

변환각 트러스 모델에 의한 철근콘크리트 기둥의 전단응력-전단변형률 관계 예측

Prediction of Shear Stress-Strain Relationship of Reinforced Concrete Columns using Transformation Angle Truss Model

김 상 우* 채 희 대** 이 정 윤***
Kim, Sang-Woo Chai, Hye-Dai Lee, Jung-Yoon

ABSTRACT

This paper predicts the shear stress-strain relationship of reinforced concrete columns using Transformation Angle Truss Model (TATM) considered bending moment and axial force effects. Nine columns with various shear span-to-depth ratios and axial force ratios were tested to verify the theoretical results obtained from TATM. Shear stress-strain relationship obtained from TATM was agreed well with test results conducted by this study than other truss models.

1. 서론

철근콘크리트 부재의 전단변형에 대한 예측은 파괴모드와 균열폭의 예측 및 경제적인 설계를 가능하게 한다는 점에서 최근 많은 연구가 이루어지고 있다. 이러한 연구의 결과로 수정 압축장 이론¹⁾(MCFT)과 회전각 연화 트러스 모델²⁾(RA-STM) 및 고정각 연화 트러스 모델³⁾(FA-STM)과 같은 변형률 적합조건을 고려한 트러스 모델이 개발되었으며, 막요소와 전단벽 및 격납건물과 같은 다양한 구조물에 적용되고 있다. 그러나, 이러한 트러스 모델은 x 와 y 방향 철근능력비 $\eta(= (\rho_y f_{yy} - \sigma_y) / (\rho_x f_{xy} - \sigma_x))$ 가 작은 철근콘크리트 보와 기둥에 적용될 때에는 많은 약점을 가지므로, 본 연구자는 철근콘크리트 보와 기둥에 적용 가능한 변환각 트러스 모델⁴⁾(이하 TATM)을 개발하였다.

본 연구에서는 휨모멘트와 축력을 받는 철근콘크리트 부재의 전단거동을 평가하기 위하여 개발된 TATM의 전단응력-전단변형률 관계에 대한 예측결과를 검증하기 위하여 전단경간비와 축력비를 변수로 9개의 철근콘크리트 기둥을 전단실험하였으며, 기존 트러스 모델의 해석결과도 함께 비교하였다.

2. 철근콘크리트 기둥 전단실험 계획

TATM이 철근콘크리트 기둥의 전단응력-전단변형률 관계를 타당하게 예측하는지 평가하기 위하여 총 9개의 철근콘크리트 기둥을 제작하였으며, 실험변수는 전단경간비와 축력비로 하였다. 철근콘크리트

* 정회원, 성균관대학교 건축공학과 박사후 연구원

** 정회원, 성균관대학교 건축공학과 석사과정

*** 정회원, 성균관대학교 건축공학과 조교수

기둥의 철근배근은 축력과 휨모멘트에 대한 주근의 영향을 평가하기 위하여 그림 1과 같이 인장과 압축측에만 배근하였다. 인장측에는 항복강도가 524.5MPa인 D25 5대($\rho_{sx}=3.31\%$)를 배근하였으며, 전단철근은 항복강도가 215.7MPa인 5.6mm 원형철근을 80mm 간격($\rho_y=0.205\%$)으로 배근하였다.

철근콘크리트 기둥이 휨파괴 이전에 전단파괴 되었는지 확인하기 위하여 그림 1과 같이 인장철근의 최대 모멘트 위치에서 1.5cm 떨어진 곳에 철근게이지를 부착하였다. 그리고 기둥의 전단변형을 측정하기 위하여 전단위험 단면을 중심으로 철근과 콘크리트 게이지를 부착하였으며, 그림 2와 같이 기둥 옆면에 LVDT를 5개 설치하였다. 실험체 일람표는 표 1과 같으며, C2 시리즈의 콘크리트 압축강도는 37.5MPa, C3 및 C4시리즈는 35MPa이었다.

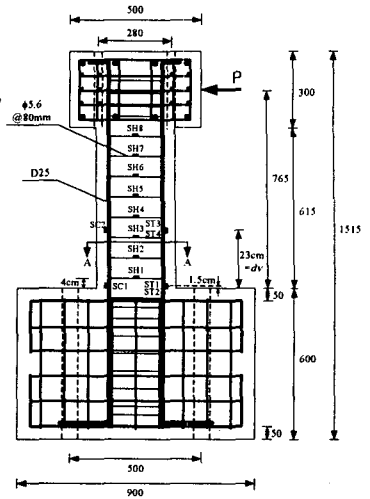


그림 1 실험체 배근상세 및 게이지 위치

3. 철근콘크리트 기둥 전단실험 결과

모든 실험체는 휨파괴 이전에 전단철근이 항복한 후 전단파괴 되었다. 기둥의 사인장 균열의 경사각은 축력이 없는 경우 45도에서 축력이 증가할수록 약 30도 정도까지 감소하였다. 표 1과 그림 3에서와 같이, 최대전단응력과 강성은 축하중이 증가할수록 증가하는 반면 전단경간비가 증가할수록 감소하였다. 여기서 C3-2 실험체의 전단응력-전단변형을 관계는 LVDT 봉의 마찰로 인하여 실험결과를 취득하지 못하였다.

4. 철근콘크리트 기둥의 전단거동 평가

본 연구에서 수행한 총 9개의 철근콘크리트 기둥에 대하여 TATM과 함께 기존 트러스 모델인 MCFT, RA-STM, FA-STM이 예측한 전단응력-전단변형을 관계는 그림 3과 같다. 여기서, MCFT는 Bentz와 Collins⁵⁾가 만든 Response-2000 프로그램으로 수행하였다.

Response-2000은 그림 3과 같이 9개 기둥의 전단강도와 이때의 전단변형률(이하 최대전단변형률)을 각각 평균 1.8과 11.4로 과소평가 하였으며, 모든 실험체에 대하여 초기 전단응력-전단변형률 관계는 비교적 타당하게 예측하지만 전단강도와 최대전단변형률은 과소평가하고 있음을 알 수 있다. 이것은 67개 철근콘크리트 기둥의 전단강도 실험결과⁴⁾와 비교한 그림 4(a)와 같이, Response-2000이 η 가 0.1 이하로 낮아질수록 실험결과를 과소평가하는 경향이 있기 때문으로 판단된다.

RA-STM은 9개 기둥의 전단강도와 최대전단변형률을 각각 평균 1.14와 1.03으로 비교적 타당하게 예측한 반면, 전단스팬비가 2인

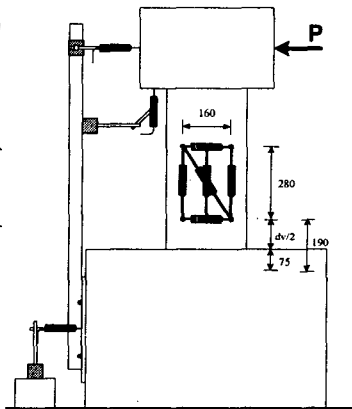


그림 2 실험체 LVDT 설치현황

표 1 기둥 실험체 상세 및 실험결과

실험체	a/d	N (kN)	$\frac{N}{bh}$ (MPa)	τ_{test} (MPa)
C2-0	2	0.0	0.0	4.00
C2-1		225.9	2.51	4.52
C2-2		549.0	6.18	5.43
C3-0	3	0.0	0.0	3.15
C3-1		206.1	2.45	3.33
C3-2		448.2	4.98	4.65
C4-0	4	0.0	0.0	2.52
C4-1		213.3	2.43	2.86
C4-2		450.9	4.90	3.49

b와 h : 300mm, d : 255mm, d' : 45mm

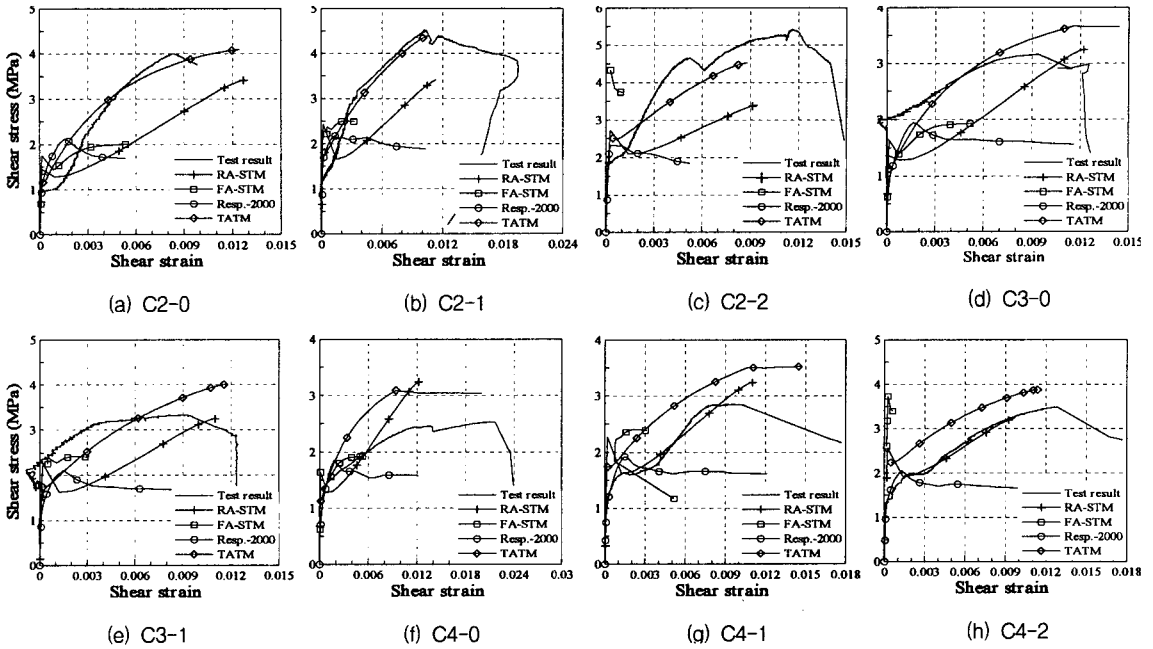


그림 3 철근콘크리트 기둥의 전단응력-전단변형률 관계에 대한 실험결과와 해석결과 비교

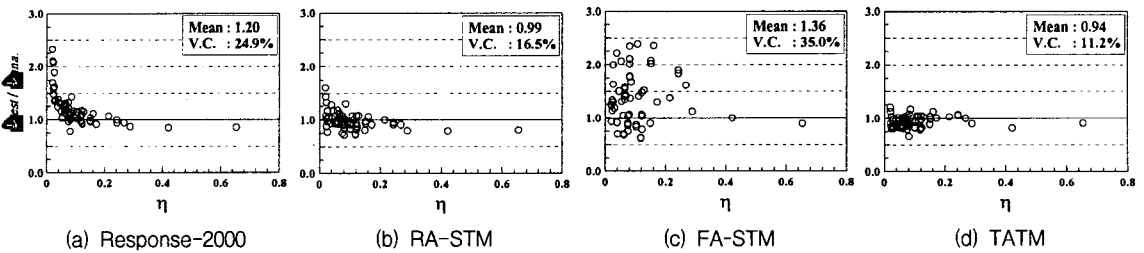


그림 4 철근능률비 η 에 따른 67개 기둥의 전단강도 실험결과와 해석결과 비교

C2 시리즈의 경우 전단강도에 도달할 때까지 전단응력을 최대 약 35% 과소평가하고, 전단스팬비가 3인 C3시리즈의 경우 최대 약 40%까지 과소평가 하는 거동을 보였다. 이것은 기둥의 전단스팬비가 작고 전단철근비가 낮을수록 콘크리트 기여에 의한 거동이 뚜렷해지는 반면 RA-STM은 콘크리트 기여를 직접적으로 고려하지 못하기 때문이다. 이러한 현상은 η 가 0.1 이하로 낮아질수록 최대 1.7배까지 실험결과를 과소평가하는 그림 4(b)에서도 확인할 수 있다.

FA-STM은 본 연구에서 실험한 기둥의 전단강도와 최대전단변형률을 각각 평균 1.35와 12.7로 예측하여 Response-2000과 같이 실험결과를 과소평가 하였다. 이것은 축력의 영향을 고려하지 못할 뿐만 아니라 그림 4(c)에서와 같이 η 가 0.3 이하인 경우 실험결과를 과소평가하기 때문이다. 여기서 η 에 영향을 크게 받는 이유는 (1) FA-STM이 실험적 검증이 부족한 콘크리트 연화계수를 사용하고 있으며, (2) 균열면 방향의 구성법칙을 주응력 방향의 구성법칙과 동일하다고 가정하여 η 가 낮은 경우 두 구성법칙 사이의 차이가 커짐을 무시하였기 때문으로 판단된다.

TATM의 해석결과는 기둥의 전단강도와 최대전단변형률에 대한 실험결과에 대하여 각각 평균 0.95와 1.07로 4가지 트러스 모델 중에서 가장 정확하였으며, 전단강도까지의 전단응력-전단변형률 관계 또한 그림 3에서와 같이 대부분의 경우 다른 해석모델 보다 실험결과를 더 정확히 예측하였다. 이것은 축력의 영향뿐만 아니라 주응력 방향의 구성법칙을 회전하여 균열면의 구성법칙으로 사용함으로써 그림 4(d)와 같이 η 의 영향을 받지 않았기 때문이다. 따라서 TATM은 철근콘크리트 기둥의 전단응력-전단변형률 관계를 예측하는데 사용할 수 있는 정확성과 신뢰성을 가진 모델이라 판단된다.

5. 결론

- (1) 본 실험결과와 67개 전단강도 실험결과를 바탕으로, 제안된 TATM은 기둥의 전단 응력에 대한 전단변형률 관계를 타당하게 예측할 수 있는 모델이라 판단된다.
- (2) Response-2000은 철근능력비 η 가 0.1이하인 경우 실험결과를 과소평가하기 때문에 철근콘크리트 기둥의 전단응력-전단변형률을 예측할 때 이에 대한 주의가 필요하리라 판단된다.
- (3) RA-STM은 균열면의 전단전달을 고려하지 못하기 때문에 전단응력-전단변형률 관계에서 전단 응력을 최대 40% 과소평가하는 직선적인 거동을 보였다. 따라서, 기둥의 전단변형을 정확히 예측하기 위해서는 균열면의 응력전달을 고려할 수 있는 모델을 사용하여야 할 것으로 판단된다.
- (4) FA-STM은 철근능력비 η 와 축력의 영향을 크게 받아 본 실험의 전단응력에 대한 전단변형률 관계를 타당하게 예측하지 못하였으며, 기둥 해석에 FA-STM을 적용하기에는 부적합하다고 판단된다.

감사의 글

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

참고문헌

1. Collins, M. P. and Mitchell, D., "Prestressed Concrete Structures," Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1991, 766pp.
2. Hsu, T. T. C., "Nonlinear Analysis of Concrete Membrane Elements," *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 5, Sep.-Oct. 1991, pp.552~561.
3. Hsu, T. T. C. and Zhang, L. X., "Nonlinear Analysis of Membrane Elements by Fixed-Angle Softened-Truss Model," *ACI Structural Journal*, Vol. 97, No. 5, Sep.-Oct. 1997, pp.483~492.
4. 김상우, 이정윤 "변환각 트러스 모델에 의한 축력을 받는 철근콘크리트 부재의 전단강도 예측," 콘크리트학회 논문집. (계재예정)
5. Bentz, E. C. and Collins, M. P., "http://www.civ.utoron.o.ca/profs/bentz/default.htm," Web address of Response-2000.