

스트럿-타이 모델을 이용한 철근 콘크리트 연결보의 전단강도와 변형능력

The Shear Strength and Deformability of R/C Coupling Beams using Strut-and-Tie Models

장 상 기* 홍 성 곁**
Jang, Sang Ki Hong, Sung Gul

ABSTRACT

In this study, a strut-and-tie models for the coupling beam based on deformations are presented. To design shear-dominated R/C coupling beams, it is important to consider shear strength deterioration with required deformations. This study proposes the method of estimating shear strength of the reinforced concrete coupling beams. The proposed method determines the strain states from target displacements based on the nonlinear truss analysis. The estimated horizontal strain of beam is then used in calculating the strength of the diagonal strut with compatibility conditions. The deterioration of shear strength of the coupling beam depends on the strength degradation of struts due to plastic deformations.

1. 서론

근래 구조물 설계의 개념이 강도 중심에서 변위 중심으로 변화하고 있다. 최근 구조 기준에서는 구조물이 극한 하중과 극한 변위를 동시에 충족하도록 규정하고 있다. 지금까지의 전단에 관한 연구는 변형과 무관하게 강도 예측에 중점을 두고 발전하여 왔다. 그러나 최근 실험을 통하여 부재의 변형이 전단강도저하를 일으킨다고 알려지고 있다. 콘크리트의 인장 변형률은 압축 강도를 감소시킨다는 연구가 이루어지고 있다. 따라서 변형을 고려할 수 있는 전단 강도 모델이 요구되고 있다.

스트럿-타이 모델은 콘크리트 압축 스트럿과 철근 인장 타이로 하중의 흐름을 표현하고 그에 따라 설계하는 방법이다. 주로 응력 불연속 구역(D-region)에 속하는 철근 콘크리트 전단 지배 부재 설계에 유용하게 사용되고 있다. 그러나 기존 스트럿-타이 모델 역시 힘의 평형만을 다루기 때문에 변형을 고려하지 못하고 있다.

병렬 전단벽 시스템의 연결보의 경우 전단지배 부재인 깊은 보이면서 양단에 소성변형을 필요로 한다. 따라서 본 연구에서는 연결보에 대해 변형에 기반을 둔 스트럿-타이 전단 강도 모델을 제안하고

* 정회원, 서울대학교 건축학과 박사과정

** 정회원, 서울대학교 건축학과 부교수

자 한다. 비선형 해석을 통해 연결보의 하중-변위 관계, 각 요소별 응력-변형을 관계 등을 연구하여 일반적인 배근 형태와 대각 배근 형태를 지니는 철근 콘크리트 연결보에 대해 변형을 고려하는 스트럿-타이 모델을 제안하였다.

2. 스트럿-타이 모델의 구성

연결보에 가해지는 전단력은 주로 그림 1 (a)와 같은 트러스 작용과 그림 1 (b)와 같은 아치작용에 의해 지지된다. 트러스 작용은 수직수평 방향 늑근과 대각방향 콘크리트 압축재가 형성하는 트러스에 전달되는 전단 전달기구이고, 아치 작용은 전단력이 하중점에서 지지점으로 직접 전달되는 기구이다. 연결보에 대한 스트럿-타이 모델은 위 두 가지 전달기구를 조합하여 그림 1 (c)와 같이 구성하였다.

연결보는 일반적으로 깊이에 비해 길이가 짧은 깊은 보와 같은 형상을 지니고 있다. 깊은 보의 경우에는 보 이론이 적용되는 세장한 보와 달리 연결 보 길이 방향 전체에서 휩 철근이 인장 상태로 존재한다. 휩 모멘트가 없는 지점이 존재하지 않는다. 길이 방향 전 영역에서 상부 철근과 하부 철근이 모두 인장력을 받게 된다. 그림 1 (d)는 상부 철근에 작용하는 인장력이 늑근에 의해 단계적으로 감소하는 것을 보여주고 있다.

그림 2는 대각 배근된 연결보에 대한 스트럿-타이 모델이다. 대각 배근은 일반적으로 일반 배근에 비해 주기 하중에 유리한 형태이다. 연결보에 전달되는 전단력은 주로 그림 2 (a)와 같은 대각 철근의 압축과 인장에 의해 지지되고, 일부는 그림 2(b)와 같은 트러스 작용에 의해 저항한다. 대각 배근된 경우의 스트럿-타이 모델은 두 가지 요소를 결합하여 구성하였다(그림 2 (c)). 주기 하중에서 대각 철근은 압축과 인장을 교대로 받으면서 하중을 지지하고, 주위 콘크리트는 철근의 안정성을 보장하는 역할을 한다.

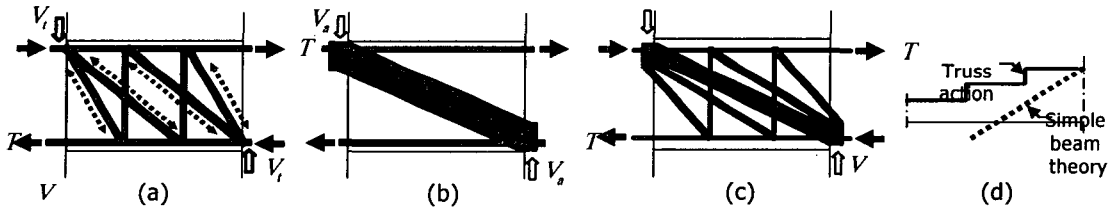


그림 1 일반 배근 (a) 트러스작용 (b) 아치작용 (c) 스트럿-타이모델 (d) 상부철근의 인장상태

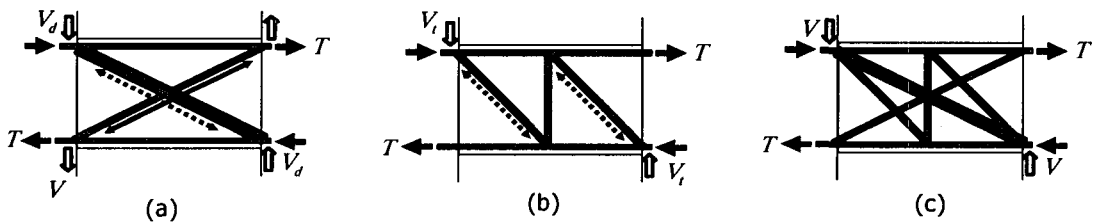


그림 2 대각 배근 (a) 대각철근작용 (b) 트러스작용 (c) 스트럿 타이 모델

각 절점부의 평형조건을 이용하여 각 절점부 크기와 스트럿의 크기를 결정하였다. 우선 수평 철근의 철근량을 이용하여 절점부의 크기를 정하였고, 늑근의 철근량을 이용하여 트러스 작용의 스트럿의 폭을 정하였다. 절점부의 나머지 크기를 아치작용과 대각철근작용의 스트럿의 폭으로 결정하였다. 그림 3은 일반배근과 대각배근에 대해 각 절점부의 크기를 나타내고 있다.

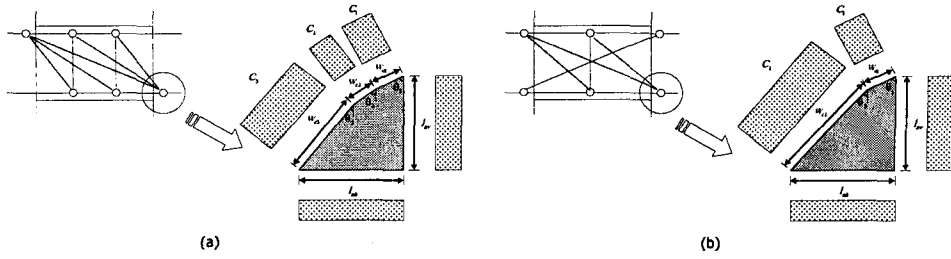


그림 3 스트럿 및 절점 크기 (a) 일반 배근 (b)대각 배근

3. 연결보의 전단강도와 변형능력

앞에서 구성한 스트럿-타이 모델을 토대로 비선형 트리스 해석을 수행하였다. 해석을 통해 하중-변위 관계를 조사하였다. 연결보의 전단강도의 저하는 변형에 따르는 콘크리트의 압축강도 감소에 기인한다. 소성 변형에 의한 보의 수평 방향 변형률은 압축강도 저하를 유발하는 콘크리트 스트럿의 주인장 변형률을 증가시킨다. 콘크리트 응력과 변형률의 관계는 Vecchio와 Collins의 순수 전단 부재 실험식을 사용하였다. 실험 연구에서 콘크리트의 주압축 응력(f_2)은 주압축 변형률(ϵ_2)뿐만 아니라 주인장 변형률(ϵ_1)에 관한 함수임을 보여주고 있다. 그 식은 다음과 같다.

$$f_2 = f_{2max} \left[2 \left(\frac{\epsilon_2'}{\epsilon_c'} \right) - \left(\frac{\epsilon_2'}{\epsilon_c'} \right)^2 \right], \quad \frac{f_{2max}}{f_c'} = \frac{1}{0.8 + 170\epsilon_1} \leq 1.0 \quad (1)$$

여기서, ϵ_c' 은 콘크리트가 최대 압축 강도를 지나는 변형률이다.

비선형 해석을 통해 변위에 따른 각 스트럿-타이 구성요소마다 수평방향 변형률(ϵ_h), 수직방향 변형률(ϵ_v), 콘크리트 스트럿 주압축방향 변형률(ϵ_2)을 구하면 콘크리트 압축강도를 감소시키는 주인장 변형률(ϵ_1)을 결정할 수 있다. 연결보의 스트럿-타이 모델의 콘크리트 스트럿의 강도는 위 식에서 구한 주인장 변형률을 기반으로 다음과 같이 구해진다.

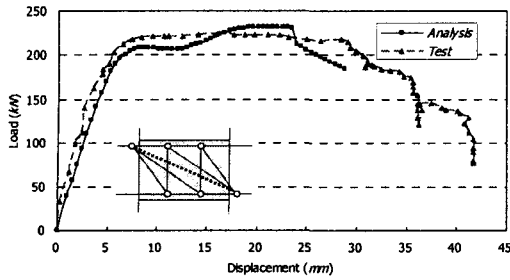
$$C_{nu} = f_{2cn} b_b w_{cn} (n=1, 2, 3) \quad (2)$$

변형을 고려한 연결보의 극한 전단 강도는 다음과 같다.

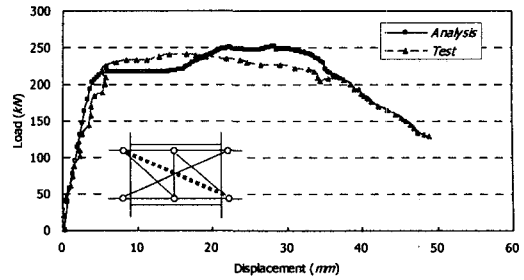
$$V_u = C_{1u} \sin \theta_1 + C_{2u} \sin \theta_2 + C_{3u} \sin \theta_3 \quad (3)$$

4. 검증 및 고찰

앞에서 제안한 전단 강도를 타 논문의 실험과 비교하였다. 일반 배근의 연결보의 경우 그림 4와 같은 거동을 확인하였다. 수평 휨 철근의 항복으로 연결보는 항복점에 도달하였고, 각 스트럿의 극한 강도 도달로 인해 극한 변위에 도달하는 것을 알 수 있었다. 식 (3)의 전단 강도가 극한 변위를 결정하는 것을 발견할 수 있었다. 대각 배근된 연결보는 그림 4와 같이 대각 인장 타이의 항복으로 항복점에 도달하였고, 트리스 스트럿의 파괴로 극한변위에 이르는 것을 알 수 있었다. 그러나 타 논문의 실험 결과에 의하면 대각 배근된 연결보의 경우 대각 압축 스트럿 주위 철근의 안정성 문제로 인해 파괴에 이른다고 알려져 있다. 이에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 생각된다.



(a)



(b)

그림 4 하중-변위 관계 (a) 일반 배근 (b) 대각 배근

5. 결론

본 연구에서는 스트럿-타이 모델을 이용하여 일반 배근과 대각 배근된 연결보에 대해 소성변형 이후의 전단 강도 감소를 효과적으로 나타내는 전단 강도식을 제안하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 변형이 증가함에 따라 대각 콘크리트 스트럿의 강도가 감소하여서 전단강도가 저하되는 것을 확인하였다.
- (2) 연결보의 항복변위는 일반적인 보와 같이 수평 휨 철근의 항복으로 발생한다.
- (3) 연결보의 극한변위는 변형에 따른 스트럿의 강도 저하로 인해 모든 스트럿이 극한 강도 도달에 의해 결정된다.

전단 강도는 스트럿의 강도 저하이외에도 철근과 콘크리트에 부착 관계, 골재 맞물림, 장부 작용에 의한 효과도 고려하여야 한다. 이에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술원 지원, 지진공학센터(KEERC)의 연구비 지원에 의하여 이루어 졌음을 밝히며 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Paulay, T., "Simulated Seismic Loading of Spandrel Beams," Journal of the structural Division, American Society of Civil Engineers, V. 97, NO. ST9, 1971, pp. 2407-2419.
2. Paulay, T., "Coupling Beams of Reinforced Concrete Shear Walls," Journal of the structural Division, American Society of Civil Engineers, V. 97, NO. ST3, 1971, pp. 843-862.
3. Vecchio, F. J., and Collins, M. P., "The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear," ACI structural Journal, V. 83, NO. 2, 1986, pp. 219-231
4. Priestley, M. J. N., Verma, R., and Xiao, Y., "Seismic Shear Strength of Reinforced Concrete Column," Journal of structural Engineering, American Society of Civil Engineer, V. 120, NO. 8, 1994, pp. 2310-2329.
5. Luciano, G., and Andrea, V., "Seismic Behavior of Short Coupling Beams with Different Reinforcement Layouts," ACI structural Journal, V. 97, NO. 6, 2000, pp. 876-885