보 단부의 정착에 관한 트러스 모델

Truss Model for Bar Development in Beam End Region

김대진* 홍성걸**

Kim, Dae-Jin Hong, Sung-Gul

ABSTRACT

The majority of published conclusions about structural configuration effects on bond strength were based on the observed performance of test specimens and their interpretations are mostly empirical and statistical. The empirical and statistical interpretation on bond strength have to be replaced by rational models based on simple, sound and verifiable mechanical principles. It is likely that such models also represent the key to a deeper understanding of some existing experimental data on bond strength. The presented truss model is capable of explaining failure modes involving bond slip that cannot be explained by current truss model.

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

트러스 모델의 가장 큰 장점은 교란구역(distributed region)에 대한 일관성있는 설계 방법을 제시한다는 점이며, 비틀림, 휨, 전단력을 받는 철근 콘크리트 구조와 프리스트레스트 콘크리트 보의 극한강도를 결정하는데에 성공적으로 적용되어왔다. 그러나 부착과 정착의 문제에 있어서는 아직까지 트러스 모델을 이용한 연구가 미진한 상태이며, 대부분의 경우 실험결과에 의존한 실험식에 의해 해석 및 설계되어지고 있다. 따라서 본 연구에서는 철근 콘크리트보 단부의 정착에 관한 합리적이고 현실적인 트러스 모델을 제시하고자 하며, 이러한 트러스 모델의 해석결과를 이용하면 정착에 의한 파괴가 발생하는 경우의 극한하중을 구할 수 있을 뿐만 아니라 정착과 관련된 여러가지 조건들을 제어함으로써 원하는 방향으로 보의 파괴양상을 조정할 수 있게 될 것이다.

1.2 연구 방법

이 연구를 통해 알아보고자 한 것은 집중하중이 작용하는 전단보강근이 없는 보의 정착에 관한 트러스 모델이며 재료의 탄성-완전소성거동을 가정하였다. 보 단부의 정착부에서 콘크리트의 압축력에 의

* 서울대학교 건축학과 석사과정

** 정회원, 서울대학교 건축학과 조교수

해 부착응력이 발현되는 것으로 보고 응력장을 구성하였으며, 부착응력이 극한강도에 도달할 때 정착파괴가 발생하는 것으로 간주하여 극한하중식을 구성하였다. 이렇게 유도한 설계식은 기존의 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

2. 정역학적 해석(Static Solution)

2.1 가정

Schlaich 등에 의해 지적된 바와 같이 트러스 모델은 소성학 이론에 그 기반을 두고 있다. 보 단부의 정착과 부착에 관한 극한 해석은 다음과 같은 가정[1]을 기본으로 하여 이루어졌다.

- 트러스 모델의 해석은 평면 응력장 및 평면 변위장에서 이루어진다.
- 콘크리트는 인장강도가 0 이며, 수정 Coulomb 항복기준을 만족한다.
- 콘크리트와 철근의 접합면에 작용하는 부착응력은 철근을 둘러싸는 콘크리트의 수직응력에 대하여 완전소성거동으로 가정한다.

2.2 트러스 모델

일반적으로, 기계적 정착 장치가 존재하지 않는 보 단부 철근의 정착에 관한 트러스 모델은 이축압축 상태의 집중절점(concentrated node) 뒤편에 가상의 정착판이 존재하여 힘을 전달하는 것으로 간주되었다.[2,3](그림 1) 그러나 이와 같이 정착판을 가정한 트러스 모델은 정착길이가 충분히 확보되어 정착에 의한 파괴가 발생하지 않는 경우의 파괴양상은 설명할 수 있지만, 정착부의 부착-미끄러짐 파괴가 발생하는 경우에 대해서는 설명하지 못한다. 따라서 그림 2 의 경우와 같이 집중절점이 아닌 퍼진절점(smeared node)의 형태로 구성되는 것이 보다 현실적이며 이러한 절점에서 부착력은 압축 스트럿이 철근에 전달하는 힘에 의해서 발현된다고 볼 수 있을 것이다.

전단보강근이 없는 보의 트러스모델은 전단보강근이 존재하지 않기 때문에 하중이 가해지는 점으로부터 지지점까지 하중이 직접 전달되며, 퍼진절점 영역 ABC 중 영역 AB 만을 정착에 관여하는 부분으로 간주할 수 있는데 그 이유는 영역 BC 에서는 위아래에 위치한 스트럿의 방향이 일직선을 이루고 있어 철근 방향으로는 아무런 힘도 가하지 못하기 때문이다.(그림 3)

이러한 트러스 모델에서 압축스트럿의 응력과 정착길이 사이의 관계를 생각해보면 정착길이가 충분히 확보된 경우에는 극한하중 작용시 부착력이 극한강도에 도달하기 전에 압축스트럿의 응력이 유효압축강도(f_c)에 먼저 도달하여 압축스트럿의 압괴에 의한 파괴가 발생하며(crushing failure), 반대로 정착길이가 충분히 확보되지 못한 경우에는 압축스트럿의 응력이 유효압축강도에 도달하기 전에 부착력이 극한강도에 먼저 도달하여 정착부의 파괴가 발생하게 될 것이다(anchorage failure). 따라서 정착파괴가 발생하는 경우의 트러스 모델은 부착력은 항복강도에 도달하고 압축스트럿의 응력은 아직 유효압축강도에 도달하지 못한 상태에서 정착길이를 비롯한 여러 변수들에 의해 압축스트럿의 응력과 극한하중이 결정되는 것으로 생각할 수 있을 것이다.

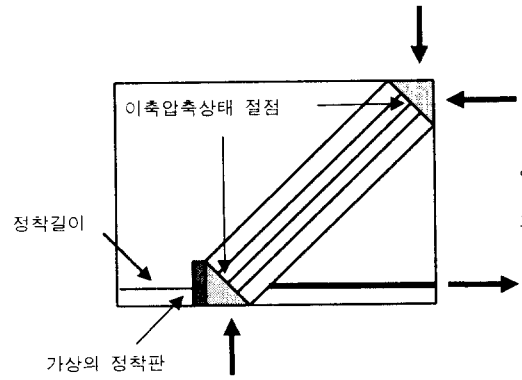


그림 1 가상의 정착판이 존재하는 경우의 트러스 모델

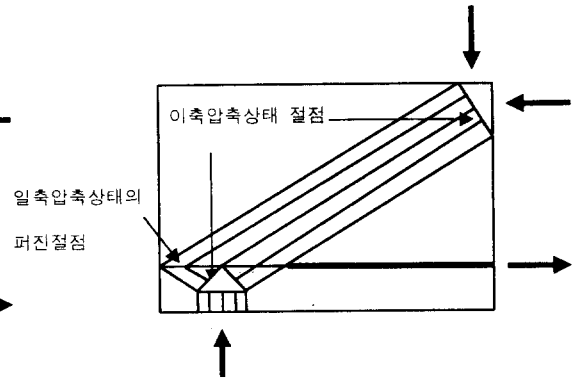


그림 2 가상의 정착판이 없는 경우의 트러스 모델

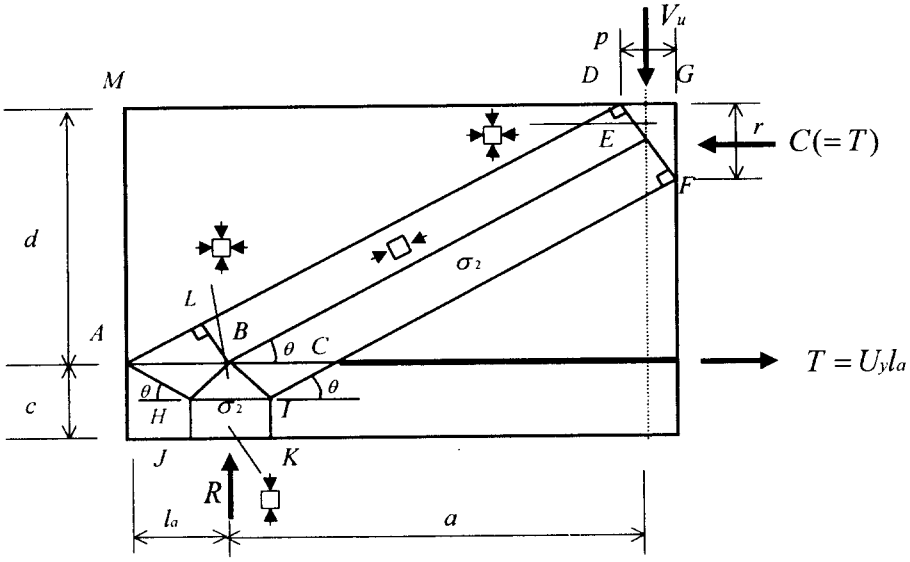
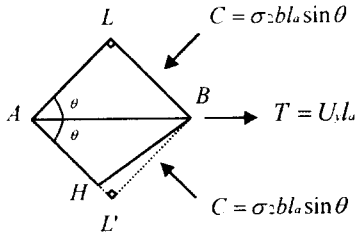


그림 3 정착파괴가 발생하는 경우의 트러스 모델



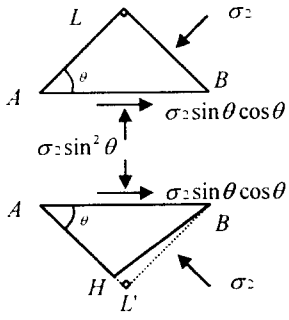


그림 4 정착부에 작용하는 힘과 응력 (b:보두께)

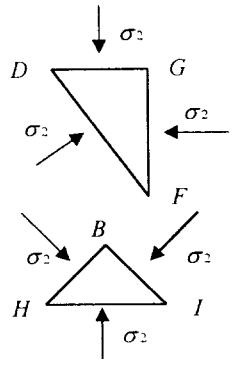


그림 5 절점에 작용하는 응력

그리고 절점 내부의 응력이 콘크리트 유효압축강도의 범위 내에 있는지 확인할 필요가 있다. 절점 DEF 를 Marti 가 제시한 방법[2]으로 검토해보면 압축스트럿이 절점 영역의 경계면에 직각으로 만나고 각각의 압축스트럿의 응력이 동일하기 때문에 내부의 응력상태가 한 점으로 표시되는 수압정적응력(hydrostatic stress)상태가 된다. 절점 BHI 의 경우는 비록 압축스트럿 ABH 와 BEFI 가 경계면에 직각으로 만나고 있지는 않지만 각각 스트럿의 응력이 동일하기 때문에 콘크리트 유효압축강도를 초과하지 않으므로 항복기준을 만족시키게 된다.(그림 5)

2.3 극한하중 산정

임의로 주어지는 보의 형상과 하중조건에 대하여 그림 3 과 같은 트러스 모델을 구성할 수 있으며 정착부 영역 AB 에서의 힘은 그림 4 에서와 같이 상부와 하부의 압축스트럿으로부터 전달된 압축력이 철근과 콘크리트 사이에 작용하는 부착력과 서로 상쇄됨으로써 평형을 이루게 된다.

$$T = U_v l_a = (2\sigma_2 b \sin\theta\cos\theta) l_a \tag{1}$$

절점 DFG 에서 절점의 폭 r 은 보의 측면에 작용하는 압축력과 인장력의 크기가 동일하기 때문에, 아래의 식에 의하여 계산할 수 있으며,

$$r = \frac{T}{\sigma_2 b} = \frac{U_v l_a}{\sigma_2 b} = l_a \sin 2\theta \tag{2}$$

이미 형성된 압축스트럿과 절점의 기하학적인 형태에 의해 다음의 식이 성립하게 된다.

$$\frac{p}{r} = \tan\theta = \frac{d - r/2}{a} = \frac{d}{l_a + a - p/2}$$

이 식을 정리하면 다음과 같다.

$$(l_a \cos 2\theta + l_a + 2a)(l_a \sin 2\theta - 2d) + 4ad = 0 \tag{3}$$

l_a, a, d 값이 모두 미리 주어지는 값이므로 (식 3)으로부터 압축스트럿의 경사각 θ 를 계산할 수 있다. (식 1)로부터 압축스트럿의 응력 σ_2 과 콘크리트 유효압축강도 f_c 와의 비 μ 를 계산할 수 있으며, 제시된 트러스 모델이 성립하기 위해서는 항상 $\mu \le 1$ 인 조건을 만족시켜야 한다.

$$\sigma_2 = \mu f_c$$
$$\mu = \frac{U_v}{f_c b \sin 2\theta} \tag{4}$$

극한하중 V_u 는 모멘트 평형조건에 의해 아래의 식으로 표현할 수 있으며 (식 3)에서 구한 압축스트럿과의 경사각 θ 값을 대입하여 계산할 수 있다 .

$$V_u = \frac{T}{a}(d - \frac{r}{2}) = \frac{U_v l_a}{a}(d - \frac{l_a}{2}\sin 2\theta) \tag{5}$$

3. 실험결과와의 비교

3.1 Mphonde 와 Frantz 의 실험

트러스 모델 접근방식으로 구한 극한하중식을 실험치와 비교하기 위해 Mphonde 와 Frantz 의 실험결과[4]를 선택하였다. 원래 Mphonde 와 Frantz 의 실험은 고강도 콘크리트의 사용이 철근콘크리트 보의 전단강도에 미치는 영향을 알아보기 위해 수행된 것으로, 본 연구에서는 실험에 이용된 여러 시험체 중에서 인장크랙에 의한 파괴양상(diagonal tension failure)을 보인 전단길이-춤비가 3.6 인 시험체의 실험결과만을 비교대상으로 선택하였다. 인장크랙에 의한 파괴는 정착파괴가 수반되어 일어나기 때문에 앞에 제시된 트러스 모델에서 가정한 정착파괴와 동일한 것으로 볼 수 있다.

3.2 제안식을 이용한 극한하중산정

정착파괴가 발생하는 경우의 극한하중을 산정하기 위하여 필요한 부착강도는 Zsutty 의 정역학적 해석에 의한 부착강도식[5]을 이용한다. (단위: lb/in.)

$$U_y = 140(f_c')^{1/3}\left(\frac{d_b}{l_d}\right)^{1/2}\left(\frac{c}{d_b}+2r\right)^{1/2}\pi d_b, \quad r=\frac{A_{st}}{bs}(100) \tag{6}$$

트러스 모델 접근방식으로 얻은 결과는 전단보강근이 없는 경우의 철근콘크리트 보의 극한강도를 나타내는 Zsutty 의 공식[6]과 비교되었다. (단위: lb/in.)

$$\frac{V_u}{bd} = 63.4(f_c'\rho\frac{d}{a})^{0.333}, \quad \rho=\frac{A_s}{bd} \tag{7}$$

3.3 실험결과와의 비교

세부적인 자료는 참고문헌 5 에 자세히 수록되어있다. (전단강도: $v_c=V_u/(bd)$, 응력의 단위: Mpa)

표 1 시험결과에 대학 Zsutty 의 공식과 트러스 모델에 의해 계산된 전단강도의 비교

시험체	f_c'	v_{exp}	v_{zsutty}	v_{zsutty}/v_{exp}	v_{truss}	v_{truss}/v_{exp}
AO-3-3b	20.746	1.419	1.330	0.937	1.377	0.970
AO-3-3c	27.112	1.468	1.282	0.873	1.507	1.027
AO-7-3a	37.641	1.805	1.620	0.897	1.680	0.931
AO-7-3b	41.595	1.819	1.674	0.920	1.737	0.955
AO-11-3a	74.874	1.971	2.039	1.035	2.113	1.072
AO-11-3b	74.584	1.964	2.033	1.035	2.110	1.074
AO-15-3a	81.281	2.053	2.095	1.020	2.171	1.057
AO-15-3b	93.614	2.198	2.198	1	2.276	1.036
AO-15-3c	91.768	2.150	2.177	1.013	2.261	1.052

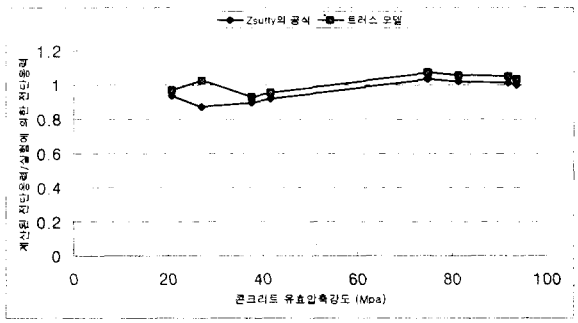


그림 6 트러스 모델과 Zsutty의 공식에 의한 전단강도의 비교

앞의 표와 그래프를 살펴보면 실험자료와 트러스 모델에 의한 결과치가 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과들을 종합해 볼 때, 본 연구에서 제시한 트러스 모델이 경사진 인장 크랙에 의한 파괴와 수반되어 일어나는 철근 콘크리트 보의 정착파괴를 잘 설명해 준다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

지금까지 전단보강근이 존재하지 않는 철근 콘크리트 보의 정착파괴에 관한 트러스 모델을 소성학의 정역학적 해석을 근거로 구성해 보았다. 이 트러스 모델의 가장 큰 특징은 지지점을 지나는 보의 추가된 길이부분만을 부착에 관여하는 부분으로 가정하여 극한하중식을 산정해 낸 것이며, 기존의 실험자료와 비교해 본 결과 이러한 가정이 옳음을 알 수 있다.

정착이 관련된 철근 콘크리트 보의 전단파괴는 여러가지 조건들에 의해 다양한 양상을 띄며 이들을 종합적으로 설명하기 위해서는 다양한 트러스 모델이 필요하다. 이러한 트러스 모델의 해석결과를 철근 콘크리트보의 초기설계단계에 이용하면 설계자가 원하는 방향으로 파괴양상을 제어할 수 있으며 보다 효과적인 설계작업을 수행하게 될 것이다. 이를 위해서는 보다 심도깊은 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 '98 년도 학술연구비에 의한 공모과제 연구비 지원에 의한 것으로, 연구비를 지원해 준 한국학술진흥재단에 감사드립니다.

참고문헌

1. Hong, S.-G.(1994), "Consistent Truss Modeling of Bar Development and Anchorage," PhD dissertation, Department of Civil Engineering, Lehigh University, Bethelem, Pennsylvania, May, 399pp
2. Marti, P.(1985), "Basic Tools of Reinforced Concrete Beam Design," ACI Structural Journal, Vol.82, No.1,Jan.-Feb. , pp46-56
3. Nielsen, M.P.(1984), "Limit Analysis and Concrete Plasticity", Prentice Hall, Inc., Englewood Cliff, New Jersey, 420pp
4. Mphonde, A.G. and Frantz, G.C.(1984), "Shear Tests of High and Low-Strength Concrete Beams without Stirrups" ACI Journal, Vol.81, No.4, July-Aug., pp350-357
5. Zsutty, T.(1985), "Empirical Study of Bar Development Behavior" Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.111, No.1, Jan., pp205-218
6. Zsutty, T.(1968), "Shear Strength Prediction for Separate Categories of Simple Beam Tests" ACI Structural Journal, Vol.68,No.2, Feb., pp138-143