

스트럿-타이 모델의 실용화

Practical Application of Strut-and-tie model

홍 성 곁*

Hong, Sung Gul

ABSTRACT

This paper discusses how to use basic strut-and-tie models (STM) for practical application. Construction of STM starts with drawing of load paths with equilibrium conditions. Understanding of structural systems including form active systems, vector active systems, and section active systems help us select appropriate systems for possible STM. Simple circular fans can be employed for load paths from concentrated forces to distributed forces. Strength of struts depends on configuration of their nodal zones which meet tension ties and effective compressive strength. The effective compressive strength of struts are assumed to be mainly influenced by transverse strain.

요 약

본 연구는 실용적인 적용을 위한 기본적인 스트럿-타이 모델의 사용방법에 대해 논의한다. 스트럿-타이 모델의 구성은 평형 조건식에 기초한 하중 경로를 그리는 것으로 시작한다. active systems, vector active systems, 그리고 section active systems를 포함한 구조 시스템의 이해는 가능한 스트럿-타이 모델을 위한 적절한 시스템을 선택할 수 있도록 한다. 간단한 원형 fan은 집중하중에서부터 분포하중까지 하중 경로를 표시할 수 있다. 스트럿의 강도는 인장 타이와 유효 압축 강도가 만나는 절점 영역의 형태에 따라 결정된다. 스트럿의 유효 압축강도는 주로 transverse 변형률에 의해 영향을 끼치는 것으로 가정한다.

1. 서 론

응력교란 구역에 대한 합리적인 설계도구로 평가되고 있는 스트럿-타이 모델의 실용적인 보급에서 닥치는 난관은 우선 엔지니어가 우선 설계에 대한 개념이 약하다는 것이다. 구조공학의 첫 번째 교육이 직관적인 것에 시작하지 않고 수학적이고 추상적인 개념에서 시작하여 틀에 짜인 주어진 조건에서 응력해석을 중요한 구조공학 및 설계분야로 알기 때문에 설계 작업과 결과를 주로 감이나 경험으로 치부하는 경우가 많다. 최근 공학설계분야에 대한 교육이 치중되어 모형을 만들어 보고 비교하는 기본적인 디자인 교육을 시도하여 종전의 해석 위주의 구조공학에서 벗어나 창의적인 교육으로 움직이고 있어 스트럿-타이 모델의 기본소양에 큰 도움이 되리라 기대한다.

* 정회원, 서울대학교, 건축학과, 교수

스트럿-타이 모델은 소위 equilibrium system을 구성하여 효과적으로 응력을 전달하도록 하는 것이다. 콘크리트로 만들어진 구역에 외력에 대한 하중경로를 제공하도록 하는 간단한 원리를 지키면 그것으로 충분하다. 소성 이론이 밝혀주는 한계이론에서 이론적인 근거를 마련해준 것은 매우 고무적인 일이나 엔지니어가 가져야 할 물리적인 직관과 기하학적인 공간 지각력을 찾아야 한다. 이 발표는 스트럿-타이 모델이 실용적으로 적용되기 위한 기술자의 필요한 소양을 기술하고 기술적인 문제 및 해결방안을 제시하도록 한다.

2. 구성 방법의 기술

일반적으로 응력해석은 평형조건, 변형적합조건, 그리고 구성방정식을 만족하여 소위 정확한 해를 구한다. 결국 구조공학자는 구조를 응력장(stress field)과 변위장(displacement field)로 이해할 수 있다. 별개의 2개의 장은 오로지 구성방정식으로 서로의 관계가 지어진다. 스트럿-타이 모델은 바로 응력장으로 이루어진 equilibrium system을 구성하여야 한다. 응력장은 항복조건식을 만족하여야 한다. 이러한 응력장의 구성은 평형조건만을 만족하는 어떠한 조합도 가능하다. 철근콘크리트 구조의 보편적인 공학적인 모형으로 보, 기둥, 슬래브 등 휨부재에 익숙하다. 주지하는 바 공학적인 휨부재는 변형율의 단면 유지에 대한 가설을 근거로 골조 및 판의 휨거동에 적절한 해석과 설계기법이 발전되어 있다.

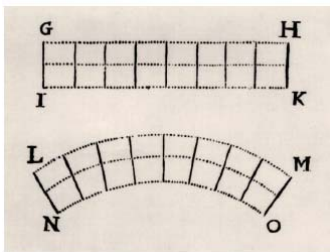


그림 1 Robert Hook의 보의 휨 변형율의 단면유지 가설

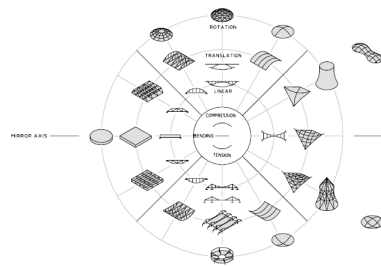


그림 2 구조시스템의 분류체계(Ref.3)

그러나 그러하지 못한 구역은 응력장과 변위장을 동시에 고려하여 파악하는 것은 일종의 particular solution을 찾는 것과 유사하다. 예를 들어 보-기둥의 접합부의 거동에 대한 지배 방정식을 만든다든지 설계식이 유도되었다고 하는 경우는 없다. 지배방정식 대신에 시스템에 대한 평형조건과 부위별로 필요한 자유물체도를 제시한다. 또한 우리가 원하는 강도나 파괴를 억누르기 위해 몇 개의 조건을 실험에 근거하거나 논리적인 순서로 제시한다. 경험적이고 실험적인 근거에 의지한 애매한 설계부위를 적절한 자유물체도와 내부의 응력흐름을 제시하여 이상화하였으나 합리적인 요소가 강도를 확보하도록 부재 단면과 배치를 만들어가야 한다.

주어진 하중조건에 대해 평형조건과 항복조건을 만족하는 응력장은 수없이 많이 존재한다. 앞서 언급한 바 응력장이란 휨부재를 사용하여 모멘트와 전단력을 전달할 수도 있고 압축재와 인장재를 단속적으로 배치할 수도 있다. 하중의 전달 시스템을 구분할 때 아치나 케이블 같이 하중 배치나 크기에 따라 최적의 하중흐름을 형성하는 구조시스템을 form active system이라고 한다. 반면 휨부재와 같이 단면에 압축과 인장응력이 작용하여 저항기구를 형성하는 경우 section active system이라고 부른다. form active system에서 집중하중에 대해서는 곡선형의 아치나 케이블 대신에 몇 개의 직선으로 이루어진 다각형형태가 자연스럽게 압축응력이나 인장응력을 통해 전달한다. 소위 트러스는 vector active system으로 분류할 수 있는데 다각형태의 아치나 케이블의 지지점에서 반력으로

필요한 버트레스나 타이를 구조시스템 내부에 배치하면 트러스 시스템으로 이해할 수 있다.

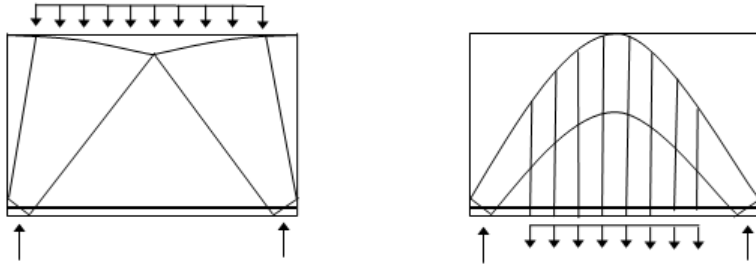


그림 3 부채꼴 압축장과 아치형태의 응력장

여기서 강조하고 싶은 것은 스트럿-타이 모델을 단순한 직선형태의 압축재와 인장재로 이루어진 것으로만 보지 말고 시스템의 입장에서 아치와 케이블에서 변환할 수 있어야 자유로운 응력장의 구성이 가능해진다.

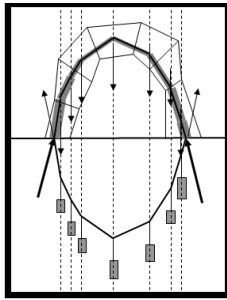


그림 4 아치와 케이블 구조의 거울 이미지

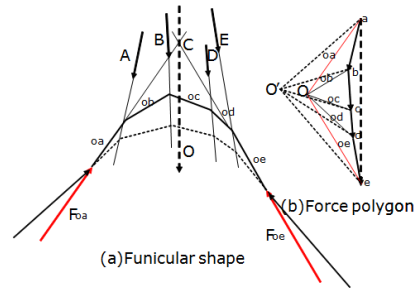


그림 5 아치의 도해법

구조해석작업을 습관적으로 전산프로그램에 의지하는 것은 영양가를 무시한 인스턴트 음식을 찾는 것과 같다. 스트럿-타이 모델은 시작부터 정해진 형상은 없다. 그러므로 구조설계자가 작업과정 중에 형상을 바꾸어서 구조내부에서 하중의 흐름을 바꿀 수 있어야 한다. 그럼 전산프로그램에 의지하지 않고 구조설계가 가능했던 시절의 기법을 다시 사용하면 되지 않는가? from active와 vector active system의 응력의 크기는 도해법(graphic statics)으로 가능하다. 도해법은 사실 중세건축과 토목구조물의 대부분을 이 방법에 의존했다고 볼 수 있다. 도해법은 전체 시스템과 부분적인 정적 평형상태를 벡터로 표현하여 상대적인 힘의 크기를 알 수 있는 장점이 있다.

3. 간편한 응력장과 스트럿-타이 모델

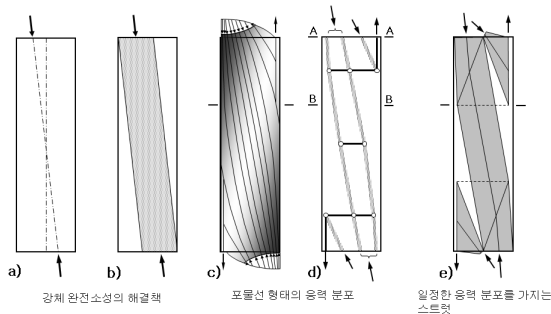


그림 6 기둥에서의 다양한 응력장의 소개

스트럿-타이 모델은 실용성을 극대화한 응력장으로 이해 할 수 있다. 응력교란구역의 복잡한 응력 흐름은 철근과 콘크리트의 부착, 콘크리트의 균열, 그리고 항복의 순서로 기인한다. 응력장은 평형 조건에 지배를 받는다. 경계조건과 우리가 의도한 항복조건을 결정된 응력에 대해 평형조건식에 근거하여 형성한 응력장은 대체로 복잡하다.

경계조건은 퍼진절점(smearred node)과 집중절점(concentrated node)으로 주어질 수 있다. 퍼진절점은 응력이 분포하여 비교적 지배방정식 구성이 쉬운 편이다. 그러나 부채꼴 응력장에 의지하는 집중절점이 경계조건을 포함하는 경우 부채꼴 응력장의 표현이 복잡하여 실용화를 위한 간단한 응력장을 필요로 한다. 대표적으로 단순한 응력장은 집중형 부채꼴 응력장(cocentric fan-shaped stress field)이다.

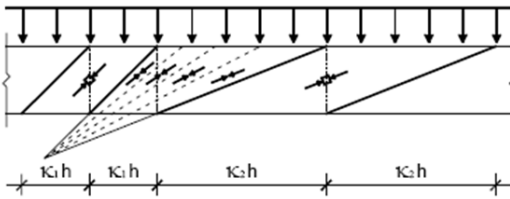


그림 7 보의 대각선 압축장을 원형 부채꼴 압축장으로 접근

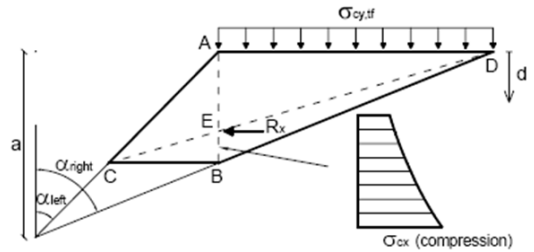


그림 8 원형 압축장의 응력분포

가장 실용적인 응력장은 폭이 일정한 스트럿을 이용한 스트럿-타이 모델, 그리고 앞서 언급한 집중형 부채꼴 응력장, 거기에 대각선 응력장을 들 수 있다.

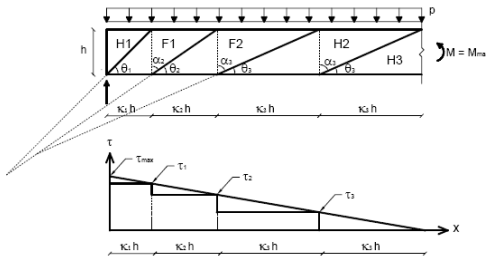


그림 9 보에서의 부채꼴 압축장의 응용

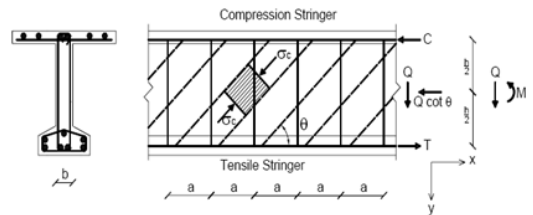


그림 10 균일 대각선 압축장으로 설명되는 보의 전단문제

4. 절점과 부착응력

현행 스트럿-타이 모델에서 철근의 부착문제는 의도적으로 부착파괴를 억제하는 방향으로 필요한 부착강도를 확보하도록 하는 것이 보통이다. 이를 위해 앵커 플레이트를 두어 이축 압축상태의 절점으로 처리한다. 그러나 부착강도에 의지하여 인장타이의 응력이 발전하는 경우 절점의 위치를 결정할 수 있으며 스트럿의 응력과 관련된 필요한 인장타이의 응력을 산정할 수 있다.

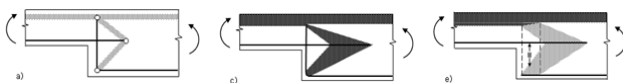


그림 11 부착 응력을 고려한 응력장

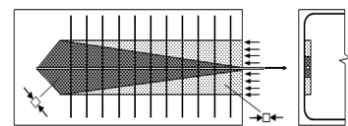


그림 12 부착응력과 휨구속

5. 하중의 방향과 크기의 변화

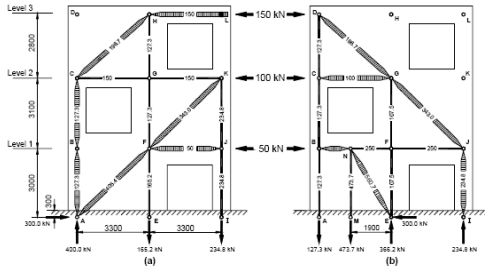


그림 13 지진하중에 대한 STM

설계하중의 조합으로 하중의 방향이 바뀌는 경우 다수의 STM이 필요하다. 2개 이상의 STM의 결과를 중첩하면 스트럿은 철근으로 강도가 증가된 효과가 있으나 인장측에는 콘크리트의 인장강도를 무시하므로 인장타이의 중첩효과는 없다. 그러므로 결과를 포개서 최종적인 철근배치로 사용할 수 있다.

6. 스트럿의 압축강도

인장타이의 항복을 전제로 이웃한 스트럿의 크기는 절점에서 인장타이의 폭에 따라 결정된다. 스트럿의 압축과피를 억제하기 위해서는 유효압축강도에 대해서 압축응력을 제어하는 방향의 스트럿의 배치 및 기하학적인 조건을 검토해야 한다. 즉 스트럿의 압축강도는 스트럿의 폭과 유효 압축강도에 따라 결정된다. 스트럿의 폭은 절점을 어떻게 다루느냐에 달려 있고 유효 압축강도는 주변의 응력과 변형 환경을 고려해서 정해진다. 유효 압축강도에 대한 이론적인 연구가 지속적으로 이루어지고 있으나 일축상태에 대한 softening 효과를 압축강도와 직각방향의 변형율을 고려한 Collins-Mitchell식이나 Euro식을 사용한다. 스트럿의 크기는 절점과 스트럿의 직각 변형율을 고려해서 결정하는 것이 지금까지 그래도 설득력이 있는 편이다.

7. 실용화를 위한 단계

1 단계: 사고의 전환과 자세

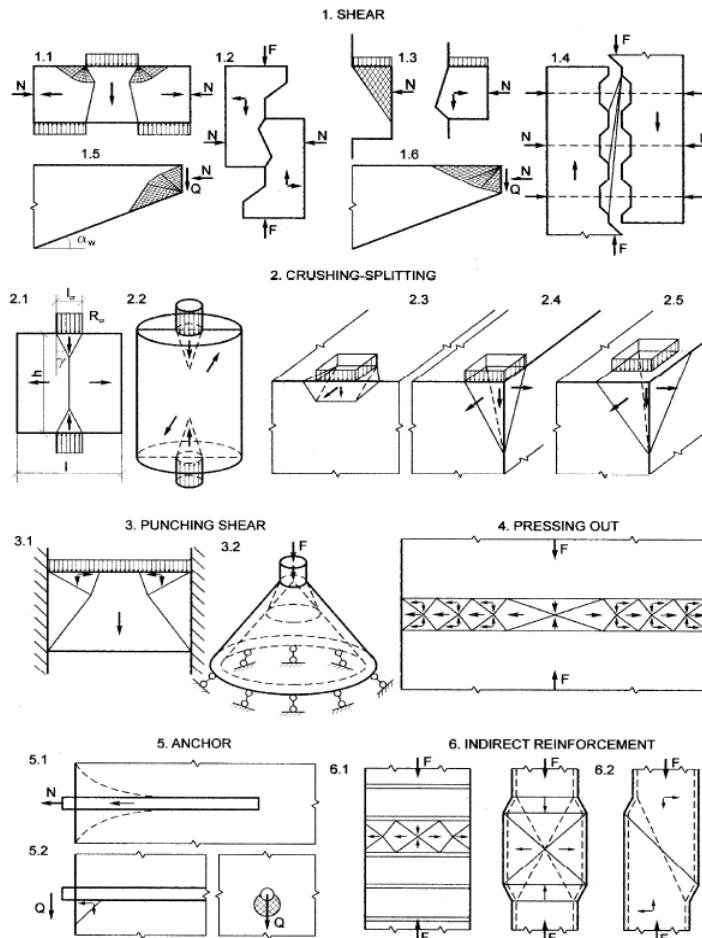
- 1) 스트럿-타이 모델을 구조설계로 인식전환
- 2) 컴퓨터보다 연필로 스케치
- 3) 유효 압축강도 문제는 잊어버릴 것
- 4) 절점에서 철근 배치는 가장 중요함

2단계: 설계기준 마련

- 1) STM 구성은 원칙만 제시
- 2) 절점별 최소조건 제시
- 3) 하중계수와 강도감소계수의 조율

감사의 글

본 논문은 “건설교통R&D정책·인프라사업 성능중심의 건설기준 표준화과제(06기반구축A01)”의 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.



참고문헌

- 1) Hansen, T. and Nielsen, M.P., "The diagonal compression field method using circular fans," Proceedings of the 2nd fib congress, 2006, Napoli
- 2) Mitrofanov, V., "The theory of perfect plasticity as the elementary mechanics of pseudo-plastic ultimate state of concrete bases, limitation, practical aspects, improving," Proceedings of the 2nd fib congress, 2006, Napoli
- 3) Schlaich, M., "Challenges in Education-conceptual and structural design," IABSE 2006, Budafest, Hungary
- 4) Sigrist, V., Alverez, M., and Kaufmann, W., "Shear and flexure in structural concrete beams," Bulletin No. 223, CEB, 1995
- 5) Nielsen, M.P., "Limit analysis and concrete plasticity," 2nd ed., CRC