

철근콘크리트 기둥에서 원형전단철근에 의한 전단강도 산정

하태훈^{1)*} · 홍성걸¹⁾

¹⁾서울대학교 건축학과

(2002년 7월 22일 원고접수, 2002년 10월 8일 심사완료)

Evaluation of the Shear Strength Component by Circular Transverse Reinforcement in Reinforced Concrete Columns

Tae-Hun Ha^{1)*} and Sung-Gul Hong²⁾

¹⁾ Dept. of Architecture, Seoul National University, Seoul, 151-744, South Korea

(Received July 22, 2002, Accepted October 8, 2002)

ABSTRACT

Current design equations for shear strength of reinforced concrete columns generally overestimate the shear strength contribution by the circular transverse reinforcement. This is due to the simplification of the discrete distribution of the reinforcement to the continuous one and the imprudent application of the classical truss model to the circular section, which is different in shear-resisting mechanism from the rectangular section. This study presents a rational model for the prediction of shear strength contribution by the circular transverse reinforcement considering the starting location of a diagonal crack, the number of transverse reinforcing bars crossing the main crack and the geometrical strength component of the transverse resistance. It was found that, for lower amount transverse reinforcement, the crack starting point and the number of crack crossing bars greatly influence the shear-resisting capacity. Proposed model leads to a reliable design equation which is derived using a linear regression method and is in good agreement with the lower bound of exact strength curve.

Keywords: shear, circular transverse reinforcement, diagonal crack, effective strength, reinforced concrete column, truss model

1. 서 론

일반적인 철근콘크리트 부재의 전단강도 설계 방법은 대각선 균열 발생 이전의 콘크리트가 저항하는 성분과 균열 발생으로 인해 노출된 전단철근이 저항하는 성분을 합하여 그 크기가 외력에 충분히 저항하도록 하는 것이다. 기둥에 있어서도 이 원칙은 예외가 아니며, 다만 기둥 축 방향의 압축력에 의해 증가하는 콘크리트의 기여 성분을 실험적인 식을 통하여 설계에 반영하고 있다. 균열면을 가로지르는 전단철근에 의한 전단강도 V_s 는 보에서와 마찬가지로 다음과 같은 45° 트러스 모델을 이용한 강도식 (ACI 318-99¹⁾ 식(11-15)을 통해 구할 수 있다.

$$V_s = \frac{A_w f_y d}{s} \quad (1)$$

여기서, A_w 는 일반적으로 전단철근 1가닥의 단면적 A_{st} 의 2배이며, f_y 는 철근의 항복강도, d 는 부재의 유효깊이, s 는 전단철근의 배근 간격이다. 식(1)은 부재의 단면이 장방형일 경우에 해당하는 것이지만, ACI 11.3.3에 따르면 콘크리트 단면이 원형이고 원형 전단철근을 사용할 경우에는 유효깊이의 크기를 단면 직경 D 의 0.8배로 한다는 전제 하에 동일한 식을 사용할 수 있다. 그러나 이는 적용의 편의성만을 고려한 방편으로서 일반적으로 실제 강도를 과대평가하고 있는 것으로 알려져 있다²⁾. 이론적인 측면에서도, 유효깊이의 크기를 $0.8D$ 로 계산하는 것은 원형단면 콘크리트 부재의 유효 단면적을 계산하기 위한 것이며, 이를 부재 단면을 둘러싸는 원형철근에까지 적용하는 것은 적절한 근거가 없다.

본 논문의 목적은 철근의 형태와 균열의 발생지점, 균열을 가로지르는 철근의 개수 등을 고려하여 원형전단철근에 의한 전단강도식을 제안하는 것이다. 해석에 사용된 모델은 실제 철근의 배근 방식을 고려한 불연속 모델이며, 최종적으로 선형회귀분석을 이용하여 안전한 하한계

* Corresponding author

Tel : 02-880-7061 Fax : 02-874-2628

E-mail : heyman1970@msn.com

값을 설계식으로 제안하고 이를 기존의 설계식들과 비교하였다.

2. 선행연구 고찰

1989년에 Ang et al.²⁾은 원형기둥에 발생하는 대각선 균열에 의해 작용하는 원형철근의 전단저항 성분을 구하기 위하여 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$V_s = \frac{\pi(2A_{sh}f_y)D'}{4s} \quad (2)$$

여기서, D' 는 전단철근이 배근된 직경이며, 나머지 변수들은 식(1)에서 사용된 것과 같다. 식(2)는 45°로 가정한 대각선 균열면과 만나는 전단철근의 위치에 따라 외력에 저항하는 힘의 크기가 변하는 사실을 반영하기 위해 평균적분법을 사용하였다(Fig. 2 참고). 그러나 이러한 접근 방법은 오직 전단철근의 배근 간격 s 가 D' 에 비해 충분히 작을 경우에만 성립하는 것으로서, 저자들도 D'/s 가 작은 경우에는 식(2)가 철근이 기여하는 강도를 약 10% 정도 과대평가함을 지적한 바 있다.

전단철근비가 작은 경우에 발생하는 식(2)의 문제점은 김장훈³⁾에 의해서도 이미 지적된 바 있다. 그는 균열 사이를 가로지르는 전단철근의 유효단면적에 대한 불연속 모델을 이용하여 식(3)을 제안하였으며, 이를 실무에 사용할 수 있도록 하기 위하여 curve-fitting을 통해 식(4)를 제안하였다.

$$A_{sh} = \frac{2}{N} \frac{\sin(\frac{\pi}{2} \frac{N}{N+1})}{\sin(\frac{\pi}{2} \frac{1}{N+1})} A_b \quad (3)$$

$$A_{sh} = (0.73N^{-0.74} + \frac{4}{\pi})A_b \quad (4)$$

여기서, A_{sh} 는 전단철근의 유효단면적이고, N 은 사인장 균열면을 관통하는 전단보강근의 수이다. 그러나 그의 모델은 전단철근과 균열면이 만나는 지점이 단면상에 투영된 각을 등각분포로 가정하여, 오히려 전단철근에 의한 강도를 과소평가하는 결과를 가져왔다⁴⁾. 그는 이 후에 균열을 지나는 전단철근의 개수가 1~3개인 경우에 대하여 기존의 설계식들과 그의 불연속 모델을 이용한 강도식을 실험결과와 비교하는 연구를 수행하기도 하였다⁵⁾.

Dancygier⁶⁾ 역시 불연속 모델을 사용하여 균열면을 통과하는 전단철근의 개수가 4개 이하로 떨어질 때 Ang et al.의 식이 저자들이 지적한 바와는 달리 실제 강도를 최

대 10% 이상 50%까지도 과대평가할 수 있음을 보인바 있다(Fig. 1). 이 그래프에 표현된 오차함수식 Err은 식(5)와 같다.

$$\text{Err} = \frac{V_s(\text{discrete}) - V_s(\text{integral averaging})}{V_s(\text{discrete})} = 1 - \frac{\pi}{4} \frac{\bar{D}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{1 - (1 - 2\frac{\bar{s} + i - 1}{\bar{D}})^2}} \quad (5)$$

여기서, $\bar{D} = (D'/s) \tan \theta$ 와 $\bar{s} = s_0/s$ 이고, s_0 는 균열의 시작점으로부터 첫 번째 횡보강근까지의 수직거리이다. 그의 접근방법은 본 연구에서 사용된 것과 본질적으로는 차이가 없으나, 실제로 값을 계산하는 과정과 균열의 시작점 및 철근의 개수를 산정하는 방법에서 일관성이 없어 모델을 재현할 수가 없는 단점이 있다.

3. 원형전단철근의 유효강도 계산

3.1. 철근의 형태와 배근방식을 고려한 강도모델

Fig. 2는 등간격으로 배근된 전단철근이 철근배근 방향과 θ 의 각을 이루는 대각선 균열과 교차하는 모습을 나타낸 것이다. Fig. 2(a)의 단면도와 입면도의 관계로부터 i 번째의 철근이 균열면과 만나는 점이 단면의 중앙과 이루는 각 α_i 는 등각분포가 아님을 알 수 있다⁴⁾. 이 각의 크기는 균열이 첫 번째 전단철근과 만나는 점부터 i 번째 철근과 만나는 점까지의 수평 투영거리(Fig. 2(b)의 α_i)를 이용하여 식(6)으로부터 구해야 한다.

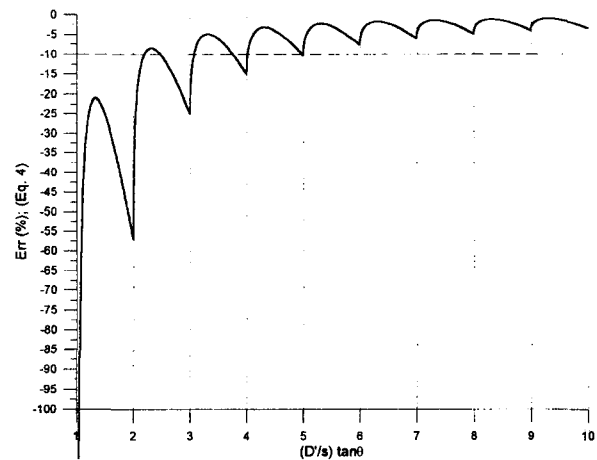


Fig. 1 Error induced by integral averaging formulation as function of nondimensional ratio

$$\bar{D}(D'/s \tan \theta)^{6)}$$

$$\cos \alpha_i = \frac{D'/2 - a_i}{D'/2} \quad (6)$$

Fig. 2(b)로부터 외력 V 에 저항하는 전단철근의 유효강도는 $A_{sh}f_y$ 의 $\sin \alpha_i$ 성분임을 알 수 있으므로, 전체 저항강도는 균열을 가로지르는 각 전단철근의 유효강도를 합하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_s = 2A_{sh}f_y \sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \quad (7)$$

여기서, 전단철근의 개수 n 은 균열의 경사도와 철근의 배근 간격, 그리고 균열이 주철근과 최초로 만나는 지점을 고려하여 식(8)과 같이 표현가능하다.

$$n = \left[\frac{D' \tan \theta - s_0}{s} \right] + 1 \quad (8)$$

여기서, $Gauss(x)$ 는 x 보다 크지 않은 최대의 정수를 의미하며, s_0 는 균열이 주철근과 만나는 지점부터 첫 번째 전단철근까지의 수직거리($0 \leq s_0 \leq s$)이다(Fig. 3 참고). 식(8)은 균열의 수직 투영 길이와 철근 배근 간격의 배율, 균열 시작점의 불확실성 등을 포괄하기 위하여, 균열이 주철근과 만나는 지점에 전단철근이 위치하여 그 유효강도가 0이 되는 경우도 개수 산정에 포함하고 있다.

균열의 시작점이 전단철근의 강도기여분에 미치는 영향을 파악하기 위해 s_0 는 중요한 변수이다. 전술한 바와 같이 원형전단철근은 대각선 균열과 만나는 위치에 따라 저항성분의 크기가 달라지므로, 균열을 가로지르는 전단철근의 개수가 적은 경우에는 s_0 가 그 크기를 변화시키는 요인이 될 것으로 예상된다.

식(6)을 식(7)에 대입하면 철근의 개수와 유효성분, 그리고 균열의 시작점을 고려한 다음과 같은 전단강도식을 얻을 수 있다.

$$V_s = 2A_{sh}f_y \sum_{i=1}^n \sqrt{1 - \left[1 - \frac{2\{s_0 + (i-1)s\}}{D' \tan \theta} \right]^2} \quad (9)$$

식(9)는 원형철근의 실제 배근을 그대로 고려한 것으로서 철근의 전단저항 성분에 대한 수학적 정해(exact solution)라고 할 수 있다. 그러나 균열의 시작점, 균열의 수직투영 거리와 철근배근 간격의 배율 등 설계 시에는 알 수 없는 여러 변수들이 존재하므로 이들의 영향을 분석하여 가장 취약한 상황을 반영한 설계식을 도출해 내는 것이 필요하다.

3.2 균열의 시작점이 철근의 전단저항에 미치는 영향

Fig. 4의 그래프는 s_0 의 값이 1 mm 씩 변함에 따라 식(9)가 어떠한 변화를 보이는지에 대한 예이다. 예제에 사용된 기둥은 Ang et al.²⁰의 실험에 사용된 것으로 $D'=364$ mm, $s=60$ mm, $f_y=328$ Mpa이고 θ 는 45° 로 가정하였다. 이

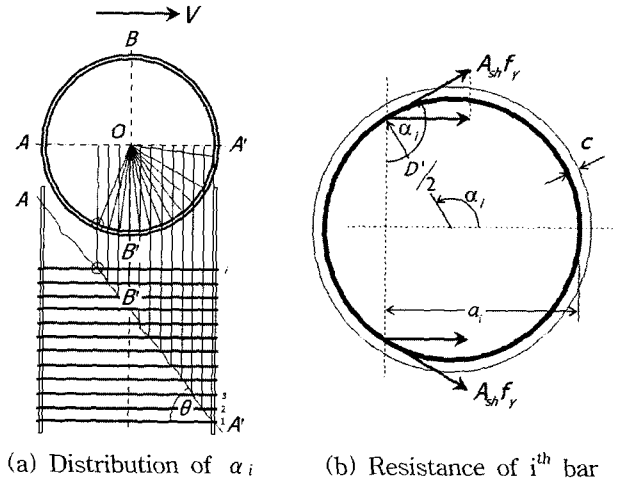


Fig. 2 Shear resistance of circular transverse reinforcement

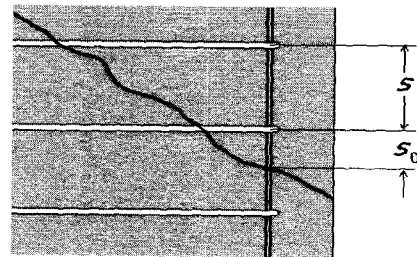


Fig. 3 Definition of S_0

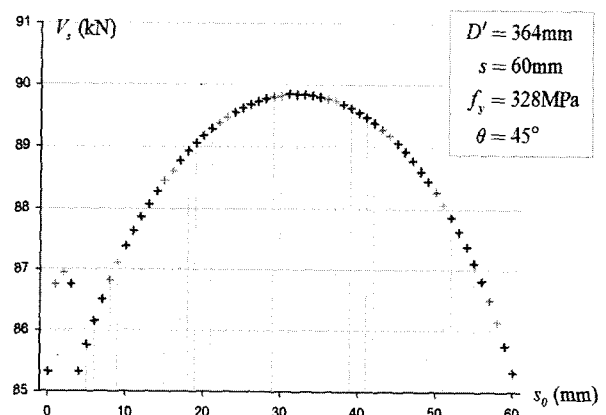


Fig. 4 Relationship between S_0 and the shear strength of reinforcement

그래프로부터 알 수 있는 사항은 s_0 가 0일 때 V_s 가 최소 값을 갖는다는 것이다. Fig. 4에 사용된 예제의 경우에는 $s_0=4$ mm인 경우에도 최소값을 가지지만, 이 역시 s_0 가 0일 때와 동일한 값이다. 이러한 관계가 일반적인 경우에 대해서도 성립한다는 사실은 다음의 해석을 통해 알아볼 수 있다.

식(9)를 단순하게 만들고 기존의 강도식과 비교하기 위하여 균열의 정중앙을 지나는 전단철근의 강도 $2A_{sf}f_s$ 로 식을 나눈 후, 상대변수 (normalized variable) $r_0 = s_0/s$ ($0 \leq s_0 < 1$)와 $r = D' \tan \theta/s$ 를 식(9)에 대입하여 다음과 같이 무차원의 식을 정의한다.

$$\bar{V} = \sum_{i=1}^n \sqrt{1 - \left[1 - \frac{2(r_0 + (i-1)s)}{r} \right]^2} \quad (10)$$

이 결과 관심의 대상이 되는 변수는 오직 r_0 와 r 만 남게 되므로 이들이 미치는 영향을 조사하기로 한다. 이 중 r_0 는 대각선균열의 불확실한 시작점 위치를 나타내는 변수인데, Fig. 4의 예제에서 살펴본 방식을 통해 식(10)의 하한계 값을 찾는 데에 이용된다. r 은 대각선균열의 수직투영거리를 전단철근의 배근간격으로 나눈 값으로서, 이는 균열 사이를 가로지르는 전단철근의 개수 n 과 밀접하게 관련된 변수이다.

Fig. 5는 식(10)의 무차원식을 $r_0=0$ 인 경우, 즉 대각선 균열이 주철근과 전단철근의 교차점을 지나는 경우에 대하여 정상화(normalize)시킨 오차함수(Erf: error function, 식(11))의 그래프로서 r 이 $1 < r \leq 2$ 의 범위에서 0.1씩 증가할 때 r_0 의 크기 변화가 전체 강도에 미치는 영향을 파악할 수 있다.

$$Erf = \frac{\bar{V}_s - \bar{V}_{s(s_0=0)}}{\bar{V}_{s(s_0=0)}} \quad (11)$$

이 그래프를 통해 $r_0=0$ 인 경우에 전단철근의 강도가 항상 최소가 된다는 사실을 일반화할 수 있으며, 그 밖의 경우에는 강도가 최대 70% 이상 증가할 수도 있음을 알 수 있다. Fig. 6은 여러 가지 다른 r 의 값에 대한 오차함수를 그래프로 표현한 것이다. r 이 증가함에 따라 강도의 증가분이 줄어든다는 점을 제외하면 Fig. 5에서 볼 수 있는 경향이 그대로 나타남을 알 수 있다.

3.3 균열을 가로지르는 전단철근의 개수와 전단강도와의 관계

Fig. 7은 r 의 값이 작은 경우($1 < r \leq 10$)에 Ang et al.²⁾의 평균적분식의 전단철근 강도에 대한 과대평가 정도를 보여주고 있다. 이 그래프에 사용된 오차함수는 식(2)를 식(10)에서와 같이 정상화시킨 후 두 식의 차이를 다

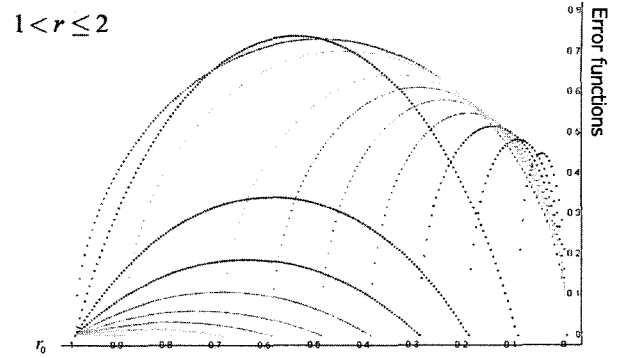


Fig. 5 Error function of Eq.(10) compared to S_0 being 0

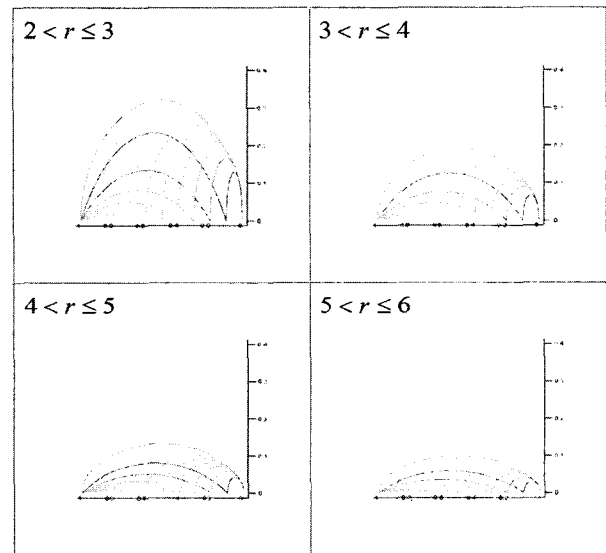


Fig. 6 Effect of r on the r_0 - error function

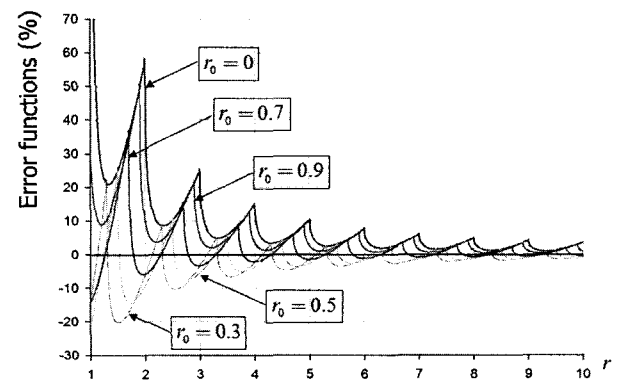


Fig. 7 Error functions of average integral equation (Eq.(12))

음과 같이 \bar{V}_s 에 대한 백분율로 나타낸 것이다.

$$Erf = \frac{(\pi/4)r - \bar{V}_s}{\bar{V}_s} (\%) \quad (12)$$

Fig. 7의 그래프로부터 알 수 있는 사실을 정리하면 다음과 같다.

(1) Dancygier⁶⁾가 지정한 바와 같이 $r = 2$ 인 경우에 식(2)에 의한 설계식은 전단철근이 강도에 기여하는 크기를 실제보다 50% 이상 과대평가하고 있다.

(2) $r_0 = 0$ 인 경우에 오차함수의 곡선이 가장 큰 값을 갖는다. 이는 전술한 바와 같이 $s_0 = 0$ 일 때 V_s 가 최소가 된다는 사실이 일반적인 경우에 대하여 성립함을 확인시켜주는 것이다.

(3) $r_0 = 0$ 인 경우에 대하여 r 이 정수일 때 (균열의 수직 투영거리가 전단철근 배근 간격으로 나누어떨어질 때) \bar{V}_s 가 최소가 된다(Fig. 8 참고).

위 사항들에 기초하여 식(10)에 $s_0 = 0$ 을 대입하면 식(13)을 얻을 수 있으며, $n = \text{Gauss}(r) + 1$ 이다.

$$\bar{V}_s = \sum_{i=1}^n \sqrt{1 - \left[1 - \frac{2(i-1)}{r}\right]^2} \quad (13)$$

식(13)은 $r_0 = 0$ 인 경우에 대한 것이므로 균열이 주철근과 만나는 지점에 전단철근도 위치하게 된다. 이때 균열 사이에서 실질적으로 저항하는 철근의 개수만을 산정하기 위해서는 균열 끝에 위치하는 전단철근은 개수에서 제외해야 하므로 $n = \langle r \rangle - 1$ 이 되며 근호 안의 $(i-1)$ 은 i 로 치환된다. 이런 과정을 거쳐 식(13)은 식(14)와 같이 기술할 수 있고, r 이 정수인 경우에 대하여 최종적으로 정리하면 식(15)가 된다.

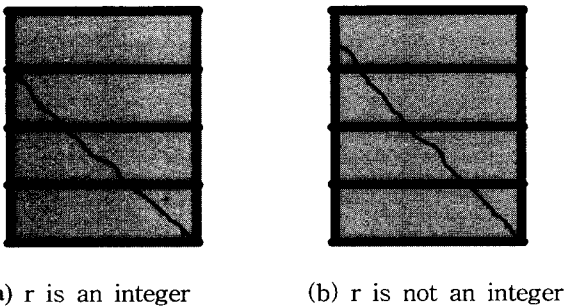


Fig. 8 Difference in the number of steel bars crossing the diagonal crack

$$\bar{V}_s = \left\langle \sum_{i=1}^1 \sqrt{1 - \left(\frac{1-2i}{r}\right)^2} \right\rangle \quad (14)$$

$$\bar{V}_s = \frac{2}{r} \sum_{i=1}^1 \sqrt{-i^2 + ri} \quad (15)$$

이로써, r 이 정수인 경우에 균열면을 지나는 철근의 개수 n 은 경계면에 위치한 2개의 철근을 제외했을 때 $(r-1)$ 개가 된다(Fig. 8 참고).

Fig. 9는 정상화시킨 ACI 기준(식(1))과 Ang et al.의 식(식(2))을 식(14)의 \bar{V}_s 와 비교한 그래프이다. 여기서 x 축은 균열면을 가로지르는 철근의 개수로서 $n = r - 1$ 이고, ACI의 설계식을 정상화시킬 때 $D' \approx d = 0.8D$ 라고 가정하였다. 이 그래프로부터 두 종류의 설계식 모두 $r_0 = 0$ 인 경우의 실제 강도를 과대평가하고 있음을 알 수 있다. 균열의 발생 위치는 미리 예측할 수 없으므로 가장 취약한 경우를 고려하여 강도를 산정하여야 한다. Fig. 10에서 한 가지 주목할만한 사항은 n 이 정수인 경우에 해당하는 \bar{V}_s 의 값이 n 과 선형관계를 가지고 있다는 사실이다. 이러한 관계를 이용하여 다음 장에서 실제

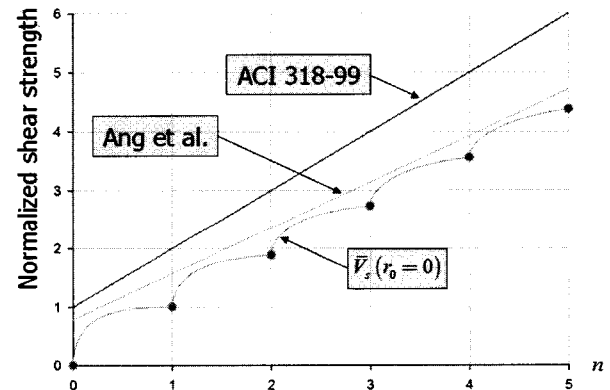


Fig. 9 Shear strength graphs for various normalized equations

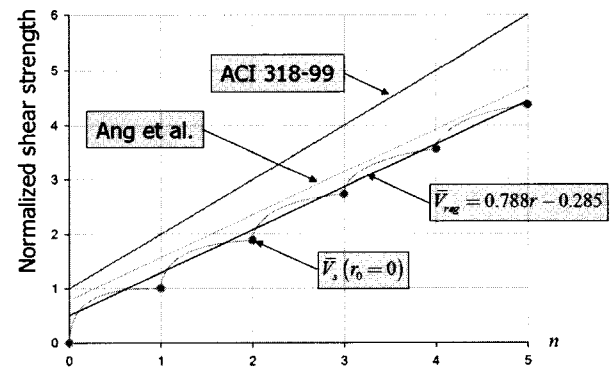


Fig. 10 Design equation derived from linear regression

설계에 사용될 수 있는 간단한 설계식을 제안하고자 한다.

$$V_s = (2A_{sh}f_y) \left(0.788 \frac{D' \tan \theta}{s} - 0.285 \right) \quad (17)$$

4. 선형회귀법에 의한 설계식 제안

Fig. 10은 균열을 지나는 전단철근의 개수 ($n = r - 1$)와 철근의 유효강도 사이의 관계를 보여준다. 3장에서 서술한 바와 같이 $r_0 = 0$ 일 때 \bar{V}_s 는 r 이 정수인 경우에 최소값들을 가지며 곡선의 하한계를 형성한다. 이 하한계 값들은 r 의 크기와 밀접한 상관관계를 가지며 ($Corr(r, \bar{V}_s) = 1$) 높은 선형성을 보이고 있다. r 과 \bar{V}_s 의 하한계 값들에 대한 선형회귀분석을 통해 다음의 식을 도출해낼 수 있다.

$$\bar{V}_s = \bar{V}_{reg} = 0.788r - 0.285 \quad (16)$$

Fig. 10에 나타난 식(16)의 직선함수를 살펴보면, n 이 커지는 경우에 대한 선형성을 맞추기 위해 n 이 작은 경우에는 하한계 값보다 큰 값을 가지지만, 같은 그래프에 표시된 다른 함수들에 비해 그 오차가 상당히 작음을 알 수 있다.

Fig. 11는 기존의 설계식 및 식(16)를 식(14)의 정해와 비교한 오차함수의 그래프들이다. 이 그래프를 보면, 식(16)에 의한 강도식이 철근의 개수가 1개인 경우를 제외하고는 오차를 10% 이내로 정해에 접근하고 있음을 알 수 있다. 이는 20% 이상의 오차를 보이는 Ang et al.의 식은 물론 최소 30% 이상 강도를 과대평가하는 ACI의 설계식보다 이론적인 정해에 부합하는 것이다. 식(16)를 원래의 강도식으로 되돌려 놓으면 최종적으로 본 연구에서 제안하는 원형철근의 전단강도 설계식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

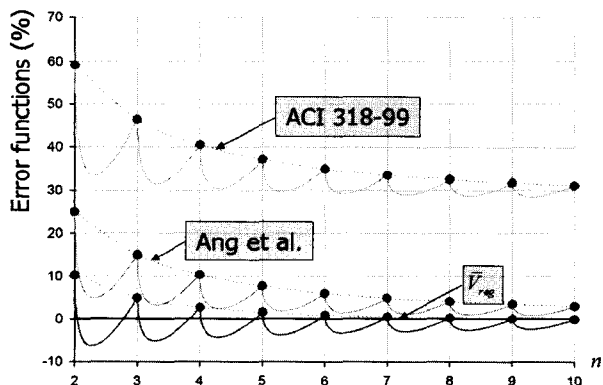


Fig. 11 Comparison of various shear strength error functions

위 식은 기존의 ACI 설계식과 같이 균열 사이를 가로지르는 전단철근의 강도($2A_{sh}f_y$) 및 개수($D' \tan \theta/s$)에 선형 비례하는 근본적인 공통점을 가지고 있으나, 1차 비례계수 및 상수항을 도입하여 전단철근비가 작은 경우에 균열의 시작점 및 균열을 지나는 철근 개수가 미치는 영향을 고려하고, 또 원형단면의 특성 상 발생하는 저항성분의 변화를 반영할 수 있도록 한 것이 장점이다.

5. 결 론

본 논문은 철근콘크리트 원형기둥에 주로 사용되는 원형 전단철근이 기여하는 전단강도 설계식을 제안하기 위해 이론적인 접근을 시도하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 원형전단철근은 장방형 단면에 사용되는 일반적인 직선형 철근과는 기하학적인 형태가 다르므로, 균열면에 노출되었을 때 외력에 평행인 성분만을 유효한 것으로 산정하여 그 강도를 계산해야 한다. 직선철근의 설계식을 사용하는 경우에는 원형철근의 강도를 30% 이상 과대평가한다.
- 2) 균열이 시작되는 지점은 횡보강근에 의한 전단강도에 영향을 미치며, 균열이 기둥의 주철근과 전단철근이 만나는 부분을 지날 때 강도가 가장 작은 것으로 나타났다. 이때 대각선 균열의 수직 투영거리가 철근 배근 간격의 배수가 되는 값들이 전단강도의 하한계 분포를 이룬다.
- 3) 횡보강근에 의한 전단강도와 $r = D' \tan \theta/s$ 의 선형관계를 이용하여 제안한 설계식(식(17))은 균열면을 가로지르는 철근의 개수가 1개인 경우를 제외하고는 10% 이내의 오차한계로 이론적인 정해와 일치하였다.

참고문헌

1. American Concrete Institute (ACI), "Building Code Requirements for Structural Concrete," ACI 318-99 and ACI 318R-99 Commentary, Farmington Hills, Mich, 1999.
2. Ang, B. G., Priesley, M. J. N., and Paulay, T., "Seismic Shear Strength of Circular Reinforced Concrete Columns," *ACI Structural Journal*, 86 (1), pp.45~59, 1989.

3. 김장훈, "철근콘크리트 원형기둥의 전단철근 유효단면적 평가," 콘크리트학회논문집, Vol.11, No.3, pp.81~88, 1999.
4. 하태훈, 홍성걸, "토론: 철근콘크리트 원형기둥의 전단철근 유효단면적 평가," 콘크리트학회논문집, Vol.11, No. 6, pp.137~140, 1999.
5. 김장훈, 정준언, 홍성걸, "콘크리트 원형단면의 횡보강
근에 의한 전단강도 평가 이론 및 실험," 2000년도 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 12(1), pp.515~520, 2000.
6. Dancygier, A. N., "Shear Carried by Transverse Reinforcement in Circular RC Element," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.127, No.1, 81~83, 2001.

요 약

철근콘크리트 기둥에서 원형 전단철근에 의한 전단강도 성분을 산정하는 기존의 기준식들은 일반적으로 그 강도를 과대평가하는 경향이 있다. 그 이유는 불연속분포로 이루어진 철근의 배근을 단순한 연속분포로 가정하는 데에서 기인하며, 또 다른 한편으로는 단면이 직사각형인 부재에 사용되는 설계식을 원형 단면에 그대로 적용함으로써 발생한다. 전단철근은 부재에 대각선 균열이 발생하면서 그 역할이 시작된다고 할 수 있는데, 원형 단면은 직사각형 단면과는 달리 균열을 가로지르는 지점에 따라 전단력에 저항하는 성분이 달라지기 때문이다. 본 연구에서는 원형 전단철근에 대하여 대각선 균열의 시작점과 그 균열을 가로지르는 전단철근의 개수, 그리고 원형단면 상에서의 저항성분의 변화를 고려한 새로운 강도모델을 제안하고자 하였다. 제안된 모델의 수학적 해석에 따르면 균열을 가로지르는 철근의 개수가 적을수록 균열의 시작점 및 균열의 수직투영거리가 철근의 배근간격과 이루는 배율이 철근의 전단저항에 미치는 영향이 크다는 사실을 알 수 있었다. 본 연구의 결과로 도출된 불연속 모델을 설계에 이용될 수 있는 식으로 단순화시키기 위해 선형회귀법이 이용되었으며, 이렇게 유도된 설계방정식은 수학적 정해의 하한계 값에 부합하는 결과를 가져왔다.

핵심용어 : 전단, 원형전단철근, 대각선균열, 유효강도, 철근콘크리트기둥, 트러스모델