

ACI 318-02 기준으로 설계된 철근콘크리트 보의 비틀림 강도 검토

Torsional Strength of RC Beams Designed according to ACI 318-02 Building Code

이정윤* 김상우** 황현복*** 김지현*** 박지선****
Lee, Jung Yoon Kim, Sang Woo Hyang, Hyun Bok Kim, Ji Hyun Park, Ji Sun

ABSTRACT

The current ACI design code does not take into account the contribution of concrete for the torsional moment of reinforced concrete(RC) beams subjected to pure torsion. This code is not capable of evaluating the inter-effects between concrete and torsional reinforcement on the torsional resistance of the RC beams. In this study, 9 RC beams subjected to pure torsion were tested. The main parameter of the beams was the amount of torsional reinforcement and the angle of twist. Test results indicated that the current ACI code over-estimated the torsional strength of RC beams that had larger amount of torsional reinforcement.

1. 서론

1971년에 채택된 ACI의 비틀림 평가식은 콘크리트에 의한 비틀림 저항 T_c 와 비틀림 보강근에 의한 비틀림 저항 T_s 의 합에 의하여 평가하였다. 1971년 발표된 평가식에서 T_c 는 Portland Cement Association(이하, PCA)의 실험 결과¹⁾에 근거하고 있으며, 비틀림 보강철근에 의한 비틀림 저항 T_s 는 45도 공간 트러스 이론(space truss theory)²⁾과 유사한 경사 휨 이론(skew-bending theory)³⁾에 근거하여 유도 되었다. 이러한 비틀림 평가식은 MacGregor 등의 연구 결과⁴⁾에 근거하여 1995년에 개정⁵⁾ 되었다. 개정된 비틀림 평가식도 박판 튜브 이론(thin walled theory)과 공간 트러스 이론에 근거하고 있지만, 1995년 이전의 ACI 비틀림 기준식은 콘크리트의 비틀림 저항 T_c 를 배제하였으며, 비틀림 균열각도 α 를 부재축방향(이하, 종방향) 및 부재축의 직각방향(이하, 횡방향) 비틀림 보강근의 양에 의하여 구하였다. 또한, 전단흐름 경로로 둘러싸인 총 단면적 A_o 은 해석에 의해 결정하되, 해석을 하지 않을 경우, 폐쇄스터럽의 중심선에 의해 둘러싸인 면적의 0.85배로 하였다. 1995년의 ACI 기준식은 1995년 이전의 ACI 규준식보다 간략하게 철근콘크리트 부재의 비틀림 내력을 평가할 수 있지만, 비틀림 내력에 미치는 콘크리트와 비틀림 보강철근의 상호영향을 효과적으로 평가하지 못한다는 점에서 1995년 이전의 ACI 기준식을 개선하였다고는 볼 수 없다. 이 연구에서는 ACI 318-02 기준의 비틀림 설계식에 의하여 설계된 총 9개의 철근콘크리트 보의 비틀림 실험을 수행하였다. 실험에서는 비틀림 보강철근의 양을 변수로 하여 비틀림 보강철근과 콘크리트 압축강도의 영향을 평가하였다.

*정회원, 성균관대학교 건축공학과 조교수
**정회원, University of Toronto, 박사후 연구원

***정회원, 성균관대학교 대학원생
****정회원, 한국건설기술연구원, 연구원

2. 실험 계획

2.1 실험체 형상 및 변수

ACI 318-02 기준에서는 식 (1)과 같이 종방향과 횡방향 비틀림 보강철근의 양에 따라서 비틀림 각도 α 가 변화하도록 설계하고 있다.

$$\cot^2 \alpha = \frac{\rho_l f_{ly}}{\rho_t f_{ty}} \quad (1)$$

여기서, f_{ly} 와 f_{ty} 는 종방향 및 횡방향 비틀림 보강철근의 항복응력, ρ_l 와 ρ_t 는 종방향 및 횡방향 비틀림 보강철근비이다. 실험에서는 종방향과 횡방향 비틀림 보강철근의 양이 동일한 T1계열과 부재 축방향 비틀림 보강철근 양이 횡방향 비틀림 보강철근 양의 2배인 T2계열로 구분하여 실험체를 제작하였다. 식 (1)에 의하면 T1계열의 경우 비틀림 균열의 각도는 45도이며, T2계열은 35.2도이다. 각 계열에 각각 4개의 실험체를 제작하였다. 실험체의 변수는 비틀림 보강철근의 양($\rho_l f_{ly}$ 또는 $\rho_t f_{ty}$)으로 A계열에서 비틀림 보강철근의 양은 2.89 MPa-8.47 MPa로 변화하며, B계열 실험체는 2.91 MPa-9.99 MPa으로 변화한다. 실험 결과의 비교를 위하여 비틀림 보강철근이 배근되지 않은 실험체 T0를 제작하였다. 각 실험체의 구체적 특징을 Table 1에 정리하였다.

Fig. 1과 같이 보는 실험체 부분 1,500mm와 지점 각 750mm로 구분되어 있으며, 보 단면의 크기는 300mm × 350mm인 철근콘크리트 단순보이다. 패쇄형 전비틀림 보강 철근의 단면 중심에서 중심까지의 간격은 260mm × 310mm이다. 지점 750mm 구간에는 횡방향 비틀림 보강철근을 50mm 간격으로 배근하여 지점부위에서의 파괴를 방지하였다. 실험체의 콘크리트 실린더 압축강도는 42.57 MPa이다. 각 실험체의 재료적 특성을 Table 1에 정리하여 표시하였다.

2.2 가력 및 측정 장치

가력은 실험체 중앙 상부에서 3~5 kN/min.의 재하속도로 1점 가력하였다. 실험체의 가력면 상부에 H-형강을 이용하여 실험체에 균등하게 비틀림 모멘트가 전달되게 하였으며, 비틀림 모멘트 팔길이

Table 1 Specification of specimens and material properties

보 명	$\frac{\rho_l f_{ly}}{\rho_t f_{ty}}$	$\frac{(\rho_l f_{ly} + \rho_t f_{ty})}{f'_c}$	종방향 철근			횡방향 철근			T_{test} (kN-m)	T_{ACI} (kN-m)	
			대수와 종류	ρ_l	f_{ly}	대수와 종류	s	ρ_t			f_{ty}
T0	-	-	-	-	-	-	-	-	16.58	-	
T1-1	1.01	0.14	4-D13	0.00706	410	D10	130	0.00772	370	32.86	28.31
T1-2	0.99	0.20	6-D13	0.0106	410	D10	85	0.0118	370	45.89	43.30
T1-3	1.00	0.27	8-D13	0.0141	410	D10	65	0.0154	370	54.05	56.63
T1-4	1.00	0.40	6-D16	0.0166	510	D13	75	0.0240	355	62.41	84.23
T2-1	1.99	0.10	4-D13	0.0071	410	D10	225	0.00394	370	26.05	23.11
T2-2	1.97	0.20	4-D16	0.0111	510	D10	130	0.00772	370	38.11	40.00
T2-3	2.01	0.30	6-D16	0.0166	510	D10	88	0.0114	370	50.16	59.10
T2-4	2.02	0.35	2-D13 4-D19	0.0195	512.4	D10	75	0.0134	370	56.39	69.34

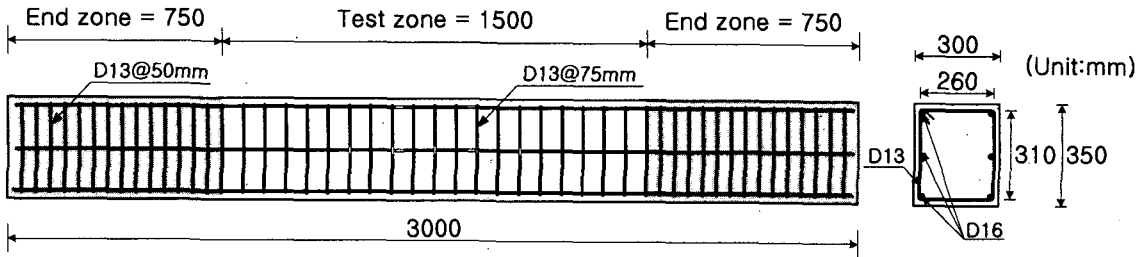


Fig. 1 Overall dimensions of beams, T1-4

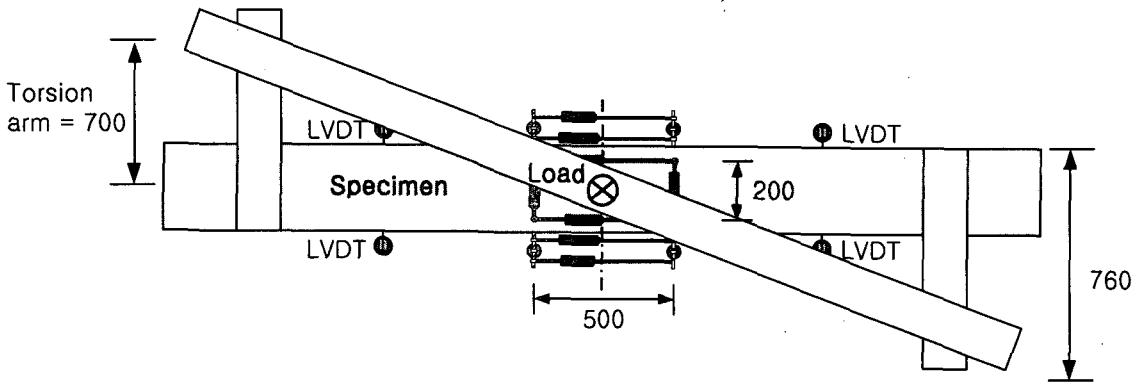


Fig. 2 Locations of LVDTs and loading system

를 70mm로 하였다. 실험체의 양 측면에 4개의 LVDT를 설치하여 비틀림 모멘트 회전각을 측정하였다. 비틀림 위험단면에서 발생하는 부재축 방향, 부재축과 직각방향의 평균변형률과 전단변형률을 Fig. 2와 같이 실험체 양 측면 및 윗면에 각각 6개의 LVDT(총 18개)를 설치하여 측정하였다. 횡방향 및 종방향 비틀림 보강철근에 철근 변형률게이지를 부착하여 철근의 변형률을 측정하였다.

3. 실험 결과 및 분석

모든 실험체는 비틀림에 의하여 파괴하였다. 비틀림 보강철근이 없는 실험체 T0는 비틀림 균열이 발생함과 동시에 취성 파괴하였다. 비틀림 보강철근이 있는 실험체는 비틀림 균열이 발생한 이후에도 비틀림 모멘트 및 비틀림 회전각이 증가하였다. 실험체 T1-4를 제외하고 모든 실험체는 비틀림 보강철근이 항복한 이후에 파괴하였으며, T1-4는 콘크리트 압축 파괴하였다. 비틀림 균열은 실험체의 4면에 일정한 기울기로 발생하였으며 비틀림 보강 철근이 적은 실험체일수록 취성적으로 파괴하였다. Fig. 3은 실험에서 측정된 보의 비틀림 모멘트-비틀림 회전각의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 비틀림 모멘트는 비틀림 보강철근의 양이 증가함에 따라서 증가함을 알 수 있다. 비틀림 회전각이 35.2도인 T2 시리즈 실험체의 비틀림 내력은 비틀림 회전각이 45도인 T1 시리즈 실험체의 비틀림 내력보다 작았다. Fig. 4는 실험에서 측정한 비틀림 내력을 ACI 318-02 기준식에 의하여 계산한 비틀림 내력으로 나누고 비틀림 보강철근의 양과의 관계를 나타낸다. 그림에서 ACI 기준식은 전체적으로 실험값을 과대평가하는 경향이 있으며, 특히 비틀림 보강철근의 양이 증가함에 따라서 그 경향은 심해짐을 알 수 있다. 따라서 보다 정확한 비틀림 내력을 평가하기 위해서는 콘크리트와 비틀림 보강 철근의 상호 영향을 고려한 비틀림 보강 평가식이 필요한 것으로 판단된다.

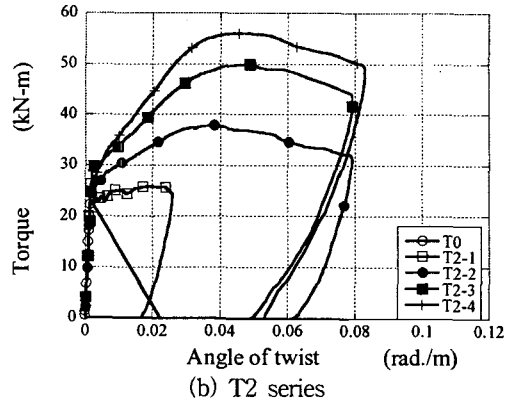
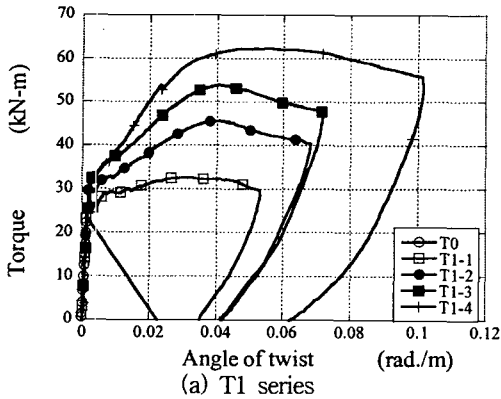


Fig. 3 Torque-twist curves of beams with various amount of torsional reinforcement

4. 결론

순수비틀림을 받는 9개의 철근콘크리트 보 실험을 수행하였다. 실험체의 주요변수는 비틀림 보강철근의 양과 비틀림 각도이었다. 실험에서 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) ACI 318-02 기준식의 비틀림 평가식은 비틀림 보강철근의 양이 증가함에 따라 실제값을 과대평가하였다.
- (2) ACI 318-02 기준식은 비틀림 보강철근의 각도가 35.2도인 T2 시리즈 실험체의 비틀림 강도를 45로인 T1시리즈 실험체의 비틀림 강도보다 과대평가하였다.

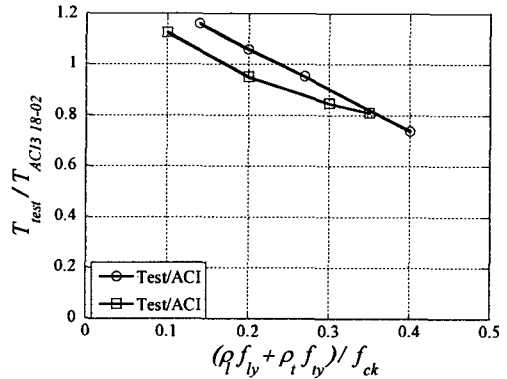


Fig. 4 Comparisons of the observed and predicted torsional moment

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출원하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술 연구개발사업(03산학연C04-01) 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Thomas T. C. Hsu, "Torsion of Structural Concrete-Behavior of Reinforced Concrete Rectangular Members," *Torsion of Structural Concrete, SP-18*, American Concrete Institute, Detroit, 1968, pp.261~306.
2. E. Rausch, "Design of Reinforced Concrete in Torsion," PhD. thesis, Technische Hochschule, Berlin, 1928, 53 pp. (in German).
3. Thomas T. C. Hsu, "Torsion of Structural Concrete Plane Concrete Rectangular Members," *Torsion of Structural Concrete, SP-18*, American Concrete Institute, Detroit, 1968, pp.203~238.
4. J. G. MacGregor and M. G. Ghoneim, "Design for Torsion," *ACI Structural Journal*, Vol. 92, No. 2, Mar.-Apr. 1995, pp.211~218.
5. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete(318-99) and Commentary (318R-99)," American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1999, pp.149~155.