

부착응력-상대슬립 관계에 대한 연구

RESEARCH FOR BOND STRESS-RELATIVE SLIP RELATIONSHIP

고원준* 김진호** 서봉원** 박선규***

Ko, WonJun Kim, JinHo Seo, BongWon Park, SunKyu

ABSTRACT

This paper deals with the estimation of the bond stress based on experimental data that were tensed by axial force on both sides. It is certificated that the concrete stress condition clearly affects the bond-slip relationship. The proposed method utilizes the conventional bond-slip theories as well as the characteristics of deformed reinforcement and concrete cross-sectional area. An analytical equation for the estimation of the bond stress is formulated as the function of non-dimensional factors (e.g. bond stress, relative slip, etc.). The validity, accuracy and efficiency of the proposed method are established by comparing the analytical results with the experimental data of Ikki (1996, 1999) and the representative bond stress equations of Shima (1987). The analytical results presented in this paper indicate that the proposed method can be effectively estimated the bond stress-relative slip relationship.

1. 서론

철근 콘크리트 부재의 안정성 측면에서 휨, 전단내력을 확보하고, 사용성 및 내구성 면에서는 휨 인장부에 발생하는 균열을 제어해야 한다. 균열간격과 철근의 변형률로 크게 구성되는 균열폭 산정에서 균열간격의 적합한 수치를 얻기 위해서 정확한 부착응력의 분포를 반드시 파악해야한다. 그러나 현재 각국의 주요 설계기준에서는 균열간격 선정의 주요변수이며, 재하하중, 부착조건 및 상대슬립 등 여러 조건에 따라서 민감하게 변화하는 부착응력을 동일조건으로 적용함은 균열폭 연구의 모순이라고 생각된다. 이와 같은 이유로 실제 설계에 사용될 수 있는 정밀도가 높은 균열폭 예측을 하기 위해서는 철근의 변형률 분포와 이에 직접적인 관련을 갖는 부착특성을 파악해야만 한다. 일반적으로 부착응력은 상대 슬립과 관련된 값으로 표시되며 지금까지 많은 부착응력과 슬립량과의 관계가 제안되었다.

한편 대표적인 부착응력식인 島 (1987)의 제안식은 인발시험으로부터 부착응력, τ_b 와 상대슬립, S 의 관계(τ_b-S)를 정밀도 높게 표현하고 있다. 그러나 인발시험에서 콘크리트는 압축응력장에 있기 때문에 철근주위의 내부균열 발생이 억제되며, 실제로 균열이 발생한 부재에서 콘크리트는 내부균열을 발생하기 쉬운 인장응력장에 있기 때문에, 이때 사용하는 τ_b-S 관계는 양측인장시험을 기준이 되어야 하지만 주요 시방서에서 인발시험으로 산정하는 것에는 필연적 문제가 내재하고 있다고 생각한다.

* 정희원, 성균관대학교 토목공학과 박사과정

** 정희원, 성균관대학교 토목공학과 석사과정

*** 정희원, 성균관대학교 토목공학과 부교수

따라서, 본 논문은 철근 콘크리트 부재의 정밀도 높은 휨균열폭 산정식을 제안하기 위해서 부착응력과 상대슬립의 관계를 새롭게 제시하고자 한다. 이를 위해서 臺岐 (1996, 1999)가 수행한 양측인장시험 결과를 이용하여 타당성을 확보하며, 축인장력이 작용하는 부재의 부착응력식을 제안하고자 한다.

2. 부착이론 및 환산리브면적

철근과 콘크리트 사이의 부착은 매우 복잡해서 아직도 명확히 해명되지 않은 상태이다. 철근 콘크리트 부재에 외력이 작용할 때 철근과 주변 콘크리트 사이에 부착응력이 발생하며, 두 가지 재료간에 상대슬립이 일어난다. 철근 콘크리트는 철근과 콘크리트가 일체가 되어서 외력에 저항하는 복합체이며, 이러한 작용의 기본을 이루는 것은 부착이다. 철근 또는 콘크리트 중의 하나가 한 방향으로 변형한다면, 철근과 콘크리트의 경계, 즉 철근 표면을 통해서 상호의 힘이 전달되어진다. 이를 부착작용이라 하며 전달력은 일반적으로 철근표면을 따라서 작용하는 철근 축방향의 전단력 성분인 부착력과 철근표면에 직각방향으로 작용하는 수직응력 성분인 방사력이 주체가 된다.

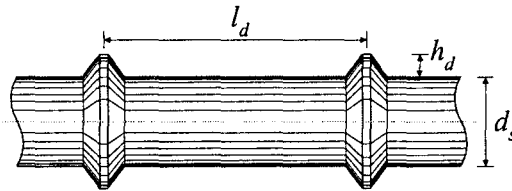


Fig. 1 원형마디를 갖는 이형철근의 개념도

Rehm (1969)은 $\tau_b - S$ 관계를 정리하여, 환산리브면적, f_R 에 의해서 각종의 이형철근 형상의 전단 저항의 크기를 비교할 수 있음을 보였다. Fig. 1에서 보이듯이 환산리브면적, f_R 은 간략화된 원형마디를 갖는 이형철근의 경우, 환산리브면적은 다음과 같이 제시할 수 있다.

$$f_R = \frac{h_d(d_s + h_d)}{l_d(d_s + 2h_d)} \simeq \frac{h_d}{l_d} \quad (1)$$

3. 양측인장에 대한 시험제원

본 논문에서 부착응력식의 검증과 타당성을 확보하기 위해서 臺岐 (1996, 1999)가 수행한 양측인장 시험결과를 이용하였으며, 이에 대한 시험제원 및 조건을 Table 1과 같이 인용했다.

Table 1 양측인장시험체의 상세제원 (臺岐, 1996, 1999)

Type	Specimens	Direction of Reinforcement on Casting	Existence of Stirrup (D6)	Shape of Section	Sectional Property
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
T-Series	TH1-30	Horizontal	Existence	Square	30cm×30cm
	TH1-45	Horizontal	Existence	Square	45cm×45cm
	TH0-30	Horizontal	Non Existence	Square	30cm×30cm
	TH0-45	Horizontal	Non Existence	Square	45cm×45cm
	TV0-45	Vertical	Non Existence	Square	45cm×45cm
	TV0-50	Vertical	Non Existence	Circle	diameter 50cm
D-Series	D-30	Vertical	Non Existence	Circle	diameter 30cm
	D-45	Vertical	Non Existence	Circle	diameter 40cm

양측인장을 받는 시험체의 총수는 8개로 T-Series와 D-Series로 구분했다. 이때 사용된 인장철근의 치수 D19이며 재료시험에 의한 철근의 탄성계수, $E_s = 181.3 \text{ GPa}$, 철근의 항복강도 $f_y = 357.8 \text{ MPa}$, 콘크리트 압축강도, $f_{ck}' = 31.24 \text{ MPa}$ 이다. 스테럽 철근의 덮개는 콘크리트 단면적에 상관없이 일정하게 3.7cm이다. D-Series는 직경 30cm, 45cm의 원형 2종류이며, 단면중앙에 인장철근이 매입되었다. 이때 사용된 인장철근은 D16이며 $E_s = 192.0 \text{ GPa}$, $f_y = 390 \text{ MPa}$, $f_{ck}' = 21.91 \text{ MPa}$ 이다.

4. 부착응력 제안식

4.1 기존 부착응력식

島 (1987)는 $\tau_b - S$ 관계의 해석을 위해서 경계조건의 차이에 따라서 부착길이가 충분히 긴 경우의 Eq. (2)와 부착길이가 짧은 경우에서 철근 변형률의 영향을 고려한 Eq. (3)을 제안했다. 이때 Eq. (2)의 경계조건은 $S=0$ 일 때 $\epsilon_s=0$ 이고 이것을 만족하는 부착길이는 $25 d_s$ 이상이다. 이 식은 압축응력장에서 해석이 좋고, 최대부착응력 등의 정량화가 어려운 정수를 설정할 필요가 없기 때문에 부착응력 해석에서 널리 사용되는 대표적인 부착응력식이다.

$$\tau_b = 0.9 f_c' {}^{2/3} \times [1 - \exp[-40 (S/d_s)^{0.6}]] \quad (2)$$

$$\tau_b = 0.73 f_c' {}^{2/3} \times [\ln\{1 + 5000 \times (S/d_s)\}]^3 \times \frac{1}{1 + 10^5 \times \epsilon_s} \quad (3)$$

島 (1987)의 $\tau_b - S$ 관계식이 기둥과 보의 집합부에서 휨하중에 의한 철근인발을 문제로 하기 때문에 정식화에서는 인발시험을 기본으로 하며, 콘크리트는 압축응력장에 있으며, 이때 철근주위의 내부 균열은 발생이 억제된다. 이러한 문제점을 고려하여 嶽岐 (1996, 1999)는 양측인장을 받는 시험체에 대해서 島 (1987)의 부착응력식을 수정하여 다음은 부착응력식을 제시했다.

$$\tau_b = \alpha_f \times \alpha_d \times 0.9 f_c' {}^{2/3} \times [1 - \exp[-40 (S/d_s)^{0.6}]] \quad (4)$$

여기서, 콘크리트 응력상태의 영향계수, α_f 는 압축응력장에서는 1.0, 인장응력장에서 0.7이며 타설시 철근방향의 영향 계수, α_d 는 철근의 연직타설 시 1.0, 수평타설 시 0.9이다.

4.2 양측인장에 대한 부착응력 제안식

본 연구에서 제안한 부착응력식은 실제거동을 고려하여 충분히 긴 부착길이를 갖는 정착부착에 대한 식이다. 본 제안식도 시험요소의 무차원화를 통해서 부착응력의 정량적인 평가를 수행했다.

$$\tau_b = k \times f_c' {}^{2/3} [1 - \exp[-4500 (S/d_s)^{1.45}]]^{0.5} \times \exp[-5 (S/d_s) + 5.5 f_R^{0.9}] \quad (5)$$

이때 k 는 부착응력에 대한 영향을 정량적으로 평가하는 계수이다.

본 논문에서 k 에 대해서 환산리브면적, 단면적의 역수 및 철근의 배근방향을 주요변수로 하여 다음과 같이 제안했다.

$$\text{철근의 수직배근 시, } k = 0.2 \times \exp\left[[-4.5 + 55(3.06 f_R - 0.24)] \times \frac{100}{\text{Area}}\right] \quad (6)$$

$$\text{철근의 수평배근 시, } k = 0.2 \times \exp\left[(-4.5 + 55 f_R) \times \frac{100}{\text{Area}}\right] \quad (7)$$

$$\text{수평배근 시, 스티럽 철근이 배근된 경우, } k = 0.2 \times k_{sh} \times \exp\left[(-4.5 + 55f_R) \times \frac{100}{Area}\right] \quad (8)$$

여기서, $Area$ 는 콘크리트의 단면적이며, k_{sh} 는 스티럽 철근배근의 영향계수로 수평배근 시 0.85이다.

본 연구자는 제안식에서 적용한 시험체의 철근과 콘크리트사이의 타설높이가 최대값이 25cm정도이기 때문에, 비록 수평, 수직배근 사이에 부착저하가 발생하지만 이는 부재 콘크리트 덮개에서 좌우되기 때문에 배근방향에 대한 차이는 두드러지지 않았다고 생각한다. 또한 콘크리트 단면적 역수는 단위 하중에 해당하는 콘크리트 단면의 평균응력과 같은 의미로서 본 연구에서 실제적으로 부착력을 받는 콘크리트 단면적에 의해서 단면의 치수 영향이 고려되어져야 한다고 생각한다.

臺岐 (1996, 1999)의 양측인장시험결과에 대해서 본 연구의 제안식, Eq. (5)은 New Eq.으로 표현되며, 島 (1987)의 부착응력식에서 실제거동과 유사하게 충분히 긴 부착길이를 갖는 Eq. (2)에 대한 결과를 Plot of Shima로, 臺岐 (1996, 1999)가 제안한 Eq. (4)에 대한 결과를 Plot of Ikki로, 일본 토목학회 (1996)가 제안하는 콘크리트의 설계부착강도식을 Plot of JSCE로 표시하여 비교했다.

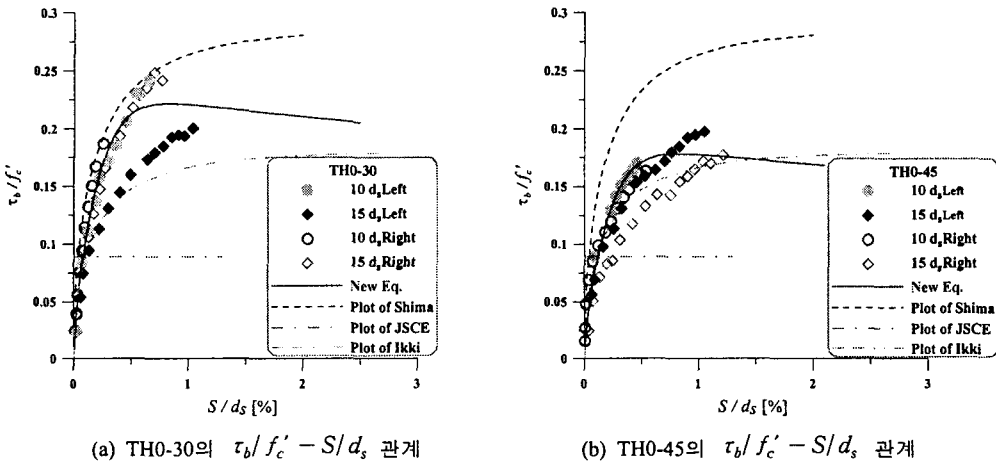


Fig. 2 THO Type의 부착응력-상대슬립 관계

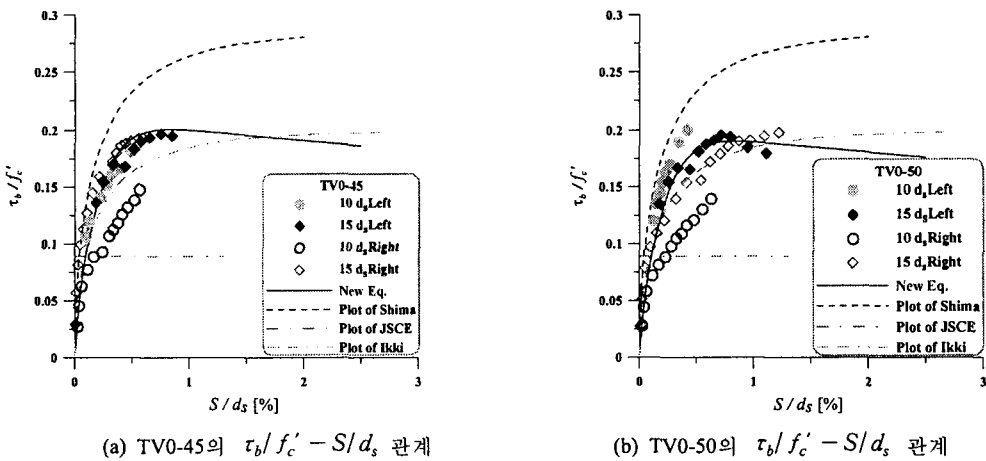


Fig. 3 TV0 Type의 부착응력-상대슬립 관계

4.3 부착응력 제안식의 비교

본 제안식(New Eq.)은 臺岐 (1996, 1999)가 수행한 시험자료(Data of Experiment)와 수정식(Eq. of Ikki) 및 島 (1987)의 부착응력식(Eq. of Shima), 일본 토목학회 (1996)가 제안하는 콘크리트의 설계부착강도식(Eq. of JSCE)을 각각 Table 2에서 비교제시했다.

이때 島 (1987)와 臺岐 (1996, 1999)의 부착응력식은 슬립량을 산정할 수 없기 때문에, 島 (1987)와 臺岐 (1996, 1999)의 제안식에 대해서 슬립량이 $S/d_s=1\%$ 일 때 해당하는 부착응력값, $\tau_{b,1\%}$ 로 각각 표시했다. 또한 일본 토목학회의 설계부착강도치, τ_{bd} 로 나타내어 비교했다.

본 제안식의 경우 최대 부착응력값과 이에 상응하는 상대슬립량을 구할 수 있다는 장점이 있으며, 단면제원과 철근의 배근방향과 각종 물성치의 변화에 따른 경향을 정확히 표현하고 있다. 이에 비해서 島 (1987)의 부착응력식은 인발시험으로부터 산출되었기 때문에 부착응력이 시험데이터에 비해서 크게 나타나며, 최대 부착응력치와 이에 해당하는 상대슬립량을 정확히 도출할 수 없음을 알 수 있다. 島 (1987)의 부착응력식을 대략 70%로 과소평과한 臺岐 (1996, 1999)의 부착응력식 역시 상대슬립량을 대략적으로 가정해야 하기 때문에 효과적인 부착응력치의 평가가 어렵다. 또한 일본토목학회의 설계강도식은 상당히 안전측의 값을 나타내고 있다.

Table 2 부착응력 제안식의 비교

Method Type	Data of Experiment		New Eq.		Eq. of Ikki	Eq. of Shima	Eq. of JSCE
	$S/d_s[\%]$	$\tau_{b,max}/f_{ck}$	$S/d_s[\%]$	$\tau_{b,max}/f_{ck}'$	$\tau_{b,1\%}/f_{ck}'$	$\tau_{b,1\%}/f_{ck}'$	τ_{bd}/f_{ck}'
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
TH1-30	1.013	0.189	0.852	0.169	0.166	0.264	0.0891
TH1-45	0.813	0.179	0.845	0.159	0.166	0.264	0.0891
TH0-30	0.834	0.230	0.857	0.221	0.166	0.264	0.0891
TH0-45	1.050	0.197	0.850	0.178	0.166	0.264	0.0891
TV0-45	0.847	0.197	0.865	0.201	0.185	0.264	0.0891
TV0-50	0.832	0.196	0.809	0.190	0.185	0.264	0.0891
D-30	0.771	0.199	0.831	0.205	0.207	0.295	0.0999
D-45	0.930	0.180	0.850	0.172	0.207	0.295	0.0999

기존 부착응력식에 대해서 통계적 비교를 통해 제안식에 대한 정확성과 타당성을 검증하고자 한다. Table 3은 부착응력 제안식에 대한 평균, 표준편차를 비교하여 나타낸 것이다.

Table 3 부착응력 제안식에 대한 C/E의 평균 및 표준편차 비교

Method	Average of C/E	Standard Deviation of C/E	Average of C/E	Standard Deviation of C/E
	$S/d_s[\%]$	$S/d_s[\%]$	τ_b/f_{ck}'	τ_b/f_{ck}'
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
New Eq.	0.9628	0.09185	0.9528	0.05113
Ikki	—	—	0.9304	0.1196
Shima	—	—	1.3960	0.1337
JSCE	—	—	0.4716	0.04568

여기서 최대부착응력에 대한 계산치와 시험치를 각각 C(Calculation)와 E(Experiment)로 나타내며, C/E는 계산치와 시험치에 대한 비를 보인다. 평균을 비교하였을 때, C/E=1인 경우는 계산과 시험에 의해 얻어진 값이 일치하는 이상적인 경우를 의미한다. C/E>1 경우는 계산치가 시험치보다 과대평가,

C/E<1 경우는 계산치가 시험치보다 과소평가됨을 나타낸다. 표준편차는 C/E가 1에 가까울수록 분산이 작다는 것을 의미한다.

5. 결 론

양측인장을 받는 시험체의 콘크리트 강도, 철근직경, 철근의 부착특성이 부착응력-슬립 관계에 미치는 영향을 검토한 결과, 본 연구범위에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 정밀도가 높은 균열폭 예측을 하기 위해서는 철근의 변형을 분포와 이에 직접적인 영향을 가지는 부착응력의 분포를 파악해야만 한다. 기존의 주요 부착응력식은 인발시험체를 기준으로 하기 때문에 철근주위의 내부균열 발생이 억제되나, 실제구조물은 내부균열을 발생하기 쉬운 상태에 있기 때문에 τ_b-S 의 관계는 콘크리트가 인장응력장에 있는 시험결과인 양측인장시험을 기초로 해야 한다.
- (2) 부착응력에 대한 영향을 정량적으로 평가하는 계수 k 를 도입한 본 제안식은 최대 부착응력값과 이에 상응하는 상대슬립량을 구할 수 있다는 장점이 있으며, 단면제원과 철근의 배근방향과 각종 물성치의 변화에 따른 경향을 정확히 표현하고 있다.
- (3) 콘크리트 단면적의 역수를 이용하여 양측인장의 부착성능 평가에 있어서 단면치수의 영향을 고려했다.
- (4) 본 연구에서 제안한 부착응력산정식을 시험결과와 비교할 때, 기존 부착응력제안식에 대해서 효과적으로 상대슬립량을 산정할 수 있으며, 단면변화에 상관없이 안정적이며 신뢰성이 높은 통계적 결과를 나타내고 있다.

참 고 문 헌

1. 臺岐直之, 清宮里 (1999) “콘크리트의 응력상태가 異形鐵筋에 附着強度에 及ぼす影響,” 콘크리트 年次論文報告集, Vol. 21, No. 3, pp. 373~378.
2. 臺岐直之, 清宮里, 山田昌郎 (1996) “附着應力-すべり關係に 影響を 及ぼす 要因の 實驗的研究,” 日本土木學會論文集, Vol. 33, No. 550, pp. 73~89.
3. 島 弘, 周 禮良, 岡村 甫 (1987) “異形鐵筋の鐵筋降伏後における 附着特性,” 日本土木學會論文集, Vol. 63, No. 378, pp. 213~220.
4. 島 弘, 周 禮良, 岡村 甫 (1987) “マッシュな 콘크리트에 埋め込まれた 異形鐵筋의 附着應力-すべり-ひずみ關係,” 日本土木學會論文集, Vol. 6, No. 378, pp. 165~174.
5. Park, S. K. , Ko, W. J. and Kim, H. Y. (2001) "Estimation of Torsional Crack Width for Concrete Structural Members," Magazine of Concrete Research, Vol. 53, No. 5, Oct, pp. 337~345.
6. Rehm, G. (1969), Kriterien zur Beurteilung von Bewehrungsstäben mit hockwertigen Verbund, Stahlbetonbau(Festschrift Rüschi) S. 79~96, W. Ernst u. Sohn, Berlin.