

# 전단보강근이 없는 철근콘크리트 보의 전단강도 예측 모델식 제안

## Model Equation for Shear Strength of Reinforced Concrete Beams without Web Reinforcement

김진근\*  
Kim, Jin Keun

박연동\*\*  
Park, Yon Dong

### ABSTRACT

In this study, a simple and accurate model equation for prediction of shear strength of reinforced concrete beams without web reinforcement is proposed based on basic shear transfer mechanisms and modified Bazant's size effect law. The proposed equation includes the effects of concrete strength, longitudinal steel ratio, shear span to depth ratio and effective depth. Comparisons with published experimental data indicate that the proposed equation estimates properly the effects of these factors. Among many equations, ACI code equation, Zsutty's equation and Bazant's equation are selected for comparison. As the result, the accuracy of the proposed equation is better than that of any other equations.

### 1. 서론

지난 수십년동안 많은 연구자들에 의해 철근콘크리트 보의 전단강도 특성 규명을 위한 연구가 수행되어 왔으나 아직도 그 특성이 완전히 규명되지 못하고 있으며, 전단강도에 대한 기존의 설계 기준식들은 많은 오차를 포함하고 있다. 일반적으로 전단보강근이 없는 철근콘크리트 보의 전단강도는 주로 콘크리트 압축강도( $f_c'$ ), 주철근비( $\rho$ ), 전단스팬비( $a/d$ ) 및 보 유효깊이( $d$ )에 좌우된다는 것이 많은 연구를 통하여 밝혀지고 있다. 그러나, 이러한 각 요인의 영향은 예측 모델식에 따라 다르게 평가되고 있다.

철근콘크리트 보에서 전단력은 다양한 방법에 의해 전달되는데, 전단스팬비가 비교적 큰 보(근사적으로 2.5 이상)는 휨 균열 발생 이후, 압축부 콘크리트의 전단 저항력, 골재의

맞물림 작용(aggregate interlocking action) 및 철근의 장부 작용(dowel action)에 의해 주로 전달된다. 전단스팬비가 작은 보(근사적으로 2.5 이하)의 경우는 보 작용(beam action)에 의한 저항 메커니즘이 파괴된 후 주로 아치 작용(arch action)에 의해 전단력이 전달된다.

철근콘크리트 보의 전단파괴는 철근콘크리트 구조물의 대표적인 취성파괴이며, 뚜렷한 크기효과(size effect)를 나타낸다. Reinhardt<sup>(1)</sup>는 선형탄성 파괴역학을 도입하여 보 전단강도의 크기효과를 해석하였는데, 선형탄성 파괴역학을 적용할 경우 크기효과를 다소 크게 평가하는 것으로 나타났다. 그 후, Bazant<sup>(2)</sup>에 의해 비선형 파괴역학에 근거한 크기효과법칙이 제안되었으며, 이 법칙은 크기효과의 경향을 비교적 잘 예측하는 것으로 알려져 왔다. 그러나, 매우 큰 실험체에 대해서는 그 경향을 다소 크게 평가하는 것으로 나타나고 있어, 최근에 이를 보정한 수정된 크기효과법칙이 제안되었다.<sup>(3)</sup>

본 연구에서는 철근콘크리트 보의 전단 저

\* 정희원, KAIST 토목공학과 부교수, 공박

\*\* 정희원, KAIST 토목공학과 박사과정

항 메카니즘과 수정된 크기효과법칙에 근거하여 고강도 콘크리트 범위까지 고려한 새로운 전단강도 예측 모델식을 제안하였으며, 다른 모델식들과의 비교, 분석을 통하여 제안된 모델식의 정확도 및 타당성을 검증하였다.

## 2. 전단강도 예측 모델식의 유도

전단보강근이 없는 철근콘크리트 보의 경우, 파괴 모드는 주로 전단스팬비에 좌우된다. 그림 1은 전단스팬비에 따른 철근콘크리트 보의 파괴 모드를 나타낸 것인데, 일반적으로 전단스팬비 1과 5~7 사이에서 전단파괴가 발생한다. 한편, 전단스팬비 2~3을 분기점으로 하여 전단파괴의 모드가 변화되는데, 이 분기점은 주철근비, 유효깊이 등에 따라서 약간의 차이는 있으나 보통 2.5 부근의 값을 가진다. 즉, 전단스팬비가 2.5 이상이 되면, 보 작용(beam action)에 의한 전단 저항 메카니즘이 파괴되면서 보가 파괴되는 사인장 파괴(diagonal tension failure)가 발생하며, 2.5 이하에서는 보 작용에 의한 전단 저항 메카니즘이 파괴된 이후에도 아치 작용(arch action)에 의해 어느 정도 보유내력(reserve capacity)을 보이다가 전단-압축(shear-compression) 또는 전단-인장(shear-tension)의 형태로 파괴가 발생한다. 따라서, 두 파괴 모드의 전단 저항 메카니즘은 상이하다.

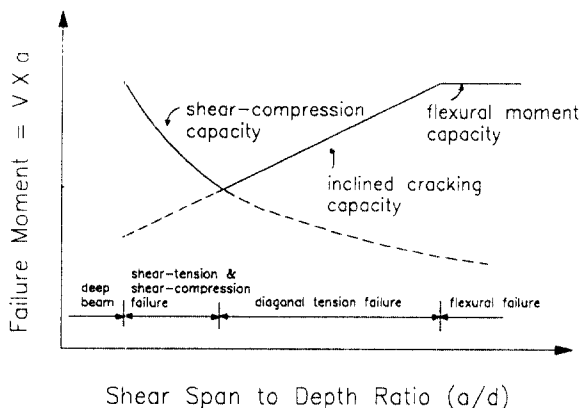


그림 1. 전단스팬비에 따른 전단파괴 모드

본 연구에서는 이와 같은 사실에 기초하여 전단강도 예측 모델식을 전단스팬비 2.5 이상인 사인장 파괴 모드와 전단스팬비 2.5 이하인 전단-압축 또는 전단-인장 파괴 모드로 나누어 유도하였다.

### 2.1 사인장 파괴 모드 ( $a/d > 2.5$ )

휨 균열이 발생한 이후의 철근콘크리트 보는 압축부 콘크리트의 전단 저항, 골재의 맞물림 작용 및 철근의 장부 작용에 의해 전단력이 전달되며, 따라서 보의 전단내력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_u = V_c + V_a + V_d \quad (1)$$

여기서,  $V_c$ 는 압축부 콘크리트에 의해 전달되는 전단력,  $V_a$ 는 골재의 맞물림 작용에 의해 전달되는 전단력,  $V_d$ 는 철근의 장부 작용에 의해 전달되는 전단력이다.

압축부 콘크리트는 사인장에 의해서 파괴가 유발되므로  $V_c$ 는 콘크리트 인장강도와 압축부 면적의 함수로 나타낼 수 있을 것이다. 콘크리트의 인장강도는 압축강도의 함수이고, 철근이 항복하지 않았다고 가정하면, 압축부 콘크리트의 면적( $bkd$ , 여기서,  $b$ =단면의 폭,  $kd$ =압축부의 높이)은 탄성계수비( $n=E_c/E_s$ )와 주철근비( $\rho$ )의 함수로 나타낼 수 있다.

Shah 등<sup>(4)</sup>은 고강도 콘크리트에 관한 최근의 연구에서 콘크리트의 탄성계수는 압축강도의 0.325 승에 비례한다고 제안하였다. 또한, 노르웨이 기준<sup>(5)</sup>에서는 압축강도 84 MPa까지의 범위에서 콘크리트 탄성계수는 압축강도의 0.3 승에 비례한다고 정하고 있다. 友澤史紀 등<sup>(6)</sup>은 문헌에 발표된 많은 실험치의 회귀분석을 통하여 압축강도 140 MPa 범위에서 콘크리트의 탄성계수는 압축강도의 0.3 승에 비례한다고 제안하였다. 이와 같은 사실에 기초하여 본 연구에서는 콘크리트의 탄성계수를 압축강도의 0.3 승에 비례한다고 가정하였다.

한편,  $k$ 를 탄성계수비 5~10, 주철근비 0.005~0.05의 범위에서 근사적으로 단순화시키면,  $0.818(np)^{0.36}$ 으로 된다. 따라서, 콘크리트 인장

강도를 압축강도의 0.5 승에 비례한다고 가정하면,  $V_c$  는 다음과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$V_c = c_1 f_c'^{0.39} \rho^{0.36} b d \quad (2)$$

여기서,  $c_1$ 는 상수이다. 한편, 실제로는 압축부 콘크리트가 인장과 압축을 동시에 받는 2축응력상태에 놓여 있으므로  $f_c'$ 의 지수승은 식 (2)의 값보다 다소 낮아질 것으로 예상된다.

Fenwick,<sup>(7)</sup> Paulay<sup>(8)</sup> 등의 연구에 의하면 골재의 맞물림 작용에 의해 전달되는 전단력은 대체적으로 균열폭의 1.1 승에 반비례한다. 또한, 이 힘은 골재를 지지하고 있는 매트릭스의 강성(rigidity)에 비례하고, 매트릭스의 강성은 콘크리트의 탄성계수에 직접 비례한다. 한편, 힘을 받는 철근콘크리트 보의 균열폭은 철근의 응력에 근사적으로 비례하므로 극한하중시의 철근의 응력, 균열의 길이, 콘크리트의 탄성계수 등을  $f_c'$ ,  $\rho$  및  $a/d$ 의 함수로 간략하게 표현하면,  $V_a$  는 근사적으로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_a = c_2 f_c'^{0.39} \rho^{0.38} (c_3 + d/a) b d \quad (3)$$

여기서,  $c_2$ ,  $c_3$ 는 상수이다. 최근의 고강도 콘크리트 보의 전단강도에 관한 연구에 의하면,<sup>(9)</sup> 콘크리트의 강도 수준이 증가할수록 균열면이 매끈해지는 경향이 있다. 따라서,  $f_c'$ 의 지수승은 식 (3)의 값보다 낮은 값을 가질 것으로 예상된다.

Vintzeleou 등<sup>(10)</sup>의 연구로부터 장부 작용에 의해 전달되는 전단력은 다음과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$V_a = c_4 f_c'^{0.3} \rho^p \quad (4)$$

여기서,  $c_4$ 는 상수이다. 윗 식에서  $p$ 는 철근 간격에 따라 변화되는 값이며, 일반적으로 0.4~0.5 사이의 값을 갖는다. 한편,  $f_c'$ ,  $\rho$ 의 지수승은 식 (2), (3), (4)에서 모두 유사한 값을 가

짐을 관찰할 수 있다. 따라서, 전단강도 예측 모델식의 간략화를 위하여 각 식의  $f_c'$ 과  $\rho$ 가 동일한 지수승을 가진다고 가정하고, 식 (2), (3), (4)를 식 (1)에 대입하여 정리한 다음 수정된 크기효과 법칙을 적용하면,  $V_u$  는 다음과 같이 표현된다.

$$V_u = c_5 f_c'^a \rho^r (c_6 + d/a) \times \left( \frac{1}{\sqrt{1 + c_7 d}} + c_8 \right) b d \quad (5)$$

여기서,  $c_5$ ,  $c_6$ ,  $c_7$ ,  $c_8$ 는 상수이다. 앞서의 논의로부터  $f_c'$ 의 지수승은 0.30~0.35 정도임을 예측할 수 있고,  $\rho$ 의 지수승은 0.4 부근의 값을 가짐을 예측할 수 있다. 이와 같은 사실과 문헌에 발표된 많은 실험치의 회귀분석으로부터 각 계수의 값을 결정하였다. 이때, 회귀분석에는 단순보의 3점 또는 4점 휨 시험에 의한 실험치만을 사용하였으며, 유효깊이가 100mm 보다 작거나 최대크기 9mm 이하의 골재를 사용한 보의 실험치는 제외시켰다. 최종적으로 유도된 사인장 파괴 모드( $a/d > 2.5$ )에서의 전단강도 예측 모델식은 다음과 같다.

$$v_u = 4.0 f_c' \frac{1}{3} \rho \frac{2}{5} (0.4 + d/a) \lambda(d) \quad (6)$$

$$\text{where, } \lambda(d) = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.008 d}} + 0.15$$

여기서,  $v_u$ 와  $f_c'$ 의 단위는 MPa 이고,  $d$ 의 단위는 mm이다.

## 2.2 전단-압축 파괴 모드 ( $a/d \leq 2.5$ )

보 작용에 의한 전단 저항 메카니즘이 파괴된 후 보는 타이드 아치(tied arch)와 유사하게 거동하므로 전단내력은 압축대(compression strut)의 면적 및 강도, 타이의 인장력, 유사 아치의 높이와 길이의 비 등의 함수가 된다. 따라서,

$$V_u = c_9 f_c'^s \rho^t (d/a)^m \lambda(d) b d \quad (7)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서  $c_9$ 는 상수이다. 한편,  $a/d = 2.5$ 에서는 사인장 파괴 모드에서 유

도된 식과 전단강도 값이 같아야 한다는 경계 조건으로부터,  $a/d = 2.5$ 에서  $s = 1/3$ ,  $t = 2/5$ 가 된다. 또한, 파괴 모드가 사인장 파괴에서 극단적인 전단-압축 파괴의 형태로 바뀌는 전이 지역이라는 점으로부터  $s$ 의 값이  $a/d$ 가 작아짐에 따라 점점 증가할 것으로 예상된다. 이와 같은 사실과 실험치의 회귀분석을 통하여 각 계수의 값을 결정하였으며, 최종적으로 결정된  $a/d \leq 2.5$ 에서의 전단강도 예측 모델식은 다음과 같다.

$$v_u = 9.6 f_c' \frac{a}{3} \rho \frac{2}{5} (d/a)^{1.2} \lambda(d) \quad (8)$$

$$\text{where, } \alpha = 1.32 - 0.008(a/d)^4$$

### 3. 제안된 모델식의 검증

그림 2는 압축강도, 주철근비, 전단스팬비 및 유효깊이의 변화에 따른 제안된 모델식의

전단강도비(실험치/예측치)를 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 본 모델식은 각 요인이 전단강도에 미치는 영향을 적절하게 평가해주고 있어, 각 요인의 변화에 따른 전단강도비의 변화 경향이 나타나지 않고 있다.

기존의 많은 연구자들에 의해 전단보강근이 없는 철근콘크리트 보의 전단강도를 예측하기 위한 모델식이 제시되었으며, ACI 기준식<sup>(11)</sup>과 더불어 대표적인 모델식으로는 Zsutty 식<sup>(12)</sup> 및 Bazant 크기효과 법칙에 근거하여 유도된 Bazant 식<sup>(13)</sup>이 있다. 각 모델식의 형태는 다음과 같다.

ACI 기준 (11-6) 및 (11-30) 식 ;

$$v_c = 0.158\sqrt{f_c'} + 17.25\rho_w \frac{V_u d}{M_u} \quad (a/d > 2.5) \quad (9)$$

$$v_c = \left(3.5 - 2.5 \frac{M_u}{V_u d}\right) \times [\text{eq. (9)}] \quad (a/d \leq 2.5) \quad (10)$$

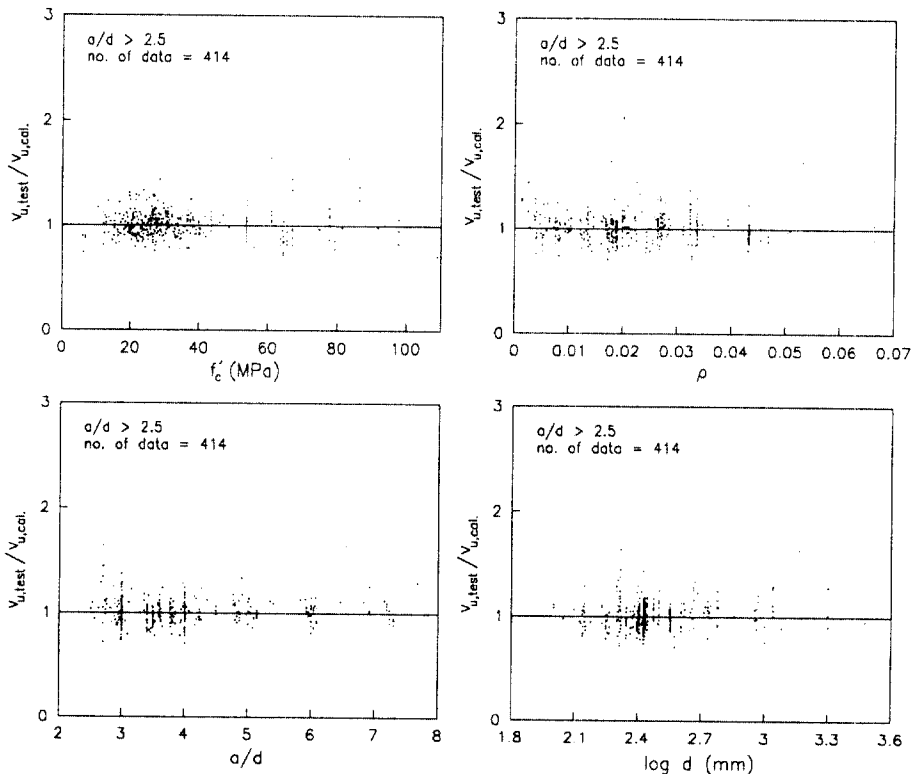


그림 2. 각 요인에 따른 실험체와 계산치의 비교

Zsutty 식 ;

$$v_u = 2.175 \left( f'_c \rho \frac{d}{a} \right)^{1/3} \quad (a/d > 2.5) \quad (11)$$

$$v_u = \left( 2.5 \frac{d}{a} \right) \times [\text{eq. (11)}] \quad (a/d \leq 2.5) \quad (12)$$

Bazant 식 ;

$$v_u = 0.54 \sqrt[3]{\rho} \left( \sqrt{f'_c} + 249 \sqrt{\frac{\rho}{(a/d)^5}} \right) \times \frac{(1 + \sqrt{5.08/d_a})}{\sqrt{1 + d/(25d_a)}} \quad (13)$$

그림 3은 각 모델식의 전단강도비를 도시한 것이다. ACI 규준식의 경우, 전단강도비의 흠어짐이 심하여 실험 결과를 잘 예측하지 못하고 있는데, 주철근비가 낮거나 유효깊이가 큰 보의 경우 전단강도비가 1.0 이하로 떨어지는 경우가 많아 이에 대한 고려가 필요할 것으로 사료된다. Zsutty 식의 경우, 예측 경향에 있어서 전단강도가 낮을 경우 전단강도비가

1.0 이하의 값을 가지다가, 전단강도가 증가함에 따라 점차로 증가하는 것으로 나타났는데, 전단강도가 낮은 부분에서는 크기효과를 고려 해주지 않았기 때문이며, 전단강도가 높은 부분에서는 아치 작용의 효과를 약간 과소평가했기 때문으로 판단된다. Bazant 식의 경우 본 모델식보다는 정확도가 다소 떨어졌으나 비교적 양호하게 실험치를 예측하는 것으로 나타났다. 본 모델식은 평균 전단강도비에 대한 표준편차(s.d.) 0.166, 실험치와 예측치의 상관계수(r) 0.923으로 비교된 모델식 중 실험치를 가장 잘 예측하였다.

#### 4. 결 론

전단 저항 메카니즘의 합리적인 분석과 수정된 크기효과법칙을 적용하여 전단보강근이 없는 철근콘크리트 보의 전단강도 예측 모델식을 제안하였으며, 제안된 모델식의 검증 및 다른 모델식들과의 비교를 통하여 다음과 같

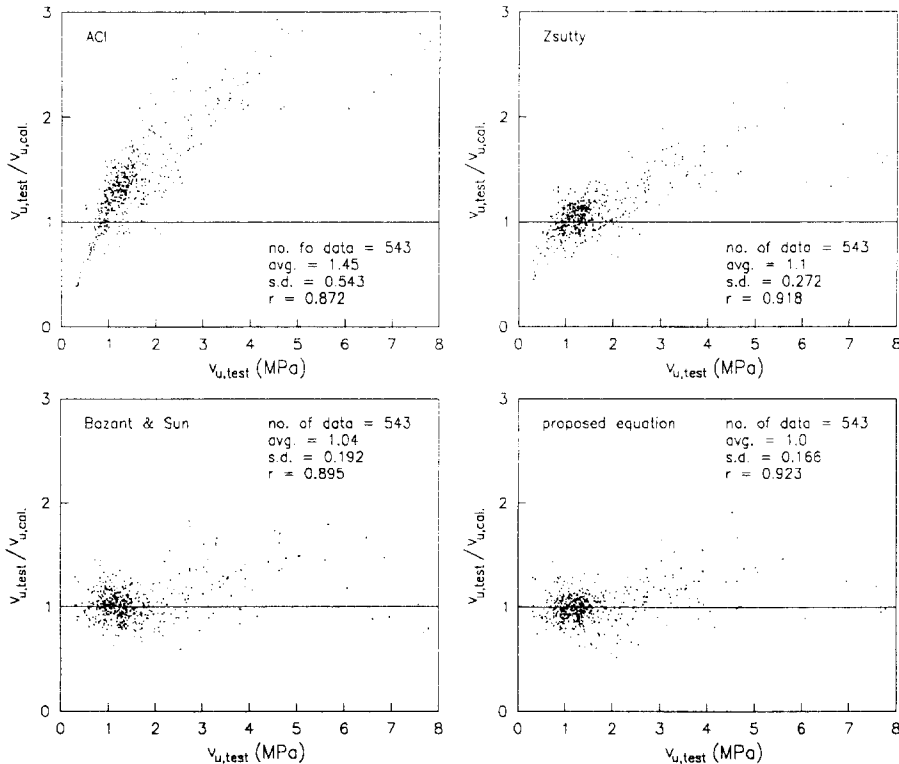


그림 3. 각 모델식에 따른 실험치와 계산치의 비교

은 결론을 얻었다.

1) 유도된 모델식의 형태는 다음과 같다.

$$v_u = 4.0 f'_c \frac{1}{3} \rho \frac{2}{5} (0.4 + d/a) \lambda(d) \quad (a/d > 2.5)$$

$$v_u = 9.6 f'_c \frac{2}{3} \rho \frac{2}{5} (d/a)^{1.2} \lambda(d) \quad (a/d \leq 2.5)$$

$$\text{여기서, } \lambda(d) = \frac{1}{\sqrt{1+0.008 d}} + 0.15$$

$$\alpha = 1.32 - 0.008(a/d)^4$$

2) 문헌에 보고된 실험치의 분석 결과, 제안된 모델식은 콘크리트 압축강도, 주철근비, 전단스팬비, 유효깊이 등 각 요인이 전단강도에 미치는 영향을 적절하게 평가하였다.

3) ACI 규준식, Zsutty 식 및 Bazant 식과 비교, 분석해 본 결과 본 모델식이 가장 정확하게 철근콘크리트 보의 전단강도를 예측하였다.

4) 본 모델식에는 전단보강 효과는 고려되지 않았으며, 이는 앞으로 연구되어야 할 과제로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 1992년도 과학재단 목적기초과제의 연구비 지원으로 일부 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Reinhardt, H.W., "Masstabseinfluss bei Schubversuchen im Licht der Bruchmechanik," Beton- und Stahlbetonbau(Berlin), No. 1, 1981, pp. 19-21.
2. Bazant, Z.P., "Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock, Metal," J. Engng. Mech., ASCE, V. 110, No. 4, 1984, pp. 518-535.
3. Kim, J.K., and Eo, S.H., "Size Effect in Concrete Specimens with Dissimilar Initial Cracks," Magazine of Concrete Research, V. 42, No. 153, 1990, pp. 233-238.

4. Shah, S.P., and Ahmad, S.H., "Structural Properties of High Strength Concrete and Its Implications for Precast Prestressed Concrete," PCI J., V. 30, No. 6, 1985, pp. 92-119.
5. Norwegian Standard NS 3473, "Concrete Structures, Design Rules," 1989.
6. 友澤史紀, 野口貴文, 小野山實造, "高強度・超高強度コンクリートの基礎的力學特性に関する調査," 日本建築學會大會學術講演梗概集 A (中國), 1990, pp. 497-498.
7. Fenwick, R.C., and Paulay, T., "Mechanisms of Shear Resistance of Concrete Beams," Proceedings, ASCE, V. 94, ST 10, 1968, pp. 2325-2350.
8. Paulay, T., and Loeber, P.J., "Shear Transfer by Aggregate Interlock," Shear in Reinforced Concrete, SP-42, American Concrete Institute, Detroit, 1974, pp. 1-16.
9. Elzanty, A.H., Nilson, A.H., and Slate, F.O., "Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Using High-Strength Concrete," ACI J., Proceedings V. 83, No. 2, 1986, pp. 290-296.
10. Vintzeleou, E.N., and Tassios, T.P., "Mathematical Models for Dowel Action under Monotonic and Cyclic Conditions," Magazine of Concrete Research, V. 38, No. 134, 1986, pp. 13-22.
11. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89), American Concrete Institute Detroit, 1989, 353 pp.
12. Zsutty, T.C., "Shear Strength Prediction for Separate Categories of Simple Beam Tests," ACI J., Proceedings V. 68, No. 2, 1971, pp. 138-143.
13. Bazant, Z.P., and Sun, H.H., "Size Effect in Diagonal Shear Failure: Influence of Aggregate Size and Stirrups," ACI Materials J., Proceedings V. 84, No. 4, 1987, pp. 259-272.