안전한 설계를 위한 철근콘크리트 부재의 최소비틀림철근비

김강수¹⁾ · 이득행¹⁾ · 박민국¹⁾ · 이정윤²⁾ · 주현진^{1)*}

¹⁾서울시립대학교 건축학부 ²⁾성균관대학교 건축토목공학부

Minimum Torsional Reinforcement Ratio of Reinforced Concrete Members for Safe Design

KangSu Kim,¹⁾ DeuckHang Lee,¹⁾ Min-Kook Park,¹⁾ Jung-Yoon Lee,²⁾ and HyunJin Ju^{1)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

²⁾Dept. of Architectural Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

ABSTRACT Current design codes regulate the minimum torsional reinforcement requirement for reinforced concrete members to prevent their brittle failure. The minimum torsional reinforcement ratio specified in the current national code and ACI318-11, however, have problems in the minimum longitudinal reinforcement ratio for torsion, the equilibrium condition in space truss model, and a marginal strength, etc. Thus, in order to overcome such shortcomings, this study presents a rational equation for minimum torsional reinforcement ratio that can provide a sufficient margin of safety in design. The minimum torsional reinforcement ratio proposed in this study was compared to the test results available in literature, and it was confirmed that it gave a proper margin of safety for all specimens studied in this paper.

Keywords : minimum torsional reinforcement, reserved strength, reinforced concrete, torsional cracking strength

1. 서 론

콘크리트공학기술의 발전과 함께 콘크리트의 재료성능이 향상되면서 구조부재들은 더욱 세장화되고 있으며, 최근 비정형적 형상을 갖는 복잡한 형태의 구조물들이 다수 설계 및 건설되고 있다. 부재가 세장화되고 비정형화 될 수록 비틀림 하중은 증가하는 반면에 저항강도는 낮아지므로 이러한 경우에는 비틀림에 대한 설계가 더욱 중요하다.¹⁾ 현행 설계기준들²⁻⁶⁾에서는 비틀림모멘트를 받는 철근콘크리트(reinforced concrete, RC) 부재의 취성적인 파괴를 방지하기 위하여 최소비틀림철근비를 규정하고 있다.⁷⁻¹⁰⁾ 또한, 균열폭이 과대하게 커지는 것을 막고, 비틀림균열 이후에 충분한 여유강도를 가짐과 동시에 최소한의 연성을 확보할 수 있도록 하는 것에 그 목적이 있다.¹⁰⁾

현행 국내 콘크리트구조기준²⁾ 및 ACI 318-11³⁾에서는 RC 부재의 최소비틀림철근량을 Table 1과 같이 제시하고 있다. 횡방향 최소비틀림철근량은 폐쇄스터럽에 한하여 전단철근과 합한 횡철근량이 규정된 최소전단철근량 이

상이 되도록 하고 있으며, 종방향 최소비틀림철근량은 Hsu¹¹⁾에 의해 수행된 실험 결과에 근거하여 종방향과 횡방향 비틀림철근비의 합이 부재체적비의 1.0% 이상이 되도록 규정하고 있다. 이러한 국내 콘크리트구조기준²⁾ 및 ACI 318-11³⁾은 몇 가지 중요한 문제점을 내포하고 있다. 첫째, 종방향 최소비틀림철근비를 산정할 때, 체적비 1.0%를 일괄적으로 적용하고 있기 때문에 횡방향 폐쇄스터럽이 길이방향철근비에 비하여 많이 배치되었거나 콘크리트 압축강도가 낮은 경우에는 음수의 길이방향철근량을 요구하게 되는 경우가 있으며, 이러한 경우에 실무 설계자들에게 불필요한 혼란을 야기할 수 있다(식 (2)참고). 둘째, 종방향과 횡방향 최소비틀림철근량은 공간트러스모델¹²⁻¹⁴⁾의 역학적 힘의 평형조건을 만족하지 못한다. ACI 318-89¹⁵⁾에서 ACI 318-95¹⁶⁾로 개정되는 과정에서 비틀림 설계는 경사힘 이론(skew bending theory)¹¹⁾에 근거한 설계법에서 박벽튜브 이론(thin-walled tube theory)¹⁷⁾에 근거한 45도 공간트러스모델(space truss analogy)¹²⁾로 설계법이 변경되었으며, 현행기준식은 종방향 및 횡방향 철근과 45도 기울기를 같은 콘크리트 압축대 상하간의 평형방정식으로부터 유도되었다. 따라서, 횡방향 철근과 종방향 철근은 균열각(θ)의 함수로 평형관계를 갖게 되기 때문에 실험적으로 결정된 체적비 1.0%를 만족

*Corresponding author E-mail : fis00z@uos.ac.kr

Received July 5, 2013, Revised August 29, 2013,

Accepted August 31, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

Table 1 Minimum shear reinforcement ratios in Codes

Sources	Minimum torsional reinforcement ratio
ACI318-11 ²⁾ and KCI-12 ³⁾	$(A_v + 2A_t)_{\min} = 0.062 \sqrt{f'_c} \frac{b_w s}{f_{yt}} \quad (1)$
	$\geq \frac{0.35 b_w s}{f_{yt}}$
	$A_{t,\min} = \frac{0.42 \sqrt{f'_c} A_{cp}}{f_{yt}} - \frac{A_t}{s} p_h \frac{f_{yt}}{f_{yt}} \quad (2)$
CSA-04 ⁴⁾	$2A_{t,\min} = 0.06 \sqrt{f'_c} \frac{b_w s}{f_{yt}} \quad (3)$
MC 2010 ⁵⁾	$2A_{t,\min} = 0.08 \sqrt{f'_c} \frac{b_w s}{f_{yt}} \quad (4)$
EC2 ^{6)*}	$2A_{t,\min} = 0.08 \sqrt{f'_c} \frac{b_w s}{f_{yt}} \sin \alpha \quad (5)$

* α : the angle between shear reinforcement and the longitudinal axis ($45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$)

하도록 제시된 현행기준의 최소비틀림철근량 산정식은 공간트러스모델의 역학적 힘의 평형관계를 만족시키지 못한다. 셋째, 균열 이후의 적절한 여유강도확보가 어렵다. Chiu et al.⁹⁾에 의하면 종방향 철근지수에 대한 횡방향 철근지수의 비($\rho_t f_{yt} / \rho_l f_{tl}$)와 양방향 철근비를 합한 전체 철근비($\rho_{tot} = \rho_t + \rho_l$)가 균열 이후의 여유강도에 영향을 미치는 주요요인이라고 보고하였다. 그러나, 앞서 설명한 것과 같이 현행기준식은 1.0% 체적비에 근거하고 있으므로 비틀림균열발생 이후에 여유강도가 적절하게 확보되었다고 보기에는 무리가 있다.

이 연구에서는 앞서 언급된 현행기준의 문제점을 극복할 수 있는 최소비틀림철근량 산정식을 제안하고자 하였으며, 비틀림균열강도 산정식을 수정하고 강도여유율계수(λ)를 도입하여 보다 안전측의 비틀림설계를 유도하고자 하였다. 또한, 제안모델에서는 종방향 철근과 횡방향 철근의 상대적인 비율의 영향이 적절히 고려될 수 있도록 하였다.

2. 기존연구

Table 1에 보이는 현행 ACI318-11³⁾의 최소비틀림철근비 산정식은 2005년에 개정된 것이며, 횡방향 최소비틀림철근을 콘크리트 강도의 함수로 제시하고 있다. 국내 콘크리트구조기준²⁾은 이와 동일한 기준을 제시하고 있다. CSA-04,⁴⁾ MC 2010,⁵⁾ EC2⁶⁾ 등의 각국 기준은 최소 횡방향 비틀림철근량을 콘크리트 압축강도의 함수로서 제시하고 있으며, ACI318³⁾ 및 국내 기준²⁾과는 다르게 종방향 철근량에 대해서는 어떠한 규정도 제시하고 있지 않다. Fig. 1은 각국의 설계기준식들의 최소 횡방향비틀림철근비를 비교하여 나타낸 것이다. 여기서, 횡방향 철근비(ρ_t)는 $A_t p_h / (A_{cp} s)$ 로 산정하였으며, A_t 는 폐쇄스터립한 다리의 단면적(mm^2), p_h 는 가장 바깥의 횡방향 폐쇄

Fig. 1 Comparison of minimum torsional transverse reinforcement in current design codes

스터립 중심선의 둘레(mm), A_{cp} 는 콘크리트 단면에서 외부 둘레로 둘러싸인 면적(mm^2), s 는 스테립의 간격이다. ACI 318-11,³⁾ 국내 설계기준(KCI-12)²⁾ 및 CSA-04⁴⁾는 유사한 최소비틀림철근비를 제시하고 있으며, MC 2010⁵⁾과 EC2⁶⁾ 등 유럽기준들은 이들에 비하여 약 1.3배정도 큰 횡방향철근량을 요구하고 있다. Fig. 1에는 RC 부재의 공칭 비틀림 강도(T_n)가 비틀림 균열강도(T_{cr}) 이상이 되도록 하는 비틀림철근비의 최소값(즉, $T_n = T_{cr}$)을 나타내었다. 이때, 공칭 비틀림 강도(T_n)와 비틀림 균열 강도(T_{cr})는 현행 기준²⁾에서 제시하고 있는 것과 같이

$$T_n = 2 \frac{A_0 A_t f_{yt}}{s} \cot \theta \quad (6)$$

$$T_{cr} = 0.33 \sqrt{f'_c} \frac{A_{pc}^2}{p_{cp}} \quad (7)$$

으로 각각 산정하였으며, 여기서, 압축대의 경사각(θ)은 45도로 가정하였고, A_0 는 전단흐름에 의해 단혀진 단면적(mm^2), f_{yt} 는 횡방향 철근의 항복강도(MPa), f'_c 는 콘크리트의 압축강도(MPa), p_{cp} 는 콘크리트 단면의 외부 둘레 길이(mm)이다. $T_n = T_{cr}$ 을 만족하기 위한 비틀림 철근량은 현행 설계기준식들보다 크게 나타났으며, 이는 현행 기준식들이 비틀림균열 이후에 충분한 여유강도를 확보하지 못할 가능성이 크다는 것을 의미한다. Bernardo and Lopes¹⁰⁾의 연구에서도 현행설계기준들의 최소비틀림철근량이 비안전측으로 산정될 수 있다고 지적하였다.

Ali and White⁷⁾는 ACI 318¹⁰⁾의 최소비틀림 철근비 규정을 적용할 때 요구되는 종방향 철근량이 음수가 될 수 있다는 점과 공간트러스모델의 평형조건이 만족되지 않는다는 점을 지적한 바 있으며, 비틀림 강도(T_n)가 측정된 비틀림균열강도(T_{cr})보다 20% 큰 여유 강도를 가질 수 있도록 최소비틀림철근량 산정식을 제안하였다. 다만,

이들은 비틀림과 전단력에 의하여 발생하는 전단응력의 누적영향(또는 조합작용)을 고려하여⁷⁾ 최종적으로는 강도여유율계수(λ) 1.0을 사용하였으며, 종방향 및 횡방향 최소비틀림철근량을 각각

$$A_{t,min} = \frac{1}{6} \frac{\sqrt{f'_c}}{f_{yt}} \frac{A_{cp}^2}{A_0} \cot \theta \quad (8)$$

$$A_{t,min} = \frac{s A_{t,min}}{p_h \cot^2 \theta} \frac{f_{yt}}{f_y} \quad (9)$$

로 제안하였다. 여기서, f_{yt} 은 종방향철근의 항복강도이다.

Koutchoukali and Belarbi⁸⁾도 Ghoneim and MacGregor¹⁸⁾의 연구 결과를 반영하여 식 (7)보다 약 40% 정도 큰 비틀림균열강도식을 사용하여 강도여유율계수(λ) 1.2를 제시하였다. 이들은 최소비틀림철근량을 횡방향과 종방향에 대하여 각각

$$A_{t,min} = 0.28 \frac{\sqrt{f'_c}}{f_{yt}} \frac{A_{cp}^2}{A_0 p_{cp}} s \quad (10)$$

$$A_{t,min} = 0.28 \frac{\sqrt{f'_c}}{f_{yt}} \frac{p_h}{p_{cp}} \frac{A_{cp}^2}{A_0} \quad (11)$$

로 제안하였다. 참고로 이들이 제안한 최소비틀림철근량은 결과적으로 Ali and White⁷⁾가 전단응력의 누적영향을 고려하기 전과 거의 유사하다.

3. 최소비틀림철근비의 제안

3.1 비틀림 균열 강도

선행연구^{7,8)}를 바탕으로 RC 부재가 비틀림 하중을 받을 때, 비틀림균열 이후 최대 비틀림강도(T_n)가 비틀림균열강도(T_{cr})보다 크도록 최소비틀림철근량을 정하되 적절한 강도여유율(λ)을 확보하는 것이 합리적일 것이다. 즉, 이 연구에서도

$$T_n \geq \lambda T_{cr} \quad (12)$$

을 만족할 수 있는 최소비틀림철근량을 결정하고자 한다. 여기서, 강도여유율계수(λ)는 기존 문헌^{8,9,11,19-21)}에서 수집한 103개의 비틀림 실험체를 바탕으로 비틀림균열 이후의 충분한 여유 강도를 확보할 수 있도록 결정하고자 한다. 수집된 103개 실험체에 대한 주요특성은 Fig. 2에 나타난 바와 같다.

Ali and White⁷⁾는 ACI318-11³⁾에서 제시하고 있는 공칭 비틀림강도(T_n) 산정식은 비교적 정확하고 안전측의 결

과를 제공하는 것으로 보고하였다. 또한, Koutchoukali and Belarbi⁸⁾ 및 Ghoneim and MacGregor¹⁸⁾에 따르면 ACI318 기준^{3,16,22)}에서 제시하는 비틀림균열강도(T_{cr}) 산정식은 실제 부재의 비틀림 강도를 30%에서 40% 가량 안전측으로 평가하는 것으로 나타났다. 공칭비틀림강도(T_n)가 안전측으로 평가되면 더 많은 최소비틀림철근량이 필요하게 되므로 비틀림에 대한 안전율이 높아질 것이다. 그러나 비틀림균열강도(T_{cr})를 안전측으로 사용하게 되면, 식 (12)를 통해 산정되는 최소비틀림철근량이 실제 필요한 철근량보다 작게 산정될 수 있다. Fig. 3에 나타난 바와 같이, 이 연구에서 수집된 실험체들의 비틀림균열강도($T_{cr,test}$)를 ACI318에서 제시하고 있는 비틀림균열강도 평가식(식 7)과 비교하여 평가해 본 결과, 평가식에 비하여 실험값이 약 1.5배 큰 비틀림균열강도를 나타내었다. 따라서, 이 연구에서는 비틀림 균열 강도(T_{cr})를

$$T_{cr} = 0.5 \sqrt{f'_c} \frac{A_{cp}^2}{p_{cp}} \quad (13)$$

으로 수정하여 사용하였다. Fig. 3에 보이는 바와 같이 식 (13)에 의한 비틀림 균열강도가 고강도 콘크리트로 제작된 RC부재 ($f'_c \geq 60$ MPa)의 비틀림균열강도를 다소 과대평가하는 경향이 있지만, 이를 통하여 산정된 최소비

Fig. 2 Distribution of primary parameters of torsional specimens collected from literature (103 tests)

Fig. 3 Evaluation of torsional cracking strengths

(a) Normalized torsional cracking strength-Aspect ratio relationships⁴⁾

(b) Comparison of torsional strengths of solid and hollow beams¹⁷⁾

Fig. 4 Comparison of solid and hollow sections

틀림철근비는 허용가능한 안전측의 결과를 제시할 것이다. 또한, Fig. 4(a)에 나타낸 것과 같이, 속빈 단면이나 단면 형상비(y/x)가 큰 경우에는 비틀림균열강도(T_{cr})가 다소 감소하는 경향이 있는 반면, Fig. 4(b)에 나타낸 것과 같이, 일반적인 보강상세를 갖는 RC 부재(저보강된)에서는 속빈 단면과 속찬 단면 모두 유사한 극한비틀림강도(T_u)를 나타내며 ACI 기준³⁾과 잘 일치하는 경향을 보인다. 따라서, 극한비틀림강도(T_u)에 대해서는 식 (6)을, 그리고 균열강도에 대해서는 식 (13)을 이용하여 최소비틀림철근량을 산정함으로써 더 높은 안전율을 확보할 수 있다. 또한, 식 (12)에서 보이는 강도여유계수(λ)를 적절하게 결정하면, 속빈 단면을 갖는 부재, 단면 형상비가 큰 부재 및 고강도 콘크리트로 이루어진 부재 등 어떠한 경우에 대해서도 제안모델은 안전측의 최소비틀림철근비를 제공할 수 있을 것이다.

3.2 최소비틀림철근비 산정식의 제안

앞서 3.1에서 설명된 배경을 바탕으로 식 (6)과 (13)을 식 (12)에 대입하면 최소 횡방향 최소비틀림철근량($A_{t,min}$)은

$$A_{t,min} = \lambda \frac{1}{4} \frac{\sqrt{f_c'}}{f_{yt}} \frac{A_{cp}^2}{A_0} \frac{s}{p_{cp}} \tan \theta \quad (14)$$

으로 유도할 수 있다. 또한, 힘의 평형조건에 의하여 종방향 철근량과 횡방향 철근량의 관계를

$$A_t = \left(\frac{A_t}{s} \right) p_h \left(\frac{f_{yt}}{f_{yl}} \right) \cot^2 \theta \quad (15)$$

으로 결정할 수 있다.¹⁴⁾ 따라서, 식 (15)의 A_t 에 식 (14)를 대입하면, 최소 종방향 비틀림철근비($A_{t,min}$)는

$$A_{t,min} = \lambda \frac{1}{4} \frac{\sqrt{f_c'}}{f_{yl}} \frac{A_{cp}^2}{A_0} \frac{p_h}{p_{cp}} \cot \theta \quad (16)$$

으로 유도할 수 있다. 횡방향과 종방향의 최소비틀림철근량을 각각 (A_{cs}/p_h)와 A_{cp} 로 나누어 철근비(ρ)로 나타내면 각각

$$\rho_{t,min} = \lambda \frac{1}{4} \frac{\sqrt{f_c'}}{f_{yt}} \frac{A_{cp}}{A_0} \frac{p_h}{p_{cp}} \tan \theta \quad (17)$$

$$\rho_{l,min} = \lambda \frac{1}{4} \frac{\sqrt{f_c'}}{f_{yl}} \frac{A_{cp}}{A_0} \frac{p_h}{p_{cp}} \cot \theta \quad (18)$$

으로 나타낼 수 있다. 또한, 양방향의 최소 철근비를 더하여 전체 최소철근비(ρ_{tot})로 표현하면

$$\rho_{tot,min} = \lambda \frac{\sqrt{f_c'}}{4} \frac{A_{cp}}{A_0} \frac{p_h}{p_{cp}} \left(\frac{f_{yt} \cot \theta + f_{yl} \tan \theta}{f_{yt} f_{yl}} \right) \quad (19)$$

이 된다. 여기서, $\tan \theta$ 는 공간트러스모델의 힘의 평형에 의하여

$$\tan \theta = \sqrt{\frac{\rho_l f_{yt}}{\rho_t f_{yl}}} \quad (20)$$

의 관계를 갖는다.

앞서 언급된 바와 같이 적절한 강도여유계수(λ)를 결정하기 위하여 Fig. 2에 나타낸 103개의 실험체들을 이용하였다. 각 실험체들의 비틀림강도(T_u)를 식 (13)으로 산정된 비틀림균열강도($T_{cr,(Eq.13)}$)로 나눈 값을 강도안전율($\chi = T_u / T_{cr,(Eq.13)}$)로 정의하여 실험체들이 충분한 여유강도를 확보하는지를 조사하였다. 여기서, 강도안전율(χ)은 기준에서 제시하는 비틀림에 대한 강도감소계수(ϕ)를 적용하여 $\phi T_u / T_{cr} > 1.0$ 일 때 충분한 여유강도를 확보하는 것으로 간주하였다. 즉, 현행 국내설계기준²⁾ 및 ACI318-11³⁾에 따르면, 비틀림에 대한 강도감소계수는 0.75이므로, 이를 적용하면

$$T_u > \frac{T_{cr}}{0.75} \approx 1.35 T_{cr} \quad (21)$$

와 같이 여유강도 약 35%를 확보할 수 있도록 최소비틀림철근비를 결정하고자 한다.

Fig. 2에 나타난 103개의 실험체들을 대상으로 식 (21)의 만족여부를 검토한 결과, Fig. 5에 보이는 바와 같이 총 28개 실험체가 여유강도 35%를 확보하지 못하였다. 최소비틀림철근비는 이와 같이 충분한 여유강도를 확보하지 못한 28개의 실험체에 배치된 비틀림철근량보다 더 많은 철근이 배치되도록 결정되어야 한다. 이러한 실험체들이 적합한 강도여유율을 갖을 수 있도록 여러 값의 강도여유계수(λ)를 적용해본 결과 가장 적절한 강도여유계수(λ)는 1.35인 것으로 나타났다. 따라서, 이를 식 (19)에 대입하여 정리하면, 최소비틀림철근비(ρ_{tot})는

$$\rho_{tot, \min} = 0.34 \sqrt{f'_c} \frac{A_{cp}}{A_0} \frac{p_h}{p_{cp}} \left(\frac{f_{yt} \cot \theta + f_{yl} \tan \theta}{f_{yt} f_{yl}} \right) \quad (22)$$

이 된다.

Fig. 6은 식 (22)에 의하여 산정한 결과를 나타낸 것이다. 제안된 최소비틀림철근비를 경계로 35% 이상의 강도

여유를 가진 실험체와 그렇지 않은 실험체가 나뉘는 것을 볼 수 있다. 즉, 제안된 최소비틀림철근비 이상을 가진 모든 실험체에서는 35% 이상의 충분한 강도여유율을 확보한 것이다. 또한, 제안식 (22)는 콘크리트 압축강도(f'_c)의 영향 뿐만 아니라 종방향 철근지수에 대한 횡방향 철근지수의 비($\rho_t f_{yt} / \rho_l f_{tl}$)를 고려하기 때문에(즉, 식 (20)을 사용하여 압축경사각의 경사각(θ)을 결정) $\theta = 45^\circ$ 로 고정하여 종방향과 횡방향의 철근비를 동일하게 가정하는 것보다 훨씬 합리적으로 안전측의 최소비틀림철근비를 산정할 수 있다.

식 (22)에 의해 산정된 최소비틀림철근비는 Fig. 7(a)와 같이 양방향 철근비가 동일한 경우($\rho_t f_{yt} / \rho_l f_{tl} = 1$), 가장 적은 최소비틀림철근량을 요구하게 되며, 이 경우에 가장 효율적으로 균열 이후 여유강도를 확보할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 제안모델은 Fig. 7(b)에 나타난 바와 같이 콘크리트 압축강도(f'_c)가 커짐에 따라 더 큰 최소비틀림철근량을 요구한다. 식 (22)에 의하여 산정된 최소비틀림철근비는 양방향 철근비의 총합이기 때문에 한 방향의 철근비가 결정되면, 다른 방향의 최소비틀림철근비는 별도의 규정이 없이도 전체요구량에서 공제하여 쉽게 계산될 수 있다.

Fig. 5 Reserved strength ratios of specimens collected from literature

Fig. 6 Proposed minimum torsional reinforcement ratio with $\lambda=1.35$ based on experimental results

(a) Total torsional reinforcement ratio versus reinforcement index ($\rho_t f_{yt} / \rho_l f_{tl}$)

(b) Total torsional reinforcement ratio versus compressive strength of concrete

Fig. 7 Proposed minimum torsional reinforcement ratio

3.3 기존 최소비틀림철근비와의 비교

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 현행 기준식들³⁻⁶⁾은 모두 $T_n = T_{cr}$ 이 되기 위한 철근비보다 낮은 최소비틀림철근비를 요구하고 있다. 반면에, 앞서 2장에서 소개한 기존 연구자들의 제안식들^{7,8)}은 모두 $T_n > \lambda T_{cr}$ 을 만족시킬 수 있도록 유도되었으며, λ 를 1.0 이상으로 사용하기 때문에 현행 설계기준식들보다 많은 양의 최소비틀림철근을 제시하고 있다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 최소비틀림철근비에 대한 Ali and White⁷⁾와 Koutchoukali and Belarbi⁸⁾의 제안식은 강도 여유율 35%를 확보하지 못한(즉, 충분한 강도여유율을 확보하지 못한) 29개의 실험체 중 각각 22

개와 7개의 실험체에 대해서 충분한 비틀림철근이 제공된 것으로 평가하였다. 즉, 이들의 제안식들이 충분히 안전측의 최소비틀림철근량을 제공하지 못하는 것으로 판단할 수 있다. 또한, Table 1에 나타난 기준식들²⁻⁶⁾은 이 두 가지 연구에서 제시된 제안식보다 적은 최소비틀림철근비를 규정하고 있기 때문에 별도의 분석 없이도 35% 이상의 강도 여유율을 확보할 수 있는 최소비틀림철근량을 제시하지 못하고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9에는 Ali and White⁷⁾와 Koutchoukali and Belarbi⁸⁾의 최소비틀림철근비를 이 연구에서 제안한 최소비틀림철근비와 비교하여 나타내었다. 제안모델의 최소비틀림철근비가 가장 큰 값을 보여주었으며, Ali and White⁷⁾의 제안식은 Fig. 1에서 $T_n = T_{cr}$ 인 경우에서 유도된 비틀림철근비와 동일한 값을 제공하였다. Koutchoukali and Belarbi⁸⁾의 제안식은 θ 를 45도로 가정하여 유도하였기 때문에 $\rho_t f_{yt} / \rho_l f_{yl}$ 의 영향을 고려하지 못하고 콘크리트 압축강도(f'_c)의 함수로 표현되며, Ali and White⁷⁾와 식 (12)의 중간정도의 철근비를 제공하였다. 또한, Fig. 9에는 ACI 318-11³⁾에서 제시하는 최소비틀림철근비의 근거가 되는 체적비 1.0%를 비교의 목적으로 함께 나타내었다. 이를 만족시키는 전체비틀림철근비(ρ_{tot})는 낮은 콘크리트 압축강도를 갖는 부재에서는 최소비틀림철근비를 보수적으로 평가할 수 있으며, 고강도 콘크리트 부재일수록 비안전측의 결과를 제공하는 것으로 나타났다. ACI318³⁾에서는 콘크리트 압축강도(f'_c)의 증가에 따라 최소비틀림철근량이 증가하도록 제시되어 있으나, 횡방향철근량이 큰 경우에 종방향 최소철근량이 줄어들고 결국 전체 철근비(ρ_{tot})는 체적비 1.0%를 근거로 산정되므로 압축강도(f'_c)의 영향을 적절히 반영하지 못하는 것이다.

4. 제안모델의 검증

Fig. 2에 나타난 103개의 실험체는 제안식 (22)를 결정하는데에 직접 사용되었기 때문에 이와는 별도로 Bernardo and Lopes¹⁰⁾에 의해 수행된 중공단면 콘크리트 보의 비틀림 실험 결과를 이용하여 이 연구에서 제안한 최소비틀림철근비 산정식을 검증하였다. 검증실험체들의 상세는 Table 2에 나타난 바와 같으며, 총 16개의 실험체 중 과보강된 7개의 실험체들은 압축 스트럿의 압괴와 함께 취성적으로 파괴되었기 때문에 이 실험체들은 검증에서 제외되었다. 나머지 9개의 실험체 중 3개의 실험체는 충분한 비틀림 보강근이 배치되지 않아 취성적으로 파괴되었다. Bernardo and Lopes¹⁰⁾의 연구 결과에 의하면, 대다수의 기준에서 제시하고 있는 최소비틀림철근비 규정은 실험체들의 적절한 연성거동확보에 적합하지 않았으며, ACI 318-95¹⁶⁾기준만이 가장 적합한 최소비틀림철근 규정을 제시하고 있는 것으로 보고되었다.

Fig. 10은 ACI318-11³⁾과 제안식 (22)로 산정한 최소비틀림철근비를 대상 실험체들과 비교하여 나타낸 것이다.

(a) Ali and White's equation

(b) Koutchoukali and Belarbi's equation

Fig. 8 Minimum torsional reinforcement ratios proposed other researchers

Fig. 9 Comparison of minimum torsional reinforcement ratios by researchers

Table 2 Specimens for verification of models¹⁰⁾

Beams	f_{ck} (MPa)	t (mm)	x_0 (mm)	y_0 (mm)	ρ_l (%)	ρ_t (%)	s (mm)
A-48.4-0.37 ⁽¹⁾	48.4	98	537	547	0.18	0.19	90
A-47.3-0.76	47.3	107	538	531	0.39	0.37	80
A-46.2-1.00	46.2	1109	540	535	0.50	0.49	95
A-54.8-1.31	54.8	104	520	525	0.66	0.65	70
A-53.1-1.68 ⁽²⁾	53.1	104	528	528	0.85	0.83	80
B-75.6-0.30 ⁽¹⁾	75.6	101	539	544	0.16	0.14	110
B-69.8-0.80	69.8	108	533	534	0.41	0.40	75
B-77.8-1.33 ⁽²⁾	77.8	109	535	537	0.66	0.67	70
B-79.8-1.78 ⁽²⁾	79.8	112	523	536	0.89	0.89	75
B-76.4-2.20 ⁽²⁾	76.4	116	518	518	1.12	1.09	60
C-91.7-0.37 ⁽¹⁾	91.7	97	540	549	0.18	0.19	90
C-94.8-0.76	94.8	100	532	533	0.39	0.37	80
C-91.6-1.29	91.6	103	545	540	0.66	0.63	70
C-91.4-1.71 ⁽²⁾	91.4	103	546	545	0.85	0.86	80
C-96.7-2.07 ⁽²⁾	96.7	104	540	543	1.02	1.05	65
C-87.5-2.68 ⁽²⁾	87.5	104	533	529	1.34	1.34	50

f_{yt}, f_{yt} : 686 MPa, B : 600 mm, H : 600 mm

⁽¹⁾ Brittle failure due to insufficient reinforcement

⁽²⁾ Brittle failure by crushing of the concrete struts due to over-reinforcement

Fig. 10 Evaluation of proposed model and ACI318-11

다만, ACI318-11에 의한 최소비틀림철근비는 종방향과 횡방향 철근비(ρ_l, ρ_t)를 각각 산정한 후 더하여 전체 최소비틀림철근비(ρ_{tot})를 산정한 것이다. ACI318-11³⁾은 Bernardo and Lopes¹⁰⁾의 연구에서 보고된 바와 같이, 상당히 정확하게 최소비틀림철근비를 제시하고 있음을 알 수 있다. 그러나 설계기준에서 제시하고 있는 안전율을 감안하면, Fig. 10의 결과는 비안전측의 결과를 제공할 수 있기 때문에 상향조정될 필요가 있다. 반면, 제안모델에 의한 최소비틀림철근비는 충분한 안전율을 확보하고 있으며, 제안된 비틀림 철근비 이상의 철근이 배치된 실험체들은 모두 충분한 강도여유율을 나타내었다. 참고로, 검증에 사용된 실험체들은 중공단면을 가지고 있기 때문

에 비틀림 균열강도(T_{cr})가 속찬 단면에 비하여 작게 나타날 수 있을 것이며, 앞서 언급된 바와 같이 최대 비틀림 강도(T_u)는 큰 차이가 없을 것이다. 따라서, 속찬 단면에 비하여 속빈 단면을 가진 비틀림 부재는 비틀림 균열 강도 이후에 강도여유율(T_u/T_{cr})을 확보하기가 용이하다. 그럼에도 불구하고 ACI318-11³⁾에서 제시하는 최소비틀림철근비 보다 많은 비틀림철근이 배치된 속빈단면을 갖는 실험체에서 취성적 파괴가 발생하였다는 것은 ACI318-11³⁾에 제시된 최소비틀림철근량이 비안전측이라는 것을 의미하며, 이러한 경향이 속찬단면에서는 더 심하게 나타날 수 있다는 것을 의미한다. 다만, 더 많은 실험체들을 대상으로 비교 분석이 필요할 것이다.

5. 결 론

현행 설계기준들에서는 비틀림 부재의 취성적인 파괴를 방지하기 위하여 최소비틀림철근비를 규정하고 있다. 그러나 국내 현행기준 및 ACI318-11에서 규정하고 있는 최소비틀림철근비 산정식은 종방향 최소철근비, 공간트러스모델의 역학적 평형관계 및 여유강도 확보 등의 측면에서 불합리한 문제점들을 내포하고 있다. 따라서, 이 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위하여, 보다 합리적인 비틀림균열강도 산정식을 도출하였으며 충분한 강도여유율을 확보할 수 있는 최소비틀림철근비 산정식을 제안하였다. 또한, 제안식을 기존실험 결과와 비교하여 검증하였으며, 이 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 이 연구에서는 실험체들의 비틀림 균열강도를 바탕으로 ACI318-11에서 제시한 비틀림 균열강도(T_{cr})의 1.5배인 비틀림 균열강도를 제시하고, 극한 비틀림 강도(T_u)가 이 균열강도 보다 크도록 최소비틀림철근비를 제시하였다.
- 2) 최소비틀림철근비는 35%의 강도안전율(χ)을 가지도록 결정되었으며, 강도여유계수(λ)는 취성적인 비틀림파괴를 방지할 수 있도록 실험체 데이터를 근거로 $\lambda=1.35$ 로 결정하였다.
- 3) 제안된 최소비틀림철근비 산정식은 종방향 철근비(ρ_l)와 횡방향 철근비(ρ_t)를 합하여 전체 철근비(ρ_{tot})로 제시되었으며, 종·횡방향 철근지수의 비($\rho_l f_{yt}/\rho_t f_{ty}$)와 콘크리트 압축강도(f'_c)의 영향이 고려되도록 하였다.
- 4) 제안식에 의한 최소비틀림철근비는 콘크리트 압축강도가 증가함에 따라 높아지며, 종·횡방향 철근지수의 비($\rho_l f_{yt}/\rho_t f_{ty}$)가 1일 때 가장 낮게 산정된다.
- 5) 이 연구에서 제안한 최소비틀림철근비는 기준식들 및 기존의 연구자들이 제안한 최소비틀림철근비에 비하여 충분한 여유 강도를 확보할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 서울시립대학교 연구년교수 연구비에 의하여 연구되었고 이에 감사드립니다.

References

- Ju, H., Lee, D. H., Hwang, J. H., Kang, J. W., Kim, K. S., and Oh, Y. H., "Torsional Behavior Model of Steel Fiber-Reinforced Concrete Members Modifying Fixed-Angle Softened-Truss Model," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 45, No. 1, 2013, pp. 215-231. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.021>)
- Korea Concrete Institute, *Concrete Design Code*, Kimoondang Publishing Company, 2012, 342 pp.
- ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary* (ACI 318-11), American Concrete Institute, Detroit, 2011, 503 pp.
- CSA Committee A23.3-04, *Design of Concrete Structures* (CAN/CSA-A23.3-04), Canadian Standards Association, Canada, 2004, 214 pp.
- Comite Euro-International du Beton, *CEB-FIP MODEL CODE 2010*, Thomas Telford, London, 2010, 653 pp.
- Comite European de Normalisation (CEN), *Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-General Rules and Rules for Buildings*, prEN 1992-1, 2004, 225 pp.
- Ali, M. A. and White, R. N., "Toward a Rational Approach for Design of Minimum Torsion Reinforcement," *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 1, 1999, pp. 40-45.
- Koutchoukali, N. and Belarbi, A., "Torsion of High-Strength Reinforced Concrete Beams and Minimum Reinforcement Requirement," *ACI Structural Journal*, Vol. 98, No. 4, 2001, pp. 462-469.
- Chiu, H. J., Fang, I. K., Young, W. T., and Shiau, J. K., "Behavior of Reinforced Concrete Beams with Minimum Torsional Reinforcement," *Engineering Structures*, Vol. 29, No. 9, 2007, pp. 2193-2205. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.11.004>)
- Bernardo, L. F. A. and Lopes, S. M. R., "Torsion in High-Strength Concrete Hollow Beams: Strength and Ductility Analysis," *ACI Structural Journal*, Vol. 106, No. 1, 2009, pp. 39-48.
- Hsu, T. T. C., "Torsion of Structural Concrete-Behavior of Reinforced Concrete Rectangular Members," *Torsion of Structural Concrete*, SP-18, American Concrete Institute, Detroit, 1968, pp. 261-306.
- Rausch, E., "Design of Reinforced Concrete in Torsion (Berechnung des Eisenbetons Gegen Verdrehung)," Ph.D thesis, Technische Hochschule, Berlin, Germany, 1929, 53 pp.
- Hsu, T. T. C., *Torsion of Reinforced Concrete*, Van Nostrand Reinhold, Inc., New York, 1984, 516 pp.
- MacGregor, J. G. and Ghoneim, M. G., "Design for Torsion," *ACI Structural Journal*, Vol. 92, No. 2, 1995, pp. 211-218.
- ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary* (ACI 318-89), American Concrete Institute, 1989, 353 pp.
- ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary* (ACI 318-95), American Concrete Institute, 1995, 369 pp.
- Bredt, R., "Kritische Bemerkungen zur Drehungselsastizitat," *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, Vol. 40, No. 28, 1896, pp. 785-790.
- Ghoneim, M. G. and MacGregor, J. G., "Evaluation of Design Procedures for Torsion in Reinforced and Prestressed Concrete," Report No. 184, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, 1993, 301 pp.
- Fang, I. K. and Shiau, J. K., "Torsional Behavior of Normal- and High-Strength Concrete Beams," *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 3, 2004, pp. 304-313.
- Lee, J. Y. and Kim, S. W., "Torsional Strength of RC Beams Considering Tension Stiffening Effect," *ASCE, Journal of Structural Engineering*, Vol. 136, No. 1, 2010, pp. 1367-1378. (doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000237](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000237))
- McMullen, A. E. and Rangan, B. V., "Pure Torsion in Rectangular Sections-A Re-Examination," *ACI Journal*, Vol. 75, No. 10, 1978, pp. 511-519.
- ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary* (ACI 318-05), American Concrete Institute, 2005, 430 pp.

요 약 현행 설계기준들에서는 비틀림모멘트를 받는 철근콘크리트 부재의 취성적인 파괴를 방지하기 위하여 최소비틀림철근비를 규정하고 있다. 그러나, 국내 현행기준 및 ACI318-11에서 규정하고 있는 최소비틀림철근비 산정식은 종방향 최소철근비, 공간트러스모델의 역학적 평형관계 및 여유강도 확보 등의 측면에서 불합리한 문제점들을 내포하고 있다. 따라서, 이 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위하여, 보다 합리적이고 충분한 강도여유율을 확보할 수 있는 최소비틀림철근비 산정식을 제안하였다. 또한, 제안식을 기존실험 결과와 비교하여 검증하였으며, 제안모델이 모든 대상실험체들의 최소비틀림철근비를 안전측으로 평가하는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 최소비틀림철근, 여유 강도, 철근콘크리트, 비틀림 균열 강도