

비선형 스트럿-타이 모델 방법에 의한 철근콘크리트 코벨의 강도 평가

Strength Evaluation of Reinforced Concrete Corbels using Nonlinear Strut-Tie Model Approach

윤 영 목* 신 용 목**
Yun, Young Mook Shin, Yong Mok

ABSTRACT

The concrete corbels consist of various failure mechanisms such as the yielding of the tension reinforcement, the crushing or splitting from compression concrete struts, and localized bearing or shearing failure under the loading plate. However, predicting those failure mechanisms is very difficult. In this study, the ACI 318-02, the softened strut-tie model approach, and the nonlinear strut-tie model approach are applied to ultimate strength analysis of normal strength concrete corbels tested to failure. From the result of the analysis, an effective analysis and design method of normal strength concrete corbels is suggested.

1. 서론

철근 콘크리트 기둥에서의 코벨(corbel) 또는 브래킷(bracket)은 주로 보나 거더 등을 지지하기 위하여 프리캐스트 구조에 사용된다. 프리캐스트 구조가 널리 사용됨에 따라 보다 안정적인 코벨의 설계가 점차 중요시되고 있다. 콘크리트 코벨은 주인장 철근의 항복, 콘크리트 스트럿의 압축에 의한 파괴, 하중의 기둥면을 따라서 발생하는 전단파괴 등의 여러 가지 형상의 파괴메카니즘을 형성하고 있으나, 이러한 파괴메카니즘을 예측하기는 어렵다.

콘크리트 코벨의 해석/설계를 위하여 ACI 설계기준⁽¹⁾, 연화 스트럿-타이 모델 방법⁽²⁾, 비선형 스트럿-타이 모델 방법 등⁽⁴⁾이 제시되고 있다. ACI 설계기준은 전단마찰이론에 근거를 둔 것으로, 콘크리트 스트럿의 압축파괴 거동을 설계기준에 반영하고 있지 않을 뿐 아니라 코벨의 기하학적 형상에 관한 제약 때문에 실 적용성의 한계가 있다. 연화 스트럿-타이 모델 방법은 일정한 형태의 하중을 받는 보-기둥의 연결부, 전단벽, 깊은 보, 그리고 철근콘크리트 코벨의 극한 전단강도를 평가할 수 있는 해석적 방법으로, 이것을 실 콘크리트 부재 설계에 적용하기는 쉽지 않다. 이러한 문제점은 철근콘크리트 코벨의 해석 및 설계를 코벨의 기하학적 형상 및 하중조건에 상관없이 동시에 수행할 수 있는 비선형 스트럿-타이 모델 방법에 의해 보완할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 ACI 설계기준, 연화 스트럿-타이 모델 방법, 그리고 비선형 스트럿-타이 모델 방법을 실험, 파괴된 일반강도 철근콘크리트

* 정회원, 경북대학교 토목공학과 부교수

** 정회원, 경북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

코벨의 강도해석에 적용하였다. 강도해석 결과의 비교, 분석을 통해 일반강도 철근콘크리트 코벨의 합리적인 해석 및 설계 방법을 제시하였다.

2. 콘크리트 코벨의 해석 및 설계 방법

콘크리트 코벨은 주인장 철근의 항복, 콘크리트 스트럿의 압축, 전단, 그리고 지압 등의 여러 가지 형상의 파괴메카니즘을 보인다. 본 연구에서는 ACI 설계기준의 수직 전단력에 의한 전단파괴, 주인장 철근의 항복으로 인한 인장파괴, 그리고 모멘트에 의한 휨파괴 등과 관련된 설계식을 적용하여 실제 철근콘크리트 코벨의 극한강도를 평가하였다. 연화 스트럿-타이 모델 방법으로 철근콘크리트 코벨의 극한강도를 평가하기 위하여, 스트럿-타이 모델을 선정한 후에 수직하중을 가정하여 작용시키고, 주압축 경사스트럿이 수평 주인장철근과 이룬 각도에 따라 참고문헌 (2)에서 제안한 경사, 수평, 그리고 수직 메카니즘 조건을 적용하고, 스트럿-타이 모델의 평형조건으로부터 계산된 주압축 경사스트럿의 응력과 이 스트럿의 응력-변형을 관계로부터 결정되는 유효강도를 비교하고, 이들 유효강도와 응력이 같아질 때의 수직하중(=극한하중)을 구하였다. 비선형 스트럿-타이 모델 방법을 적용한 경우, 먼저 무근콘크리트의 압축주응력 흐름과 철근의 배근상세를 근거로 스트럿-타이 모델을 선정한 후, 콘크리트 스트럿의 유효강도 및 스트럿과 타이의 단면적을 결정하였다. 콘크리트 인장저항능력 및 철근의 압축저항능력을 고려하기 위해 콘크리트 타이 및 철근 스트럿을 각각 철근 타이 및 콘크리트 스트럿의 위치에 중복으로 추가하였다. 극한하중까지의 철근콘크리트 코벨 내부의 발생 가능한 하중경로의 변화, 즉 힘의 재분배과정을 스트럿-타이 모델 해석 시 잘 반영하기 위하여 선정된 스트럿-타이 모델 자체의 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 철근콘크리트 코벨의 극한강도는 스트럿-타이 모델의 안정성 검토, 기하학적 적합성 검토, 절점영역의 파괴메카니즘 발생여부 검토 등을 통해 평가하였다. 그림 1은 비선형 스트럿-타이 모델 방법에 의한 콘크리트 부재의 해석/설계 알고리즘을 나타낸 것이다.

3. 콘크리트 코벨의 강도 평가

Mattock et al.⁽³⁾에 의해 실험, 파괴된 총 10개의 일반강도 철근콘크리트 코벨의 극한강도를 비선형 스트럿-타이 모델 방법으로 평가한 후, ACI 설계기준과 연화 스트럿-타이 모델 방법에 의한 결과와 비교하였다. 전단 지간 대 높이의 비가 0.67인 실험부재 A2의 배근상세는 그림 2와 같으며, 이 부재의 무근콘크리트 평면응력 유한요소해석을 통해 얻은 압축주응력의 흐름은 그림 3과 같다. 이 부재의 스트럿-타이 모델은 연화 스트럿-타이 모델 방법에 의한 해석결과와 비선형 스트럿-타이 모델 방법에 의한 해석결과를 비교하기 위하여 연화 스트럿-타이 모델 방법에서 사용된 모델에 최대한 가깝게, 그리고 압축주응력의 흐름, 배근상세, 균열양상 등을 고려하여 선정하였다. 스트럿-타이 모델의 선정 시 22-25번 철근타이는 배근된 철근의 위치를 고려하여 배치하였으며, 스트럿은 일반적으로 코벨에서 잘 나타나는 압축주응력의 흐름과 균열양상을 잘 반영할 수 있도록 위치시켰다. 또한 콘크리트의 인장능력을 고려하기 위하여 이들 철근타이의 위치에 36-39번 콘크리트 타이를 추가로 배치하였다. 선정한 A2부재의 스트럿-타이 모델은 그림 4와 같다.

선정한 스트럿-타이 모델의 콘크리트 스트럿의 유효강도는 참고문헌 (4)의 방법으로 구하였다. 철근 타이의 유효강도는 철근의 항복강도를 취하였다. 스트럿과 타이의 유효강도 범위 내에서 이들의 단면적을 참고문헌 (4)의 방법을 이용하여 산정하였다. 산정한 철근타이의 단면적은 실 배근된 철근의 단면적으로 대치시켰다. A2부재 스트럿-타이 모델이 받을 수 있는 최대하중 상태에서 결정된 차원화된 스트럿-타이 모델의 형상은 그림 5와 같다. A2부재의 스트럿-타이 모델이 받을 수 있는 최대하중은 실험파괴강도의 130%로 나타났는데, 이는 실험파괴강도의 130% 이상의 하중을 스트럿-타이 모델에

가했을 때 스트럿-타이 모델이 구조적으로 안정한 상태였으나, 그림 5에서 나타난 것과 같이 34번과 35번의 스트럿의 단면적이 코벨의 외부경계면을 초과하여 기하학적 적합조건을 만족시킬 수 없었기 때문이다. 최대하중을 결정한 후, 위험절점영역(절점 a 및 k)의 유한요소절점에 위험절점영역을 형성하는 스트럿과 타이에 의한 하중 및 외부하중을 증분하중으로 부과하였다. 절점영역의 유한요소해석 모델의 경계조건은 각 절점영역에서의 스트럿과 타이의 교차된 중심에 힌지를 부과하고, 절점 a 절점영역의 경우 하중판에 의한 경계면에 수직롤라, 절점 k 절점영역의 경우 그림 6의 6번 수평스트럿의 경계면에 수평롤라를 부과하였다. 그림 6은 A2부재의 위험절점영역인 절점 k 절점영역의 스트럿과 타이에 의해 형성된 절점영역의 형상을 보여준다. 그림 7은 A2 부재의 스트럿-타이 모델의 절점영역 해석결과 및 압축주응력 흐름을 나타내고 있으며, 실험파괴하중의 98.8%가 작용할 때 3번과 6번 스트럿의 경계면을 연결하는 콘크리트 파쇄균열 진전에 의한 파괴메카니즘이 발생한 것을 알 수 있다. 절점영역의 압축주응력 흐름은 그림 3의 동일한 영역에서의 압축주응력 흐름과 유사함을 알 수 있다. 절점 a 절점영역에서는 파괴메카니즘이 발생되지 않았다. 각 방법에 의한 철근콘크리트 코벨의 강도평가 결과는 표 1에서 비교하였다.

4. 결론

실험, 파괴된 10개의 일반강도 철근콘크리트 코벨의 강도를 ACI 설계기준으로 평가한 결과, 전단지간대 유효깊이의 비가 작은 경우 실제 파괴강도보다 상당히 작은 강도값을 예측하였고, 전단지간대 유효깊이의 비가 1에 가까운 값을 가질수록 실제파괴강도보다 상대적으로 큰 강도를 예측함을 알 수 있었다. 연화 스트럿-타이 모델 방법은 비록 일반강도 철근콘크리트 코벨의 강도평가 과정 중에 몇몇 직감에 의한 지나친 가정을 도입하였지만 코벨의 파괴강도를 비교적 잘 예측하였다. 한편 비선형 스트럿-타이 모델 방법을 적용한 경우, 스트럿-타이 모델 해석에 의한 철근콘크리트 코벨의 파괴모드와 실제 실험에서 나타난 파괴형상은 조금 차이를 보이나 이들 부재의 파괴강도는 기타의 두 방법보다 더욱 정확하게 평가하였다. 한정된 수의 일반강도 철근콘크리트 코벨의 강도해석을 통해 본 연구에 적용한 세가지 방법의 타당성 및 우수성을 평가하기엔 무리가 있으나, 본 연구의 결과로 미루어 볼 때 하중 및 기하학적 형상 조건에 관계없이 철근콘크리트 코벨의 강도를 정확히 평가 할 수 있는 비선형 스트럿-타이 모델 방법은 다양한 종류의 철근콘크리트 코벨의 설계에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02)", American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2002.
2. Hwang, S.J. and Lee, H.J., "Analytical Model for Predicting Shear Strengths of Interior Reinforced Concrete Beam-Column Joints for Seismic Resistance", *ACI Structural Journal*, Vol. 97, 2000, pp. 34-44.
3. Mattock, A.H., Chen, K.C., and Soongswang, K., "Behavior of reinforced Concrete Corbels", *PCI Journal*, Vol. 21, 1976, pp. 52-77.
4. Yun, Y.M., "Nonlinear Strut-Tie Model Approach for Structural Concrete", *ACI Structural Journal*, Vol. 97, 2000, pp. 581-590.

표 1 일반강도 철근콘크리트 코벨의 극한강도

Specimen	a/d	$V_{cv, test}$ (kN)	$\frac{V_{cv, test}}{V_{cv, calc}}$		
			ACI 설계기준 ⁽¹⁾	연화 스트럿-타이 모델 방법 ⁽²⁾	비선형 STM 방법 ⁽⁴⁾
A2	0.67	158.3	0.93	1.24	1.01
A3	1.01	124.5	0.68	0.98	0.93
B2	0.67	173.0	1.05	1.24	1.08
B3A	1.01	187.3	0.98	1.22	1.14
C1	0.45	195.7	1.21	1.17	1.06
C2	0.68	177.9	1.1	1.20	1.10
C2A	0.68	180.1	1.24	1.26	1.09
C3	1.02	167.2	0.94	1.04	1.10
D2	0.68	151.2	1.43	1.13	1.18
D3	1.01	145.9	1.24	1.19	1.03
		평균	1.08	1.17	1.07
		표준편차	0.21	0.09	0.07

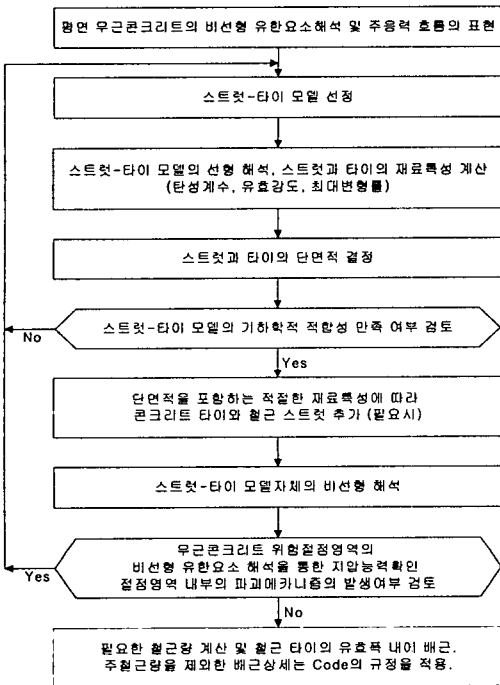


그림 1 비선형 스트럿-타이 모델 방법에 의한 콘크리트 부재의 해석/설계 알고리즘

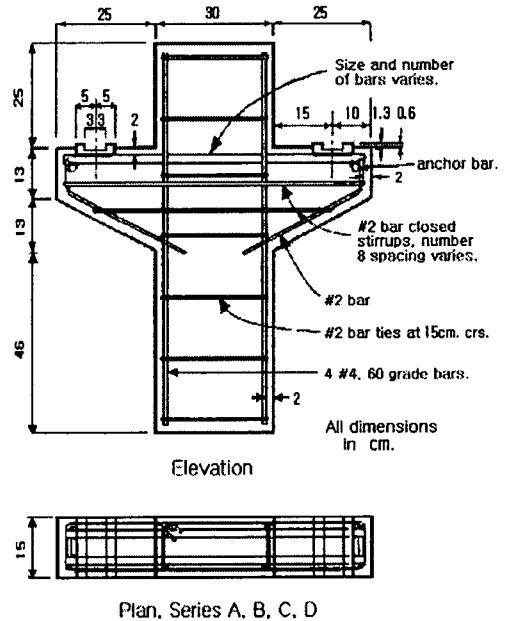


그림 2 콘크리트 코벨(A2 부재)의 배근상세

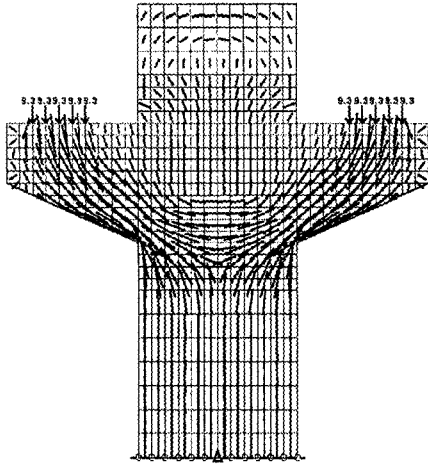


그림 3 A2 부재의 평면응력 유한요소해석 모델 및 압축주응력 흐름

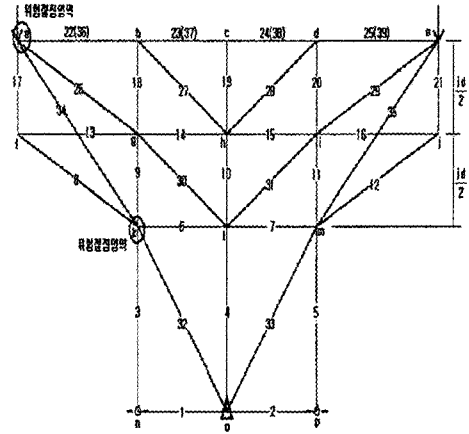


그림 4 A2 부재 스트럿-타이 모델

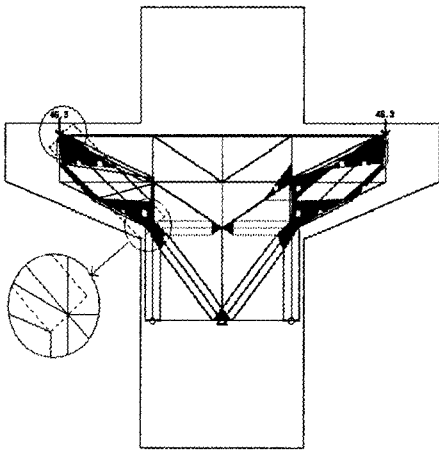


그림 5 130% 극한하중하에서 차원화된 A2 부재 스트럿-타이 모델의 형상

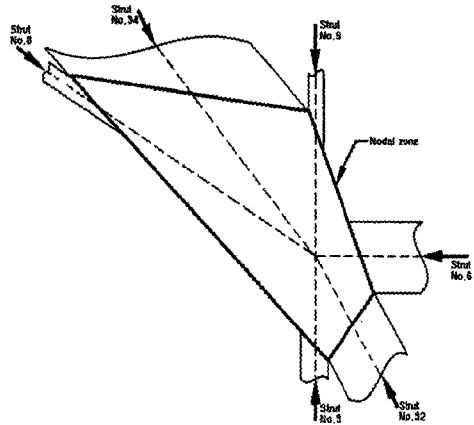
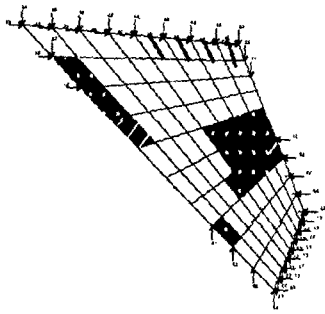
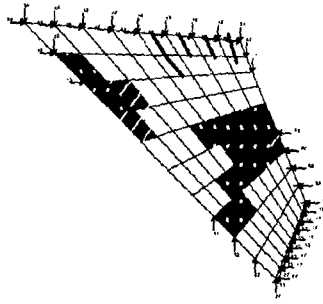


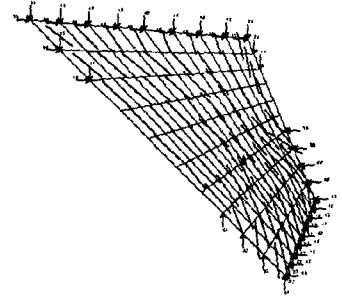
그림 6 절점 k 절점영역의 형상



① 파괴이전상태(96.2% 극한강도)



② 파괴 상태(98.8% 극한강도)



③ 압축주요응력 분포

그림 7 절점 K 절점영역의 해석 결과