

철근 콘크리트부재에서 최소균열간격을 이용한 최대균열폭 산정

Estimation of Maximum Crack Width Using Minimum Crack Spacing in Reinforced Concrete

고 원 준^{*} 양 동 석^{**} 장 원 석^{***} 박 선 규^{****}
Ko, WonJun Yang, DongSuk Jang, WonSeok Park, SunKyu

ABSTRACT

This paper deals with the estimation of the maximum flexural crack widths using minimum crack spacing for reinforced concrete members. The proposed method utilizes the conventional crack and bond-slip theories as well as bonding transfer length and effects of creep and shrinkage between the reinforcement and concrete. An analytical equation for the estimation of the maximum flexural crack width is formulated as a function of mean bond stress. The validity, accuracy and efficiency of the proposed method are established by comparing the analytical results with the experimental data and the major code specifications (e.g., ACI, CEB-FIP Model code, Eurocode 2, etc.). The analytical results of analysis presented in this paper indicate that the proposed method can be effectively estimated the maximum flexural crack width of the reinforced concrete members.

1. 서론

철근 콘크리트 부재의 안정성 면에서 휨, 전단내력을 확보하며 사용성 및 내구성 면에서 휨 인장부에 발생하는 균열폭을 추정하기 위해서 최대 균열폭 산정이 필요하다. 균열폭 거동에 관해서는 다수의 연구들이 수행되고 있지만 복잡한 상호 요인들로 인하여, 최대 휨 균열폭의 평가방법은 아직 정립되지 않은 상태이다. Saliger (1950)의 부착 전달이론이 발표된 이래, 많은 연구와 실험이 수행되고 있으며, 지금까지도 기본적인 균열폭 산정식은 균열간격과 철근과 콘크리트사이의 변형률 차이로 구성된다. 초기에 제시되었던 균열폭 산정이론들은 실험결과와 잘 일치하지 않는 경향을 나타내기 때문에, 식 자체를 실험적으로 수정하거나 또는 새로운 이론을 도입하거나 이론과 무관한 독창적인 실험식으로부터 이론이 제안되고 있다. 이러한 제안들은 ACI, CEB-FIP과 같은 주요 규정에서 널리 이용되고 있으나, 적용범위와 실험결과와의 적합성 등에서 검토되어야 할 문제가 잔존하는 상황이다.

이에 대해서 본 연구는 최대 균열폭을 산정하기 위해서 최소 균열간격의 2배에 상응하는 최대 균열간격을 부착 전달길이에 적용하였다. 또한 철근과 콘크리트 평균 변형률의 차에 건조수축과 크리프의 영향을 고려하는 기존 이론을 이용하였다. 균열간격 산정에서 주요인자인 부착응력과 최대균열폭에 대한 상관관계를 확립하기 위해서 STD 16 Series, S-D16, S-D19 Series의 측정결과를 이용해서 기존의 주요 시방규정과 비교하여 최대 휨 균열폭 산정식에 대한 타당성을 확인하고자 한다.

* 학생회원, 성균관대학교 토목공학과 박사과정
** 학생회원, 성균관대학교 토목공학과 박사과정
*** 학생회원, 성균관대학교 토목공학과 석사과정
**** 정회원, 성균관대학교 토목공학과 부교수

2. 균열폭의 기초이론

2.1 부착응력과 균열간격

축인장력을 받는 철근 콘크리트 부재의 인장응력 및 부착응력 분포가 Fig. 1에서 나타내고 있다. 이 때 임의의 균열사이에 나타나는 균열간격, l 을 이상화된 경우인 정상상태(Stabilized State)라고 생각한다. 균열폭, w 는 균열 사이의 콘크리트의 변형률, ϵ_c 과 철근의 변형률, ϵ_s 의 차가 균열위치에 집중되어 나타난다고 생각할 수 있으며, 일반적인 균열폭 산정식은 다음의 형태로 제시된다.

$$w = l(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) \quad (1)$$

여기서 ϵ_{sm} 는 철근의 평균변형률이며, ϵ_{cm} 는 콘크리트의 평균변형률이다.

Fig. 1과 같이 균열간격의 중간부분에서 철근과 콘크리트 사이의 부착작용으로 인해서 철근에 작용하는 힘의 일부가 콘크리트로 전달된다. 균열로부터 x 만큼 떨어진 위치에서 부착응력을 $\tau_b(x)$, 철근의 인장응력을 $f_s(x)$, 콘크리트의 인장응력을 $f_c(x)$, 철근의 周長을 u 라고 하면 $x = l/2$ 일 때 $f_c(x)$ 의 최대값, $f_{c,max}$ 는 다음과 같다.

$$f_{c,max} = \frac{u}{A_c} \int_0^{l/2} \tau_b(x) dx = \frac{u \tau_{bm} l}{2A_c} \quad (2)$$

여기서 A_c, A_s 는 콘크리트, 철근의 단면적이며 τ_{bm} 은 균열간격에 대한 평균 부착응력이다.

계속되는 실험과 연구에 의해서 식 (2)로 부터 얻어지는 균열간격에 대한 일반적인 이론치로, 부착작용의 영향을 나타내는 부착 전달길이, l_e 는 τ_{bm} 의 함수로 다음과 같이 일반화되어 제시된다.

$$l_e = \frac{f_t A_n}{\tau_{bm} u} = G \frac{f_t d_s}{4 \tau_{bm} \rho} \quad (3)$$

여기서 A_n 은 콘크리트의 순단면적, G 는 인장 및 휨에 대응하는 실험계수, d_s 는 철근직경이며, ρ 는 철근비이다.

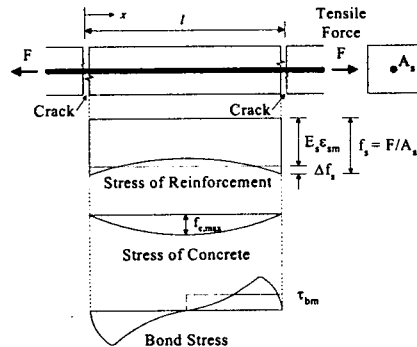


Fig. 1 Stress variations of a cracked concrete member under tension

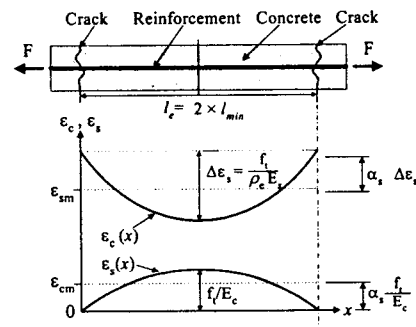


Fig. 2 Strain variations of a cracked concrete member

l 의 한계치로써 최대균열간격, l_{max} 와 최소균열간격, l_{min} 에 대해 $l_{max} \geq l \geq l_{min}$, $l_{max} = 2l_{min}$ 의 일반법칙이 인정되고 있다.(Goto, 1971) 또한 인장영역에 대한 l_{min} 은 다음과 같다.(Leonhardt, 1976)

$$l_{min} = \frac{f_t A_{ce}}{\tau_{bm} u} = \frac{f_t d_s}{4 \tau_{bm} \rho_e} \quad (4)$$

여기서, A_{ce} 는 동일도심을 갖는 유효 콘크리트 단면적이며 유효 철근비, $\rho_e = A_s/A_{ce}$ 이다.

2.2 평균 부착응력 및 평균변형률의 산정

Fig. 1에서 일반화된 균열간격, l 을 부착 전달길이, l_e 로 생각하면, τ_{bm} 과 $\tau_b(x)$ 의 관계는 다음 식으로 표현된다.

$$\tau_{bm} = \frac{1}{l_e} \int_0^{l_e} \tau_b(x) dx \quad (5)$$

CEB-FIP Model code 1990 (1993)이 제시하는 부착응력과 상대슬립 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$\tau_b(x) = C \times S(x)^a \quad (6)$$

여기서 C 는 콘크리트의 강도와 철근 종류에 관련된 상수이며, $S(x)$ 는 부재축 거리 x 에 대한 상대슬립, a 는 철근종류에 따른 콘크리트와 철근과의 부착상태를 나타내는 상수이다.

König (1996)는 실험적 연구를 통해서 균열간격과 상대슬립의 상관계수, λ 와 l_e , 평균 균열폭, w_{av} 의 관계를 이용하여 τ_{bm} 을 다음과 같이 제안했다.

$$\tau_{bm} = \frac{C}{1+\lambda a} \left(\frac{w_{av}}{2} \right)^a \quad (7)$$

균열간격과 병행하여 균열폭을 결정하는 요인은 균열사이에 철근과 콘크리트 변형률의 차이이다. Fig. 2에서 균열과 균열사이의 간격 l_e 내에서 철근과 콘크리트의 변형률 분포를 보이며, 이때 철근과 콘크리트의 평균변형률의 차는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \varepsilon_{sc} - a_s \Delta \varepsilon_s - a_s \frac{f_t}{E_c} = \left[\varepsilon_{sc} - \frac{a_s f_t}{E_s \rho_e} (1+n \rho_e) \right] \quad (9)$$

여기서 ε_{sc} 는 균열위치에서 철근의 변형률이며, $\Delta \varepsilon_s$ 는 l_e 내에서 x 를 따라서 변화하는 철근의 변형률 중에서 최대 변형률 차를 나타낸다. a_s 는 철근과 콘크리트 사이의 부착응력에 관련된 상수이다.

CEB-FIP Model code 1990 (1993)은 일반적인 경우에 대해서 a_s 를 0.6으로 사용하도록 권장하며, 본 연구는 철근과 콘크리트 사이의 부착조건에 의해서 a_s 를 다음과 같이 계산했다.

$$a_s = \frac{1}{2 + \lambda a} \quad (10)$$

콘크리트의 건조수축과 크리프는 균열폭의 증가를 수반하며, 철근과 콘크리트 사이의 변형률 차이를 추가적으로 증가시키는 동시에 균열간격에도 영향을 주지만, ε_{cs} 를 도입함에 따라 합리적인 평가가 어느 정도 가능하다는 것이 角田 (1978), 尾板 (1985) 등의 연구로부터 제안되고 입증되었다. 본 연구는 건조수축과 크리프의 영향을 고려한 ε_{cs} 를 식 (9)에 추가하여 다음과 같은 식을 제시한다.

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \left[\varepsilon_{sc} - \frac{1}{2 + \lambda a} \frac{f_t}{E_s \rho_e} (1+n \rho_e) + \varepsilon_{cs} \right] \quad (11)$$

여기서 ε_{cs} 는 콘크리트의 건조수축 및 크리프에 의한 균열폭 증가를 고려하기 위한 변형률 값으로 일본 토목학회 (1996)에서는 $100 \sim 300 \times 10^{-6}$ 로 제안하나 본 연구에서는 150×10^{-6} 을 사용했다.

3. 최대 휨 균열폭 산정식의 제안

3.1 시험체의 단면제원

본 연구에서 균열폭 산정식의 비교와 검증을 위해서 사용된 단면제원은 Fig. 3과 같다. STD 16 Series 단면은 전체길이 2.2 m에 순지간 2 m의 휨균열 시험체로 4개의 시편을 STD 16-1, 2, 3, 4로 표기하며, S-D16 Series, S-D19 Series 단면은 전체길이 2.6 m, 순지간 2.3 m의 휨균열 시험체로 3개의 시편을 S-D16A-1, S-D16B-1, S-D19-1로 표시하여 균열폭 측정실험을 수행했다.

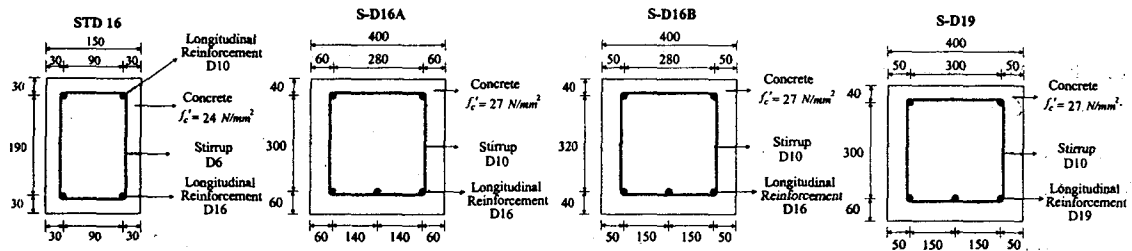


Fig. 3 Sectional properties of the specimens

3.2 최대균열폭 산정식

균열폭에 관해서 각 연구자에 의해 제안된 이론은 균열간격의 정식화에서 그 차이가 있다. 본 연구에서는 $l_{max}/l_{min} = 2$ 의 관계를 이용해서 최대 휨 균열폭, w_{max} 를 다음과 같이 나타냈다.

$$w_{max} = l_e (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) = 2l_{min} (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) \quad (12)$$

또한 식 (4)을 이용하여 l_{min} 에 대해서 다음 식을 제시한다.

$$l_{min} = \frac{f_t d_s}{4 \tau_{bm}' \rho_e} \quad (13)$$

여기서 τ_{bm}' 은 최소 균열간격에 상응하는 평균 부착응력이다.

본 논문에서 STD 16 단면의 측정결과를 사용하여, 부착응력과 최대 휨 균열폭의 관계를 다음과 같이 최소 균열간격에 대한 평균 부착응력식으로 제시한다.

$$\tau_{bm}' = \frac{kC}{1+1.2\alpha\lambda} \left(\frac{w_{max}}{2} \right)^{1.2\alpha} \quad (14)$$

여기서 k 는 휨에 대한 부착응력과 최대 균열폭의 영향계수이며 이형철근의 경우 4.5이다.

최대 휨 균열폭 산정식은 식 (12)에 식 (11), (13), (14)를 대입하여 다음과 같이 제시할 수 있다.

$$w_{max}^{1+1.2\alpha} = \frac{2^{1.2\alpha-1} \times f_t \times d_s \times (1+1.2\lambda\alpha)}{k \times C \times \rho_e} \left[\epsilon_{sc} - \frac{1}{2+\lambda\alpha} \frac{f_t}{E_s \rho_e} (1+n\rho_e) + \epsilon_{cs} \right] \quad (15)$$

4. 제안식과 측정결과와의 비교

4.1 균열폭 제안식의 도해적 비교

균열폭 제안식(New Equation)의 검증을 위해서 STD 16 Series 단면의 측정결과와 주요 시방서의 균열폭 산정식을 비교하였다. 여기서 Experiment는 측정결과, New Equation은 본 연구에서 제안한 균열폭 산정식이다. 도해적 비교는 Fig. 4와 같다.

New Equation은 STD 16-1, 2, 3, 4의 측정결과를 이용하여 산정했기 때문에, 보다 객관적인 비교를 위해서 제원이 다른 단면 S-D16A-1, S-D16B-1, S-D19-1과 비교를 수행하였다. 비교결과는 Fig. 5에서 볼 수 있다.

4.2 균열폭 제안식과 주요 시방서 기준에 대한 통계적 비교

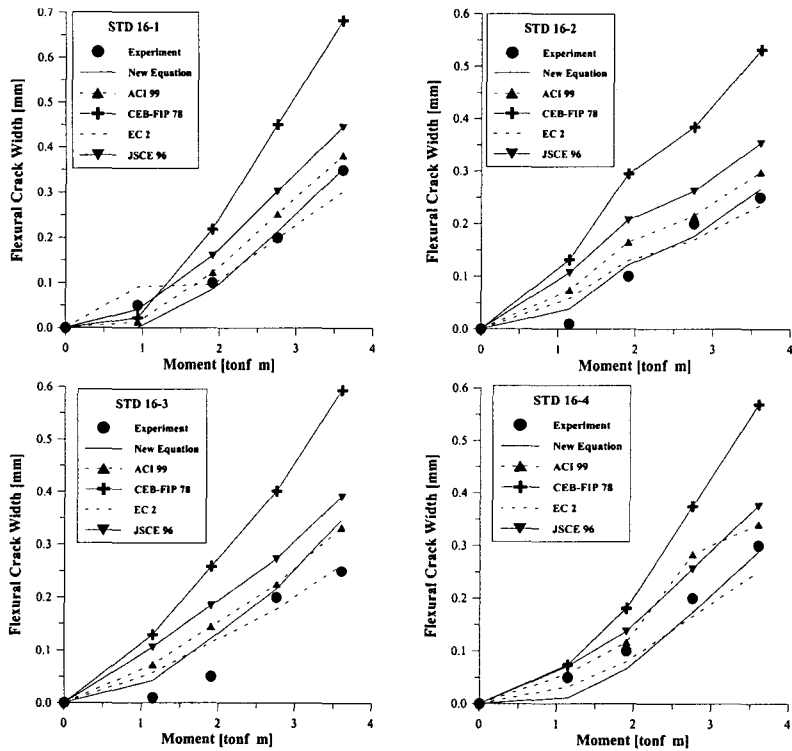


Fig. 4 Comparisons of analytical methods with the experiment in STD 16 Series

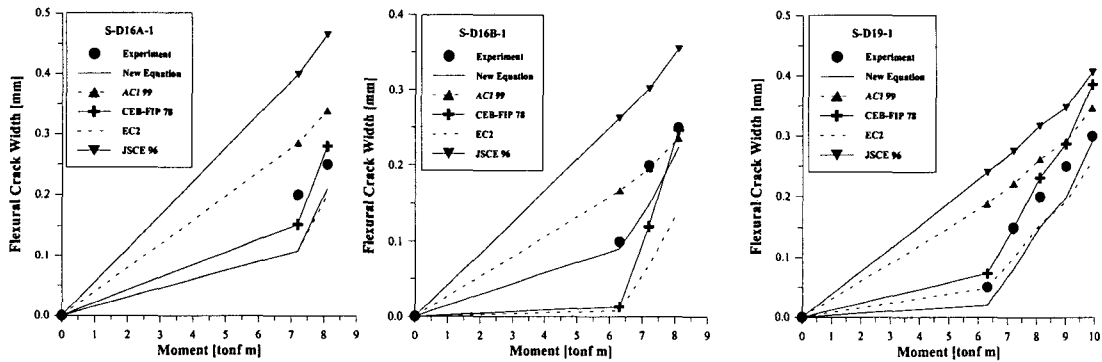


Fig. 5 Comparisons of analytical methods with the experiment in S-D16, S-D19 Series

본 논문에서 통계적 비교에 의해 제안식에 대한 정확성과 타당성에 대해 검증하고자 한다. Table 1은 제안식과 주요 시방서의 기준과의 비교를 나타내고 있다. 여기서 각 균열에 대한 계산치, C(Calculation)로 STD 16과 S-D16, S-D19 Series에 대한 실험치, E(Experiment)로 나타내며, C/E는 계산치와 실험치에 대한 비를 보인다. C/E=1인 경우는 계산과 실험에 의해 얻어진 값이 일치하는 이상적인 경우를 의미한다. C/E>1 경우는 계산치가 실험치보다 과대평가, C/E<1 경우는 계산치가 실험치보다 과소평가됨을 알 수 있다. Table 1에서는 타 시방 규정식(ACI 318-99, Eurocode 2, JSCE 1996(일본토목학회식))이 단면에 따라서 표준편차가 급격히 변화함에 비해서, 본 제안식은 안정적이며 신뢰성이 높은 통계적 결과를 나타냄을 알 수 있다. 또한 평균(Average)과 표준편차(Standard Deviation)가 타 규정식보다 탁월하게 뛰어난 것을 알 수 있다.

Table 1 Average and standard deviation of the analytical methods

Method	Average of C/E	Standard Deviation of C/E	Series of Section
New Equation	0.947	0.280	STD 16
	0.762	0.191	S-D16, S-D19
	0.863	0.261	Total
ACI 318-99	1.380	0.482	STD 16
	1.311	0.198	S-D16, S-D19
	1.351	0.388	Total
Eurocode 2	1.048	0.393	STD 16
	0.610	0.228	S-D16, S-D19
	0.860	0.398	Total
JSCE 1996	1.642	0.655	STD 16
	1.786	0.384	S-D16, S-D19
	1.704	0.560	Total

5. 결 론

Fig. 4의 STD-16 Series에서 모멘트가 2 [tonf·m] 이전에서는 균열이 정상상태로 추이되는 과정이기 때문에 다소 급격한 변화를 나타냄을 알 수 있다. 이와 같이 정상상태 이전에서 균열폭을 예측하는 것은 상당히 어렵고 복잡하기 때문에, 일반적으로 균열폭의 산정은 정상상태에서 이루어지고 있다. 단면변화에 따른 대표적 비교 예를 들면, EC 2는 STD-16 Series에서 측정결과와 근접한 결과를 보이지만, S-D16 Series, S-D19 Series로 단면이 변화되어 적용될 때, 상당히 과소평가됨을 알 수 있다. 본 논문은 STD-16, S-D16, D19 Series에 대해 비교 및 검토를 수행하였으나, 타 제원의 단면적용에 대한 추가적인 연구가 요망된다. 단면제원이 변화하는 경우에도 상대슬립과 최대균열폭의 관계를 이용한 평균 부착응력을 사용할 때, 기존 연구에서 연구된 철근간격 및 덮개 등을 이용한 시방서 규정식보다 더 효과적으로 최대 휨 균열폭을 산정할 수 있음을 알 수 있었다.

6. 참 고 문 헌

- 尾板芳夫, 大塚浩司, 松本英信 (1985) “乾燥の影響を受ける引張RC供試体のひびわれ性状,” 콘크리트工学, Vol. 23, No. 3, pp. 109~119.
- 角田與史雄, 小柳 洽, 池田尚治 (1982) 新體系土木工学 - 鐵筋콘크리트の力學, 技報堂.
- 日本土木學會 (1996) 콘크리트標準示方書.
- König, G. and Tue, N. (1996) "Grundlagen und Bemessungshilfen für die Rißbreitenbeschränkung im Stahlbeton und Spannbeton," Beuth, Berlin.
- Leonhardt, F. (1976) Vorlesungen über Massivbau, Springer-Verlag.
- Saliger, R. (1950) Die Neue Theorie des Stahlbetons, Frauz Denticke.
- American Concrete Institute, ACI (1999) Building Code Requirements for Reinforced Concrete, ACI 318-99.
- CEB-Bulietin d'Information Final Draft (1993) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford, U.K.
- Eurocode 2 (1991) Design of Concrete Structures, Part 1, General Rules and Rules for Building, European Prestandard, Brussels, ENV 1992-1-1.
- Goto, Y. (1971) "Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars," Journal of ACI, Vol. 68.
- Watstein, D. and Parsons, D. (1943) "Width and Spacing of Tensile Cracks in Axially Reinforced Concrete Cylinders," Journal of National Bureau of Standard, Vol 31, No. RP 545.