

격자 스트럿-타이 모델을 이용한 철근콘크리트 보의 강도평가

Strength Evaluation of RC Beams Using Grid Strut-Tie Models

윤 영 목* 이 원 석** 김 병 현*** 정 찬 핵****
Yun, Young Mook Lee, Won Seok Kim, Byung Hun Jung, Chan Heak

ABSTRACT

In this study, the validity of the grid softened strut-tie model method suggested for concrete member analysis is examined through the ultimate strength evaluation of the reinforced concrete beams. The evaluated results of ultimate strength by the grid softened strut-tie model method were compared with those by the ACI 318-02 and the modified compression field theory, and European codes.

1. 서론

일반 철근콘크리트 보의 전단 역학적 거동 특성은 휨을 동반한 전단거동을 나타냄으로써 철근콘크리트 보의 전단파괴를 예측할 수 있지만, 전단지간이 2.5이하인 철근콘크리트 보의 경우에는 미소한 처짐에도 불구하고 급작스런 전단파괴양상을 나타내므로 전단파괴를 예측하기 어렵다. 스트럿-타이 모델 방법은 전단지간 대 유효높이의 비가 작은 콘크리트 깊은 보의 설계를 위한 근본적인 접근이라고 할 수 있다. 이러한 스트럿-타이 모델 방법에 Hsu에 의해 제안된 연화효과^(2,4,5) 개념을 도입하고 그 모델을 격자로 형성한 것이 격자 연화 스트럿-타이 모델 방법이다.

본 논문에서는 철근콘크리트 깊은 보의 극한강도 평가를 위해 ACI 설계기준, 수정 압축장 이론, 유럽설계기준에 따라 평가한 결과들을 제안된 격자 연화 스트럿-타이 모델 방법의 결과와 비교 분석함으로써 콘크리트 깊은 보를 해석하는데 격자 연화 스트럿-타이 모델 방법이 합리적이고 적합한 방법임을 검증하는데 목적이 있다.

2. 격자 연화 스트럿-타이 모델 방법

연화 트러스 모델에서는 복부 전단영역의 응력 상태가 균일하고 압축응력의 흐름은 압축 스트럿의 방향과 평행하다고 가정한다. 그러나 실제로 응력의 흐름은 분산되어 있으므로 균일하다고 볼 수 없

* 정회원, 경북대학교 토목공학과 부교수

** 정회원, 경북대학교 토목공학과 박사과정

*** 정회원, 경북대학교 토목공학과 박사수료

**** 정회원, 경북대학교 토목공학과 박사과정

다. 따라서 스트럿-타이 모델은 깊은 보의 응력흐름을 잘 표현할 수 있는 방법이다. 기존의 스트럿-타이 모델은 응력의 흐름에 따라 스트럿과 타이를 배치하여 해석자의 주관에 따라 여러 형태의 모델이 제시될 수 있다는 단점이 있었으나, 격자형 스트럿-타이 모델은 스트럿-타이 모델에 대해 일관성을 가진다.

격자 스트럿-타이 모델에서 각 구성부재의 면적은 부재 내에서 취할 수 있는 최대면적으로 하였다. 수직 및 수평 부재의 폭은 인접한 수평 및 수직 부재의 길이의 10분의 2를 취하며, 대각부재의 면적은 결정된 수직 및 수평 부재의 폭의 길이방향 중심에서 격자의 대각부재까지의 수직거리를 평균한 값에 2배를 취해 결정한다. 그리고 콘크리트 덮개가 있는 부분의 부재 폭은 덮개의 2배와 위 방법으로 구해진 폭 중에서 더 작은 것으로 취한다.

단면적이 결정된 트러스 구조물에 충분하중을 작용시켜 재료 비선형 유한요소해석을 수행하여 각 충분하중 단계에서 스트럿-타이 모델 구성부재의 전체응력과 변형률을 구한다. Zhang과 Hsu⁽⁵⁾가 제안한 연화 콘크리트 스트럿의 응력-변형률 관계를 이용하여 각 충분하중 단계에서의 단독 배치된 콘크리트 스트럿의 유효강도를 결정한다. 응력-변형률 관계로부터 결정된 임의 중분단계에서의 유효강도가 단면적이 결정된 격자형 스트럿-타이 모델의 비선형 유한요소해석으로부터 결정된 임의 중분하중단계에서의 콘크리트 스트럿의 응력과 같아질 때 콘크리트 부재는 콘크리트 스트럿의 파쇄에 의한 파괴단계에 도달하였다고 본다. 콘크리트 타이와 철근 타이가 중복된 위치에서 철근 타이의 항복에 의한 콘크리트 부재의 극한강도 평가시에는 Hsu⁽⁵⁾에 의해 제안된 인장 콘크리트의 영향을 고려한 연화되는 인장철근의 응력-변형률 관계를 이용하였다. 격자 스트럿-타이 모델의 재료 비선형 유한요소해석시 재료의 접선탄성계수는 응력-변형률 관계식을 미분한 값으로 취하였으며, 격자 연화 스트럿-타이 모델 방법에 의한 콘크리트 부재의 극한강도 평가과정은 그림 1과 같다.

3. 콘크리트 깊은 보의 극한강도 평가

본 장에서는 격자 연화 스트럿-타이 모델 방법의 타당성을 검증하기 위해 실험파괴된 52개의 단순지지 철근콘크리트 깊은 보⁽⁶⁾를 ACI 318-02 설계기준, 수정 압축장 이론, 유럽의 EC2 및 CEB-FIP 설계기준, 그리고 격자 연화 스트럿-타이 모델 방법을 이용하여 평가하고 그 결과를 비교·분석하였다. A, B, C, D의 네 개의 그룹으로 구성된 52개의 단순지지 철근 콘크리트 깊은 보는 Smith와 Vantsiotis에 의해 실험파괴 되었다.⁽⁶⁾ 각 그룹별 전단 지간비 a/d 의 값은 0.77, 1.01, 1.34, 2.01이며 모든 실험파괴된 보의 단면은 직사각형이다. 각각의 부재들은 지간 중앙으로부터 4in. 떨어진 압축면의 두 지점에서 직접 재하되었으며 주인장 철근의 충분한 정착을 확보하기 위해 부재의 단부는 지점 중앙으로부터 12in. 연장되었다. 종방향의 주인장 철근은 굽힌 부분이나 갈고리가 없으며 지점과 두 재하지점에는 4x4x1in.의 재하판이 사용되었다. 실험결과 모든 보는 전단 파괴되었으며 전단파괴시의 강도는 휨이론에 의해 예측되어진 휨파괴강도보다 낮았다.

ACI 설계기준⁽¹⁾에 의한 전단강도 평가에서 콘크리트가 저항하는 전단강도는 간략식과 정밀식의 값 중 작은 값을 취하였다. 일반 보의 전단에 대한 위험단면은 받침부 내면으로부터 경간 중앙으로 유효깊이 d 만큼 떨어진 곳으로 하였으며, 깊은 보의 경우는 받침부 전면에서 $0.5d \leq d_c$ (d_c 는 전단지간)의 거리로 취하였다. 수정압축장 이론⁽⁴⁾에 의한 강도평가에 있어서 전단에 대한 위험단면은 받침부 내면으로부터 경간 중앙으로 유효깊이 d 만큼 떨어진 곳으로 취하였다.

EC2 설계기준⁽⁷⁾의 식은 콘크리트 스트럿의 압축응력을 f_{cd} 로 제한함으로써 콘크리트의 압축파괴를 피하고 연성을 확보하고자 하였다. 여기서 콘크리트 스트럿의 d 값은 트러스 모델에 따라 변화한다. 소성이론에 근거한 콘크리트 부재의 복부 전단강도는 전단철근과 콘크리트 스트럿이 동시에 항복응력과

균열에 도달될 때 콘크리트의 저항은 무시된 철근 스테럽만이 저항하는 값으로 결정된다. CEB-FIP 설계기준⁽⁸⁾에 의한 콘크리트 부재의 전단강도 평가과정은 EC2 설계기준을 이용하는 경우와 동일하다. 즉 취성파괴를 피하고 연성을 유도함과 동시에 균열발생 후 콘크리트가 부담하는 전단강도를 무시함으로써 좀 더 안전측으로 전단설계에 접근하고 있는 것이다.

격자 연화 스트럿-타이 모델 방법에 의한 콘크리트 부재의 극한강도 평가는 2장에서 설명한 절차에 따라 수행하였다. 그림 2는 보 2A6-41에 대해 2단으로 구성된 격자 스트럿-타이 모델을 나타낸다. 배근된 수직 및 수평 철근량은 배근위치에서 수직 및 수평 구성부재와의 거리비를 이용하여 각 수직 및 수평 구성부재의 단면적으로 분배하였다. 이렇게 구성된 격자형 스트럿-타이 모델에 재료 비선형 유한요소해석을 수행하고, 각 증분하중단계마다 모든 구성부재의 응력과 변형률을 구하여 각 구성부재의 파쇄 혹은 파단여부를 판단한다. 보 2A6-41에서는 증분하중의 합이 175kN일때 52 및 61번 구성부재에서 콘크리트 스트럿의 파쇄가 일어나는 것으로 나타나, 이 보의 극한강도는 171kN으로 결정되었다. 그리고 격자의 크기에 대한 영향을 고려하기위해 3단 및 4단의 격자로 구성하여 동일한 방법으로 극한 강도를 평가하였다. 이와 동일한 절차와 형태로 격자 스트럿-타이 모델 방법을 이용하여 나머지 부재들의 극한강도를 평가하였다.

4. 결과고찰

표 1은 실험에 의해 실측된 전단강도와 이에 대한 격자 연화 스트럿-타이 모델방법에 의해 예측된 전단강도와 설계기준들에 의해 예측된 전단강도 비를 나타낸다. 격자 연화 스트럿-타이 모델 방법의 결과는 실험 파괴된 52개의 콘크리트 깊은 보의 전단강도를 예측하는데 보의 세부적인 요소와 관계없이 비교적 정확하게 강도를 예측하였으며 표준편차도 작다. ACI 설계기준과 수정 압축장 이론에 의한 결과는 비교적 표준편차는 작으나 강도 예측이 매우 보수적이며, EC2와 CEB-FIP 설계기준에 의한 결과는 표준편차가 크고 예측된 강도도 실험값과 큰 차이를 보인다. 그러므로 제안된 격자 연화 스트럿-타이 모델 방법에 의한 강도예측 결과는 평균값과 표준편차 모두 설계기준들의 결과에 비해 양호한 결과를 보여주고 있다.

5. 결론

1. 격자 연화 스트럿-타이 모델 방법은 실험파괴된 52개의 콘크리트 깊은 보의 극한강도를 다른 기존의 방법에 비해 비교적 편차가 작으면서 정확하게 강도를 평가하였으므로 철근콘크리트 깊은 보의 강도평가에 있어 합리적이고 적합한 방법으로 판단된다.
2. 격자 연화 스트럿-타이 모델 방법은 기존의 다른 강도평가 방법에 비해 양호한 결과를 나타내긴 했으나 정확한 강도평가 및 설계를 위해서는 격자의 크기에 따른 규정을 명확히 하는 연구를 수행해야 할 것이다.

참고문헌

- (1) ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02)," *American Concrete Institute*, Farmington Hills, Michigan, 2002.
- (2) Mau, S. T. and Hsu, T. T. C., "Shear Strength Prediction for Deep Beams with Web Reinforcement," *ACI Structural Journal*, V. 84, No. 6, Nov-Dec. 1987, pp. 513-523.
- (3) Tan, K. H. Kong, F. K. and Weng, L. W., "High-Strength Reinforced Concrete Deep and Short Beams: Shear Design Equations in North America and UK Practice," *ACI Structural Journal*, V. 95, No. 3, May-June 1998, pp. 318-329

- (4) Vecchio, F. J. and Collins, M. P., "Compression Response of Cracked Reinforced Concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V. 119, No. 12, Dec. 1993, pp. 359-361.
- (5) Zhang, L. X. B. and Hsu, T. T. C., "Behavior of Analysis of 100MPa Concrete Membrane Elements," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V. 124, No. 1, Jan.. 1998, pp. 24-34.
- (6) Smith, K. N. and Vantsiotis, A. S., "Shear Strength of Deep Beams," *ACI Journal. Proceedings V. 79, No. 3*, May-June 1982, pp. 201-213.
- (7) *Eurocode No.2*, "Design of concrete Structures, part 1 : General rules and rules for buildings", Thomas Telford, London, 1991.
- (8) Comité Euro-International du Béton - Fédération International de la Précontrainte, *CEB-FIP model code 1990*, Switzerland, July 1991.

표 1 콘크리트 깊은 보의 극한강도 평가

구분	V_{cal}/V_{test}						
	ACI	수정압축장 이론	EC2	CEB-FIP	격자 연화 스트럿-타이 모델 방법		
					2단	3단	4단
평균	0.66	0.63	1.94	1.69	1.01	0.92	0.91
표준편차	0.12	0.24	1.08	0.34	0.10	0.09	0.10

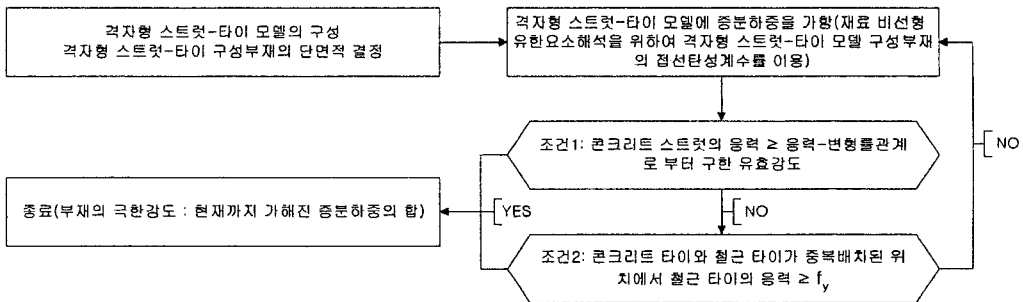


그림 1 격자 연화 스트럿-타이 모델방법에 의한 극한강도평가 알고리즘

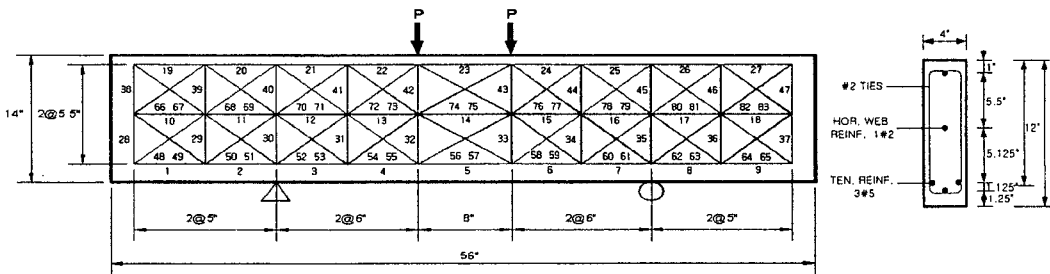


그림 2 2단 격자 스트럿-타이 모델