

단순지지된 RC보에서의 아치효과를 고려한 전단변형적합조건

Shear Compatibility Condition with Arch Action in Simply Supported RC Beam

이 성 철* 조 재 열** 김 우*** 박 병 선****
Lee, Seong-Cheol Cho, Jae Yeol Kim, Woo Park, Byung Sun

ABSTRACT

In simply supported concrete beams with concentrated load, there is arch action that the internal lever arm length varies through shear span. Recently shear analysis model considering this effect has been developed, but the analysis algorithm is so complicated. Moreover, the variation of internal lever arm length is not considered on the shear compatibility condition. In this study, the shear analysis model is developed more simply and the variation of internal lever arm length is considered on the shear compatibility condition. From these modifications, an actual shear behavior of RC beams subjected to concentrated load could be expected from the results of the proposed analysis model.

요 약

집중하중을 받는 콘크리트 보 부재의 경우 전단 경간에서 내부 모멘트 팔길이가 변화하는 아치 현상이 발생하게 된다. 최근 이러한 점을 고려한 전단해석모델이 개발되었으나, 복부 요소의 전단 거동 해석에 있어서 그 해석 과정이 매우 복잡할 뿐만 아니라 철근의 재료 성질을 항복 후 완전 소성거동을 보이는 것으로 간주하여 해석할 수밖에 없는 단점을 지니고 있다. 또한, 아치 작용에 의한 전단력의 비율을 산정하는데 있어 이용되는 전단변형적합조건에서 내부 모멘트 팔길이의 변화가 고려되어 있지 않아 전단경간에 따른 전단변형률의 분포가 실험으로부터 측정되는 분포 경향과 일치하지 않는 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 기존의 아치 효과를 고려한 콘크리트 보 부재의 전단해석모델에서 복부 요소의 전단 해석을 좀 더 간편화하여 일반적인 철근의 재료 모델을 적용할 수 있도록 하였다. 또한, 내부 모멘트 팔길이의 변화를 고려한 전단변형적합조건을 유도하여 실제 보 부재의 전단 경간에서의 변형률의 경향을 보다 잘 묘사할 수 있는 전단해석모델을 제시하였다. 제시된 전단해석모델은 집중하중을 받는 콘크리트 보 부재의 전단 거동 예측에 유용할 것으로 사료된다.

* 정회원, 서울대학교, 교량설계핵심기술연구단, 선임연구원

** 정회원, 서울대학교, 건설환경공학부, 조교수

*** 정회원, 전남대학교, 토목공학과, 교수

**** 정회원, 서울대학교, 건설환경공학부 콘크리트구조연구실, 석사과정

1. 서 론

한 세기가 넘는 동안 콘크리트 부재의 전단 강도에 대해 많은 연구가 이루어져 왔다. 특히 1980년대 이후 이축 응력을 받는 평면 요소에 대한 전단 해석 모델이 개발되었고, 개발된 모델을 토대로 베르누이 보 이론을 이용하여 보 부재에서의 전단 거동에 대한 해석 모델 또한 제시된 바 있다. 이후 집중하중을 받는 콘크리트 보 부재의 경우 전단 경간에서 내부 모멘트 팔길이가 변화하는 아치 현상을 고려한 전단해석모델이 개발되었으나, 복부 요소의 전단 거동 해석에 있어서 그 해석 과정이 매우 복잡할 뿐만 아니라 철근의 재료 성질을 항복 후 완전 소성거동을 보이는 것으로 간주하여 해석할 수밖에 없는 단점을 지니고 있다. 또한, 아치 작용에 의한 전단력의 비율을 산정하는데 있어 이용되는 전단변형적합조건에서 내부 모멘트 팔길이의 변화가 고려되어 있지 않아 전단경간에 따른 전단변형률의 분포가 실험으로부터 측정되는 분포 경향과 일치하지 않는 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 기존의 아치 효과를 고려한 콘크리트 보 부재의 전단해석모델에서 복부 요소의 전단 해석을 좀 더 간편화하여 일반적인 철근의 재료 모델을 적용할 수 있도록 하고, 내부 모멘트 팔길이의 변화를 고려한 전단변형적합조건을 유도하여 실제 보 부재의 전단 경간에서의 변형률의 경향을 보다 잘 묘사할 수 있는 전단해석모델을 제시하고자 한다.

2. 아치효과를 고려한 수정된 전단해석모델

2.1 아치효과를 고려한 콘크리트 보 부재의 전단저항구조

선행 연구에 의해 집중하중을 받는 콘크리트 보 부재의 전단저항구조는 보 작용에 의한 것과 아치 작용에 의한 것으로 구분될 수 있다. 아치 작용에 의해 전단 경간에서의 내부 모멘트 팔길이는 하중 재하점에서 지점부로 갈수록 점점 짧아지게 되며, 선행 연구에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z_x = \left(\frac{a}{x}\right)^\alpha z_0 = R_x^\alpha z_0 \tag{1}$$

2.2 아치효과를 고려한 단면 평형조건

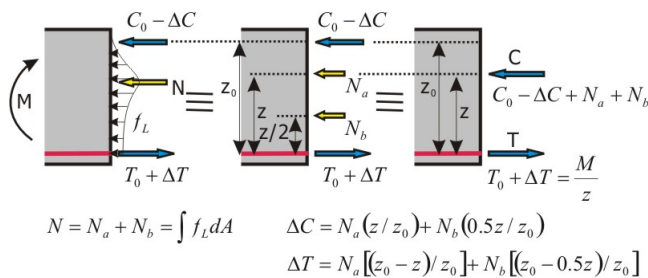


그림2. 아치작용에 의한 전단경간에서의 종방향 힘의 재분배 및 평형관계

그림1에서 보는 바와 같이 보 작용에 의한 전단력에 의해 복부 요소에서 종방향으로 압축력이 유발되게 되고, 단면 평형 조건을 만족하기 위해 유발된 압축력에 해당하는 힘의 크기만큼 상·하현재에 인장력이 분배되어 발생하게 된다. 이렇게 전단에 의해 유발된 힘들에 의해 내부 모멘트 팔길

이가 짧아지게 되며, 결국 전단력에 의해 추가되는 압축력들이 작용하는 위치의 중심이 아치 효과가 고려된 압축력이 작용하는 중심과 같아야 한다는 조건으로부터 복부에 작용하는 압축력은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$N_b = \frac{2(1-\alpha)(1-R_x^\alpha)}{z_0 R_x^\alpha} \quad (2)$$

위의 식에서 보는 바와 같이 가해진 전단력에 대한 아치 작용에 의한 전단력의 비율이 정해지면 복부 요소에 유발되는 종방향 압축력의 크기를 계산할 수 있으며, 결국 복부 요소에 작용하는 응력이 결정되어 MCFT 혹은 RASTM 등과 같은 판에 대한 전단해석모형을 적용하여 복부 요소의 전단 거동을 해석할 수 있게 된다. 그림2는 아치현상을 고려한 복부에 작용하는 응력상태를 나타낸 것이다.

2.3 내부 모멘트 팔길이 변화를 고려한 전단변형적합조건

그림 3에서 보는 바와 같이 아치 작용에 의해 내부 모멘트 팔길이는 변화하게 되고, 동시에 아치 작용에 의해 상·하현재에 작용하는 인장력에 의해 상·하현재에서는 베르누이 보 이론으로부터 계산되어지는 변형에서 추가적인 변형이 발생하게 되며, 이는 아래의 식으로부터 계산할 수 있다.

$$e_{top} = \int_x^{x+dx} \frac{\Delta T_{x+dx} - \Delta T_x}{E_c A_{cc}} dx, \quad e_{bot} = \int_x^{x+dx} \frac{\Delta T_{x+dx} - \Delta T_x}{E_{sm} A_s} dx \quad (3)$$

상·하현재에서 발생하는 변형의 차이만큼 복부에서의 전단 변형률과 내부 모멘트 팔길이의 굽은 전단 경간을 따라 변화하게 되므로, 그림 3과 식 3을 이용하여 전단 변형률과 내부 모멘트 팔길이의 굽은 종방향 변화율은 상·하현재에서 아치 작용에 의해 추가적으로 발생하는 변형률의 차와 같은 것을 알 수 있다. 또한, 식(1)로부터 아치 작용에 의해 증가된 하현재의 인장력을 구할 수 있으므로 다음의 식을 유도할 수 있다.

$$\frac{d}{dx}(z_x \gamma_{w,x}) = z_x \frac{d\gamma_x}{dx} + \gamma_x \frac{dz_x}{dx} = \Delta T_x \left(\frac{1}{E_{sm} A_s} - \frac{1}{E_c A_{cc}} \right) \quad (4)$$

위 식에서 보는 바와 같이 미분항은 두 가지로 나뉘어지며, 이 중 첫 번째 미분항이 들어있는 부분은 두 번째보다 그 크기가 일반적으로 매우 작기 때문에, 계산의 효율성을 위해 두 번째 항만 고려하여 전단변형적합조건을 정리하면 다음과 같이 된다.

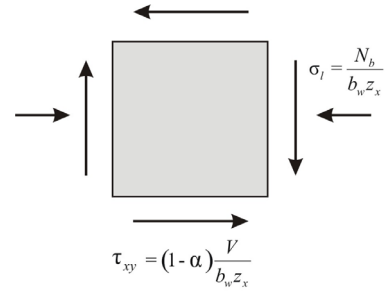


그림2. 복부 요소의 이축응력상태

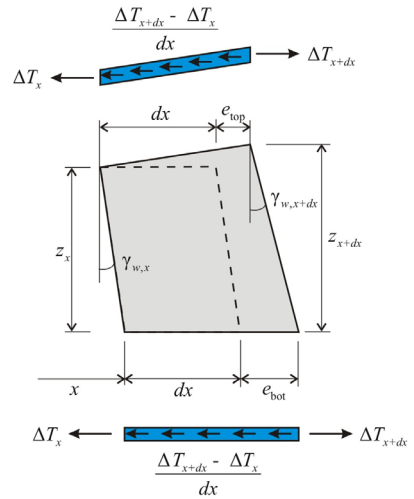


그림3. 아치효과에 의한 전단변형상태

$$\gamma_{w,x} = K_\gamma \frac{Va^2}{z_0^2} \left(\frac{1}{E_{sm}A_s} - \frac{1}{E_cA_{cc}} \right) \quad (5)$$

여기서 $K_\gamma = \left(\frac{x}{a}\right)^2 \frac{1}{R_x^\alpha} \left(\frac{1}{(2-\alpha)R_x^\alpha} - \frac{1}{2} \right)$ 이다.

3. 해석결과 및 고찰

그림4~5는 전단 경간 위치에 따른 종방향 응력의 크기와 전단변형률의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 아치효과에 의해 유발되는 종방향 압축력은 전단 경간 위치에 따라 크게 변화하는 것을 알 수 있다. 또한, 전단 변형률의 경우 하중 재하점에서 복부의 전단변형률이 집중하중에 의해 0이 되지 않는다는 것을 확인할 수 있다.

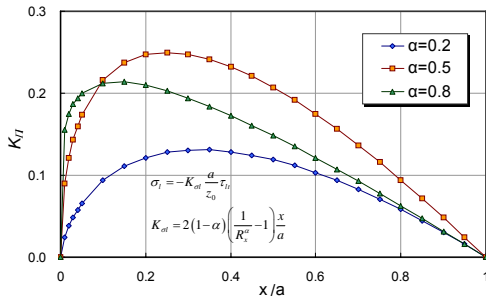


그림4. 전단 경간 위치에 따른 종방향 응력

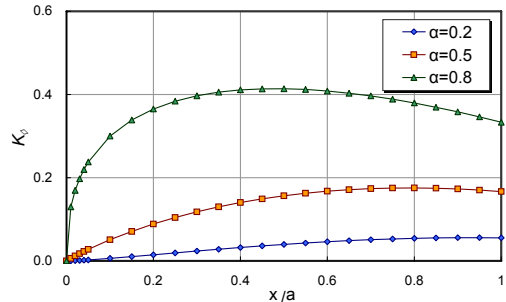


그림5. 전단 경간 위치에 따른 전단변형률

4. 결론

본 연구에서는 집중하중을 받는 콘크리트 보 부재에서 아치 효과를 고려한 기존의 전단해석모델을 개선하였다. 특히 아치효과에 의한 복부에 유발되는 압축응력을 전단응력에 관한 식으로 유도하였으며, 내부 모멘트 팔길이의 변화를 고려한 전단변형적합조건을 도출하였다. 개선된 전단해석모델은 향후 콘크리트 보 부재의 전단 거동 예측에 있어 매우 유용할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Kim, W., Rhee, C. S. and Jeong, J. P. (2006), Shear Behavioral Model Based on Shear Deformation Compatibility in Reinforced Concrete Members, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 18, No. 3, June, pp. 379-388.
2. Vecchio, F. J. and Collins, M. P. (1986), The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, Journal of the American Concrete Institute, Vol. 83, No. 2, March-April, pp. 219-231