

# 콘크리트 부재의 해석/설계를 위한 선형 및 비선형 스트럿-타이 모델 방법

## Linear and Nonlinear Strut-Tie Model Approaches for Analysis and Design of Structural Concrete

윤영목\*      김병헌\*\*

Yun, Young Mook      Kim, Byung Hun

### ABSTRACT

In this paper, the linear and nonlinear strut-tie model approaches for the analysis and design of concrete structures are suggested. The validity of the approaches are examined through the strength analysis of four dapped-end beams tested to failure. According to the analysis results, the nonlinear strut-tie model approach which takes the various characteristics of nonlinear behaviors into account in the analysis and design of structural concrete and predicts the strength of structural concrete proven to be an effective method for structural analysis and design.

#### 1. 서론

스트럿-타이 모델의 적용에 있어서 많은 관심의 대상이 되는 것은 기존의 선형적인 스트럿-타이 모델 방법과 비선형 스트럿-타이 모델 방법의 적용 여부이다. 실제 설계되고 있는 대부분의 콘크리트 구조물은 하중조건, 기하학적 조건, 재료의 성질, 그리고 콘크리트와 보강재의 상호작용 및 콘크리트의 균열 등의 요인에 의해 비선형적 거동을 한다. 따라서 콘크리트 구조물의 거동을 보다 정확하게 예측하여 설계에 반영하기 위해서는 비선형 수치해석기법에 기초를 둔 스트럿-타이 모델 방법을 이용해야 한다. 본 연구에서는 선형 및 비선형 스트럿-타이 모델 방법을 이용하여 실험, 파괴된 턴이진 보의 극한강도 및 거동을 평가하고, 그 결과를 각각 비교, 분석함으로써 어느 방법이 좀더 효과적이고 정확한 해석 및 설계 방법인지를 검증해보았다.

#### 2. 선형 및 비선형 스트럿-타이 모델 방법

본 연구에서 정의한 선형 스트럿-타이 모델 방법은 스트럿-타이 모델의 선정을 위해 무근콘크리트의 선형유한요소해석을 수행한다는 점과 절점영역 경계면에서의 유효강도를 근거로 절점영역의 안전성을 판단하는 점을 제외한 콘크리트 스트럿의 유효강도 결정방법, 스트럿과 타이의 단면적 산정방법, 그리고 철근배근 원칙 등은 비선형 스트럿-타이 모델 방법의 것과 동일하다고 보았다. 철근 타이의 위치에 콘크리트 타이를 추가하지 않으나, 콘크리트 부재의 압축영역에 배근된 압축철근은 철근 스트럿을 콘크리트 스트럿의 위치에 중복으로 추가하여 고려할 수 있다. 이 방법에서는 스트럿-타이 모델이 기하

\* 정회원, 경북대학교 토목공학과 부교수

\*\* 정회원, 경북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

학적 적합조건을 만족하면서 추가적인 하중에 저항할 수 있다라고 철근 타이의 변형률이 항복변형률  $\epsilon_y$ 보다 커서는 안되며, 이조건을 만족시키는 최대하중이 극한하중이 된다. 절점영역의 강도는 절점영역 경계면에서의 콘크리트 스트럿의 유효강도 값을 기초로 검토한다.

이에 반해 비선형 스트럿-타이 모델 방법에서는 스트럿-타이 모델의 선정 및 스트럿의 유효강도 결정을 위해 무근콘크리트의 비선형유한요소해석을 수행하고, 콘크리트의 인장저항능력 및 철근의 압축저항능력을 콘크리트 부재의 해석 및 설계에 고려하기 위하여 콘크리트 타이 및 철근 스트럿을 각각 철근 타이 및 콘크리트 스트럿에 중복으로 추가한 스트럿-타이 모델을 사용할 수 있다. 또한 이 방법에서는 극한하중 단계까지의 과정에서 콘크리트 부재 내부의 발생 가능한 하중경로의 변화, 즉 힘의 재분배과정을 콘크리트 부재의 해석 및 설계 시 정확히 반영하기 위하여 선정된 스트럿-타이 모델 자체의 비선형 유한요소해석을 수행한다. 절점영역에서의 콘크리트 강도는 (a)반력, 스트럿, 프리스트레스 정착판, 그리고 인접 부재의 철근과 후프형 철근 등에 의한 구속, (b)인장 변형된 타이가 압축을 받는 절점영역의 안이나 절점영역을 가로질러 정착될 때 절점영역에서의 변형 불연속의 영향, 그리고 (c)절점영역 안에서 혹은 뒤에서의 인장철근의 정착으로부터 기인하는 할열응력 및 철근의 축에 의한 지지응력과 같은 많은 요소들에 좌우된다. 비선형 스트럿-타이 모델 방법에서는 절점영역의 강도를 비선형 무근 콘크리트 유한요소해석을 수행, 절점영역에서의 파괴메카니즘의 발생여부를 판단하여 결정한다. 이때 절점영역 내부에 위치한 철근이 절점영역의 강도 및 거동에 미치는 영향은 철근에 작용하는 힘을 절점영역의 유한요소모델의 절점에 수동적인 외부하중으로 작용시켜 고려한다. 마지막으로, 비선형 스트럿-타이 모델 방법에서는 콘크리트 부재의 강도를 스트럿-타이 모델의 안정성 검토, 스트럿-타이 모델의 기하학적 적합성 검토, 절점영역의 파괴메카니즘 발생여부 검토 등을 통해 평가하고, 콘크리트 부재의 거동을 선정된 스트럿-타이 모델 자체의 비선형 유한요소 해석을 통해 평가한다. 선형 및 비선형 스트럿-타이 모델의 주요 특징은 표 1에서 비교하였다.

### 3. 텍이진 보의 강도평가

본 연구에서는 Texas대학<sup>(2)</sup>에서 실험, 파괴된 텍이진 보 단부의 시험체 ST1, ST2, PCI와 MF의 극한강도 및 그 거동을 선형 및 비선형 스트럿-타이 모델 방법을 이용하여 평가하였다. 이들 시험체의 콘크리트 압축강도는 각각 43.3, 51.5, 51.5, 그리고 44.3MPa이다. 시험체에 배근된 철근의 항복강도는 항복강도는 413.7MPa이며, 스트럽의 항복응력은 331MPa이다. 네 시험체의 기하학적 형상은 그림 1의 텍이진 보로부터 결정된 것으로, 이들 시험체의 배근상세 및 실험결과등의 정보는 참고문헌<sup>(2)</sup>에 자세히 나타나 있다. ST1 시험체의 경우 690kN의 하중에서 시험체 상부 스테럽의 정착파괴와 압축영역 콘크리트의 파쇄에 의해 파괴되었다. ST2 시험체에서는 578kN의 하중에서 압축영역 콘크리트가 파쇄에 의해 파괴되었으며, PCI 시험체는 712kN의 하중에서 ST1과 동일한 파괴모드에 의해 파괴되었으며, MF 시험체는 압축영역 콘크리트의 파쇄에 의해 600kN의 하중에서 파괴되었다.

시험체의 극한강도 및 거동을 평가하기 위한 스트럿-타이 모델의 선정 시 스트럿의 위치 및 방향은 무근콘크리트 평면응력해석에 근거한 주압축응력 흐름에 따라 결정하였으며, 타이의 위치는 배근상세를 고려하여 결정하였다. 선형 스트럿-타이 모델 방법에서 절점영역의 강도검토를 위해 AASHTO-LRFD 설계기준<sup>(1)</sup>에서 제안한 절점영역 경계면 유효강도값을 사용하였다. 비선형 스트럿-타이 모델 방법에서는 콘크리트에 균열이 발생하기 전에 콘크리트가 인장력에 저항할 수 있으므로 콘크리트 타이를 수직 및 수평 철근타이의 위치에 추가하였다. 극한하중을 받는 ST1 시험체에서의 압축주응력 흐름 및 이를 근거로 선정된 스트럿-타이 모델은 그림 2와 같다. ST1 시험체에 선형 스트럿-타이 모델 방법

을 적용할 경우 그림 3(a)와 같이 기하학적 적합성에는 문제가 없었으나 주 인장타이인 6번 부재의 변형률이  $\epsilon_y$ 를 초과함으로써 최대하중은 실험파괴하중의 78%로 결정되었다. 이 때 절점영역 경계면에서의 압축응력은 AASHTO-LRFD의 제안 강도값을 초과하지 않았다. 비선형 스트럿-타이 모델 방법을 적용할 경우 그림 3(b)와 같이 18번 스트럿에 의해 실험파괴하중의 120%가 기하학적 적합조건과 안정조건을 만족하는 최대하중으로 결정되었으며, 그림 4(a)와 같은 형상을 가지는 절점 B를 위험절점영역으로 선정하여 강도검토한 결과 절점영역의 파괴전 후의 파괴형상이 그림 4(b) 및 (c)와 같이 나타났다. 실험파괴하중의 98%가 작용하였을 때 이 절점에서 파괴메카니즘이 발생하였으며, 실험에서 발생하는 파괴모드와 동일한 파괴모드를 가지는 것으로 나타났다. ST2, PCI 및 MF 시험체에 대해서도 ST1 시험체의 경우 동일한 과정을 적용, 해석을 수행하였다. 선형 및 비선형 스트럿-타이 모델 방법의 의해 평가된 극한강도는 표 2에서 비교하였다. 시험체의 거동을 평가하기 위해 선정한 스트럿-타이 모델의 유효요소해석 시 극한하중을 20단계의 증분하중으로 작용시켰으며 그림 5와 같이 수직 및 수평 철근의 응력-변형률 관계를 얻었다.

#### 4. 결론

선형 및 비선형 스트럿-타이 모델 방법을 실험, 파괴된 턴이진 보의 해석에 적용시킨 결과, 선형 스트럿-타이 모델 방법은 이들 보의 극한강도를 대부분 실제 파괴하중 보다 작은 값들로 평가하였으며 그 편차 또한 비교적 크게 나타났다. 이에 반해 비선형 스트럿-타이 모델 방법의 경우 실제 파괴하중에 아주 근접한 강도를 평가하였을 뿐만 아니라 턴이진 보의 실제 파괴모드 또한 아주 잘 예측하는 것으로 나타났다. 주요 철근 타이의 변형률 거동 역시 콘크리트 타이의 영향을 고려한 비선형 스트럿-타이 모델 방법이 보다 정확하게 평가하였다. 실제 콘크리트 구조물 및 부재의 거동을 보다 정확하게 반영한 스트럿-타이 모델 설계를 위해서는 비선형 스트럿-타이 모델 방법의 스트럿의 유효강도 산정, 스트럿과 타이의 단면적 산정, 스트럿-타이 모델 자체의 해석, 절점영역의 강도검토, 그리고 콘크리트 부재의 강도평가 방법등에서 접목시킨 비선형 수치해석기법을 도입하여야 할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. American Association of State Highway Transportation Officials, "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications", SI Units, 2nd Edition, Washington D.C., 1998.
2. Barton, D.L., Anderson, R.B., Bouadi, A., Jirsa, J.O., and Breen, J.E., "An Investigation of Strut-and-Tie Models for Dapped Beam Details", Research Report, The University of Texas Austin, Texas, 1991.
3. Yun, Y.M., "Nonlinear Strut-Tie Model Approach for Structural Concrete", ACI Structural Journal, Vol. 97(4), pp. 581-590, 2000.

표 1 선형 및 비선형 스트럿-타이 모델 방법의 특징사항

| 특징적인 사항            |        | 선형 스트럿-타이 모델 방법  | 비선형 스트럿-타이 모델 방법   |
|--------------------|--------|--|--|
| 압축주응력 흐름의 결정방법     |        | 선형 유한요소해석법에 의함   | 비선형 유한요소해석법에 의함  |
| 스트럿-타이 모델의 선정방법    |        | 압축주응력 흐름과 배근형태를 근거로 선정   | 좌동   |
| 콘크리트 타이의 고려여부      |        | 고려할 수 없음   | 고려할 수 있음   |
| 스트럿과 타이 단면적의 산정방법  |        | "스트럿과 타이의 응력이 입력한 유효강도와 같아질 때까지"의 조건을 이용함                                  | 좌동   |
| 스트럿-타이 모델 자체의 해석방법 |        | 선형 유한요소법에 의함   | 비선형 유한요소법에 의함  |
| 절점영역 강도의 검토방법      |        | 절점영역 경계면에서의 압축응력이 허용압축 응력 보다 작아야 한다는 조건을 이용함                               | 절점영역 무근콘크리트의 비선형 유한요소해석에 의한 파괴메카니즘 발생여부를 검토함                         |
| 해석방법               | 강도평가방법 | 스트럿-타이 모델의 기하학적 적합조건과 철근타이의 항복여부를 검토함                                      | 스트럿-타이 모델의 기하학적 적합조건 및 안정조건과 절점영역의 강도조건을 검토함                         |
|                    | 거동평가방법 | 스트럿-타이 모델 자체의 선형 유한요소해석을 수행함   | 스트럿-타이 모델 자체의 비선형 유한요소해석을 수행함  |
| 설계방법               |        | · 스트럿-타이 모델의 기하학적 적합조건과 철근타이의 강도조건을 만족하는 필요철근량 산정<br>· 절점영역 경계면의 유효압축강도 검토 | · 스트럿-타이 모델의 기하학적 적합조건, 안정조건을 만족하는 필요철근량 산정<br>· 절점영역의 파괴메카니즘 발생여부검토 |

표 2 선형 및 비선형 스트럿-타이 모델 방법에 의한 극한강도 평가결과

| 시험체 | 선형 스트럿-타이 모델 방법 |          |               | 비선형 스트럿-타이 모델 방법            |           |           |            |               |
|-----|-----------------|----------|---------------|-----------------------------|-----------|-----------|------------|---------------|
|     | 파괴강도 예측방법       |          | 예측강도 / 실험파괴강도 | (**)/실험파괴강도, (***) , (****) | 파괴강도 예측방법 |           |            | 예측강도 / 실험파괴강도 |
|     | 철근타이의 항복여부(*)   | 기하학적 적합성 |               |                             | 안정조건      | 기하학적 적합조건 | 절점영역의 강도조건 |               |
| ST1 | ●, (6)          | -        | 0.78          | 1.20, (적합조건), (18)          | -         | -         | ●          | 0.98          |
| ST2 | ●, (3)          | -        | 0.55          | 0.95, (안정 및 적합조건), (9,17)   | ●         | ●         | -          | 0.95          |
| PCI | ●, (3)          | -        | 0.90          | 1.25, (적합조건), (18)          | -         | -         | ●          | 1.02          |
| MF  | ●, (10)         | -        | 0.70          | 1.00, (적합조건), (17)          | -         | ●         | -          | 1.00          |

(\*) : 항복된 부재 번호; (\*\*) : 스트럿-타이 모델이 받을 수 있는 최대 하중; (\*\*\*) : (\*\*) 이상의 하중을 받지 못하는 이유; (\*\*\*\*) : (\*\*)을 유발하는 스트럿 또는 타이의 부재번호

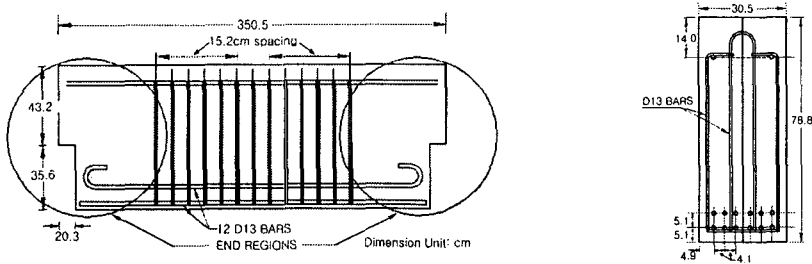


그림 1 턱이진 보의 형상

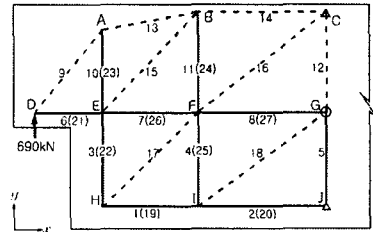
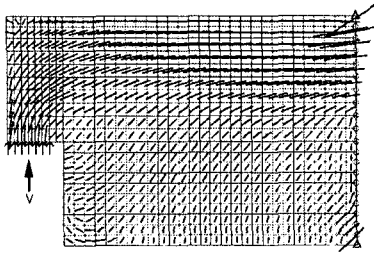
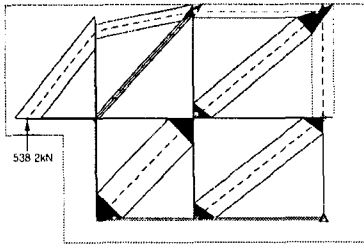
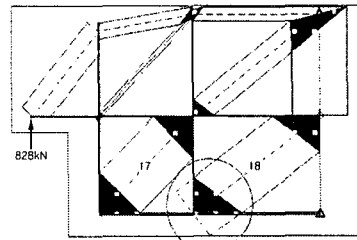


그림 2 ST1 시험체의 압축주응력 흐름과 스트럿-타이 모델

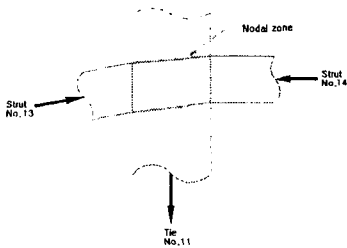


(a) 선형 STM방법을 적용할 경우  
(78% 극한하중)

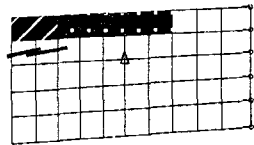


(b) 비선형 STM방법을 적용할 경우  
(120% 극한하중)

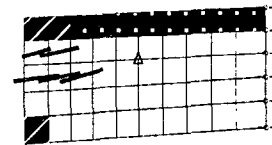
그림 3 차원화된 ST1 시험체 스트럿-타이 모델



(a) B 절점영역의 형상

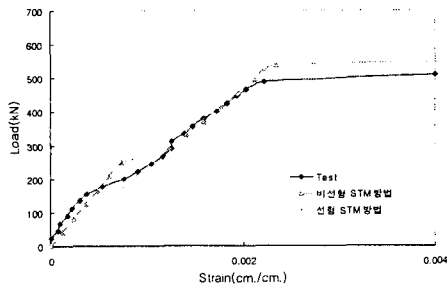


(b) 파괴 이전단계  
(89% 극한강도)

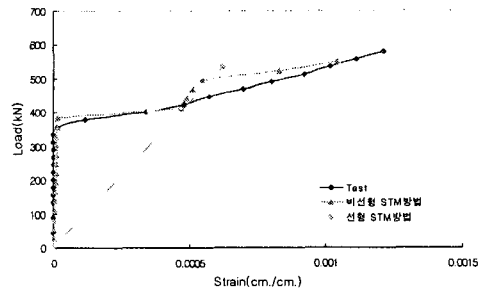


(c) 파괴 단계  
(98% 극한강도)

그림 4 ST1 시험체 스트럿-타이 모델의 위험 절점영역의 강도평가



(a) ST1 시험체 스트럿-타이 모델의 6번  
철근타이



(b) ST2 시험체 스트럿-타이 모델의 4번  
철근타이

그림 5 ST1 및 ST2 시험체의 철근 변형률 거동