

프리스트레스트 콘크리트 보를 위한 변형률 기반 전단강도 모델

Strain-Based Shear Strength Model for Prestressed Concrete Beams

강 순 필*

박 흥 근**

Kang, Soon-Pil

Park, Hong-Gun

ABSTRACT

An analytical model for predicting the shear strength of prestressed concrete beams was developed, applying the previously proposed strain-based shear strength model. In flexure-compression member without shear reinforcement, compression zone of intact concrete primarily resist to the shear force rather than tension zone. The shear capacity of concrete at the compression zone was defined based on the material failure criteria. The shear capacity of the compression zone was evaluated along the inclined failure surface considering interaction with the normal stress. Since the distribution of normal stress varies due to the flexural deformation of member, the shear capacity was defined as a function of the flexural deformation. Finally, the shear strength was determined at the intersection of the shear capacity curve and the shear demand curve. As a result of the comparisons to prior test data, the proposed model accurately predicted the shear strength of specimens.

요 약

이전 연구에서 제안된 변형률 기반 전단강도모델을 휨-압축 부재에 적용하여, 프리스트레스트 콘크리트 보의 전단강도를 예측하기 위한 해석모델을 제안하였다. 전단보강 되지 않은 콘크리트 휨-압축 부재에서는 균열발생 이후, 일반적으로 인장대보다 콘크리트 압축대가 주로 전단력에 저항한다. 압축대 콘크리트의 전단성능은 콘크리트의 재료 파괴기준을 통해 정의된다. 그리고 압축대의 전단성능은 단면에 작용하는 수직응력과 상관을 고려하여, 주응력방향에 의해 결정되는 파괴면을 따라서 산정된다. 압축대의 수직응력 분포는 부재의 휨변형에 따라 변화하므로, 압축대 단면의 전단성능은 휨변형에 대한 함수이다. 부재의 전단강도는 전단 성능 곡선과 수요 곡선의 교점에서 결정된다. 제안된 해석모델을 기존 연구자들의 실험 연구 결과와 비교한 결과, 실험체의 전단강도를 정확하게 예측하였다.

* 정회원, 서울대학교 건축학과 석사과정

** 정회원, 서울대학교 건축학과 교수

1. 서 론

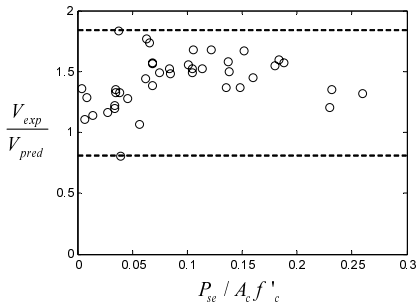


그림 1 Strength prediction by ACI318-05

프리스트레스트 콘크리트 보의 전단파괴는 휨균열에서 진전된 사균열, 또는 보의 웨브에서 발생한 사균열에 의해 유발된다(Sozen et al 1959, Kar 1968). 이에 대해 현행 설계기준 ACI 318-05에서는 프리스트레스트 보의 전단강도를 휨-전단강도 V_a 와 웨브-전단강도 V_{cw} 중에서 작은 값으로 택하고 있다. 그러나 현행 설계기준은 단순지지보 실험을 통해 경험적으로 개발된 것으로서, 그림 1에 나타나 있듯이 부재강도를 안전측으로 평가하지만 정확도에 한계가 있다. Elzanaty et al.(1986)의 연구에 따르면 현행 설계기준이 콘크리트의 압축강도, 전단경간비, 프리스트레스트 긴장력, 철근비 등 다양한 설계변수의 영향을 적절히 반영하

지 못하고 있다.

현행 설계기준의 여러 가지 단점을 보완하기 위해서, 최근 Choi et al.(2006)에 의해 재료파괴기준과 부재의 변형에 근거한 철근 콘크리트 보의 전단강도 이론모델이 개발되었다. 본 연구에서는 이를 휨-압축 부재에 적용하여, 프리스트레스트 콘크리트 보의 휨-전단강도 V_a 를 예측하기 위한 해석모델을 제안하였다. 연구의 대상으로 프리스트레스트 강선이 부착되고 직선으로 배근된 사각형단면 부재를 고려하였다.

2. 휨변형에 따른 압축대의 전단성능

전단보강 되지 않은 콘크리트 보에서는 휨균열 발생 이후, 일반적으로 인장대보다 콘크리트 압축대가 주로 전단력에 저항한다(Zararis 2001, Frosch 2003). 프리스트레스트 보와 같은 휨-압축재의 경우, 휨부재에 비해 압축대가 크게 형성되며, 휨 부재와 마찬가지로 주로 압축대의 콘크리트가 전단력에 저항하는 것으로 가정할 수 있다.

압축대의 콘크리트에는 수직압축응력과 전단응력이 동시에 작용하므로, 압축대의 전단강도를 구하기 위해서는 두 응력의 상호작용을 고려해야 한다. 본 연구에서는 Rankine의 파괴 기준(Chen 1982)을 사용하여, 주응력이 콘크리트의 인장강도 f'_t , 또는 압축강도 f'_c 에 도달하면 각각 인장파괴와 압축파괴가 발생하는 것으로 정의한다. 콘크리트의 인장강도는 Kupfer et al.(1969)의 실험연구에 근거하여, 직교방향의 주압축응력의 크기에 따라 저하된 강도 $f'_t = f_t [1 - 0.5(\sigma_1/f'_c)]$ (σ_1 =주압축응력, $\sigma_1 \geq 0$)를 사용한다(Choi et al. 2007). 이로부터, 보의 지점으로 부터의 거리 x 와 중립축으로부터의 거리 z 에서 콘크리트의 전단성능응력(최대허용전단응력)은 식 (1)로 정의된다.

$$\text{인장지배 전단성능응력, } \nu_{ut}(x,z) = \frac{1}{1+0.5\eta} \sqrt{[f_t + \sigma_u(x,z)] \left[f_t - \frac{\eta}{2} \sigma_u(x,z) \right]} \quad (1a)$$

$$\text{압축지배 전단성능응력, } \nu_{uc}(x,z) = \sqrt{f'_c [f'_c - \sigma_u(x,z)]} \quad (1b)$$

여기서, σ_u =수직압축응력($\sigma_u \geq 0$), f_t =콘크리트의 직접인장강도($=0.292\sqrt{f'_c}$), $\eta=f_t/f'_c$.

허용전단응력은 식 (1a)과 식 (1b)의 전단성능응력 중에서 작은 값으로 결정된다. 그림 2에 나타

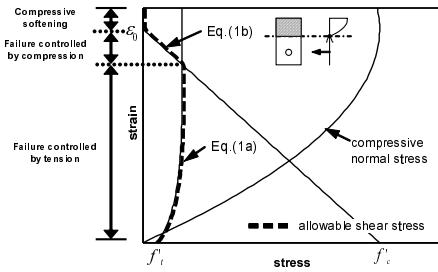
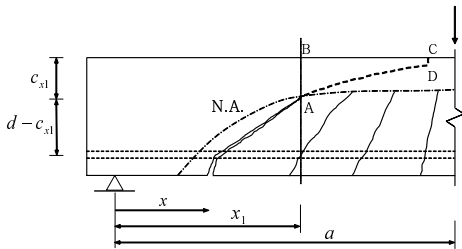
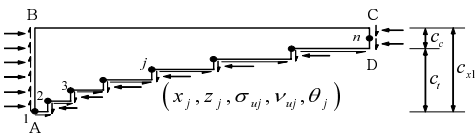


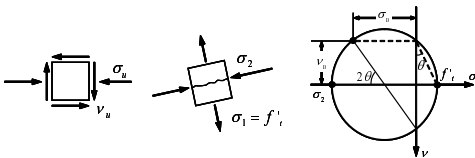
그림 2 Variation of allowable shear stress according to compressive normal stress in the compression zone of cracked section



(a) Inclined cracking and failure surface



(b) Failure surface in compression zone



(c) Stress in failure surface

그림 3 Stresses in failure surface of compression zone at shear failure

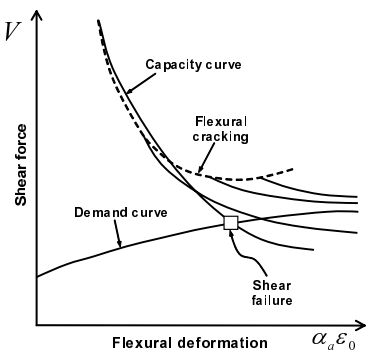


그림 4 Determination of shear strength of beam

나 있듯이 콘크리트 압축대에서 변형률이 작은 구간에서는 인장파괴가 일어나고, 변형률이 큰 구간에서는 압축파괴가 일어난다.

인장지배 전단파괴의 파괴면은 주인장응력 방향에 수직인 방향으로 발생한다. 그리고 압축지배 전단파괴 시에는 주압축응력 방향이 수직응력 방향에 가깝기 때문에 파괴면을 수직으로 가정한다. 따라서 그림 3(b)에 나타난 바와 같이, 압축대의 단면 AB의 전단성능은 대각 방향의 파괴면 ADC를 따라서 산정된다. 프리스트레스트 보와 같은 휨-압축 부재는 일반 콘크리트 보에 비해 압축대 깊이가 크기 때문에, 길게 진전되는 파괴면에서의 전단성능응력을 고려해야 할 필요가 있다. 압축대 AB의 전단성능은 식 (1)의 전단성능응력을 파괴면 ADC를 따라 적분하여 다음과 같이 산정된다.

$$V_{ci} = \lambda_s b \int_0^a \nu_{ut}(x, z) dz + b \int_a^c \nu_{uc}(x, z) dz \quad (2)$$

여기서, λ_s = 크기효과 계수 ($= 1.2 - 0.2(a/d)d \geq 0.65$) (Zararis 2001), c = 압축대깊이

이 해석모델에서는 압축대 깊이를 n 등분하여, 그림 3(b)에 나타난 각 지점($j=1, \dots, n$)에서 위치좌표 x, z 와 응력 σ_u, ν_u , 그리고 인장균열각도 θ 를 차례대로 구하여 전단성능 V_{ci} 를 산정하였다. 압축대의 수직응력 분포는 부재의 휨변형에 따라 변화하므로, 압축대 단면의 전단성능은 휨변형에 대한 함수이다.

식 (2)의 전단성능 산정식을 이용하여 집중하중을 받는 프리스트레스트 단순 지지보의 전단강도를 예측하였다. 그림 4는 하중점 단면에서의 최대압축변형률 $\alpha_a \epsilon_0$ 에 대해서 휨균열 발생 이후의 전단성능곡선과 전단수요곡선을 나타내고 있다. 전단성능곡선은 단면의 위치에 따라 달라지며, 집중하중에 의해 작용하는 전단력은 모든 위치에서 동일하기 때문에 전단수요곡선은 하나의 곡선으로 나타난다. 부재의 전단강도와 위험단면의 위치는 전단성능곡선과 전단수요곡선이 최초로 만나는 교점에서 결정된다.

개발된 강도모델을 직선 강선이 배근된 사각형 보 41개의 실험결과와 비교함으로써 추정능력을 검증하였다. 그림 5에 나타나 있듯이, 각 설계변수와 관계없이 전단강도 예측값과 실험강도가 잘 일치함을 알 수 있다.

개발된 강도모델을 실제로 사용되는 프리스트레스트

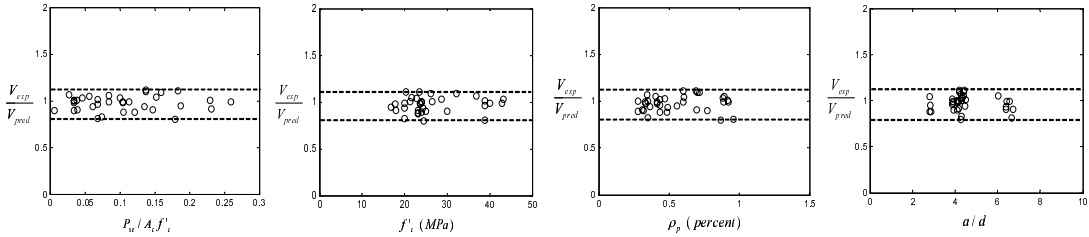


그림 5 Strength Prediction for experimental specimens

부재에 적용하기 위해서, 향후에는 T형 단면 부재와 경사진 프리스트레스 강선이 배근된 경우에 대한 연구가 필요하다.

4. 결 론

프리스트레스드 콘크리트 보는 휨 균열 발생 이후, 주로 단면의 압축대에 의해 전단력에 저항한다. 본 연구에서는 부재의 압축대에 작용하는 수직응력과의 상호작용을 고려하여, 재료과파기준으로부터 압축대가 발휘하는 전단강도를 산정하였다. 개발된 강도모델을 기존의 실험 연구 결과와 비교한 결과, 실험체의 전단강도를 정확히 예측하였다.

감사의 글

본 연구는 건교부(04 핵심기술 C02-02)의 재정적 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Sozen, M. A., Zwoyer, E. M., and Siess, C. P., "Investigation of Prestressed Concrete for Highway Bridge. Part1-Strength in Shear of Beams without Web Reinforcement," *Bulletin No. 452*, Engineering Experiment Station, University of Illinois, Urbana, Apr. 1959.
2. Kar, Jitendra N., "Diagonal Cracking in Prestressed Concrete Beams," *Proceedings*, ASCE, V.94, ST1, Jan. 1968, pp.83-109
3. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05)," American Concrete Institute, Farmington Hills, 2004, pp.153-155
4. Elzanaty, A. H., Nilson, A. H., and Slate, F. O., "Shear Capacity of Prestressed Concrete Beams Using High-Strength Concrete," *ACI Journal Proceedings*, Vol.83, No.3, 1986, pp.359~368
5. Choi, K., Park, H., and Wight, J. K., "Strain-Based Shear Strength Model for Slender Beams without Web Reinforcement," *ACI Structural J.*, Vol.103, No.6, 2006, pp.783~793
6. Zaris, P. D. and Papadakis, G. C., "Diagonal Shear Failure and Size Effect in RC Beams without Web Reinforcement," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V.127, No.7, July, 2001, pp.733-742
7. Tureyen, A. K. and Frosch, R J., "Concrete Shear Strength: Another Perspective," *ACI Structural J.*, Vol.100, No.5, 2003, pp.609~615
8. Chen, W. F., *Plasticity in Reinforced Concrete*, McGraw-Hill, NewYork, 1982, p.204
9. Kupfer, H., Hilsdorf, H. K., and Rusch, H., "Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses," *ACI Journal Proceedings*, Vol.66, No.8, 1969, pp.656~666
10. Choi, K., Reda Taha, M. M., Park, H., and Maji, A. K. "Punching Shear Strength of Interior Concrete Slab-Column Connections Reinforced with Steel Fibers," *Cement and Concrete Composites*, 29(5), 2007, pp.409-420