

철근 콘크리트 구조물의 설계와 해석을 위한 트러스모델

트러스 모델과 철근정착기구의 개발

Truss Models and Bar Anchorage Devices



홍성길*

〈편집자 주〉

트러스 모델 혹은 스트럿-타이 모델이라고 불리는 철근콘크리트 구조설계 모형은 금세기 유럽에서 시작되어 80년대 이론적인 개념에 대한 연구가 완성되었으며 최근 여러분야에 적용개발되고 있다. 최근 외국 학술지와 국내 논문 그리고 설계기준에 소개되어 나름대로 그 원리 및 적용방법이 소개되고 있으나 아직도 트러스 모델에 대한 올바른 이해가 요구되어 이번 특집을 마련하였다. 철근 콘크리트 구조설계 기술 향상은 궁극적으로 합리적인 철근 배근 및 상세에 있으며 이를 해결할 수 있는 도구가 다름아닌 트러스 모델이다. 트러스 모델은 구조 설계자가 구조물 내부에 작용하는 힘의 흐름을 이해하여 합리적인 배근 설계를 가능하게 한다. 보다 많은 창조적인 구조설계자를 기대하며 트러스 모델에 관심이 있는 분의 글을 실는다.

(특집주간 : 서울대학교 홍성길)

1. 서론

철근콘크리트 구조물은 콘크리트와 철근의 합성구조물로서 합리적인 구조해석과 설계를 위해 철근의 부착과 정착에 대한 체계적인 이해가 매우 중요하다. 철근콘크리트 구조공학의 발달과 더불어 철근의 부착과 정착에 대한 미세역학적인 접근방법(micro mechanics) 및 다양한 실험적인 연구결과를 토대로 현행 철근콘크리트 구조물의 설계기준에 반영되었다.

ACI 설계기준 및 우리나라 철근콘크리트 구조설계기준에서 정의된 정착길이는 철근이 부착과괴를 일으키기 전에 재료적인 항복으로 발전할 수 있는 철근의 최소 문힘길이를 뜻하며 철근 주변의 부착과 정착에 영향을 주는 요소를 보정계수로서 조정하도록 하고 있다. 이와 같은 사고방식은 철근의 부착문제에

* 정회원, 서울대학교 건축학과 교수

관한한 가급적 철근의 인장파괴인 연성파괴모드로 발전시키고자하는 의도로 해석할 수 있다. 그러나 철근의 정착과 정착의 문제를 철근의 부착강도로 접근하기보다는 철근의 축방향 인장강도로 우회적으로 접근하기 때문에 현행 정착길이의 개념을 다양한 구조상세 및 조건에 직접 적용하기에는 한계점이 있다. 또한 설계공식이 유도된 거의 동일한 실험조건과 모형을 벗어난 경우에는 현행 정착에 대한 설계방법과 공식 적용여부에 의심을 갖을 수 있다.

철근의 부착과 정착에 대한 이해의 접근을 합리적이고 단순한 역학적인 원리로 설명할 수 있는 모형 중에 하나로 Tepfer가 제안한 국부트러스 모델(local truss action)을 들 수 있다. 그림 1에서 철근의 부착과 정착에 대한 트러스 모델의 도입은 이형 철근의 돌기에서의 국부적으로 발달되는 트러스 작용에서 찾아 볼 수 있다. 이와 같은 국부적인 트러스 작용의 개념은 철근 주변의 구속(confinement) 정도에 따른 부착과 정착 능력의 증가현상을 설명할 수 있으며 얇게 분해된 철근의 쪼개짐 균열등을 적절하게 설명할 수 있다. 그러나 거시적인 입장에서 철근의 부착성능에 대한 적절한 모형의 부재의 문제점과 현행 대부분의 트러스 모델 자체도 철근의 불충분한 부착 및 정착 능력으로 인한 구조물의 파괴양상을 설명할 수 없다.

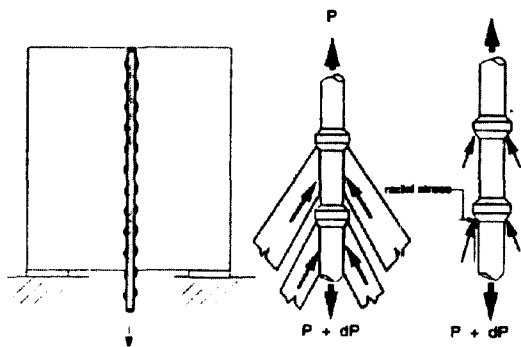


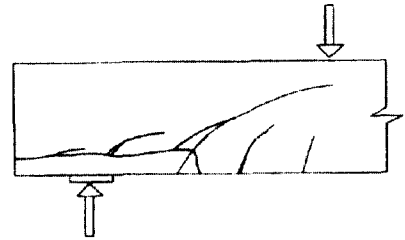
그림 1 Tepfer의 철근의 정착에 대한 국부 트러스 작용

본 소고에서는 부착과 정착에 대한 트러스 모델을 소개하고 트러스 모델 입장에서 연구개발되어 현재 다양한 구조물에 적용되고 있는 headed reinforce-

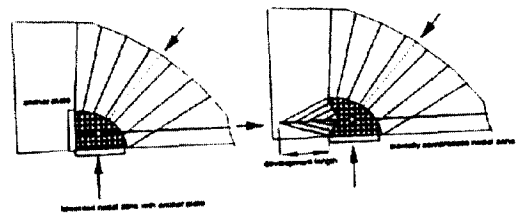
ment라고 불리우는 인장철근의 정착단부의 현황 및 연구과제를 소개한다.

2. 현행 트러스 모델과 철근의 부착과 정착

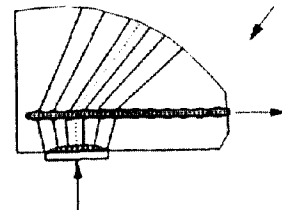
트러스 모델의 구조설계에 적용단계에서 트러스 모델의 구성 요소인 압축재와 인장재에 작용력을 역학적인 원리인 평형조건에 따라 산정하며 이때 시스템의 바람직한 파괴모드로 발전하기위해 인장재의 항복을 전제로 하고 나머지 트러스 모델의 구성요소의 작용력을 구한다. 따라서 해당 인장재는 트러스 모델의 절점에서 완전하게 정착되어 있는 것으로 전제하고 있다. 철근이 완전하게 정착되어 인장재로 작용하기 위해서는 충분한 길이의 정착길이가 확보되어 인장재의 항복이 유도될 수 있도록 하여야 한다. 또한 절점에서 강재 플레이트가 설치되어 이상적으로 절점영역이 2축 또는 3축압축응력상태로 발전되



a) Beam and anchorage



b) Equivalent treatment of anchor plate and development



c) Proposed treatment of bar anchorage by development

그림 2 보 단부에서의 철근 정착에 대한 트러스 모델

도록 할 수 있으며 한편 철근을 연속적으로 구부러 버리 편 모양으로 하여 충분하게 인장력이 발휘하도록 한다. 그림 2에서 보 단부의 극한응력상태를 트러스 모델로 접근하고자 할 때 3가지 다른 정착에 대한 모델링을 보여준다. 충분한 정착길이가 확보된 경우 b)의 왼쪽에서와 같이 기계적인 정착기구를 도입할 수 있다.

그러나 실제적으로 충분한 공간이 확보되지 않는 구조상세의 경우 트러스 모델이 설계자의 의도한 대로 적용하기 위해서 인장재의 확실한 정착여부가 트러스 모델의 성공적인 적용의 중요한 관건이다. 그림 3은 배근의 공간이 충분하지 않은 예를 보여준다.

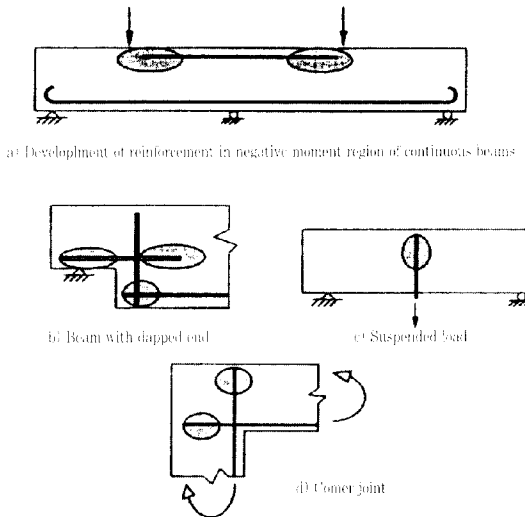


그림 3 배근 공간이 충분하지 않은 예

현행 철근 콘크리트 구조물 설계기준의 정착길이의 개념은 철근 길이 방향에 따라 적절한 부착력이 발달되도록하고 있으나 트러스 모델에서의 절점은 어느 한점으로 이상화하기 때문에 실제적으로 부착력의 함력점이 실제적인 트러스 모델상에 절점이 될 수 있다. 절점의 위치선정은 일반 트러스 구조물의 경우와 마찬가지로 트러스의 기하적인 구성을 결정 짓는 요소로 그 중요성이 매우 크다. 그러나 현행 트러스 모델을 적용하기 위해서 별도의 정착기구가 없는 철근에 대한 절점 위치 및 인장재의 능력산정에는 의문점이 남을 수 있다.

3. 부착과 정착을 위한 트러스 모델

트러스 모델의 절점의 합리적인 위치선정과 직선 형태의 인장철근의 부착능력에 대해이차우너적인 응력상태에서 C-C-T, T-T-C, 그리고 T-T-T 절점에서 발생할 수 있는 기본적인 힘으로 분류하여 Hong 에 의해 본격적으로 논의되었다. 이와 같은 개념은 Schlaich의 스트럿-타이에 관한 PCI Vol32, No.3에 게재된 유명한 논문인 Toward a Consistent Design of Structural Concrete에서 시작되어 Bruggeling의 저서 "Prefabrication with Concrete"에서 그의 프리캐스트 집합부의 성능에 대한 연구에 기본적인 원리로 적용하였다. 그림 4에서 브라켓과 단이 진 보의 경우 C-C-T, T-T-C의 부착개념을 알 수 있다.

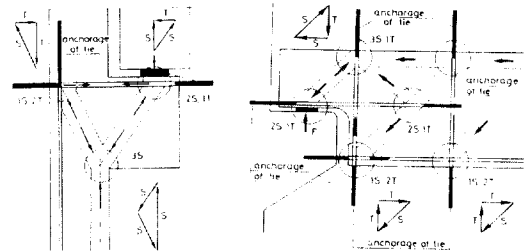


그림 4 PC부재에서 C-C-T, T-T-C형식의 부착메카니즘

그림 5에서 각각 해당되는 트러스 모델을 보여준다. 제안된 트러스 모델의 장점은 철근의 부착능력이 주변 응력 및 구조적인 인자(structural configuration)에 따라 다를 수 있는 개연성을 나름대로 역학

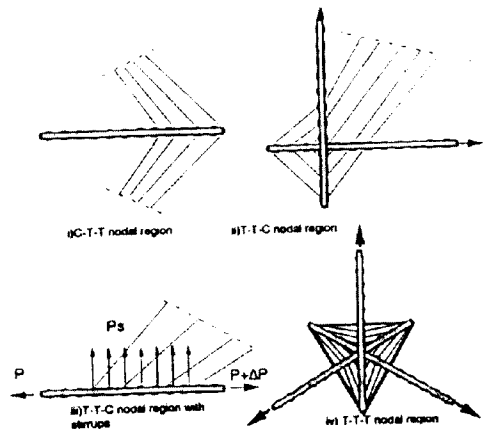


그림 5 트러스 모델의 입장에 분류된 철근의 정착메카니즘

적인 기본원리에 의해 밝히려고 하였으며 현행 트러스 모델의 부착과 정착에 대한 적용한계를 극복하였다고 볼 수 있다. 이와 같은 트러스 모델의 주요한 개념은 현행 트러스 모델에서 절점을 2축 및 3축의 압축상태의 모형을 일축의 압축응력장을 철근과 콘크리트의 접촉면까지 확장하여 부착파괴의 메커니즘이 가능하도록 하였다. 그러나 아직도 3차원적인 문제로 확장이 필요하며 현재의 학구적인 연구결과를 보다 쉽게 실제적으로 적용할 수 있도록 간단하고 쉬운 모델로 발전시킬 필요가 있다.

앞서 살펴본 트러스 모델의 성공적인 적용은 절점에 대한 합리적인 모형과 인장재의 정착능력에 있다. 논외한 트러스 모델의 연구는 사실상 콘크리트 부재가 종종 배근 공간이 작아 충분한 정착길이를 확보하지 못하는 경우 그에 따른 트러스 모델의 강도가 철근의 부착강도에 의해 좌우될 수 있으며 이를 합리적으로 설명할 수 있는 역학적인 모형을 제시하는 목적을 가지고 있었다. 정착에 의해 트러스 모델의 강도가 결정되는 경우 트러스 모델은 취성파괴로 발전할 수 있다.

4. T-Headed Stirrup과 Headed Reinforcement

3장에서 살펴본 바 정착에 의해 트러스 모델의 강도가 결정되는 경우 트러스 모델은 취성파괴로 발전할 수 있다. 이와 같은 문제점을 적극적으로 해결하고자 면 형태의 구조물의 늑근으로 그림 6의 T-Headed Stirrup과 Headed Reinforcement이 개발 사용하고 있다.

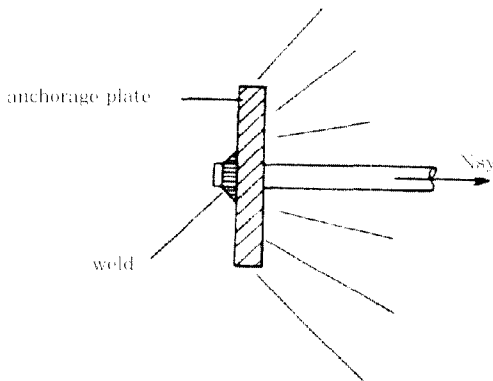


그림 6 T-Headed Stirrup과 Headed Reinforcement

해양구조물의 skin구조물에 심한 충격하중, 그리고 전단벽에 지진력이 작용하여 철근 콘크리트 구조 요소에 압축력과 모멘트 그리고 전단력이 작용하는 경우 부재의 능력을 제고하기 위해 횡방향의 구속력이 필요하다. 기둥의 경우 나선형 철근으로 콘크리트에 대한 구속력을 증가시킬 수 있으나 면 형태의 벽체, 슬래브 등 일종의 skin structure의 경우 스티럽의 설치에 필요하다. 그러나 기존의 구부림 스티럽의 사용은 그림 7에서의 힘의 흐름에서 보면 다음과 같은 일반적인 문제점이 있다.

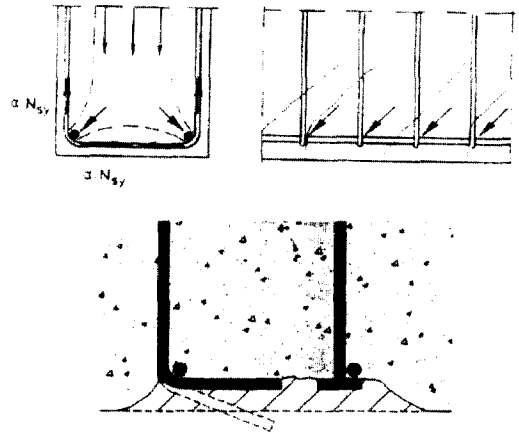


그림 7 스티럽에 작용하는 압축력의 흐름과 문제점

- 구부림 폭물이 철근 크기에 의해 제한 된다.
- 구부림 여유를 두어야 한다.
- 스티럽의 파괴 모드는 구부림 안쪽의 콘크리트 압축 파괴가 철근 항복강도의 70%에서 일어난다.
- 구부린 스티럽의 배근이 어렵다.
- 철근이 과다하여 콘크리트 타설 및 진동 다짐에 어려움이 있다.

철근의 부착능력을 기계적으로 증가 시키기 위해 90년대 초반부터 철근의 기계적인 정착기구에 대한 연구의 필요성이 트러스 모델의 적용과 함께 대두되어 현재 T-Headed Stirrup과 Headed Reinforcement이라는 이름으로 그 성능에 대한 실험적인 연구가 이루어지고 있으며 실제 철근 콘크리트구조물에 시공되었다. 그림 8는 시공예를 보여준다.

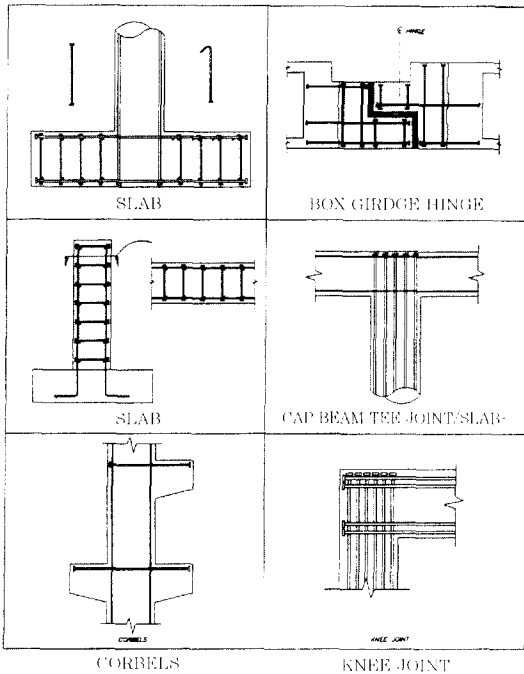


그림 8 T-Headed Reinforcement의 설치

Headed shear reinforcement는 무거운 하중이 예상되는 산업용 구조 바닥 슬래브와 플랫폼 슬래브의 주두에서 키팅 쉬어에 대한 슬래브의 전단강도를 증가시키기 위하여 Stuttgart에서 원래 실험이 시작되어 캐나다 Calgary대학에서 개발된 개념의 산물이다. 특히 해양구조물의 일종인 콘크리트 플랫폼 폼에 대해 빙산의 충돌에 대비하여 철근 배근 공간이 협소하여 많은 량의 늑근을 대신하여 T-Headed Stirrup을 사용하여 전단강도의 증가시킬 수 있다. 이에 대한 연구는 주로 해양석유채굴이 활발한 북구의 스웨덴, 노르웨이, 그리고 알라스카의 석유회사의 연구지원을 받아 이루어지고 있다.

주요한 연구과제는 T-headed reinforcement로 인한 철근 콘크리트 부재의 강도 및 연성증가의 확인에 있었다. 압축력의 작용으로 압축변형이 발생하며 그에 따른 콘크리트의 횡방향의 팽장은 소위 Poisson's Effect라고 한다. 이와 같은 현상과 T-Headed reinforcement에 의한 수동적인 구속력(passive confinement)으로 강도 및 연성을 증가시킬 수 있다는 연구결과가 보고되고 있다.

면 형태의 구조물의 전단강도의 증가 목적 이외에 headed reinforcement에 대한 연구는 보-기둥 접합부와 PC부재의 접합부에 확장되고 있다. 보-기둥의 접합부의 경우 압축력에 의한 Push-out에 의한 조기 파괴로 인한 pinching현상에 대한 염려가 예상되나 최근 J. W. Wallace에 의한 제한적인 실험결과 큰 문제점이 없는 것으로 보고되었다.

5. 연구과제 및 결론

T-Headed reinforcement나 그와 유사한 철근에 대한 설계 방법은 트러스 모델을 적용하는 것이 매우 타당하다. 트러스 모델에 근거한 설계방법은 구조물의 연성파괴 모드를 전제하는 경우이므로 그에 따른 철근 크기결정에 대한 연구가 필요하다.


구부린 스티럽의 문제점인 구부림 내부의 콘크리트 압괴 파괴와 유사하게 T-head에서 예상되는 콘크리트의 압괴 파괴를 가급적 피하고 횡방향으로 적절한 구속력을 발휘할 수 있는 적정 크기 결정은 다양한 실험과 트러스 모델에 의한 이론적인 연구가 상호 보완적으로 이루어져야 할 것이다.

구조물의 보강방법으로 간편한 FRP, 유리강화 섬유등의 사용은 기둥 및 보의 경우와 높이가 낮은 벽체에 큰 전단력이 작용하는 경우 섬유판의 면내에 작용하는 인장력을 증가시켜 보강효과를 기대할 수 있다. 또한 기둥과 보의 경우 구조체를 섬유 보강재로 감아 구속력을 증강시킬 수 있으나 전단벽체에 압축력 그리고 휨 모멘트, 전단력이 동시에 작용하여 면내 인장력의 증강효과로 한계가 있는 경우 섬유 보강으로 벽체의 구속력 증강에는 문제점이 있다. 즉 우리나라와 같은 벽체가 빈번하게 사용되는 공동주거 건축물의 구조물의 보강 및 설계의 적용가능성에 대해 연구가 필요하다.

트러스 모델은 설계자에게 부재 내부의 작용력의 크기를 요구하여 단면크기를 제안할 수 있으며 효율적인 배근 및 그에 따른 디테일에 대한 아이디어를 창출할 수 있다. 왜냐하면 트러스 모델 자체가 설계자가 원하는 창의적인 구조시스템이기 때문이다. 트러스 모델 실제적인 적용의 문제점과 실제 구조물의

시공 및 구조적 성능의 문제점을 적극적으로 해결하고자 하는 목적에서 새로운 철근의 디테일을 살펴 보았다. 이와 같은 디테일의 개발의미는 면형태의 구조물의 전단강도 및 콘크리트의 구속응력증가에 효율적인 철근 디테일에 있으며 너무나 진부하여 간과해 버리는 현장의 문제를 해결하려는 공학적인 자세에 커다란 의미가 있다.

참 고 문 헌

1. D. A., Kuchma, "The Influence of T-Headed Bars on the Strength and Ductility of Reinforced Concrete Wall Elements." 1996, Unpublished paper
 2. D. E., Berner, B. C. Gerwick, Jr., and G. C., Hoff, "T-Headed Stirrup Bars," Concrete International, May 1991
 3. J. W., Wallace, "Headed Reinforcement - A Viable Option," Concrete International, Dec. 1997
 4. ATLSS, "Connections for Building Structures in the 21st Century," ATLSS ERC, Lehigh Univ., Bethlehem, PA, June 1992 
- 1.