

변형을 고려한 스트럿-타이 모델

Concepts on Deformation Dependent Strut-and-Tie Models

홍성걸*

장상기**

Hong, Sung Gul Jang, Sang Ki

ABSTRACT

This paper presents basic concepts on deformation models for D-regions critical to shear. Strut-and-tie models are used to construct for deformation estimation at yielding and ultimate deformation. A generic strut-and-tie model is proposed to investigate deformation patterns and failure mode identification. Superposition of the basic models enables us to explain deformation limits of arch action and truss action. Displacement at yielding is assessed by consideration of deformation of reinforcing steel only while the ultimate displacement is calculated by limits of ultimate strain of concrete in compression and failure mechanisms.

1. 서론

스트럿-타이 모델의 응용과 발전은 유럽의 CEB model code의 기본개념에서 이제 ACI 설계기준의 한 부분을 차지하게 되었다. 스트럿-타이 모델을 실제 구조물 설계에 적용하는 데 아직도 추저하거나 미숙한 이유는 설계기준에 대하여 설계자가 가지고 있는 전형적인 공식과 같은 막연한 기대감, 설계의 다양성의 몰이해 그리고 틀에 박힌 구조해석과의 혼동, 전산프로그램의 무차별적인 의지가 복합적으로 내재되어 있다. 스트럿-타이 모델의 구성방법은 지극히 구조설계과정과 유사하다. 미리 여러 가지 스트럿-타이 모델의 형상을 제시하는 것은 사실 설계자의 자유를 박탈하는 것이다. 그러므로 최소한 스트럿-타이 모델의 구성요소의 강도를 규정하는 것이 합당하다. 이러한 방향에서 최근 ACI 설계기준은 단지 스트럿, 인장타이, 절점의 강도를 규정하는 것으로 그 도입을 시작한다.

본 논문은 스트럿-타이 모델의 구성 원리를 깊은 보의 기본 형태에서 시작하여 하중 직접전달(direct transfer)메카니즘과 간접 전달(Indirect transfer)메카니즘으로 분류하여 항복이후의 변형능력을 고려한 스트럿-타이 모델 기본형의 특성을 파악하고자 한다.

2. 변형을 고려한 스트럿-타이 모델

*정회원, 서울대학교 건축학과 부교수
**정회원, 서울대학교 건축학과 박사과정

스트럿-타이 모델은 널리 지지하는 바 스트럿, 인장타이 그리고 절점으로 이루어진다. 스트럿은 압축요소로 부채꼴 모양의 압축대, 병모양의 응력장을 사용할 수 있다. 그러나 설계작업에는 간편한 스트럿으로 표현하여 사용하는 것 보편적이다. 또한 응력교란 구역에 대한 효과적인 배근설계에 매우 효과적인 설계 도구이다. 응력교란구역은 하나의 독립된 시스템을 이루거나 전체 구조물의 부분구조로 분리하면서 인접 단면으로부터 응력이 작용한다. 하중이나 부재력이 응력교란 구역에 경계력으로 존재하면서 내부에서는 스트럿-타이 모델을 통해 응력이 전달된다. 경계력이 일직선상에 위치하는 경우 압축대로서 스트럿-타이 모델이 가능하다. 경계력이 일직선을 벗어나는 경우 압축 스트럿과 인장타이의 적절한 구성이 필요하다. 모멘트가 작용하는 경우 일직선의 보부재에서 경계력이 직각으로 이루어진 경우는 보-기둥 접합부에서 찾아 볼 수 있으며 같은 경계면에도 위치할 수 있다. 대각 스트럿과 연결한 인장타이가 기본적으로 삼각형을 이루면서 외력을 전달한다. 기본 STM은 거동의 주요한 시점인 항복과 최대 변형지점을 결정하는 모형으로 이용할 수 있다.

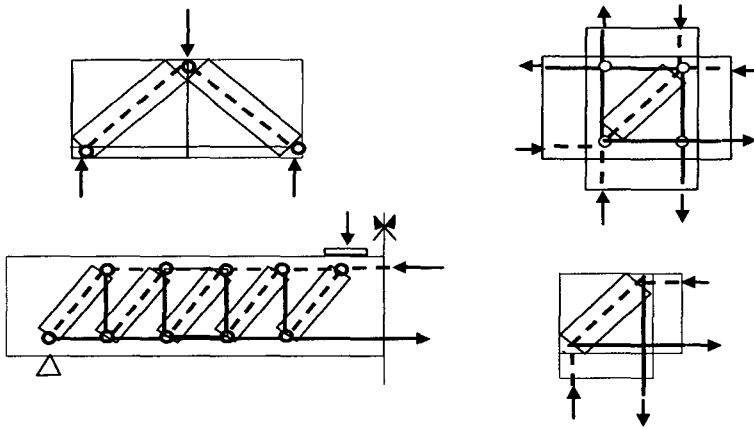


그림 1. 스트럿-타이 모델

3. 스트럿-타이 모델의 기본 변형

삼각형을 이루는 기본 STM의 스트럿을 4개의 스트럿과 1개 인장타이로 구성할 수 있다. 이를 Indirect-force transfer라고도 한다. 한편 접합부의 전단력 저항 메커니즘을 설명하기 위하여 아치작용과 트러스 작용으로 분류하는 것과 같은 맥락이다. 트러스 작용은 소위 부채꼴 모양의 응력장을 간략하게 설명한 것으로 연결보에서 볼 수 있는 대칭형 부채꼴 응력장과 단순지지 깊은 보에서 볼 수 있는 비대칭 부채꼴의 차이점을 이해 할 필요가 있다. 먼저 비대칭형 부채꼴 응력장은 길이 방향의 인장 철근이 한쪽에서 항복을 시작하면 부착응력이 발휘하지 못하므로 해당부분에서 수직방향의 힘이 전달되지 않는다. 부착응력을 잃게되는 부분의 해당 길이만큼 스트럿이 필요하다. 결국 부채꼴이 위와 아래에서 각각 다른 형상을 이루게 된다. 그러나 상하 길이방향의 철근이 대칭적인 특성을 유지하는 연결보의 경우 주철근이 항복 이후에 부착응력의 효과가 단부부터 나타나며 중앙부에만 수직철근의 효과가 나타난다. 또한 스트럿의 각도가 커지면서 아치작용의 영향이 증가된다고 설명할 수 있다.

결국 Indirect transfer형 스트럿-타이 모델의 중앙부 인장타이의 위치는 bond critical 요소가 대칭성에 따라 비대칭 또는 대칭으로 발전한다.

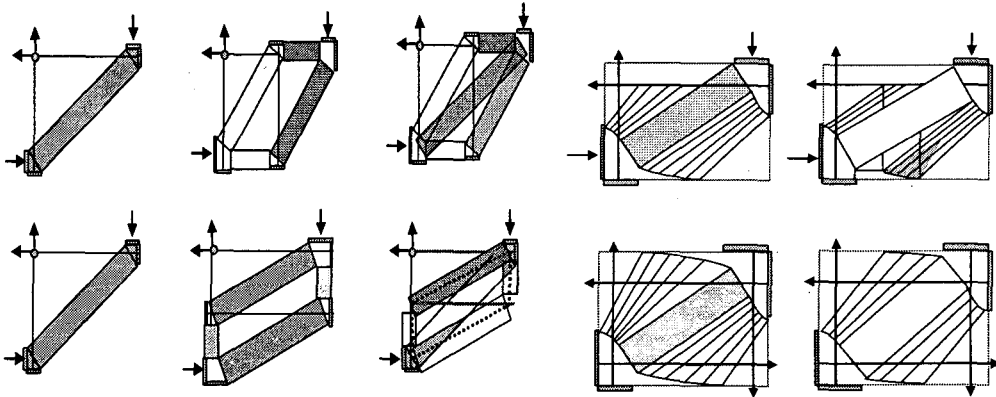


그림 2. 아치 작용과 트러스 작용

그림 3. 부착(bond)에 의한 대칭형과 비대칭형 스트럿-타이 모델

4. 변형 능력을 고려한 스트럿-타이 모델

기본 STM을 근거로 수직방향 또는 수평방향의 인장타이의 항복시점과 스트럿의 압축변형도의 한계에 따른 기본 STM 시스템의 변형한계를 산정할 수 있다. 스트럿-타이 모델의 변형 능력의 한계모형으로 소위 부정정 스트럿-타이 모델로 구성되는 D-구역의 변형한계와 항복 이후의 대략적인 거동을 설명할 수 있다. 힘의 흐름의 특성에 따라 아치작용과 트러스 작용의 배분이 달라진다. 아치작용과 트러스 작용이 복합된 스트럿-타이 모델로써 소성변형에 따라 시스템의 감소하는 강도를 설명할 수 있다.

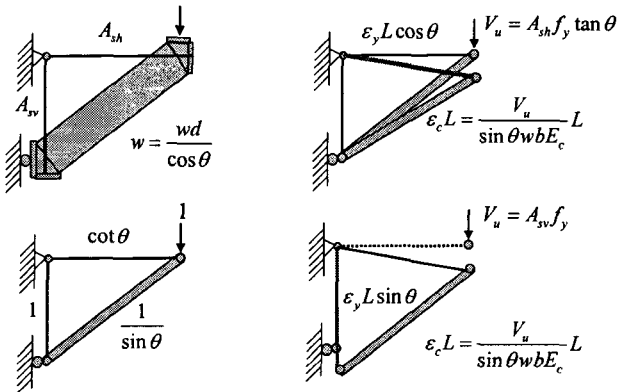


그림 4. 항복상태와 극한상태의 설정그림

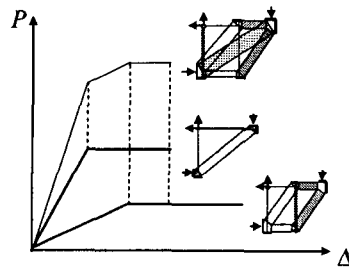


그림 5. 아치작용과 트러스작용의 조합

5. 결론

본 연구에서는 변형을 고려한 스트럿-타이 모델의 기본 개념에 대해 제시하였다. 요약하면 다음과 같다.

- (1) 파괴 메커니즘과 철근의 부착 상태에 따른 스트럿-타이를 구성한다.

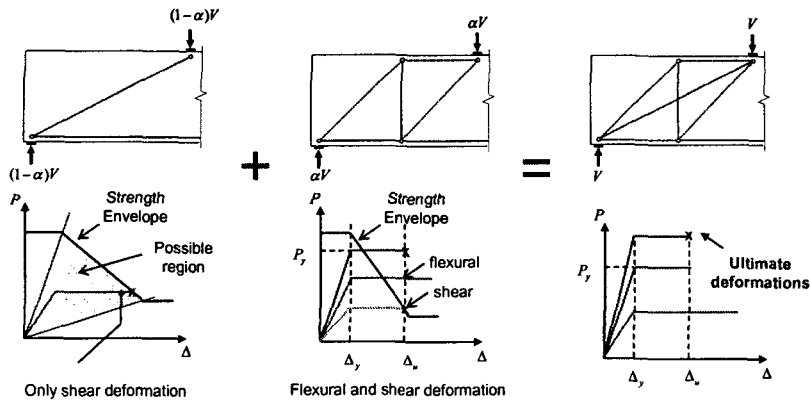


그림 5. 변형을 고려한 스트럿-타이 모델

- (2) 스트럿-타이 모델을 아치 작용과 트러스 작용으로 구분하고 각 요소의 항복 상태와 극한 상태를 설정하여 부재의 변형을 결정한다.
- (3) 부재의 변형을 이용하여 콘크리트 재료와 철근 재료의 변형에 따른 특성 변화를 반영하여 부재의 상태를 결정한다.
- (4) 스트럿-타이 모델을 변위 기초 설계법에 직접 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지원, 지진공학센터(KEERC)와 특정기초연구개발사업의 연구비 지원에 의하여 이루어 졌음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-02/318R-02)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, pp. 329-330.
2. Marti, P., "Basic Tools of Reinforced Concrete Beam Design", *ACI structural Journal*, V. 82, NO. 1, 1985, pp. 46-56.
3. Paulay, T., and Priestley, M. J. N., *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Building*, John Wiley and Sons, 1992, pp. 417-421.
4. Park, R., and Paulay, T., *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley and Sons, 1972, pp. 637-660.
5. 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.