

콘크리트의 인장강성을 고려한 RC보의 공칭비틀림강도

박창규¹⁾*

¹⁾군산대학교 토목공학과

(2001년 4월 30일 원고접수, 2001년 12월 19일 심사완료)

Torsional Resistance of RC Beams Considering Tension Stiffening of Concrete

Chang-Kyu Park*

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Kunsan National University, Kunsan, 573-701, Korea

(Received on April 30, 2001, Accepted on December 19, 2001)

ABSTRACT

The modified compression field theory is already applied in shear problem at some code(AASHTO-1998) partly. Nominal shear strength of concrete beam is sum of the concrete shear strength and the steel shear strength in the current design code. But Torsional moment strength of concrete is neglected in the calculation of the nominal torsional moment strength of concrete beam in the current revised code. Tensile stress of concrete strut between cracks is still in effect due to tension stiffening effect. But The tensile stresses of concrete after cracking are neglected in bending and torsion in design.

The torsional behavior is similar to the shear behavior in mechanics. Therefore the torsional moment strength of concrete should be concluded in the nominal torsional moment strength of reinforced concrete beam. This paper shows that the torsional moment strength of concrete is caused by the average principal tensile stress of concrete. To verify the validity of the proposed model, the nominal torsional moment strengths according to two ACI codes (89, 99) and proposed model are compared to experimental torsional moment strengths of 55 test specimens found in literature. The nominal torsional moment strengths by the proposed model show the best results.

Keywords : nominal torsional moment strength, modified compression field theory, torsional resistance of concrete, tension stiffening of concrete.

1. 서 론

콘크리트의 휨 및 축방향력에 대한 해석은 잘 정립되어 있는 반면에, 전단과 비틀림을 받는 철근콘크리트 부재의 해석은 상대적으로 그렇지 못한 편이다.

최초의 트러시이론은 1929년 Rausch¹⁾가 제안하였다. 이 이론은 축방향과 이루는 균열각을 45°로 가정했기 때문에 45°공간트러시모델이라고 부른다. Rausch는 다음과 같은 방정식을 유도했다.

$$T_n = 2 \frac{A_{oh} A_t f_{yt}}{s} \quad (1)$$

여기서, T_n : 공칭비틀림강도

A_{oh} : 횡방향 비틀림철근의 중심선으로 둘러싸인 면적

A_t : 횡방향 비틀림철근의 단면적

f_{yt} : 횡방향 비틀림철근의 항복강도

s : 횡방향 비틀림철근의 간격

Rausch의 이론값은 실제의 비틀림강도보다 상당히 크게 나왔다. 그리하여 (1)식을 수정하기 위한 연구들이 계속 이어졌다. 이러한 연구는 대략 세 가지로 분류된다.

첫째로 철근의 역할을 줄이는 것으로 상수 2를 줄이는 방법이다. 이 부류에 속하는 논문은 가장 먼저 1934년 Andersen²⁾에 이어 1959년 Cowan³⁾, 1968년 Hsu⁴⁾ 그리고 1971년 ACI 빌딩설계기준⁵⁾이다. ACI-71 설계기준은 1989년 ACI-89 설계기준까지 과소철근콘크리트 부재의 비틀림강도를 다음과 같이 제시하였다.

$$T_n = T_c + \alpha_t \frac{A_{oh} A_t f_{ty}}{s} \quad (2)$$

여기서,

$$\alpha_t = 0.66 + 0.33 \frac{y_1}{x_1} \leq 1.5$$

A_{oh} : 직사각형의 경우 $x_1 y_1$

x_1 : 횡방향 비틀림철근(페쇄스터립)의 짧은 변

y_1 : 횡방향 비틀림철근(페쇄스터립)의 긴 변

* Corresponding author

Tel : 063-469-4757 Fax : 063-469-4791

E-mail : ckpark@kunsan.ac.kr

T_c : 콘크리트의 비틀림강도($= 0.21x^2y\sqrt{f_{ck}}$ kgf/cm²)
 x, y : 직사각형 단면의 짧은 변과 긴 변의 길이

(2)식에서 보는 바와 같이 α_t 는 2보다 상당히 더 작고, 콘크리트의 비틀림강도 T_c 가 추가되었는데도 불구하고 (1)식의 값보다 훨씬 더 작다.

둘째의 부류는 전단흐름으로 둘러싸인 면적 A_0 를 적당히 정함으로써 값을 줄이는 방법이다. 즉, 전단흐름의 중심선을 모퉁이에 있는 종방향철근의 중심을 연결하는 선으로 가정한다. 이 방법은 먼저 1969년 Lampert & Thurlimann⁶⁾을 시작으로 CEB-FIP 설계기준⁷⁾에 채택되었다.

$$T_n = T_c + 2 \frac{A_2 A_t f_{yt}}{s} \cot \theta \quad (3)$$

여기서, A_2 : 종방향철근의 중심을 연결하는 선으로 둘러싸인 면적

θ : 콘크리트스트럿의 경사각

T_c : $2.5 \tau_R t_d (2A_2)$ ($T_n < 3T_c$);

t_d : 전단흐름유효두께(A_2 의 면적에 내접하는 원의 직경의 6분의 1)

$T_c = 0$ ($T_n \geq 3T_c$)

$\tau_R = f'/4$

$f' = 0.214 (f'_c)^{2/3}$; (f', f'_c 단위는 MPa)

셋째의 부류는 1980년 Collins & Mitchell⁸⁾가 제시한 것으로, 임의의 가정으로 면적 A_{oh} 을 줄이려 하였다.

$$T_n = 2 \frac{A_o A_t f_{yt}}{s} \cot \theta \quad (4)$$

여기서 A_o 는 전단흐름의 중심선으로 둘러싸인 면적이다. 전단흐름의 중심선은 콘크리트스트럿의 등가압축응력블럭의 중심선과 같다고 가정하였다. 등가압축응력블럭을 정하는데 페쇄스터럽 중심선 외곽의 콘크리트 피복두께는 무시한다. 그 이유는 콘크리트스트럿의 압축응력에 의하여 밀려나 떨어진다(spalling)고 생각하기 때문이다. 이러한 가정에 따라 A_o 는 근사적으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A_o = A_{oh} - \frac{a_o}{2} p_h \quad (5)$$

여기서, a_o : 등가직사각형 압축응력블럭의 깊이

p_h : 페쇄스터럽 중심선의 둘레

평형조건식과 적합조건식으로부터 a_o 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$a_o = \frac{A_{oh}}{p_h} \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{T_n p_h}{0.85 f'_c A_{oh}^2} (\tan \theta + \cot \theta)} \right\} \quad (6)$$

Collins & Mitchell의 이론에서 어려운 점은 등가 직사각형 압축응력블럭의 깊이 a_o 가 너무 작다는 점이다. 그 이유는 콘크리트스트럿의 응력 계산에 표준실린더강도가 부정확하게 적용되었기 때문이다. 실제로 콘크리트스트럿의 강도는 대각선 방향의 균열로 인하여 크게 감소한다. 이러한 현상을 콘크리트의 연화(軟化)라고 부른다.

콘크리트의 연화현상을 처음으로 관측한 사람은 1972년 Robinson & Demorieux⁹⁾이다. 1981년 Vecchio & Collins¹⁰⁾는 17개의 $89 \times 89 \times 7$ cm 크기의 철근콘크리트 패널에 순수전단력을 가하여 실험하였다. 그 결과 응력과 변형률이 모두 일정비율로 감소되었다.

1985년 Hsu & Mo¹¹⁾는 콘크리트의 연화를 고려한 트러스모델을 발표하였다. 1996년 Hsu & Pang¹²⁾은 고경각 트러스모델을 발표하여 균열 후 콘크리트의 전단응력이 비틀림에 저항할 수 있는 것으로 보았다.

1995년 ACI¹³⁾ 빌딩설계기준에서는 다음과 같은 공칭비틀림강도를 갖는 단면을 설계하도록 제시하였으며 현행 ACI-99 설계기준까지 사용하고 있다.

$$T_n = 2 \frac{A_o A_t f_{yt}}{s} \cot \theta \quad (7)$$

여기서, A_o 는 해석에 의하여 계산하되, $A_o = 0.85 A_{oh}$ 로 보아도 좋다고 한다. θ 는 30°보다 작거나 60°보다 크게 취해서는 안된다. 철근콘크리트보에서는 45°로 보아도 좋다.

Mitchell & Collins¹⁴⁾는 트러스이론을 발전시켜 압축장 이론을 비틀림 해석에 적용하였으며, 피복두께가 극한상태에서 박리한다고 가정하였다.

Vecchio & Collins¹⁵⁾는 콘크리트의 인장강성을 고려한 수정압축장이론을 전단문제에 적용하였으며, Rahal & Collins¹⁶⁾는 수정압축장이론을 전단과 비틀림의 조합을 받는 보에 적용하였다.

본 논문의 연구목적은 콘크리트의 평균주인장응력이 이루는 콘크리트의 비틀림강도를 포함한 철근콘크리트보의 공칭비틀림강도를 구하는데 있다.

2. 수정압축장이론

압축장이론은 콘크리트의 균열 후 주인장응력은 무시한다. 그러나 수정압축장이론에서는 균열사이의 콘크리트의 인장응력을 고려한다.

Fig. 1는 균열이 발생된 RC보의 복부를 나타낸 것이며, Fig. 2은 복부철근의 인장력을 나타낸 것이다. 수정압축장이론에 의한 힘의 평형조건은 Fig. 1와 Fig. 2의 자유물체도로부터 얻을 수 있다.

Fig. 1에서 수직방향으로 힘의 평형을 생각하면 전단력을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V = [f_2 b_w d_v \cos \theta] \sin \theta + [f_1 b_w d_v \sin \theta] \cos \theta \quad (8)$$

여기서, f_2 : 복부의 주압축응력
 f_1 : 복부의 주인장응력
 b_w : 복부의 폭
 d_v : 유효깊이
 θ : 균열각

(8)식으로부터 콘크리트의 주압축응력 f_2 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_2 = \frac{v}{\sin \theta \cos \theta} - f_1 \quad (10)$$

여기서, v 는 전단응력이며 다음과 같다.

$$v = \frac{V}{b_w d_v} \quad (11)$$

식(8)의 f_2 는 Fig. 1 및 Fig. 2에 보인 방향으로 작용하는 압축응력이다. Fig. 2에서 수직방향에 대한 힘의 평형을 생각하면

$$A_v f_v = f_2 s b_w \sin^2 \theta - f_1 s b_w \cos^2 \theta \quad (12)$$

여기서, A_v : 스테럽의 단면적
 f_v : 스테럽의 인장응력
 s : 스테럽의 간격

(9)식의 f_2 와 (10)식의 v 를 (11)식에 대입하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$V = f_1 b_w d_v \cot \theta + \frac{A_v f_v d_v}{s} \cot \theta \quad (13)$$

위의 식에서 전단력 V 는 (12)식 우변의 제1항이 나타내는 콘크리트의 인장응력(f_1)이 전단저항에 기여하는 몫과 (12)식 우변의 제2항이 나타내는 횡방향철근의 인장력($A_v f_v$)이 전단저항에 기여하는 몫의 합계임을 나타내고 있다.

3. 철근 콘크리트 부재의 비틀림

Fig. 3는 비틀림철근으로 보강된 철근콘크리트보의 단면을 보인 것이다. 이 보가 균열비틀림모멘트를 받으면 Fig. 4에 보인 바와 같이 나선형 균열을 일으킨다.

Fig. 4을 참고하면, 이 부재의 비틀림 저항은 등가(等價)의 속 빈 관의 네 변의 전단력이 이루는 중심축에 대한 모멘트의 합으로 나타낼 수 있다. 예컨대, 관의 우측벽에 작용하는 전단력이 비틀림 저항에 기여하는 몫은 다음과 같다.

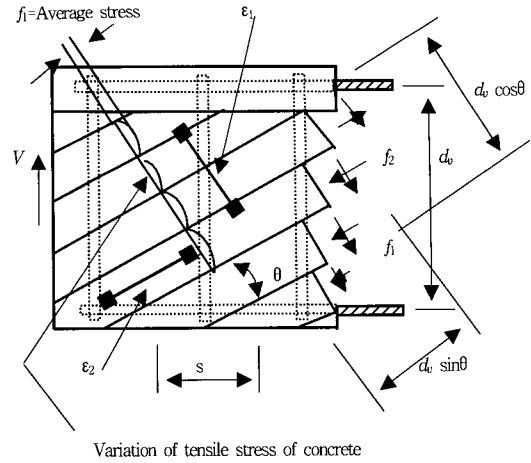


Fig. 1 Web of RC beam after crack

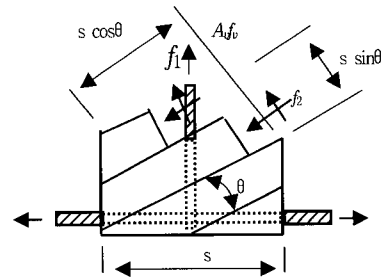


Fig. 2 Tensile force of stirrup

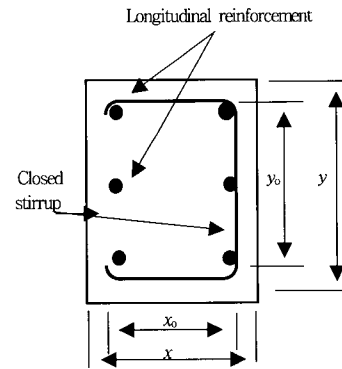


Fig. 3 Cross section of RC beam

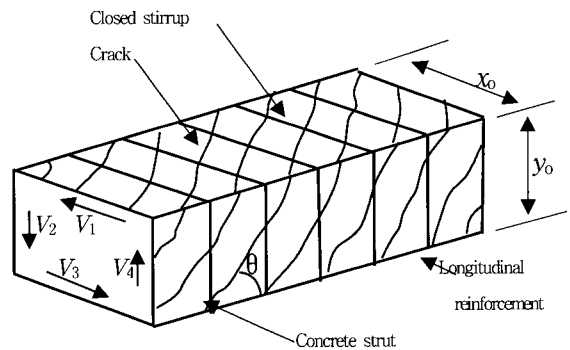


Fig. 4 Space truss model

$$T_4 = \frac{V_4 x_o}{2} \quad (14)$$

수직벽의 전단력 V_4 는 (12)식에서 복부의 폭 b_w 대신에 전단흐름두께 t_d 를, 복부의 유효깊이 d_b 대신에 y_o 를, 스테럽의 단면적 A_b 대신에 비틀림 철근의 단면적 A_t 를, 스테럽의 인장응력 f_b 대신에 횡방향 철근의 인장응력 f_{st} 를 대입하면 다음과 같은 식이 된다.

$$V_4 = f_1 t_d y_o \cot \theta + \frac{A_t f_{st} y_o}{s} \cot \theta \quad (15)$$

여기서, A_t : 페쇄스테럽의 단면적
 f_{st} : 페쇄스테럽의 인장응력
 y_o : 페쇄스테럽의 긴 변의 길이

(14)식을 (13)식에 대입하면 다음과 같다.

$$T_4 = \frac{f_1 t_d x_o y_o}{2} \cot \theta + \frac{A_t f_{st} x_o y_o}{2s} \cot \theta \quad (16)$$

각각의 수평 및 수직벽에 대하여 (15)식과 같은 식을 얻을 수 있으므로, 이들 네 번의 값을 합하면 다음과 같은 비틀림모멘트를 얻을 수 있다.

$$T = \sum_{i=1}^4 T_i = 2f_1 t_d x_o y_o \cot \theta + \frac{2A_t f_{st} x_o y_o}{s} \cot \theta \quad (17)$$

여기서, $x_o y_o$ 를 A_{oh} 라 놓으면 (16)식은 다음과 같이 된다.

$$T = 2f_1 t_d A_{oh} \cot \theta + \frac{2A_{oh} A_t f_{st}}{s} \cot \theta \quad (18)$$

1994년 오 등¹⁷⁾은 균열후 콘크리트의 인장강성을 고려한 새로운 모델로 비틀림해석을 수행하였다. (17)식에서 콘크리트의 평균주인장응력 f_1 , 전단흐름두께 t_d , 균열경사 각 θ 를 수치적으로 구하기 위해, 오 등이 개발한 전산프로그램 'TRSN'을 개정하여 사용하였다. 개정한 내용은 철근의 응력을 콘크리트 속의 평균응력으로 바꾼 것이다. 이를 간략히 소개하면 다음과 같다.

3.1 평형방정식

전단응력과 수직응력을 받는 2차원 콘크리트요소는 Fig. 5과 같은 막요소 (membrane element) 로 볼 수 있다. 작용한 응력 (f_ℓ, f_t, v) 과 철근($f_{s\ell}, f_{st}$) 과 콘크리트 (f_2, f_1) 의 내부 응력과의 평형방정식은 평균응력의 좌표변환을 이용하면 다음과 같은 세 개의 방정식을 얻는다¹⁸⁾.

$$f_\ell = f_2 \cos^2 \theta + f_1 \sin^2 \theta + \rho_\ell f_{s\ell} \quad (19)$$

$$f_t = f_2 \sin^2 \theta + f_1 \cos^2 \theta + \rho_t f_{st} \quad (20)$$

$$v = (-f_2 + f_1) \sin \theta \cos \theta \quad (21)$$

여기서, f_ℓ, f_t : ℓ, t 방향의 수직응력

ρ_ℓ, ρ_t : ℓ, t 방향의 철근비

v : 전단응력

$f_{s\ell}, f_{st}$: ℓ, t 방향의 철근의 인장응력

박벽관 이론에 의하면 전단흐름내의 전단응력과 비틀림 모멘트의 관계식을 다음과 같이 구할 수 있다¹⁹⁾.

$$v = \frac{T}{2A_o t_d} \quad (25)$$

3.2 적합방정식

Fig. 5과 같은 전단응력과 수직응력을 받는 2차원 콘크리트 막요소의 적합방정식은 변형률의 좌표변환을 이용하면 다음과 같은 세 개의 방정식을 얻는다¹⁸⁾.

$$\varepsilon_t = \varepsilon_2 \sin^2 \theta + \varepsilon_1 \cos^2 \theta \quad (26)$$

$$\varepsilon_\ell = \varepsilon_2 \cos^2 \theta + \varepsilon_1 \sin^2 \theta \quad (27)$$

여기서, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$: 1, 2 방향의 평균 주 변형률

$\varepsilon_\ell, \varepsilon_t$: ℓ, t 방향의 평균 수직변형률

γ : 평균 전단변형률

$$\gamma = 2(-\varepsilon_2 + \varepsilon_1) \sin \theta \cos \theta \quad (29)$$

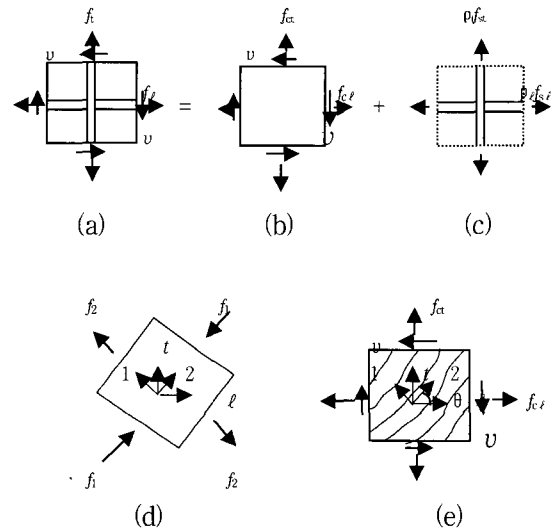


Fig. 5 Reinforced concrete membrane elements subjected to in-plane stresses:

(a) Reinforced concrete;

(b) Concrete;

(c) Reinforcement;

(d) Principal axes 2-1 for stresses on concret;

(e) Assumed crack direction

Bredt의 박판탄성론(薄板彈性論)을 적용하여 다음과 같은 네 개의 적합방정식을 얻을 수 있다²⁰⁾.

$$\phi = \frac{\rho_o}{2A_o} \gamma \quad (30)$$

$$\psi = \phi \sin 2\theta \quad (31)$$

$$t_d = \frac{\varepsilon_{2s}}{\psi} \quad (32)$$

$$\varepsilon_{2s} = 2\varepsilon_2 \quad (33)$$

여기서, ϕ : 단위길이 당 비틀각

ρ_o : 전단흐름의 중심선이 이루는 둘레

A_o : 전단흐름의 중심선으로 둘러싸인 면적

ψ : 콘크리트스트럿의 곡률

ε_{2s} : 콘크리트스트럿의 표면의 압축변형률

3.3 구성법칙

세 개의 평형 방정식 (18)~(20)과 세 개의 적합방정식 (22)~(24)는 평균 응력과 평균 변형률을 기초로 한 것이므로, 이 에 적용할 구성법칙 또한 평균응력과 평균변형률에 대한 것이어야 한다. 이에 대하여 다음과 같은 Belarbi & Hsu²¹⁾, Pang & Hsu²²⁾ 등이 제안한 식을 사용하였다.

콘크리트의 압축응력(Fig. 6참조)

$$f_2 = \zeta f_{ck} \left[2 \left(\frac{\varepsilon_2}{\zeta \varepsilon_o} \right) - \left(\frac{\varepsilon_2}{\zeta \varepsilon_o} \right)^2 \right] \quad \varepsilon_2 / \zeta \varepsilon_o \leq 1 \quad (36a)$$

$$f_2 = \zeta f_{ck} \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_2 / \zeta \varepsilon_o - 1}{2 / \zeta - 1} \right)^2 \right] \quad \varepsilon_2 / \zeta \varepsilon_o > 1 \quad (29b)$$

$$\zeta = \frac{0.9}{\sqrt{1 + 400\varepsilon_1}} \quad (30)$$

여기서, f_{ck} : 콘크리트 실린더의 압축강도

ε_o : 압축강도에 대한 콘크리트의 변형률(=0.002)

ζ : 연화계수

콘크리트의 인장응력(Fig. 7참조)

$$f_1 = E_c \varepsilon_1 \quad \varepsilon_1 \leq 0.00008 \quad (31a)$$

$$f_1 = f_{cr} \left(\frac{0.00008}{\varepsilon_1} \right)^{0.4} \quad \varepsilon_1 > 0.00008 \quad (31b)$$

여기서, E_c : 콘크리트의 탄성계수(=12,455 $\sqrt{f_{ck}}$ kgf/cm²)

f_{cr} : 콘크리트의 균열강도(=0.994 $\sqrt{f_{ck}}$ kgf/cm²)

철근의 인장응력 (Fig. 8참조)

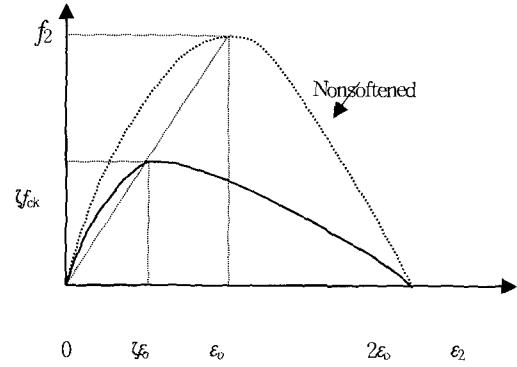


Fig. 6 Softened stress-strain curve of concrete in compression

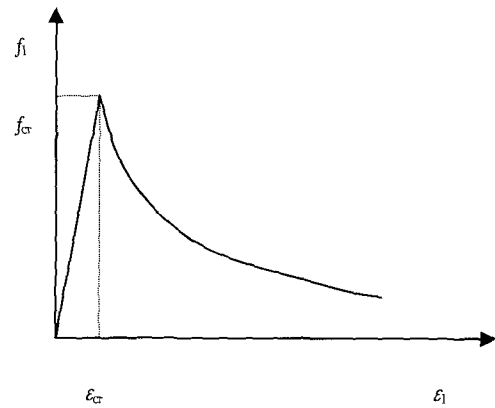


Fig. 7 Average stress-strain curve of concrete in tension

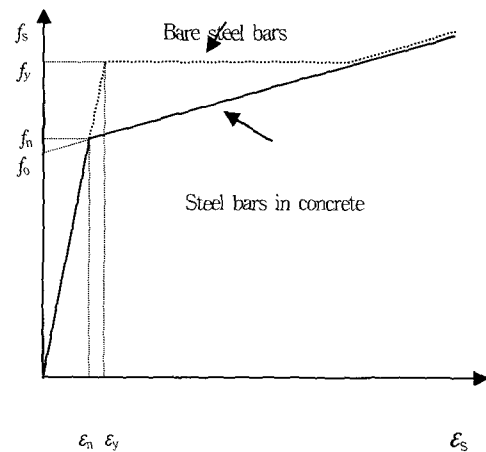


Fig. 8 Average stress-strain curve of mild steel bars in concrete using bilinear model

$$f_s = E_s \varepsilon_s \quad \varepsilon_s \leq \varepsilon_n \quad (34a) \text{ or } (33a)$$

$$f_s = f'_y = f_y \left[(0.91 - 2B) + (0.02 + 0.25B) \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_y} \right]$$

Table 1 Comparison of nominal torsional strengths

Beam	T _{exp} * kgf-m	ACI-89		ACI-99		Proposed model		Beam	T _{exp} * kgf-m	T _n kgf-m	T _{exp} T _n	T _n kgf-m	T _{exp} T _n	T _n kgf-m	T _{exp} T _n
		T _n kgf-m	T _{exp} T _n	T _n kgf-m	T _{exp} T _n	T _n kgf-m	T _{exp} T _n								
T0	21,080	18,158	1.161	22,297	0.945	21,591	0.976	B1	2,270	2,294	0.989	2,038	1.114	2,202	1.031
T1	13,190	11,962	1.103	13,125	1.005	12,989	1.015	B3	3,825	3,787	1.010	4,171	0.917	4,224	0.906
T2	13,390	11,962	1.119	13,125	1.020	12,989	1.031	B4	4,827	4,971	0.971	5,815	0.830	5,360	0.901
T4	13,190	11,962	1.103	13,125	1.005	12,989	1.015	B7	2,742	3,742	0.733	4,153	0.660	2,977	0.921
VS2	1,993	2,251	0.886	1,970	1.012	1,981	1.006	B9	3,042	2,319	1.312	2,046	1.487	2,634	1.155
VS3	2,915	3,036	0.960	2,998	0.972	2,810	1.037	B10	3,502	2,279	1.537	2,042	1.715	2,872	1.219
VS9	2,200	2,676	0.822	2,563	0.858	2,341	0.940	D1	2,281	2,264	1.008	2,017	1.131	2,229	1.023
VB3	4,735	4,758	0.995	4,845	0.977	4,718	1.004	D3	3,986	3,912	1.019	4,342	0.918	4,361	0.914
VB4	4,954	4,891	1.013	4,838	1.024	4,909	1.009	M1	3,099	2,409	1.286	2,152	1.440	2,609	1.188
VQ1	2,154	2,195	0.981	2,036	1.058	1,881	1.145	M2	4,136	3,081	1.343	3,101	1.334	3,599	1.149
VQ3	2,039	2,413	0.845	2,093	0.974	1,944	1.049	M3	4,470	3,554	1.258	3,866	1.156	4,159	1.075
VQ9	2,235	2,155	1.037	1,911	1.170	1,993	1.122	I2	3,675	3,366	1.092	3,225	1.140	3,541	1.038
VH1	2,178	2,177	1.001	2,094	1.040	1,888	1.154	I3	4,654	4,144	1.123	4,351	1.070	4,785	0.973
VU2	3,099	3,662	0.846	3,806	0.814	2,936	1.055	I4	5,922	4,951	1.196	5,508	1.075	5,868	1.009
VU4	2,650	2,155	1.230	1,857	1.427	2,083	1.272	I5	7,212	6,491	1.111	7,715	0.935	7,416	0.972
VM1	1,417	1,401	1.012	1,428	0.992	1,252	1.131	J1	2,189	2,065	1.060	2,058	1.063	2,037	1.075
VM2	3,998	3,744	1.068	3,584	1.115	3,572	1.119	G2	4,113	4,030	1.020	3,449	1.192	3,737	1.101
VM3	10,290	9,191	1.120	8,746	1.177	8,882	1.159	G3	5,058	5,022	1.007	4,777	1.059	4,934	1.025
VM4	28,480	29,972	0.950	28,280	1.007	28,566	0.997	G4	6,613	6,352	1.041	6,379	1.037	6,287	1.052
A2	2,304	1,787	1.289	1,872	1.231	1,974	1.167	G6	3,986	3,999	0.997	3,435	1.160	3,714	1.073
A3	2,834	2,273	1.247	2,680	1.057	2,893	0.980	G7	5,369	5,300	1.013	5,013	1.071	5,251	1.022
A4	3,514	2,884	1.218	3,723	0.944	3,650	0.963	N1	922	878	1.049	764	1.207	828	1.114
B2	2,120	1,842	1.151	1,664	1.274	1,808	1.172	N1a	922	875	1.054	764	1.207	823	1.120
B3	2,581	2,500	1.032	2,461	1.049	2,674	0.965	N2	1,475	1,373	1.074	1,370	1.076	1,376	1.072
PT4	7,143	4,798	1.489	4,749	1.504	5,350	1.335	N2a	1,348	1,409	0.957	1,424	0.947	1,364	0.988
2-1	2,085	1,730	1.205	1,681	1.241	2,241	0.931	N3	1,244	1,174	1.060	1,141	1.091	1,156	1.077
R-1	1,078	805	1.340	610	1.768	971	1.110	K1	1,567	1,480	1.059	1,194	1.312	1,450	1.081
								K2	2,419	2,258	1.072	2,070	1.169	2,370	1.021
Mean			1.085		1.112		1.057								
Cov			0.142		0.184		0.087								

*Texp : Torsional strength from test

$$\left[1 - \frac{2 - \alpha_2/45^\circ}{1,000\rho} \right] \quad \epsilon_s > \epsilon_n \quad (32b) \text{ or } (33b)$$

$$\epsilon_n = \epsilon_y(0.93 - 2B) \left(1 - \frac{2 - \alpha_2/45^\circ}{1,000\rho} \right) \quad (34)$$

$$B = \frac{1}{\rho} \left(\frac{f_{cr}}{f_y} \right)^{1.5} \quad (35)$$

여기서, E_s : 철근의 탄성계수

f_n : 콘크리트 속의 철근의 평균항복강도

f_s : 철근의 평균응력

f_y : 철근의 항복강도

f_y' : 콘크리트 속 철근의 평균항복후강도

α₂ : 외력에 의한 주압축응력과 종방향철근이 이루는 고정각(固定角) (순수전단의 경우 α₂ = 45°)

ε_n : 콘크리트 속 철근의 평균항복변형률

ε_y : 철근의 항복변형률

ρ : 철근비

3.4 비선형 연립방정식의 구성

(20)식과 (21)식으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$T = A_o t_d (f_1 - f_2) \sin 2\theta \quad (39)$$

(24)식~(28)식으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$p_o t_d (\epsilon_1 - \epsilon_2) \sin^2 2\theta - 4 A_o \epsilon_2 = 0 \quad (40)$$

모든 변수는 $\epsilon_2, \epsilon_1, \theta, t_d$ 를 알면 구해진다. 즉, $\epsilon_2, \epsilon_1, \theta, t_d$ 를 독립변수로 나머지 변수를 종속변수로 간주한다. 먼저 ϵ_2 를 선정하고 ϵ_1, θ, t_d 는 (18), (19), (37)식의 연립방정식을 만족시키는 해를 구하면 얻을 수 있다. 그 다음 다른 변수들은 $\epsilon_2, \epsilon_1, \theta, t_d$ 들로부터 순차적으로 구할 수 있다.

임의의 주압축변형률 ϵ_2 에 대한 비틀림모멘트는 (36)식으로부터 구할 수 있다.

따라서 주압축변형률 ϵ_2 를 점진적으로 증가시켜가며 그에 상응하는 비틀림모멘트를 구하면 전하중(全荷重)이력에 대한 해를 얻는다.

4. 공칭비틀림강도의 계산

공칭비틀림 강도는 횡방향 비틀림철근이 항복했을 때를 기준으로 하며 (17)식에서 A_{oh} 를 A_o 로 바꾸면, 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_n = 2f_1 t_d A_o \cot \theta + \frac{2A_o A_s f_{yt}}{s} \cot \theta \quad (41)$$

여기서 f_{yt} 는 콘크리트 속의 횡방향 비틀림철근의 평균 항복강도이다.

본 논문에서 제안한 모델의 타당성을 검증하기 위한 해석예제로서 참고문헌 20에서 인용한 보 55개를 선정하였다.

ACI 설계기준에 따른 공칭비틀림강도와 논문에서 제안한 모델에 의한 공칭비틀림강도를 실험자료에 의한 값과 각각 비교하였다. Table 1과 Fig. 9에 보인 바와 같이 ACI-89 설계기준에 의한 공칭비틀림강도는 실험값과의 비가 평균 1.085로서 실험값보다 8.5% 작고, 변동계수는 0.142이며, ACI-99 설계기준에 의한 공칭비틀림강도는 실험값과의 비가 평균 1.112로서 실험값보다 11.2% 작고, 변동계수는 0.184이다, 한편 본 논문이 제안한 모델에 의한 공칭비틀림강도는 실험값과의 비가 평균 1.057로서 실험값보다 5.7% 작고, 변동계수는 0.087이다.

따라서 본 논문이 제안한 모델에 의한 공칭비틀림강도가 가장 좋은 결과를 보여주고 있다.

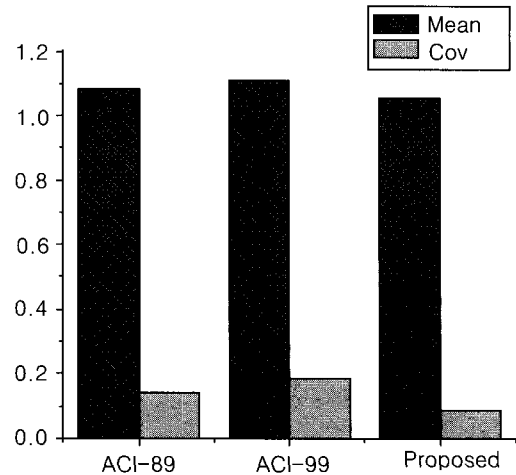


Fig. 9 Comparison of nominal torsional moment strengths

참고로 콘크리트의 비틀림강도에 기여하는 콘크리트의 평균주인장응력은 콘크리트의 인장강도의 25.4%, 전단흐름중심선으로 둘러싸인 면적 A_o 는 폐쇄스터럽 중심으로 둘러싸인 면적 A_{oh} 의 97.0%, 콘크리트 속의 횡방향 비틀림철근의 평균항복강도 f_{yt} 는 철근의 순항복강도 f_y 의 83.8%이었다.

본 논문이 제안한 모델에 의한 콘크리트의 비틀림강도는 공칭비틀림강도의 평균 7.7%이었으며, ACI-89 설계기준에 의한 경우는 평균 28.2%로 큰 차이를 보였다.

5. 결 론

본 연구에서는 비틀림하중을 받는 철근콘크리트부재의 공칭비틀림강도를 구하기 위해 콘크리트의 비틀림강도를 공칭비틀림강도에 포함시키고자 전단문제에 적용하고 있는 수정압축장이론의 콘크리트의 인장강성을 비틀림문제에 적용하였다. 본 논문이 제안한 모델에 의한 공칭비틀림강도의 타당성을 검증하기 위하여 참고문헌에서 발췌한 55개의 공시체에 대하여, ACI 설계기준이 채택하였던 공칭비틀림강도와 비교 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 비틀림균열 발생 후 콘크리트의 인장저항을 무시한 공칭비틀림강도보다 인장저항을 고려한 공칭비틀림강도가 실제에 더 가깝다고 할 수 있다.

2) 전단문제의 경우와 마찬가지로 공칭비틀림강도의 계산에 콘크리트의 비틀림강도를 고려하는 것이 바람직한 설계개념이라고 생각된다.

3) 종전의 ACI-89 설계기준의 콘크리트의 비틀림강도와 본 논문이 제안한 콘크리트의 비틀림강도는 큰 차이를 보이고 있다.

참고문헌

1. Rausch, E., "Design of Reinforced Concrete in Torsion," (Berechnung des Eisenbetons gegen Verdrehung). Ph. D. thesis. Technische Hochschule, Berlin, 1929, p.53 (in German). A second edition was published in 1938 and a third in 1952. The third edition has the title: "Drilling (Torsion), Schub and Scheren in Stahlbetonbau," Deutscher Ingenieur-Verlag Gmb H, Dusseldorf, p.168.
2. Anderson, P., "Experiments with concrete in Torsion," *Transactions, ASCE*, Vol. 100, 1935, pp.949~83. Also, *Proceedings, ASCE*, Vol. 60, May 1934, pp.641~52.
3. Cowan, H. J., "Elastic Theory for Torsional Strength of Rectangular Reinforced Concrete Beams," *Magazine of Concrete Research* (London), Vol.2, No.4, July 1950, pp.3~8.
4. Hsu, T. T. C., "Ultimate Torque of Reinforced Rectangular Beams," *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 94, ST. 2, Feb. 1968, pp.485~510.
5. ACI 318-71: "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-71)," American Concrete Institute, Detroit, 1971.
6. Lampert, P., and Thurlimann, B., "Torsion sver-suche an Stahlbetonbalken," (*Torsion Tests of Reinforced Concrete Beams*) Bericht Nr. 6506-2, June 1968; "Torsions-Biege-Versuch an Stahlbetonbalken," (*Torsion-Bending Tests on Reinforced Concrete Beams*) Bercht Nr. 6506-3, January 1969, Institut fur Baustatik, ETH, Zurich, Switzerland.
7. CEB-FIP, "Model Code for Concrete Structures," CEB-FIP International Recommendations, third edition, Comite Euro-International du Beton, (CEB), 1978.
8. Collins, M. P., and Mitchell, D., "Shear and Torsion Design of Prestressed and Non-Prestressed Concrete Beams," *Journal of the Prestressed Concrete Institute*, Vol. 25, No. 5, September-October, 1980, pp.32~100.
9. Robinson, J. R. and Demorieux, J. M., "Essais de Traction-Compression sur Modelis d'arne de Poutre en Béton Armé," Part I, June 1968; Part II, May 1972, Institut de Recherches Appliquées du Béton Armé (IRABA).
10. Vecchio, F., and Collins, M. P., "Stress-Strain Characteristics of Reinforced Concrete in Pure Shear," *IABSE Colloquim Advanced Mechanics of Reinforced Concrete*, Delft, 1981, Final Report, pp.211~225.
11. Hsu, T. T. C., and Mo, Y. L., "Softening of Concrete in Torsional Members - Theory and Tests," *ACI Journal*, No.82-25, May-June 1985, pp.290~303.
12. Hsu, T. T. C., and Pang, X. D., "Fixed Angle Softened Truss Model for Reinforced Concrete," *ACI Structural Journal*, No. 93-S18, March- April 1996, pp.197~207.
13. ACI 318-95: "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-95)," American Concrete Institute, Detroit, 1995.
14. Collins, Michael P., and Mitchell, D., "Diagonal Compression Field Theory - A Rational Model for Structural Concrete in Pure Torsion," *ACI Journal, Proceedings*, Vol.71, No. 8, Aug. 1974, pp.396~408.
15. Vecchio, Frank J. and Collins Michael P., "The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear," *ACI Structural Journal*, No. 83-22, Mar.-Apr., 1986, pp.219~231.
16. Rahal, K. N., and Coliins, M. P., "Analysis of Sections subjected to Combined Shear and Torsion-A theoretical Model," *ACI Structural Journal*, No. 92-S44, July-August 1995, pp.459~469.
17. 오병환, 박창규, "비틀림을 받는 프리스트레스트 콘크리트 부재의 새로운 비선형 해석 모델," 콘크리트학회 논문집, 제6권 2호, 1994, 4, pp.159~168.
18. Hsu, T. T. C., "Torward A Unified Nomenclature for Reinforced-Concrete Theory," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 112, No. 3, March, 1996, pp.275~283.
19. 신현묵, 변동균, 문제길, "철근 콘크리트," 동명사, 2001, p. 149.
20. Hsu, Thomas T. C., and Mo, Y. L., "Softening of Concrete in Torsional Members," Research Report No. ST-TH-001-83, Dept. of Civil Eng., Univ. of Houston, March, 1983.
21. Belarbi, A., and Hsu, T. T. C., "Constitutive Laws of Softened Concrete in Biaxial Tension-Compression," *ACI Structural Journal*, Vol. 92, No. 5, September-October 1995, pp.562~573.
22. Pang, X. B., and Hsu, T. T. C., "Behavior of Reinforced Concrete Membrane Elements in Shear," *ACI Structural Journal*, Vol.92, No. 6, November-December 1995, pp.665~679.

요 약

전단문제에서는 일부 설계기준(AASHTO 1994)에 이미 수정압축장이론이 도입되었다. 그리고 현행 콘크리트 설계기준에는 콘크리트의 전단강도가 철근의 전단강도와 합하여 공칭전단강도를 계산하고 있다. 그러나 최근에 개정된 콘크리트설계기준에는 콘크리트의 비틀림강도가 공칭비틀림강도 계산에서 누락되었다. 콘크리트의 인장응력은 비록 크기가 작으나 균열후에 균열사이의 콘크리트에 존재한다. 그러나 휨과 비틀림문제에서는 균열 후 콘크리트의 인장강성은 생략되고 있다.

역학적으로 콘크리트보의 비틀림거동은 전단거동과 매우 유사하다. 그러므로 균열 후 콘크리트의 비틀림강도를 철근콘크리트보의 공칭비틀림강도의 계산에 포함시켜야 한다. 본 논문에서는 콘크리트의 평균주인장응력이 이루는 콘크리트의 비틀림강도를 횡방향 비틀림철근의 비틀림강도와 함께 공칭비틀림강도를 구성함을 밝혔으며, 이의 타당성을 검증하기 위해 개정 전후의 ACI의 설계기준에 의한 공칭비틀림강도와 함께 실험값과 비교하였다. 그 결과 본 논문이 제안한 모델에 의한 공칭비틀림강도가 가장 좋은 결과를 보였다.

핵심용어 : 공칭비틀림강도, 수정압축장이론, 콘크리트의 비틀림강도, 콘크리트의 인장강성,
