



## 부착특성을 고려한 철근콘크리트 부재의 휨 균열폭 산정 및 비교

고원준<sup>1)\*</sup> · 민병철<sup>1)</sup> · 박선규<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>인덕대학 건설환경학과, <sup>2)</sup>성균관대학교 토목환경공학과

## The Estimation and Comparison of Flexural Crack Width Considering Bonding Characteristics in Reinforced Concrete Members

Won-Jun Ko<sup>1)\*</sup>, Byung-Chul Min<sup>2)</sup>, and Sun-Kyu Park<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil and Environmental Engineering, Induk Institute of Technology, Seoul 139-749, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Civil and Environmental Engineering, SungKyunKwan University, Suwon 440-330, Korea

**ABSTRACT** In recent years, the availability of high-strength reinforcing and prestressing steels leads us to build economically and efficiently designed concrete structural members. One of critical problems faced to the structural engineers dealing with these types of structural member is controls of crack width that is used as a criterion for the serviceability in the limit state design. Especially, flexural cracking must be controlled to secure the structural safety and to improve the durability as well as serviceability of the load carrying members. The proposed method utilizes the results of pure tension test, in which tensile loads are applied both side of specimen, done by Ikki. The bond characteristics of deformed reinforcing bar under pure tension is considered by the area of concrete and rib area. The results of proposed method are compared with the test data and the results show that the proposed method can take into account the dimensions, variation of sectional properties, and direction of reinforcing and gives more accurate maximum bond stress and corresponding relative slip than the existing methods. the characteristics of bonding is considered by using dimensionless slip magnitude and effective reinforcement ratio. The validity of the proposed equation is verified by test experimental data.

**Keywords** axial load, bonding, bond stress, reinforcement, slip

### 1. 서 론

최근 경제성을 고려한 효율적인 설계와 시공이 증대함에 따라 부재단면이 작아지며 고강도강재의 사용증가에 수반하여, 한계상태설계에서 사용성의 기준이 되는 균열폭 제어가 중요한 문제로 대두되고 있다. 철근콘크리트 부재의 안정성 측면에서 휨, 전단내력을 확보하고, 사용성 및 내구성 면에서는 휨 인장부에 발생하는 균열을 제어해야 한다. 균열폭 거동에 관해서는 다수의 연구들이 수행되고 있지만 복잡한 상호 요인들로 인하여, 최대 휨 균열폭의 평가방법은 아직 정립되지 않은 상태이다. 부착 전달이론이 발표된 이래, 많은 연구와 시험이 수행되고 있으나 지금도 균열폭 산정에 적용되는 가장 대표적 이론이다.

균열간격과 철근의 변형률로 구성되는 균열폭 산정은 결국 하중변화에 대응하는 균열간격의 결정이라고 정의할 수 있다. 최대균열폭을 얻기 위해서는 이에 상응하는 정확한 최대균열간격을 수반되어야 하며, 이를 위해서 최대 부착응력치가 반드시 필요하다. 즉 재하하중, 부착

조건에 따라서 변화하는 부착응력-상대슬립 관계가 규정되지 않는다면, 실제거동에 대응하는 균열폭은 산정할 수 없다. 그러나 최대균열폭을 산정함에 있어서 부착응력은 균열간격을 결정하는 주요변수이며, 재하하중, 부착조건 및 상대슬립 등 여러 조건에 따라서 민감하게 변화하기 때문에, 이를 주요시방서에서 동일조건으로 적용함은 균열폭 연구의 모순이라고 생각된다.

이는 하중 및 상대슬립의 변화에 따라서 급격한 변화를 보이는 부착응력에 대한 특성이 전혀 균열폭 산정식에 고려되고 있지 않다고 말할 수 있다.

본 연구자는 ‘축인장 부재의 부착응력-상대슬립 관계 산정(2002)’<sup>1)</sup>에서 제안한 양측인장에 대한 부착응력식을 이용하여 실제구조물인 휨인장 시험체에 확대 적용했다. 기존 연구에서 2개의 단면형태에 대해서 13개의 시험체를 비교했으나 스티럽이 배근되지않은 3개의 시험체는 갑작스러운 파괴가 나타나서 실제 비교가능한 시험체는 10개였다.

이번 연구에서는 스티럽철근과 콘크리트 강도 및 단면 형태를 달리한 16개의 신규시험체를 제작하고 객관적 평가를 위해서 Mathey가 제작한 4개의 시험체를 포함해서 총 30개의 시험체에 대해서 비교, 분석했다. 본 연구는 휨에 대한 부착응력 영향계수,  $k_f$ 를 이용하여 단면치수

\*Corresponding author E-mail : kowj00@hanafos.com  
Received September 5, 2005, Accepted September 11, 2006  
©2006 by Korea Concrete Institute

변화를 고려하며, 부착에 직접적인 영향을 끼치는 환산리브면적계수를 이용하여 최대 휨 균열폭 산정을 수행했다.

## 2. 균열폭의 기초 이론

### 2.1 부착응력과 균열간격

축인장력을 받으며 단면의 중심부에 철근이 들어있는 철근콘크리트 부재의 인장응력 및 부착응력 분포가 Fig. 1에서 나타내고 있다. 균열폭,  $W$ 는 균열 사이의 콘크리트의 변형률,  $\epsilon_c$ 와 철근 변형률,  $\epsilon_s$ 의 차가 균열위치에 집중되어 나타난다고 생각할 수 있다.

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

여기서  $\epsilon_{sm}$ 는 철근의 평균변형률이며,  $\epsilon_{cm}$ 는 콘크리트의 평균변형률이다.

일반적으로 부착작용은 극히 복잡하기 때문에, 임의의 상태에 대해서  $\tau_b(x)$ 의 분포를 정확하게 추정하는 것은 현시점에서 거의 불가능하다. 이 때문에 분포가 일정하지 않은 대신에 대략적으로 부착응력의 평균값인  $\tau_{bm}$ 을 사용하고 있으며 균열간격에 대해서 다음과 같이 정의하고 있다.

$$l = K \frac{A_c f_t}{u_s \tau_{b, \max}} \quad (2)$$

여기서  $K$ 는 균열간격에 대한 확률변수,  $A_c$ ,  $A_s$ 는 콘크리트, 철근의 단면적,  $f_t$ 는 콘크리트 인장강도이며,  $\tau_{b, \max}$ 는 균열의 정상상태에서 최대 부착응력이다.

계속되는 실험과 연구에 의해서 식 (2)에서 제시된 균열간격에 대한 일반적인 이론치로, 부착작용의 영향을 나타내는 부착 전달길이,  $l_e$ 는  $\tau_{bm}$ 의 함수로 다음과 같이 일반화되어 제시된다.

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

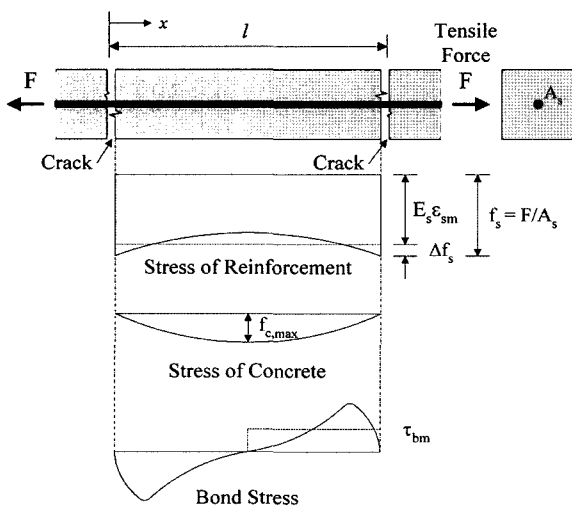


Fig. 1 Stress variations of a cracked concrete member under tension(stabilized state)

여기서,  $A_n$ 은 콘크리트의 순단면적,  $G$ 는 인장 및 휨에 따라서 적용되는 실험적 계수,  $d_s$ 는 철근의 직경이며,  $\rho$ 는 철근비이다.

일반적으로 축력을 받는 콘크리트 부재를 휨을 받는 경우와 비교할 때, 일부 변수에서 다소간의 차이는 있으나, 부착전달길이와 부착응력의 관계를 휨에 확장하여 적용할 수 있으며, 이는 균열폭이론 전개에서 일반적인 법칙으로 인정되고 있다<sup>3)</sup>.

균열발생 후, 정상상태에서 인장영역에서 발생하는 최소균열간격은 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서,  $A_{ce}$ 는 유효콘크리트 단면적이며,  $\rho_e = A_s / A_{ce}$ 는 유효철근비이다.

### 2.2 철근과 콘크리트의 평균변형률

균열간격과 병행하여 균열폭을 결정하는 요인은 균열 사이의 철근과 콘크리트의 변형률의 차이이다. Fig. 2는 최대균열간격,  $l_{\max}$ 내에서 철근과 콘크리트의 평균변형률 분포를 보이고 있다.

이때 철근과 콘크리트의 평균 변형률 차는 다음과 같다.

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \epsilon_{sc} - \alpha_s \Delta \epsilon_s - \alpha_s \frac{f_t}{E_c} = \left[ \epsilon_{sc} - \frac{\alpha_s f_t}{E_s \rho_e} (1 + n \rho_e) \right] \quad (5)$$

여기서  $\epsilon_{sc}$ 는 균열발생이후, 철근의 변형률,  $\alpha_s$ 는 철근과 콘크리트 사이의 부착응력에 관련된 상수,  $\Delta \epsilon_s$ 는  $l_e$ 내에서 변화하는 철근변형률 중에서 최대 변형률 차이이며,  $n$ 은 탄성계수비이다.

CEB-FIP Model Code 1990<sup>2)</sup>은 일반적인 경우에 대해서  $\alpha_s$ 를 0.6으로 사용하도록 권장하고 있으며, 본 연구에서도 최대 균열폭 산정시  $\alpha_s = 0.6$ 을 적용하였다. 또한 콘크리트의 건조수축 및 크리프에 의한 균열폭 증가를

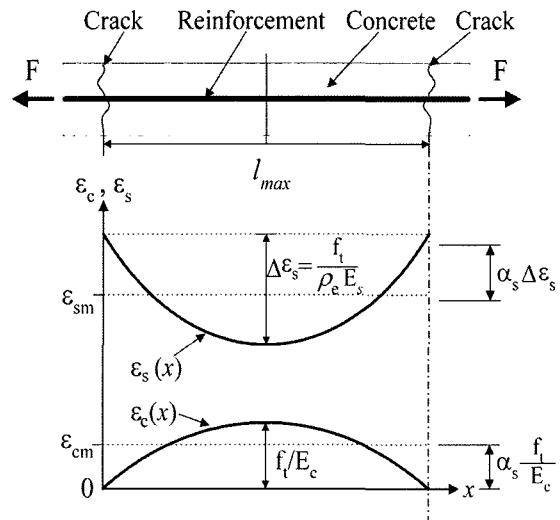


Fig. 2 Strain variations of a cracked concrete member

고려하기 위한 변형률 값,  $\epsilon_{cs}$ 를 도입함으로써 합리적인 평가가 어느정도 가능하다는 것이 角田<sup>5)</sup>, 尾板<sup>6)</sup> 등의 연구로부터 제안되고 입증되었다.

이러한 근거에 의해서 본 연구에서는 건조수축과 크리프의 영향을 고려한  $\epsilon_{cs}$ 를 식 (5)에 추가하여 콘크리트와 철근사이의 평균변형률에 관한 식을 다음과 같이 제시하였다.

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \left[ \epsilon_{sc} - \frac{\alpha_s f_t}{E_s \rho_e} (1 + n \rho_e) + \epsilon_{cs} \right] \quad (6)$$

일본토목학회<sup>7)</sup>에서는  $\epsilon_{cs}$ 를  $100 \sim 300 \times 10^{-6}$ 으로 제안하며 일반적으로는  $150 \times 10^{-6}$ 으로 추천하고 있다.

### 3. 시 험

본 연구는 양측인장에 대한 부착응력식을 철근콘크리트 부재의 최대 휨균열폭 산정에 적용하며, 이에 대한 영향을 고려하기 위해서 기존 10개의 시험체와 별도로 휨 시험체 16개를 새로이 제작하여 각 하중 단계별 균열폭을 측정했다. 이때 휨시험체는 최대 휨균열폭에 영향을 끼치는 시험 변수로는 콘크리트 압축강도, 철근 직경, 스테럽 철근간격, 환산리브면적 및 철근의 슬립량을 변수로 했다. 이때 인장철근의 변형률을 변형률계지기로 측정했고 이때 간격을 100 mm로 균일하게 좌우대칭으로 부착했다. 이때 측정되어진 철근변형률로부터 슬립량을 계산하기 위해서 山尾<sup>8)</sup>가 제안한 방법을 사용했다. 또한 슬립량을 측정할 수 없는 기존 시험체인 F29 Series의 휨 시험체 4개를 이용하여 본연구자가 제안한 부착응력식의 타당성을 확보했다. 모든 시험체의 하중 재하시험에는 U.T.M.(Shimazu UEH- 100)을 사용하여 4점 재하했다. 또한 data logger인 EDX-1500A(Kyowa 電業)을 이용하여 철근의 변형률을 측정했다. 본 시험에서 공장제 레미콘 제품을 사용했다. 이때  $f'_c$ 은 콘크리트 28일 압축강도이다. 시험체의 배근에 사용된 철근은 동일제조사의 설계항복응력이 3,500 kgf/cm<sup>2</sup>인 D6 철근과 설계항복응력 4,000 kgf/cm<sup>2</sup>인 D10, D13, D16, D19 철근을 사용하였다. 이때 F29, F30, F37 Series은 모두 150×250×2,000(mm)의 제원에 대해서 D6의 스테럽철근을 사용했고, FT37 series에는 200×350×2,000(mm)의 제원에 대해서 D10의 스테럽철근을 사용했다.

본 실험에서 사용된 시험체는 충분히 긴 부착길이를 확보하고 있으며, 시험요인을 고려한 휨 시험체의 상세 제원은 Figs. 3, 4와 Table 1에서 제시했다.

### 4 부착응력식의 적용

#### 4.1 양측인장에 대한 부착응력식

본 연구자가 수행한 양측인장 시험 결과를 근거로하는 부착응력식은 실제거동을 고려하여 충분히 긴 부착길이

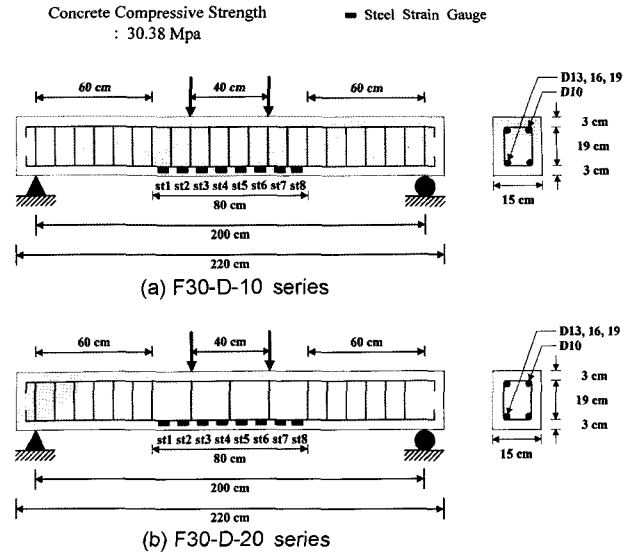


Fig. 3 Sectional properties of the specimens (flexural beam, F30 series)

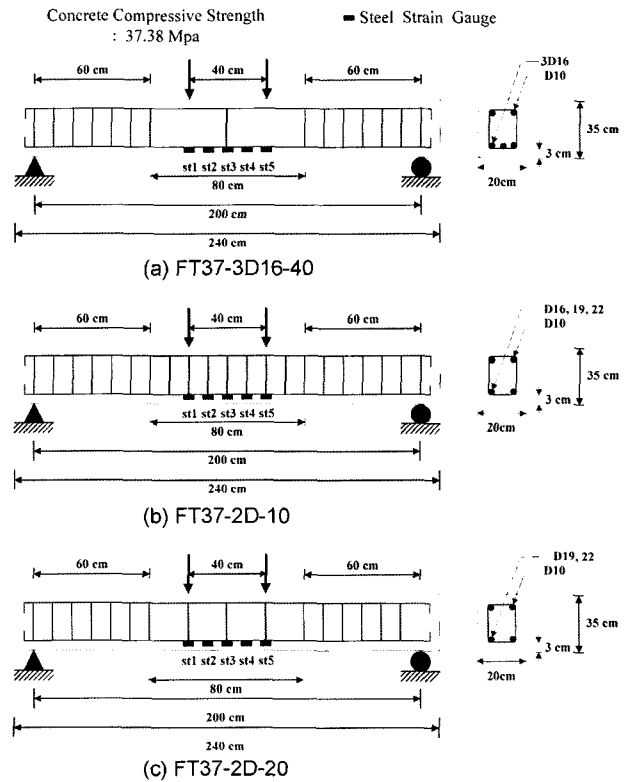


Fig. 4 Sectional properties of the specimens (flexural beam, FT37 series)

를 갖는 정착부착에 대한 제안식으로 다음과 같다.

$$\tau_b = k \times f'_c{}^{1/2/3} [1 - \exp[-4,500 (S/d_s)^{1.45}]]^{0.5} \times \exp[-5(S/d_s) + 5.5 A_R^{0.9}] \quad (7)$$

여기서  $k$ 는 축인장 부착응력에 대한 영향을 정량적으로 평가하는 계수,  $A_R$ 은 환산리브면적,  $S$ 는 상대슬립량이다. 본 연구자는 정상상태에서 휨 인장부의 응력상태는 축

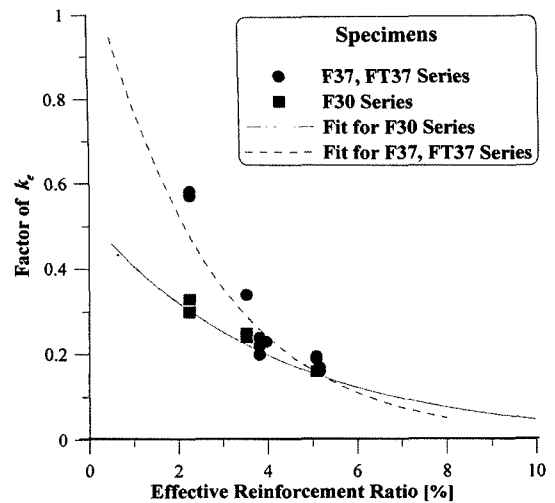
**Table 1** Characteristics of test specimens

Type(series) (1)	Specimen (2)	$f'_c$ (MPa) (3)	Spacing of stirrup (cm) (4)	Rebar (5)
F29	F29-2D16-10A	28.91	10	D16
	F29-2D16-10B			
	F29-2D16-10C			
	F29-2D16-10D			
F30	F30-2D13-10	30.38	10	D13
	F30-2D13-20		20	
	F30-2D16-10	30.38	10	D16
	F30-2D16-20		20	
	F30-2D19-10	30.38	10	D19
	F30-2D19-20		20	
F37	F37-2D13-10	37.38	10	D13
	F37-2D13-20		20	
	F37-2D16-10	37.38	10	D16
	F37-2D16-20		20	
	F37-2D19-10	37.38	10	D19
	F37-2D19-20		20	
FT37	FT37-2D16-10	37.38	10	D16
	FT37-3D16-10		10	
	FT37-3D16-20		20	
	FT37-3D16-40		40	
	FT37-2D19-10	37.38	10	D19
	FT37-2D19-20		20	
	FT37-2D19-40		40	
	FT37-2D22-10	37.38	10	D22
	FT37-2D22-20		20	
	FT37-2D22-40		40	

인장 모델과 동일하다는 기존가정으로부터 휨시험체에 도입했으며 이에 대한 경향을 반영하는 결과를 얻었으나, 각 부재마다  $k_e$ 에 따른 상이한 차이가 발생했다. 본 연구자는 축인장부재는 단순히 철근의 직경과 콘크리트 단면적으로 구성되지만, 휨시험체에서 스티럽 철근의 배근간격과 주인장철근의 배근위치, 단면치수변화의 영향 및 여러 상호작용에 의해서 이와 같은 차이가 발생한다고 생각했다. 본 연구에서는 휨시험체에 대해서 기존  $k$ 를 대신하여 휨에 대한 부착응력 영향계수,  $k_f$ 를 도입하여 식 (7)을 다음과 같이 정리했다.

$$\tau_b = k_f \times f'_c{}^{2/3} [1 - \exp[-4,500 (S/d_s)^{1.45}]]^{0.5} \times \exp[-5(S/d_s) + 5.5 A_R^{0.9}] \quad (8)$$

본 논문에서 휨 균열폭 시험을 수행한 26개의 시험체와 이에 대한 실험 결과를 반영하는 부착영향계수,  $k_e$ 와 의 비교 및 보간에 의해서 Fig. 5와 같이 부착영향계수를 유효철근비의 관계로 정리할 수 있었다.



**Fig. 5** Comparisons of the effective reinforcement ratio with  $k_e$  in specimens

$$k_f = 0.0166 \exp [0.1134 f'_c + 100 \rho_e [1.79 - 0.6 \ln (100 \rho_e)]] \quad (9)$$

#### 4.2 휨 시험체에 대한 부착응력식

휨부재에 대한 부착응력식은 F29 Series와 같이 변형률계지를 다수 설치하지 않아서 변형을 분포 및 부착응력의 분포를 확인할 수 없는 시험체 및 일반적인 휨 시험체에 대해서 슬립량의 적용이 문제가 되어서 기존 휨시험체에 적용하기 어려운 문제점을 인식했다.

이에 대해서 본 연구는 CEB-FIP<sup>9)</sup>에서 철근콘크리트 부재의 균열폭 산정에서 평균균열간격을 100 mm로 제시한 내용을 근거로 하여 순 휨구간에서 100 mm간격에 대한 상대슬립량의 평균값과 최대균열폭,  $W_{max}$ 의 상관관계에 대해서 다음과 같이 정식화했다. 이때  $f_t/E_c$ 의 값이 극히 작으므로 간략화를 위해서 콘크리트 슬립항을 생략해도 무방하다.

$$S = \int \epsilon_s dx - \int \epsilon_c dx = \int \epsilon_s dx - \alpha_s \int \frac{f_t}{E_c} dx \quad (10)$$

$$S/d_s [\%] = 1.8 \left( \frac{\ln [25 \times W_{max}]}{\exp^v} \right) \quad (11)$$

여기서  $v$ 는 환산리브면적의 영향계수이다.

일례로 F30 series, FT37 series에 대해서 최대균열폭과 무차원화한 상대슬립의 상관관계를 통해서 환산리브면적의 영향을 반영하는 변수,  $v$ 의 값을 상수로 산정하여 스티럽 간격에 대해서 다음과 같이 정리했다.

$$\sqrt{F^{30-10}} = 2.737 \times \ln [A_R] + 6.919 \quad (12-a)$$

$$\sqrt{F^{30-20}} = 3.355 \times \ln [A_R] + 8.271 \quad (12-b)$$

$$\sqrt{F^{37-10}} = 2.844 \times \ln [A_R] + 7.274 \quad (13-a)$$

$$\sqrt{F^{37-20}} = 4.293 \times \ln [A_R] + 10.27 \quad (13-b)$$

$$\sqrt{F^{37-40}} = 3.107 \times \ln [A_R] + 7.683 \quad (13-c)$$

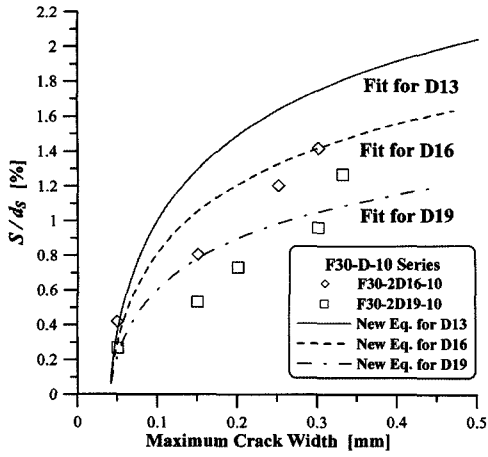


Fig. 6 The relationship between the maximum crack width and relative slip in F30-D-10 series

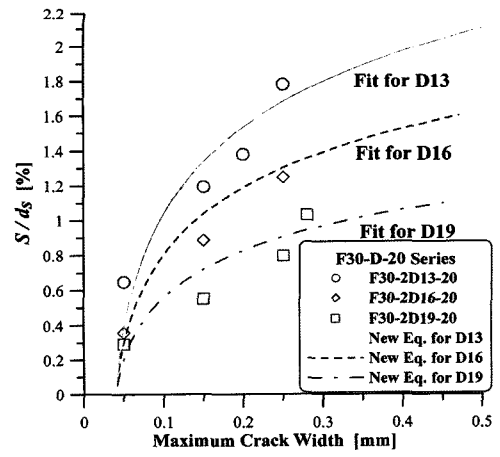


Fig. 7 The relationship between the maximum crack width and relative slip in F30-D-20 series

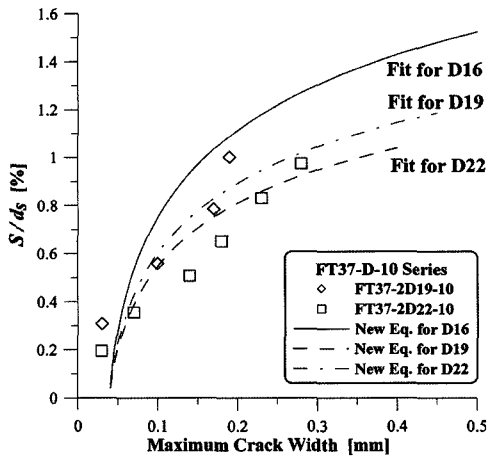


Fig. 8 The relationship between the maximum crack width and relative slip in FT37-D-10 series

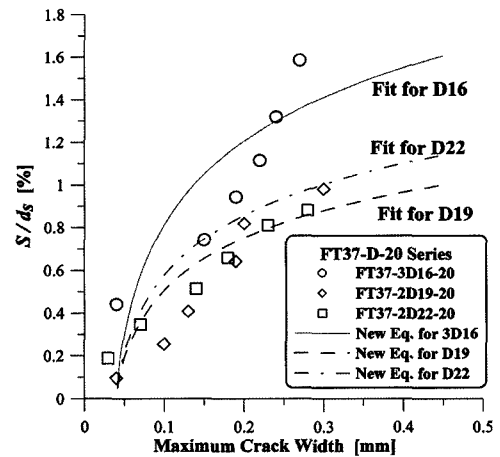


Fig. 9 The relationship between the maximum crack width and relative slip in FT37-D-20 series

여기서  $v$ 의 위첨자는 콘크리트 압축강도-스터럽간격을 의미한다.

식 (11)을 이용하면 스테럽간격에 대한 환산리브면적의 함수로 구성되는 상대슬립의 관계식을 F30 series, FT37 series에 대해서 다음과 같이 제시할 수 있다.

For F30-D-10 series,

$$S/d_s[\%] = 0.0142 \left[ \frac{\ln(25W_{max})}{A_R^{2.737}} \right]^{0.7} \quad (14-a)$$

For F30-D-20 series,

$$S/d_s[\%] = 0.00551 \left[ \frac{\ln(25W_{max})}{A_R^{3.355}} \right]^{0.7} \quad (14-b)$$

For FT37-D-10 series,

$$S/d_s[\%] = 0.0111 \left[ \frac{\ln(25W_{max})}{A_R^{2.844}} \right]^{0.7} \quad (15-a)$$

For FT37-D-20 series,

$$S/d_s[\%] = 0.00136 \left[ \frac{\ln(25W_{max})}{A_R^{4.293}} \right]^{0.7} \quad (15-b)$$

For FT37-D-40 series,

$$S/d_s[\%] = 0.00831 \left[ \frac{\ln(25W_{max})}{A_R^{3.107}} \right]^{0.7} \quad (15-c)$$

Figs. 6, 7은 F30-D-10, F30-D-20 series에 대해서, Figs. 8, 9는 FT37-D-10, FT37-D-20 series에 대한  $W_{max}-S/d_s$  (%)관계를 도해하고 있다. 여기서 new eq.은 eqs. (14), (15)에서 제시되는 상대슬립 관계식이며 휨 시험체의 거동을 잘 표현함을 알 수 있다.

F30 series, F37 series, FT37 series를 스테럽 간격에 대해서 철근직경별로 구분하여 정리했고, 일례로서 FT37 series에 대해서 Figs. 10 (a), (b), (c)에서 최대균열폭과 상대슬립에 대한 관계를 도해했다. 최대균열폭과 상대슬립의 관계를 철근 직경별로 구분할 때, 시험 결과가 스테럽간격에 상관없이 거의 일정한 결과가 도출됨을 확인할 수 있었다.

상기의 최대균열폭과 상대슬립 관계를 비교할 때, 스테럽간격 100 mm를 기준으로 하는 최대균열폭과 상대슬립에 대한 제안식이 Fig. 11에서 보이듯이 단면제원과 상관없이 일정한 경향을 제시함을 알 수 있었다.

상기의 식 (11)은 자연로그와 환산리브면적에 대한 계

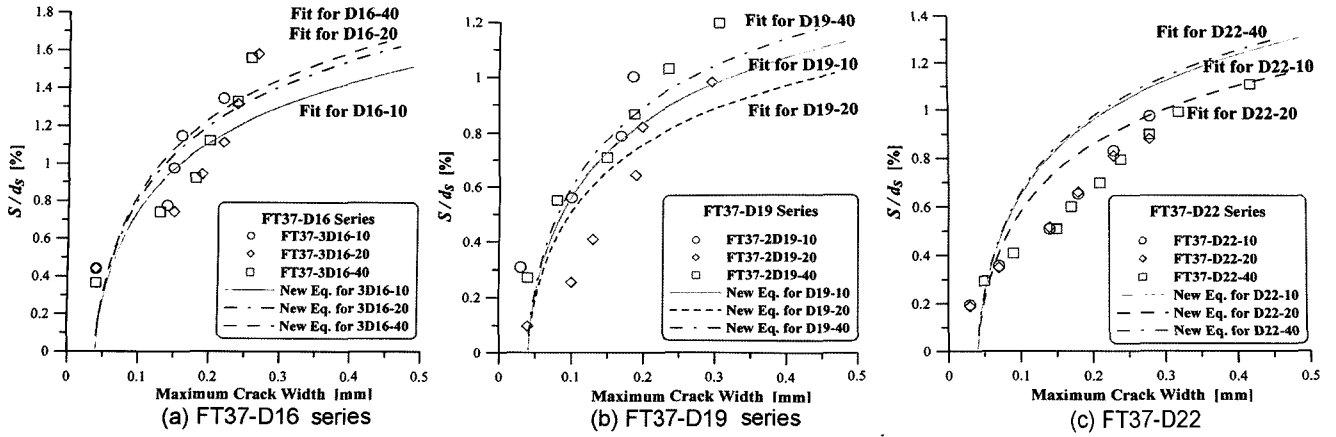


Fig. 10 The relationships between the maximum crack width and relative slip in FT37 series

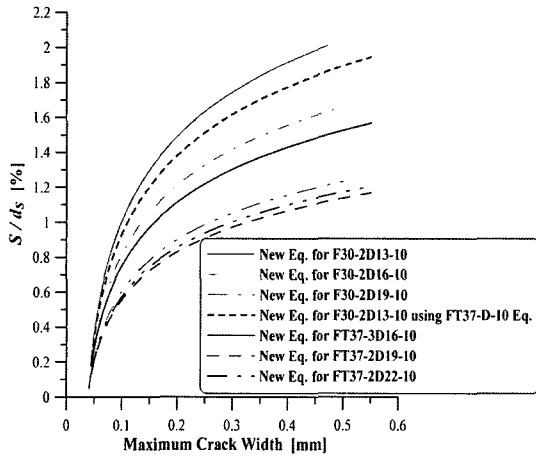


Fig. 11 The relationship between the maximum crack width and relative slip with the stirrup spacing 100 mm in specimens

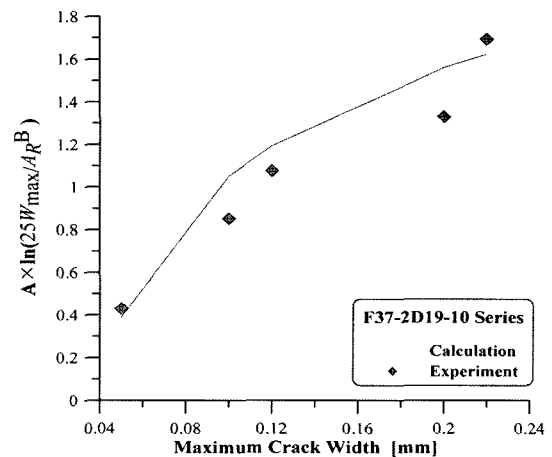


Fig. 12 Comparison of the maximum crack width with the relative slip by proposed method

수 A, B의 형태로 정리할 수 있으며 계산값과 시험값의 비교예를 Fig. 12에서 나타냈다.

$$S/d_s[\%] = A \times \ln\left(\frac{25W_{\max}}{A_R^B}\right) \quad (16)$$

여기서 A, B는 상대슬립과 균열폭 관계식에 대한 임의의 계수이다.

여기서 시험체에 대한 균열폭의 계산치(calculation)와 시험치(experiment)로 나타내며, C/E는 계산치와 실험치에 대한 비를 나타낸다. 상기의 상대슬립-최대균열폭이 시험 결과와 일치하는 경향을 통계적으로 검증하기 위해서 C/E의 평균과 표준편차 및 변동계수(COV, coefficient of variation)를 이용하여 비교했다.

### 5. 최대균열폭 산정식의 제안

최대 균열폭,  $W_{\max}$ 에 대해서 균열간격의 정식화에서 그 차이가 있으나 일반적으로 다음과 같다.

$$W_{\max} = l_{\max}(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) = 2l_{\min}(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) \quad (17)$$

최대 균열간격,  $l_{\max}$ 의 산정에서 외력이 증가함에 따라

균열간격이 감소하는 영향을 고려하기 위해서 극한 모멘트,  $M_u$ 와 균열모멘트 이후의 단계별모멘트,  $M_i$ 의 영향을 고려한  $(M_u/M_i)^{0.33}$ 의 항<sup>10)</sup>을 추가하고, 최대균열폭에 해당하는 최대부착응력을 이용하면 식 (4)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$l_{\max} = \left[ 2 \times \frac{f_t d_s}{4\tau_{b, \max} \rho_e} \left( \frac{M_u}{M_i} \right)^{0.33} \right] \quad (18)$$

이때 식 (6)을 이용하면 식 (17)은 최대 휨균열폭에 대해서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$W_{\max} = \left[ 2 \times \frac{f_t d_s}{4\tau_{b, \max} \rho_e} \left( \frac{M_u}{M_i} \right)^{0.33} \right] \times \left[ \epsilon_{sc} - \frac{\alpha_s f_t}{E_s \rho_e} (1 + n\rho_e) + \epsilon_{cs} \right] \quad (19)$$

상기의 식을 구하기 위해서  $\tau_{b, \max}$ 를 구해야 한다.

스터럽간격에 따라서 식 (14), (15)를 식 (8)에 대입하면, 일반적인 균열폭 범위는 0.10~0.40 mm이므로  $[1 - \exp[-4,500(S/d_s)^{1.45}]]^{0.5}$ 부분은 거의 1에 가까운 값으로 근접한다. 따라서  $\tau_{b, \max}$ 는 식 (8)이 다음과 같이 간략화

**Table 2** Average and standard deviation of the analytical methods between the maximum crack width and the relative slip

Specimen (series)	Average of C/E	Standard deviation of C/E	COV (%)
(1)	(2)	(3)	(4)
F30-D13	0.948	0.210	22.15
F30-D16	1.028	0.184	17.90
F30-D19	0.956	0.236	24.69
F37-D13	0.948	0.140	14.77
F37-D16	1.223	0.327	26.74
F37-D19	1.069	0.207	19.36
FT37-D16	1.085	0.184	16.96
FT37-D19	1.077	0.313	29.06
FT37-D22	1.270	0.192	15.11
All series	1.108	0.254	22.92

된 형태로 나타낼 수 있다.

$$\tau_{b,max} = k_f \times f_c^{2/3} \times \exp[-5(S/d_s) + 5.5A_R^{0.9}] \quad (20)$$

## 6. 제안식과 측정 결과의 비교

### 6.1 균열폭 제안식의 비교

본 연구에서 수행한 철근콘크리트 부재의 최대 휨균열 폭 측정 결과와 제안식을 비교하여 F30, F37, FT37

series의 대표 시험체를 Figs. 13 (a)~(f)에 나타내었다.

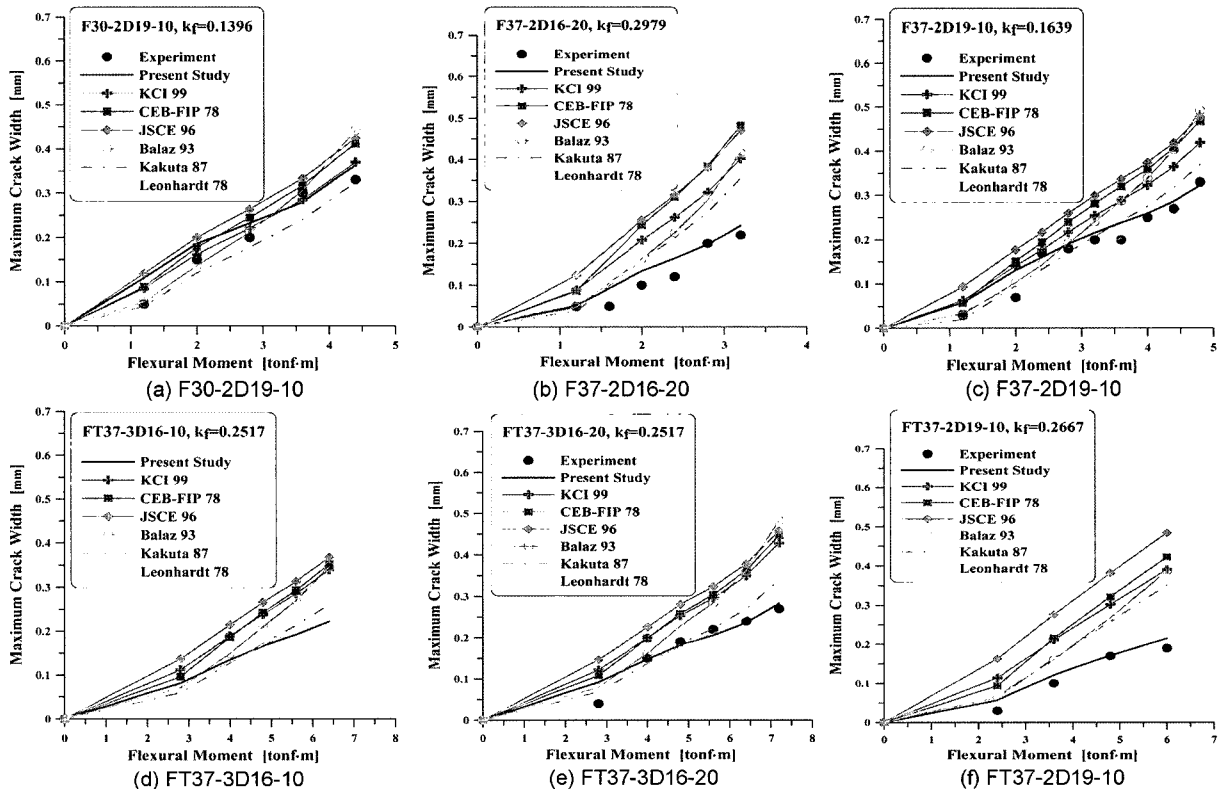
주요 시방규정의 균열폭 산정식을 적용하여 시험 결과를 비교하였다. 여기서 experiment는 측정 결과, present study은 본 연구에서 제안한 균열폭 산정식에 적용한 결과이다. ACI 318-99<sup>11)</sup>와 ‘건설교통부 제정 콘크리트구조 설계기준[한국콘크리트학회 주관](KCI)’는 동일식이므로 KCI 99<sup>12)</sup>로 나타냈다. CEB-FIP 78<sup>13)</sup>, JSCE 96<sup>7)</sup>, Baláz 93<sup>14)</sup>, Katuta 87<sup>5)</sup>, Leonhardt 78<sup>3)</sup>의 산정식과 비교했다.

본 논문에서 제시한 최대 휨균열폭 산정식의 객관적인 검증에 위해서 Mathey<sup>15)</sup>가 수행한 휨균열폭 시험체 type 2, Type 3, Type 5, Type 6와 비교수행했다. Table 3에서 type series의 제원을 나타내고 있으며, 모든 단면크기는 152.4×381.0×3,812.4 (mm)이다. Figs. 14 (a), (b)에서는 Type 3, Type 5의 예를 나타냈다.

또한 슬립량을 산정할 수 없는 시험체의 검증을 위해서 F29 Series를 통해서 제안식과 실험 결과의 비교 예를 Figs. 15 (a), (b), (c), (d)에서 제시했다.

### 6.2 균열폭 제안식과 시험 결과와의 비교

휨 시험체의 중앙부에서 스테럽이 100 mm, 200 mm, 400 mm로 배근된 경우, 최대 균열폭-슬립량 관계를 고찰하면 Fig. 11에서 보이듯이 철근직경별로 거의 유사한 형태를 보이고 있다. 이는 藤井<sup>16)</sup>의 연구 결과와 같이 스테럽간격 차이는 철근의 항복 이전단계에는 부착거동에 영향을 거의 미치지 못한다는 사실을 입증한다. 또한 기둥과 같은 압축부재와 다르게 스테럽에 의한 횡구속 효과



**Fig. 13** Comparisons of analytical methods with the experiment in specimens

**Table 3** Characteristics of type series

Specimen (series) (1)	$f'_c$ (MPa) (2)	Spacing of stirrup (cm) (3)	Stirrup (4)	Rebar (5)
Type 2	26.34	6.35	D10	D22
Type 3	26.48	6.35	D10	D22
Type 5	25.52	6.35	D10	D19
Type 6	25.64	6.35	D10	D19

과가 적용되지 않음을 언급한다. 슬립량을 시험을 통해서 산정하지 않은 F29 및 type series에서도 최대균열폭-슬립량의 관계를 식 15 (a)를 통해서 간략화된 균열폭 산정이 가능했다. 본 논문에서는 균열폭 산정식 외에 Leonhardt의 제안식이 F29 series에 대해서 균열폭시험값과 다소 유사한 결과를 보이고 있으나 콘크리트 강도증가와 부재단면의 확대 등에 따른 단면제원의 변동에 따라서 많은 분산을 보이고 있다. 이는 Leonhardt의 제안식이 저강도 및 단면치수가 작은 시험체에 대해서 주로 연구되었기 때문이라고 생각된다. 객관적인 검증을 위해서 type series와 비교한 결과, 본 논문의 제안식이 단면크기

에 따른 균열폭의 유동적인 변화를 효과적으로 반영함을 알 수 있다.

본 연구에서 수행한 균열폭 시험체 26개와 type series 4개의 단면에 대한 균열폭 계산값과 시험값을 각각 C(calculation)와 E(experiment)로 표현하여 C/E를 통계적으로 비교한 결과를 Table 4에서 나타냈다.

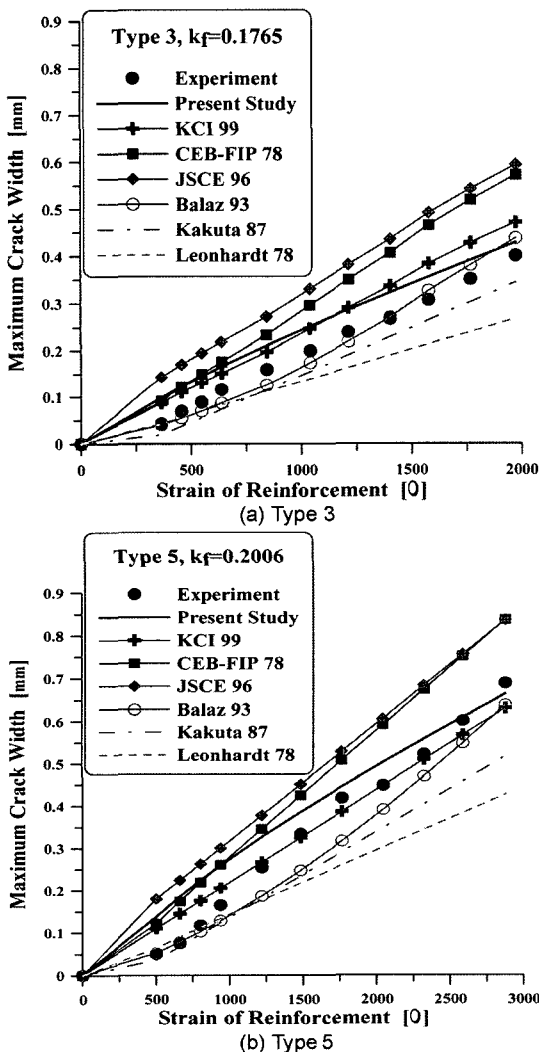
본 제안식 식 (19)는 유효철근비를 통해서 단면크기의 차이에 따른 영향을 고려하고 있으며, Figs. 13~15에서와 같이 단면크기에 따른 균열폭을 효과적으로 평가함을 알 수 있다. 또한 타 시방서 규정과 비교했을 때 상대적으로 평균과 표준편차 및 변동계수로부터 시험 결과를 잘 반영함을 알 수 있다. 이에 비해서 타 시방 규정식이 단면크기에 따라서 표준편차가 급격히 변화함에 비해서, 본 제안식은 단면크기에 무관하게 안정적이며 신뢰성이 높은 통계적 결과를 나타내고 있으며, 평균은 계산값과 시험값이 일치되는 경우보다 14.54% 안전측으로 평가하고 있다. 변동계수는 14.93%로 타 제안식에 비해 현격하게 분산이 작은 것으로 나타났다. 평균에 대해서 Leonhardt의 제안식의 경우는 F37, FT37 series에서는 평균이 과대 평가되며, type series에서는 과소평가되기 때문에, 전체 시험체에 대해서 이러한 과대, 과소값이 상쇄되어서 1.0에 가까운 결과를 나타냄을 확인할 수 있다.

Fig. 16은 본 제안식에 의한 계산값과 시험값의 비교를 나타내고 있다. 계산값과 시험값의 분포는 휨 시험값에 대해서 대각선 (C/E = 1)에 대해 거의 일치하며, 안전측으로 평가됨을 알 수 있다. 여기서 좌상부는 시험체에 대한 제안식의 안전측, 우하부는 비안전측을 나타내고 있다. 이와 같은 결과를 종합해볼 때 타 시방 규정식이 단면에 따라서 표준편차가 급격히 변화함에 비해서, 본 제안식은 안정적이며 신뢰성이 높은 통계적 결과를 나타냄을 알 수 있다.

## 7. 결 론

본 논문에서는 양측인장시험에 기초한 부착응력식을 이용하여 30개 휨시험체에 대해서 최대 균열폭을 측정, 검토한 결과, 본 연구 범위에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 정밀도가 높은 균열폭 예측을 하기 위해서는 철근의 변형을 분포와 이에 직접적인 영향을 가지는 부착응력의 분포를 파악해야만 한다. 실제구조물은 내부균열을 발생하기 쉬운 상태에 있기 때문에  $\tau_b$ - $S$ 의 관계는 콘크리트가 인장응력장에 있는 시험결과인 양측인장시험을 기초로 해야 한다.
- (2) 스테럽 간격을 100, 200, 400 mm로 각각 다르게 배근한 부재휨시험체에서 스테럽간격의 차이는 부착거동에 영향을 거의 없다는 사실을 알 수 있으며, Fig. 11에서 제시되는 것과 같이 최대균열폭-상대슬립 관계가 일정한 경향을 나타냈다.
- (3) 부착응력 제안식을 이용하여 휨인장 시험체에 확



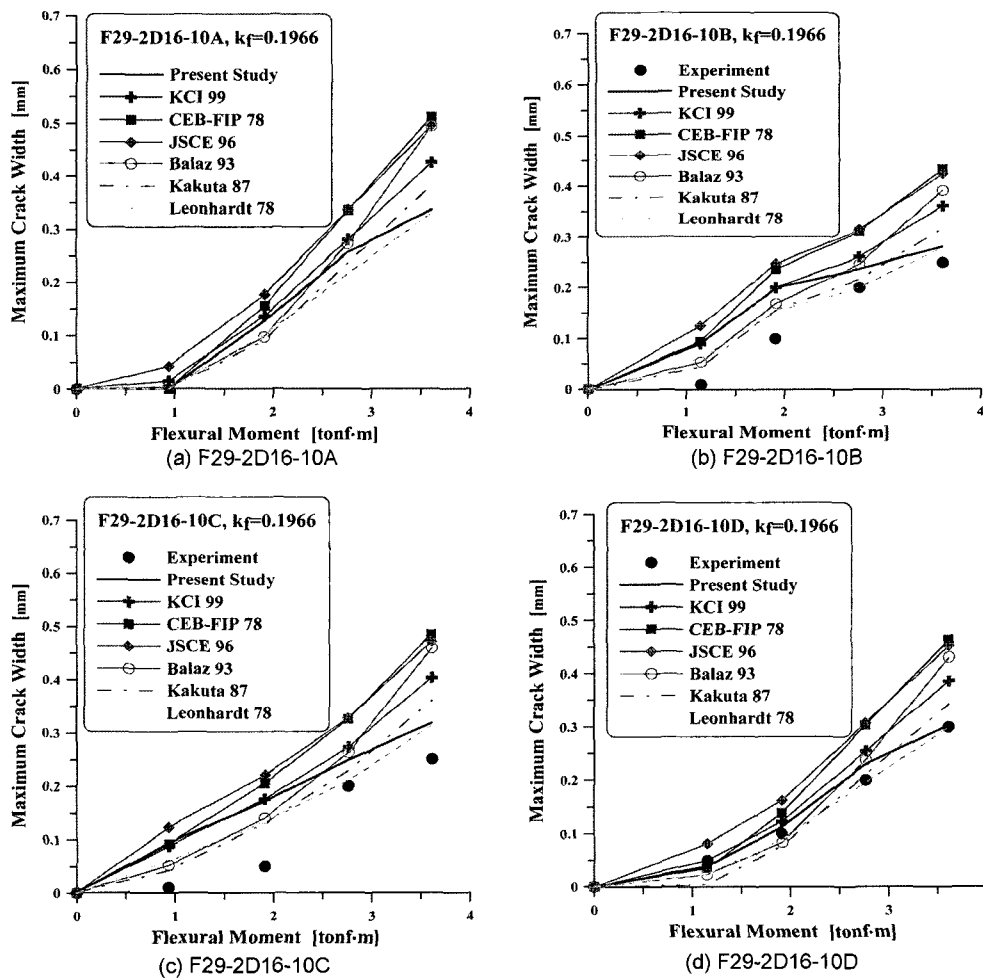
**Fig. 14** Comparisons of analytical methods with the experiment in type series



**Table 4** Average, standard deviation, and coefficient of variation of the analytical methods  
(average = aver., standard deviation = S.D.)

Method	Aver. of C/E	S.D. of C/E	Aver. of C/E	S.D. of C/E	Aver. of C/E	S.D. of C/E
Series (1)	F29 (2)	F29 (3)	F30 (4)	F30 (5)	F37 (6)	F37 (7)
Present study	1.239	0.259	1.105	0.116	1.195	0.151
KSCD99	1.409	0.216	1.270	0.192	1.771	0.479
CEB-FIP78	1.670	0.261	1.524	0.303	2.096	0.697
JSCE96	1.709	0.271	1.533	0.250	2.102	0.601
Baláz93	1.351	0.278	1.186	0.184	1.672	0.368
Kakuta87	1.150	0.209	1.057	0.165	1.484	0.406
Leonhardt78	1.078	0.168	1.014	0.223	1.362	0.478

Method	Aver. of C/E	S.D. of C/E	Aver. of C/E	S.D. of C/E	S.D. of C/E	S.D. of C/E	COV (%)
Series (8)	FT37 (9)	FT37 (10)	Type (11)	Type (12)	Total (13)	Total (14)	Total (15)
Present study	1.105	0.138	1.226	0.226	1.145	0.171	14.9
KSCD99	1.548	0.249	1.114	0.158	1.429	0.366	25.6
CEB-FIP78	1.598	0.288	1.396	0.158	1.639	0.449	27.4
JSCE96	1.840	0.365	1.527	0.260	1.764	0.438	24.8
Baláz93	1.467	0.279	0.846	0.140	1.302	0.396	30.4
Kakuta87	1.271	0.233	0.764	0.056	1.145	0.350	30.5
Leonhardt78	1.140	0.218	0.687	0.074	1.048	0.353	33.7



**Fig. 15** Comparisons of analytical methods with the experiment in F29 series

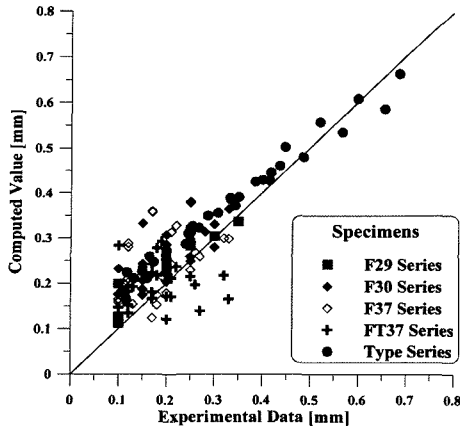


Fig. 16 Comparison of the Experiment with the Solutions by Proposed Method

대 적용할 때 효과적인 균열폭 산정이 가능하며, 단면크기의 차이에 대한 영향이 고려됨을 알 수 있다. 또한 최대부착응력과 최대균열폭-상대슬립을 간략식으로 제시하여 시험으로 구하지 않고도 효과적인 균열폭 산정이 가능하다.

- (4) 제안된 휨균열폭 산정식은 시험결과와 비교할 때, 단면크기에 무관하게 안정적이며 신뢰성이 높은 통계적 결과를 나타내며, 평균은 계산값과 시험값이 일치되는 경우보다 14.54% 안전측이며 변동계수는 14.93%로 타 제안식에 비해 분산이 작은 것으로 나타났다.
- (5) 균열폭 제안식의 비교는 다양한 철근배치와 보다 많은 형태와 크기를 가진 단면에 적용되어야 하고 시험이 수행되어야 할 것이다. 각 요인에 대한 영향계수 표준화와 다수요인에 의한 자료축적이 필요하다.

### 참고문헌

1. 고원준, 박선규, “축인장 부재의 부착응력-상대슬립 관계 산정”, 대한토목학회논문집, 22권, 4-A, 2002, pp.815~823.

2. CEB-Bulletin d'Information Final Draft, *CEB-FIP Model Code 1990*, Thomas Telford, London, U.K., 1993.

3. Leonhardt, F., *Vorlesungen über Massivbau*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1976.

4. Eurocode 2, *Design of Concrete Structures, Part 1, General Rules and Rules for Building*, European Prestandard, Brussels, 1991.

5. 角田典史雄, “curve受けるコンクリート部材のひびわれとたわみに關する研究の現狀”, 日本土木學會論文集, Vol.7, No.384, 1987, pp.21~32.

6. 尾板芳夫, 大塚浩司, 松本英信, “乾燥の影響を受ける引張RC供試 のひびわれ性狀”, 콘크리트工学, Vol.23, No.3, 1985, pp.109~119.

7. 日本土木學會, 콘크리트標準示方書, 日本土木學會, 1996.

8. 山尾芳秀, 周 良, 二羽淳一浪, “付着應力-すべり關係に關する實驗的研究”, 日本土木學會論文集, No.343, 1984, pp.219~228.

9. CEB-Bulletin, *CEB-FIP Model Code for Concrete Structures*, CEB, 1970.

10. Desayi, P., “A Method for Determining the Spacing and Width of Cracks in Partially Prestressed Concrete Beams”, *Proceedings, Institution of Civil Engineers*, Vol.59, Sept., London, 1975, pp.411~428.

11. American Concrete Institute, *ACI, Building Code Requirements for Reinforced Concrete*, ACI 318-99, Michigan, U.S.A., 1999.

12. 한국콘크리트학회, 건설교통부제정 콘크리트구조설계기준, 한국콘크리트학회, 1999.

13. CEB-Bulletin, *CEB-FIP Model Code for Concrete Structures*, CEB, 1978.

14. Balázs, L. G., “Cracking Analysis Based on Slip and Bond Stresses”, *ACI Mat. J.*, Vol.90, No.4, Jul.-Aug., 1993, pp. 340~348.

15. Mathey, R. and Watstein, D., “Effect of Tensile Properties of Reinforcement on the Flexural Characteristics of Beams”, *ACI Journal*, Vol.31, No.12, 1960, pp.1253~1273.

16. 藤井 榮, 森田司郎, “異形鐵筋の付着 割裂 強度に關する研究-第1報 付着割裂破壞を支配する要因についての實驗結果”, 日本建築學會論文報告集, No.319, 1982, pp.47~54.

**요 약** 최근 고강도철근 및 프리스트레싱에 의한 유용성은 경제적이고 효과적으로 콘크리트 구조설계를 가능하게 되었다. 이러한 구조적 부재를 다루는 구조기술자가 직면하는 중요한 문제중 하나는 한계상태설계에서 사용성에 대한 기준으로 사용되는 균열폭의 제어이다. 특히 휨균열은 하중을 부담하는 부재에 대해서 안전성의 확보 및 사용성과 연성을 향상될 수 있도록 제어되어야 한다. 본 논문에서 제안된 방법은 Ikki에 의해서 수행된 양축인장시험법의 시험 결과를 이용하고 있다. 양축인장상태에서 이형철근에 대한 부착특성은 콘크리트면적과 리브면적에 의해서 고려된다. 제안된 방법에 의한 결과는 시험 결과와 비교되며, 기존 방법보다도 치수 및 단면제원의 변화, 철근의 방향을 고려하여 보다 정밀한 부착응력과 이에 대한 상대슬립의 관계를 제시한다. 부착특성은 무차원적 슬립량과 유효철근비에 의해서 고려된다. 제안식의 유효성은 시험체 실험자료에 의해서 검증되어진다.

**핵심용어** 축아중, 부착, 부착응력, 철근, 슬립