기여도가 크기 때문에 식 (15)에 의하여 계산된 처짐값과 실험값의 차이가 크게 발생하는 것이다. 따라서, 이를 반영하여 식 (15)의 처짐산정식을 수정할 필요가 있다. 수정계수(C_1)

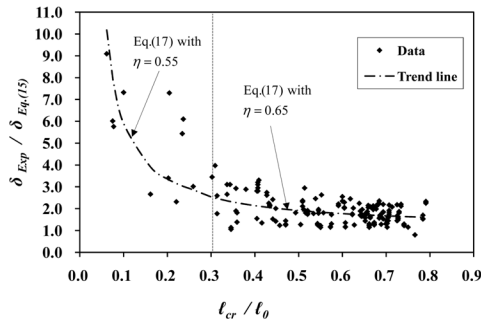


Fig. 17 Prediction results of equation (15)

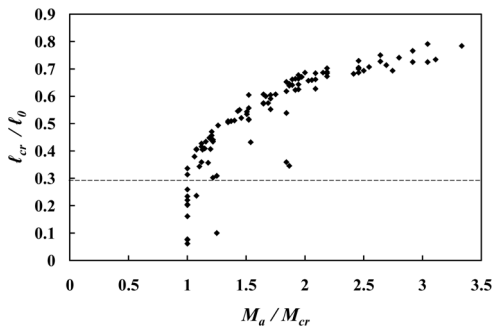


Fig. 18 Effect of M_u/M_{cr} on l_{cr}/l_0

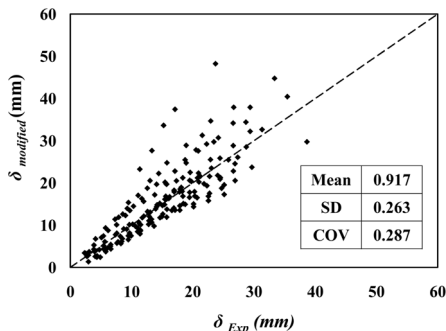


Fig. 19 Comparison of deflection calculated by the Simple Method (Eq. 16, 17) and test results

를 도입하면 수정된 처짐($\delta_{modified}$)은

$$\begin{aligned} \delta_{modified} &= C_1 \delta_{cr} \\ &= C_1 \left(\frac{l_0}{2} - \frac{l_{cr}}{4} \right) \frac{\Sigma_{cr}}{2(h - kh)} \end{aligned} \quad (16)$$

이 된다. Fig. 17에 나타난 추세선이 지수곡선의 형태를 보이고 있으므로 수정계수 C_1 은 지수함수형태로 가정할 수 있으며, 균열구간의 길이와 경간길이의 비(l_{cr}/l_0)가 주요 영향인자로 고려되어야 함을 알 수 있다. 또한, Fig. 18에 나타난 바와 같이 균열구간의 길이와 경간길이의 비(l_{cr}/l_0)가 약 0.3 이상일 때에는 작용 휨모멘트가 균열 모멘트를 넘어 증가 할수록 균열 구간의 길이(l_{cr})가 비례하여 증가하는 반면, 약 0.3 이하일 때에는 그러한 비

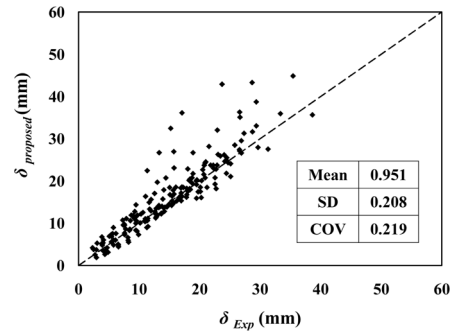


Fig. 20 Comparison of deflection calculated by the Detailed Method (Eq. 16, 18, 19) and test results

례 관계가 없음을 알 수 있다. 그러므로, 균열구간의 길이와 경간길이의 비(l_{cr}/l_0)가 0.3인 경계점을 기준으로 각각 다른 수정계수를 적용시키는 것이 합리적임을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 실험결과를 바탕으로 수정계수 C_1 을

$$C_1 = e^{0.5(l_{cr}/l_0)^\eta} \quad (17)$$

으로 도출하였으며, 여기서, η 는 l_{cr}/l_0 이 0.3 이하인 경우에는 0.55, l_{cr}/l_0 이 0.3을 초과하는 경우에는 0.65을 사용하며, 제안된 수정계수 C_1 은 Fig. 17에 나타난 추세선으로 보여진다. 식 (16) 및 (17)을 적용하여 산출된 처짐($\delta_{modified}$)을 실험값과 비교하여 Fig. 19에 나타내었다. 제안모델에 의한 처짐비($\delta_{Exp}/\delta_{Eq.(16)}$)가 평균(mean) 0.917, 변동계수(cov) 0.287을 보여주어 제안식 (16)이 실험결과와 매우 근접한 처짐값을 제공할 수 있다.

그런데, 앞서 언급된 바와 같이 콘크리트 압축강도 및 피복두께가 처짐-균열폭 합의 관계에 영향을 미치는 것을 확인하였으므로, 이를 제안식에 반영할 수 있을 것이다. 따라서, 콘크리트 압축강도(f_{ck})와 피복두께를 고려할 수 있는 유효 인장단면적(A)을 영향인자로 고려하여 실험결과를 바탕으로 회귀분석을 수행한 결과 수정계수 C_1 을

$$C_1 = e \left[0.85 \left(\frac{l_0}{l_{cr}} \right)^{0.4} - \frac{f_{ck}}{600} - \frac{A}{3 \times 10^5} \right] \quad \text{for } \frac{l_{cr}}{l_0} \leq 0.3 \quad (18)$$

$$C_1 = e \left[0.85 \left(\frac{l_0}{l_{cr}} \right)^{0.5} - \frac{f_{ck}}{150} - \frac{A}{1 \times 10^5} \right] \quad \text{for } \frac{l_{cr}}{l_0} > 0.3 \quad (19)$$

으로 최종 유도하였다. 식 (18) 및 (19)의 수정계수를 식 (16)에 대입하여 계산된 처짐값과 실제 처짐값을 비교한 결과, Fig. 20에 나타난 것과 같이 해석결과는 평균 0.951, COV 0.219로 더욱 높은 예측정확도를 보여주었다.

5. 결론

본 연구에서는 콘크리트의 압축강도, 주인장 철근의 피복두께 및 철근량을 주요변수로 한 17개의 철근콘크리트 보에 대한 실험을 수행하여 균열폭과 처짐의 상관관계를 분석하였으며, 균열폭의 합을 이용하여 처짐을 산정하는 방법을 제안, 검증하였다. 본 연구로 부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 총 17개의 철근콘크리트 보의 실험결과를 바탕으로 균열폭의 합은 처짐과 비례관계에 있음을 알 수 있었으며, 그 관계를 통하여 처짐의 근사적인 예측값을 도출할 수 있었다.

2) 제안된 처짐 예측식은 사용하중 상태에서의 실험에 의한 처짐값과 매우 근접한 결과를 보여주었다.

3) 본 연구에서 제안한 처짐산정방법은 안전진단시에 필연적으로 측정되는 균열폭을 이용하여 처짐까지 추정할 수 있는 방법으로 균열측정장비와 연동하여 사용하면 매우 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

4) 본 연구에서 제안한 방법은 기존의 유효 단면 2차 모멘트를 이용하여 처짐을 산정하는 방법에 비하여 비교적 간단하게 처짐을 산정 할 수 있다.

5) 제안처짐예측식은 정확한 하중을 추정하기 어려운 상황에서 하중에 관계없이 균열폭으로만 처짐을 추정할 수 있는 장점이 있다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2008-331-D00637)

참고문헌

- 이승배, 박미영, 장수연, 김강수, 김상식, “사용하중상태에서 철근콘크리트 휨부재의 유효 단면2차모멘트에 대한 고찰”, 한국콘크리트학회 논문집, 제20권 3호, 2008, pp.393-404.
- 박미영, 이승배, 김강수, 김상식, “철근콘크리트 단순보의 유효단면2차모멘트에 대한 모멘트 분포 형상의 영향분석”, 한국콘크리트학회 논문집, 제21권 1호, 2008, pp.93-103.
- 한국콘크리트학회, 2007년도 개정 콘크리트구조설계기준해설, 2007, p.523.
- ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary(ACI 318M-05), American Concrete Institute, Farmington Hills, 2005, p.436.
- ACI Committee 435, “Deflections of Reinforced Concrete Flexural Members”, American Concrete Institute Journal Proceedings, Vol. 63, No. 6, 1966, pp.637-674.
- Akmaluddin and Thomas C., “Experimental Verification of Effective Moment of Inertia Used in the Calculation of Reinforced Concrete Beam Deflection”, International civil Engineering Conference, 2006, pp.89-98
- AL-Zaid R. Z., Al-Shaikh A. H., and Abu-Hussein, M., “Effect of Reinforcement Ratio on the Effective Moment of Inertia of Reinforced Concrete Beams”, ACI Structural Journal, Vol. 88, No. 2, 1991, pp.184-190.
- Al-Shaikh, A. H. and Al-Zaid, R. Z., “Effect of Reinforcement Ratio on the Effective Moment of Inertia of Reinforced Concrete Beams”, American Concrete Institute Structural Journal, Vol. 65, No. 9, 1993, pp. 144-149.
- Branson, D. E., “Instantaneous and Time-Dependent Deflections of Simple and Continuous Reinforced Concrete Beams”, HPR Report No. 7, Part 1, Alabama-Highway Department/U.S. Bureau of Public Roads, 1963/1965, pp. 1-78.
- Branson, D. E., Trost, H., “Unified Procedures for Predicting the Deflection and Centroidal Axis Location of Partially Cracked Nonprestressed and Prestressed Concrete Members”, American Concrete Institute Journal Proceedings, Vol. 72, No. 2, 1982, pp.119-130.
- Chen W. F., Plasticity in Reinforced Concrete, McGraw-Hill, 1982, p.474.
- Chen, W. F. and Han, D. J., Plasticity for Structural Engineering, Springer-Verlag New York Inc., 1988, p.606.
- Collins, M. P., and Mitchell, D., Prestressed Concrete Structure, Prentice Hill, 1991, 766 pp.
- Fikry, A. M. and Thomas, C., “Development of a Model for the Effective Moment of Inertia of One-Way Reinforced Concrete Elements”, American Concrete Institute Structural Journal, Vol. 95, No. 4, 1998, pp. 444-455.
- Gere, J. M., Mechanics of Materials, Cengage Learning, 2009, p.1002.
- Harajli, M. H., and Kanj, M. Y., “Ultimate Flexural Strength of Concrete Members Prestressed With Unbonded Tendons”, American Concrete Institute Structural Journal, Vol. 88, No. 6, 1991, pp.663-673.
- Macgregor, J. G. and Wight, J. K., Reinforced Concrete Mechanics and Design, Prentice Hall, 2006, p.1111.

(접수일자 : 2010년 1월 7일)
(심사완료일자 : 2010년 2월 4일)

요 지

철근콘크리트 구조물의 사용성을 검토할 때 처짐은 가장 중요한 사항 중 하나이며, 철근콘크리트 휨 부재의 처짐은 일반적으로 유효 단면2차모멘트의 개념을 적용하여 구해진다. 그러나 이미 사용중인 철근콘크리트 보에서 정확한 사용하중을 알기 어려운 경우에는 기존의 방법으로 처짐을 계산하는 것이 쉽지 않다. 따라서, 이 연구에서는 철근콘크리트 보에서 균열과 처짐은 상호 밀접한 관련이 있다는 사실을 바탕으로 작용하는 하중의 크기에 무관하게 철근 콘크리트 보 부재의 균열 상태에서부터 처짐을 쉽게 산정할 수 있는 방법을 제안하고자 하였다. 균열폭의 합, 평균변형률 및 곡률 등의 관계를 이용하여 처짐식을 제안하였으며, 수정계수를 적용하여 보다 정확한 처짐식을 제안하고자 하였다. 이 제안식을 사용할 경우, 철근콘크리트 보에 작용하는 하중 크기에 무관하게 균열을 측정함으로써 처짐 추정치를 얻을 수 있으며, 유효 단면 2차 모멘트 값을 산출하여 처짐을 산정하는 기존의 방법에 비해 비교적 간단하게 처짐을 산출 할 수 있다.

핵심 용어 : 처짐, 균열 폭, 휨 강성, 곡률, 유효 단면2차모멘트
