

3차원 스트럿-타이 모델을 이용한 순수 비틀림을 받는 보의 강도예측

Strength Prediction of RC Beams Subjected to Pure Torsions Using 3-D Strut-Tie Models

박 정 웅* 윤 영 묵**

Park, Jung Woong Yun, Young Mook

ABSTRACT

ACI design code is not capable of evaluating the inter-effects between concrete and torsional reinforcement on the torsional resistance of the reinforced concrete beams. In this study, the failure strengths of the ten reinforced concrete beams subjected to pure torsion were evaluated using 3-dimensional strut-tie models. The analysis results obtained from the present study were compared with those obtained from the ACI design code. The comparison showed that the accuracy and performance of the present method were better than the ACI design code. Thus, the method implementing a 3-dimensional strut-tie model can be possibly applied to the analysis and design of the reinforced concrete beams subjected to pure torsion as a rational design method.

1. 서론

철근 콘크리트 부재의 비틀림에 대한 가장 공인된 설계방법은 입체 트러스 유사법(space truss analogy)을 이용하는 것이다. 여러 연구자들이 이 이론과 콘크리트의 연화를 고려한 응력-변형률 곡선을 이용하여 비틀림을 받는 보의 거동을 예측하고자 하였다. 1995년 개정된 ACI 설계기준⁽¹⁾의 비틀림 설계규정은 박벽관 이론(thin-walled tube)과 힘의 평형조건만을 이용한 입체 트러스 유사법을 근간으로 하고 있다. 이 이론은 비틀림을 받는 보의 단면의 둘레를 둘러감은 두께 t 의 박벽관으로 이상화하고, 보의 공칭 비틀림 강도 계산 시 균열각을 45° 로 가정하였으며, 콘크리트에 의한 비틀림 저항은 무시하였다. 또한 ACI 318-95⁽¹⁾에서는 콘크리트의 전단저항 기여분 V_c 와 콘크리트의 비틀림저항 기여분 사이의 실험적인 상관관계가 없어지고, V_c 는 비틀림에 관계없이 일정한 값을 가지도록 하였다. 입체 트러스 유사법은 ACI code^(1,2) 이외에도 Canadian 기준⁽³⁾, CEB-FIP 기준⁽⁴⁾, 우리나라의 콘크리트 구조설계기준⁽⁵⁾ 등 여러 설계기준서의 비틀림 설계규정에 포함되어 있다. 비틀림 설계방법의 이러한 변화는 새로운 설계규정의 이해와 적용에 있어 매우 간단하면서도 비슷한 정확도를 가질 수 있는 점에 크게 기인하고 있다. 또한 ACI 318-95 이전의 비틀림 설계규정에는 포함되지 않았던 비틀림을 받는 프리스트레스트 콘크리트에도 적용될 수 있다. 그러나 이러한 현행 비틀림 설계규정은 힘의 평형조건만을 고려한 트러스 이론을 사용하고 있으므로, 비틀림에 의한 부재의 변형과 거동을 예측하기 어렵다. 또한 전단철근량이 적은 경우에는 부재의 비틀림 강도를 대체로 과소평가하고, 전단철근량이 많은

* 정회원, 경북대학교 토목공학과 post-doc. 연구원

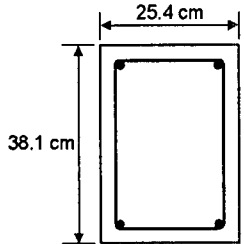
** 정회원, 경북대학교 토목공학과 부교수

경우에는 비틀림 강도를 과대평가하는 경향을 보이게 되며, 축방향 철근량과의 상관관계를 반영할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 3차원 스트럿-타이 모델을 이용하여 실험·파괴된 순수 비틀림을 받는 철근콘크리트 보의 파괴강도를 예측하였고, 그 결과를 실험결과 및 ACI 318-02 설계기준서에 따라 예측된 파괴강도와 비교함으로써 본 연구에서 적용한 방법의 타당성을 입증하였다. 이는 비틀림뿐만 아니라 축력, 휨, 전단 등의 복합적인 하중의 영향을 받는 보에 대한 합리적인 설계방법을 개발하기 위한 것이다. 본 연구의 강도예측 결과로부터 3차원 스트럿-타이 모델을 이용하는 방법은 비틀림 보의 만족스러운 정확도를 가진 합리적이고 실용적인 설계방법이라 판단된다.

2. 3차원 스트럿-타이 모델을 이용한 강도해석

본 연구의 해석대상 구조물은 Hsu⁽⁶⁾에 의해 실험·파괴된 수십 개의 비틀림 보 시험체 중에서 선정한 10개의 보이며, 그 단면크기와 철근비가 표 1에 주어져있다. 이 시험체들의 일축압축강도는 27.6MPa로 일정하고, 축방향 철근과 횡방향 철근의 비를 설계변수로 사용하였다.

표 1. 시험체의 단면크기 및 철근비



Beam	철근비	
	longitudinal steel (%)	transverse hoop steel (%)
B1	0.534	0.537
B2	0.827	0.823
B3	1.77	1.17
B4	1.60	1.61
B5	2.11	2.13
B6	2.67	2.61
B7	0.534	1.17
B8	0.534	2.61
B9	1.17	0.537
B10	2.67	0.537

그림 1은 비틀림을 받는 보의 무근콘크리트 비선형유한요소해석을 위한 유한요소모델 및 선정한 3차원 스트럿-타이 모델을 보여주고 있다. 비틀림 하중은 절단된 단면에 절점하중으로 부과하였다. 그림 2(a) 및 그림 3(a)는 시험체 B3와 B5의 차원화된 압축스트럿을 보여주고 있다. 3차원 스트럿-타이 모델에 의한 파괴하중은 기하학적 적합조건을 만족하는 최대하중 상태에서 철근이 항복되는 단계의 하중으로 결정하였다. 스트럿-타이 모델 해석결과 본 연구의 모든 시험체들은 철근의 항복에 의해 강도가 결정되었는데, 이는 순수 비틀림을 받는 보의 콘크리트의 압축파괴보다는 비틀림 균열의 진전으로 인한 철근의 항복으로 파괴될 가능성이 높다는 것을 말해준다. 기하학적 적합조건을 만족하는 최대하중은 실험 파괴하중의 4에서 6배에 해당되는 것으로 나타났다. 비선형 스트럿-타이 모델 방법⁽⁷⁾에서는 기하학적 적합조건을 만족하는 최대의 하중범위 안에서 철근이 항복되는 단계의 하중을 파괴하중으로 보았다. 그림 2(b) 및 그림 3(b)는 SG1시험체 스트럿-타이 모델 경사콘크리트 스트럿의 단면적이 이 스트럿의 최대허용면적에 도달한 것을 보여주는 것으로, 더 이상의 하중 하에서는 스트럿-타이 모델의 기하학적 적합조건이 이 경사스트럿에 의해 만족될 수 없다. 그림 4는 시험체 B5 스트럿-타이 모델의 차원화된 콘크리트 타이틀을 보여주는 것이다. 실험에서 측정된 파괴강도와 ACI 318-02⁽²⁾ 및 3차원 스트럿-타이 모델을 이용한 방법에 의해 예측된 파괴강도는 표 2에서 비교되었다.

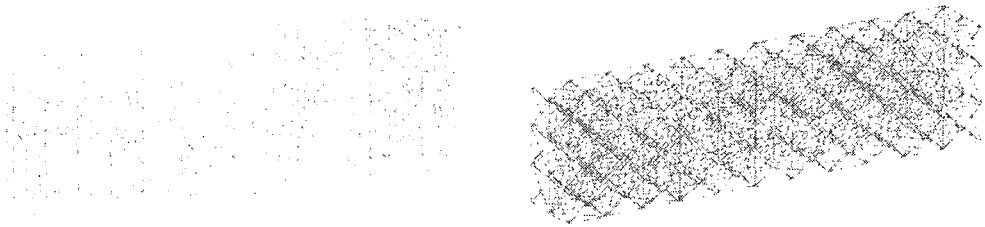
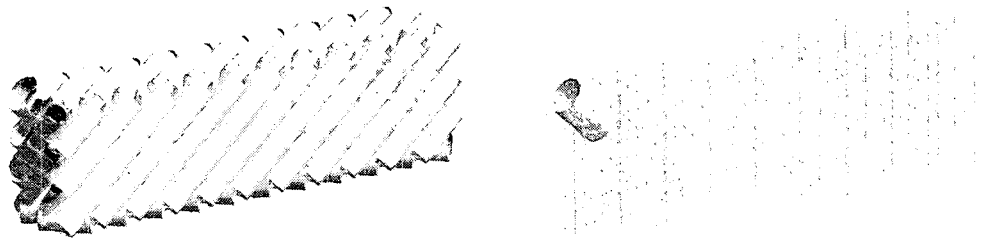


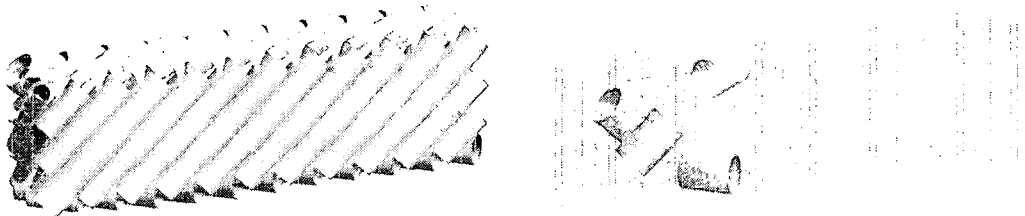
그림 1. 비틀림을 받는 보의 유한요소모델 및 스트럿-타이 모델



(a) 차원화된 압축스트럿

(b) 압축파괴된 스트럿

그림 2. 시험체 B3



(a) 차원화된 압축스트럿

(b) 압축파괴된 스트럿

그림 3. 시험체 B5

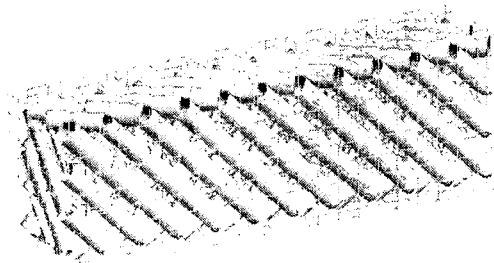


그림 4. 차원화된 콘크리트 타이 (시험체 B5)

3. 결론

ACI 318-02의 비틀림 설계규정은 축방향 및 횡방향 철근량의 상호관계를 비틀림 보의 강도예측 시 고려하지 못하며, 전단철근량이 적은 경우에는 부재의 비틀림 강도를 대체로 과소평가하고 전단철근량이 많은 경우에는 비틀림 강도를 상당히 과대평가하는 경향을 보인다. 이는 콘크리트의 비틀림 저항능

력을 무시하고 비틀림 보강근의 저항성능 만으로 비틀림 저항모멘트를 산정하는 것에서 비롯된 오차로 보이며, 설계의 정확도를 높이기 위해서는 입체 트러스 이론의 보완 및 수정이 필요할 것으로 판단된다. 더구나 보와 같은 형상이 비교적 단순한 부재에서도 비틀림뿐만 아니라 축력, 휨, 전단 등의 복합적인 상호작용이 부재의 강도를 결정한다는 것을 감안할 때, 비틀림뿐만 아니라 휨과 축력이 동시에 작용하는 경우에 더 일반적으로 적용될 수 있는 3차원 스트럿-타이 모델을 이용하는 방법은 입체 트러스 이론을 개선하여 비틀림을 받는 보뿐만 아니라 모든 콘크리트 부재에 적용될 수 있도록 일반화시킨 방법으로 볼 수 있다. 이것은 스트럿-타이 모델의 개념을 가장 적극적으로 받아들이고 있는 CEB-FIP 기준⁽⁴⁾에서 축력, 모멘트, 전단력, 비틀림 등의 모든 단면력을 동시에 고려하는 일관된 스트럿-타이 모델 방법을 제시하고 있다는 점과 유사하다. 따라서 본 연구의 3차원 스트럿-타이 모델을 이용하는 방법은 현행 비틀림 설계규정을 단점을 보완한 보다 실용적이고 합리적인 비틀림 설계방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

표 2. 예측된 파괴강도

Beam	파괴하중 $kN \cdot m$	Ratio of theoretical to experimental failure loads		Predicted failure mode
		ACI 318-02	Present study (최대하중)	Present study
B1	22.26	0.718	1.12 (167)	Steel yielding
B2	30.17	0.821	0.97 (196)	Steel yielding
B3	37.51	1.183	1.15 (217)	Steel yielding
B4	47.34	1.021	0.97 (185)	Steel yielding
B5	55.93	1.129	1.19 (134)	Steel yielding
B6	61.24	1.305	1.04 (257)	Steel yielding
B7	26.66	0.599	1.08 (193)	Steel yielding
B8	32.54	0.491	0.93 (203)	Steel yielding
B9	29.83	0.683	0.98 (197)	Steel yielding
B10	34.35	0.593	0.90 (208)	Steel yielding
평균		0.85	1.03	-
표준편차		0.285	0.098	-

참고문헌

1. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95), American Concrete Institute, 1995.
2. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02), American Concrete Institute, 2002.
3. Canadian Standards Association, Design of Concrete Structures for Buildings (CAN3-A23.3-M84), Rexdale, Ontario, 1984.
4. Comite Euro-International du Beton, CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford Services Ltd., 1993.
5. 건설교통부, 콘크리트 구조설계기준, 한국콘크리트학회 · 대한건축학회, 1999.
6. Hsu, T. T. C., "Torsion of Structural Concrete - Behavior of Reinforced Concrete Rectangular Members", Torsion of Structural Concrete, SP-18, pp. 261-306, American Concrete Institute, Detroit, Mich, 1968.
7. Yun, Y. M., "Nonlinear Strut-Tie Model Approach for Structural Concrete", *ACI Structural Journal*, Vol. 97, No. 4, 2000.