

이방향 휨인장 시험(Biaxial Flexure Test; BFT) 및 삼차원 유한요소 해석

The Biaxial Flexure Test(BFT) method and its finite element analysis

김 지 환* 지 광 습** 강 진 구*** 오 흥 섭****
Kim, Ji-Hwan Zi, Goang-seup Kang, Jin-Gu Oh, Hong-seob

ABSTRACT

The biaxial tensile strength of concretes was measured by the Biaxial Flexure Test(BFT) which was recently developed to measure the biaxial tensile strength of concretes. From the test result, The circular specimen is generally fractured after 1~3 of the initial crack were formed on the top of specimen. The direction and number of the initial crack was completely arbitrary. As the specimen was larger, the number of the crack increased. And, the strengths of the different radii and thickness of specimens were calculated by the commercial finite element program to study the size effect of the biaxial tensile strength like the uniaxial tensile strength. The parameters such as radii to the support and to the load point, were studied using the program. The results of the FE analysis were entirely consistent with the predictive solution, when $b/a > 0.4$, and the thickness of the specimens were increased. On the other hands, those with lesser free length showed good results.

요 약

최근에 개발된 이방향 휨인장 시험법(Biaxial Flexure Test; BFT)을 적용하여 이축 인장강도를 측정 한 결과 원형 시편에 1~3개의 초기 균열이 불규칙 하게 발행한 후 파괴되는 것이 일반적이며, 실험체의 크기가 증가함에 따라 상대적으로 균열의 개수가 증가하는 양상을 갖는 것으로 관찰되었다. 또한, 일방향 휨인장과 마찬가지로 이방향 인장상태의 균열강도의 크기효과에 관한 연구를 위한 각종 변수의 선택에 따른 이방향 휨 인장시험체의 거동을 삼차원 유한요소 해석을 통해 분석하였으며, 지점간의 지름, 하중재하판의 지름, 시험체의 두께와 여유길이 등이 주요변수로 고려되었다. 분석결과 시험체가 $b/a > 0.4$ 인 경우에는 h/a 가 증가할수록, 여유길이의 크기가 작을수록 이방향 휨인장 응력 산정식과 일치함을 알 수 있었다.

* 정회원, 고려대학교, 건축·사회환경공학과, 석사과정
** 정회원, 고려대학교, 건축·사회환경공학과, 조교수
*** 정회원, 고려대학교, 건축·사회환경공학과, 석사과정
**** 정회원, 국립전주산업대학교, 토목공학과, 조교수

1. 서 론

최근 각종 콘크리트 구조물이 대형화되고 다양화됨에 따라 기존 콘크리트의 결점인 취성 또는 휨이나 인장응력에 저항할 수 있는 능력 등을 개선하기 위한 연구가 끊임없이 요구되고 있다. 이들 중 인장응력은 구조물의 내하력 평가, 사용성 설계 및 균열 예측을 위해 사용되는 중요한 요소이다. 일반적으로 인장강도를 측정하기 위해 널리 사용되는 시험법으로는 직접 인장법, 휨인장시험법, 활렬시험법 등이 있다(Bazant 외 1991, Raphael 1984, 안주옥과 서영갑 2004). 이와 같은 시험법들에 의해 측정된 강도는 보 또는 일방향 슬래브에 발생하는 일방향 휨균열을 예측하기에는 적당하지만, 교량의 바닥판, 콘크리트 포장 또는 활주로와 같은 탄성지반위의 슬래브, 고강도콘크리트의 장경간이방향 슬래브와 같은 두께가 얇은 판의 구조적 균열, 다축구속된 콘크리트의 표면 등에 발생하는 불규칙적인 이방향 균열을 예측하기에는 무리가 있어 이방향 인장강도로 설명하는 것이 보다 합리적이다.

본 연구에서는 최근에 개발된 이방향 휨인장 시험법(Biaxial Flexure Test; BFT)을 적용하여 이축 인장강도를 측정하였으며(지광습 외 2007), 각종 변수의 선택에 따른 이방향 휨인장 시험체의 거동을 분석하기 위해 삼차원 유한요소 해석을 수행하였다.

2. 이방향 휨인장 시험법(Biaxial Flexure Test; BFT)

이 기법은 일축 휨인장 시험체를 삼차원으로 일반화 시킨 것으로서 그 구성은 그림 1과 같으며, 그림 2는 삼차원 유한요소 해석으로 구한 시험체의 주응력 분포이다.

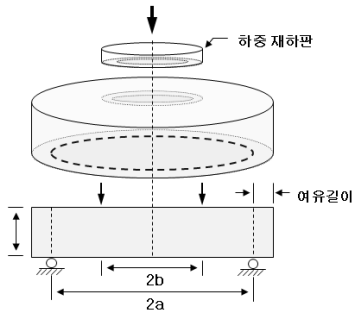


그림1. 이방향 휨인장 시험체의 구성

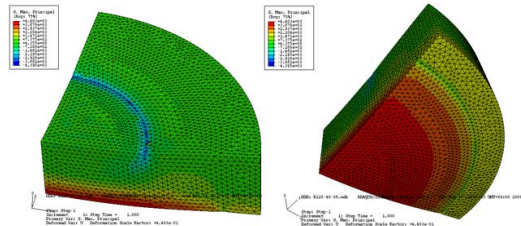


그림2. 이방향 휨인장 시험체의 주응력분포

본 시험법은 삼차원 시험법이기에 때문에 일반적으로 사용되는 일방향 하중-응력 식을 사용할 수 없다. 작용하중과 응력과의 관계를 알아보기 위해 보 이론에 근거하여 다음과 같은 응력 산정식을 개발한 바 있다.(지광습 외 2007)

$$\sigma = \frac{3}{4\pi h^2} \{ (1-\nu)[1 - (b/a)^2] - 2(1+\nu)\log(b/a) \} P \quad (1)$$

여기서 h 는 시험체의 두께, b/a 는 가력점과 지지점의 상호비율, P 는 하중, ν 는 포와송비이다. 이방향 휨인장 시험법을 통해 이축 인장강도를 측정된 결과 콘크리트 측면에 1~3개의 초기 균열이 발행한 후 파괴되는 것이 일반적이며, 실험체의 크기가 증가함에 따라 상대적으로 균열의 개수가 증가하는 양상을 갖는 것으로 관찰되었다.

3. 이방향 휨인장 시험의 삼차원 유한요소 해석

크기효과 이론에 의하면 균열이 발생하는 응력은 인장강도 뿐 만 아니라 구조체의 형상 및 크기에 영향을 받는다. 일방향 인장상태의 균열강도의 크기효과는 다음과 같이 주어진다(Bazant 2004).

$$\sigma_N = \sigma_N^\infty \left[\left(\frac{D_b}{D} \right)^{rn/m} + \frac{rD_b}{D} \right]^{1/r} \quad (2)$$

여기서 σ_N 은 크기 D 에 따른 균열강도이고, σ_N^∞ 는 무한히 작은 시험체가 가지는 균열강도이며, D_b 는 구조체의 크기와 형상에 의해 결정된다. 일방향 휨인장강도는 그림 3과 같이 연구되어 잘

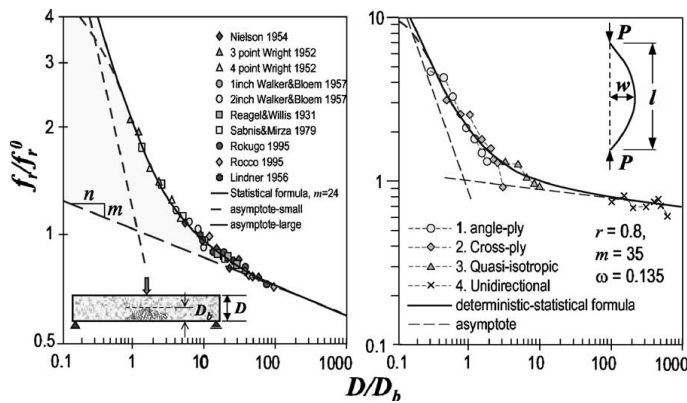


그림3. 콘크리트 및 합성재료의 휨인장 강도의 크기효과 (Bazant 2004)

밝혀진 바 있으나, 이방향 인장상태의 균열강도의 크기효과에 관한 연구는 아직 국내외적으로 이루어진 바가 없다. 따라서, 본 연구진은 각종 변수 등 크기효과에 따른 이방향 휨 인장시험체의 거동을 분석하고, 식 (1)의 적용범위에 대한 지적에 대해 최근 삼차원 유한요소해석을 통해 그림 4와 같이 확인한 바 있다. 그 결과 기존 연구에 사용된 형상의 경우 충분한 정확도를 가지고 있음을 확인하였으며, 또한 가력점과 지지점의 상호비율이 너무 작거나 시험체의 두께가 얇고, 여유길이가 적을수록 이방향 휨인장 응력 산정식과 일치함을 알 수 있었다.

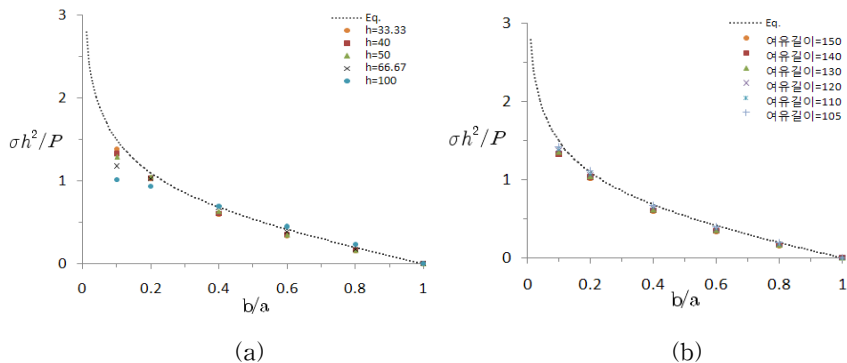


그림4. (a) 시험체의 두께에 따른 적용범위 (b) 시험체의 여유길이에 따른 적용범위

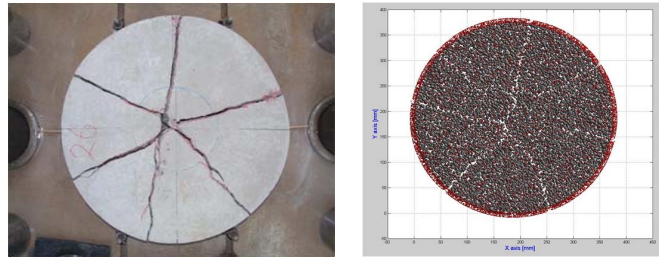


그림 5. (a) 실험 후 균열 양상 (b) CSL 모델 해석 결과 시험체의 균열 양상

그림 5는 이방향 휨 시험 후 시험체의 균열 형상(a)과 콘크리트 골재 단위 해석 모델인 CSL 모델 (Confinement-Shear Lattice Model; Cusatis외 2003)로 모델링하여 시험체의 균열(b)을 모사한 것이다. CSL 모델에 의한 이방향 휨 시험체의 균열해석 결과 시험체의 균열 패턴과 같음을 알 수 있다.

4. 결 론

이방향 휨인장 시험의 삼차원 유한요소해석 결과, 일방향 휨인장 강도와 마찬가지로 이방향 휨인장 강도 또한 구조체의 형상 및 크기에 영향을 받는다는 것을 알 수 있었으며, 가력점과 지지점의 상호비율 $b/a > 0.4$ 인 경우에는 h/a 가 증가할수록, 여유길이의 크기가 작을수록 이방향 휨인장 응력 산정식과 일치함을 알 수 있었다. 차후 시험체의 두께와 지지점 크기 비율에 따른 응력대 하중 비, 자중을 고려한 해석 등 구조체의 크기가 균열발생의 사용성에 미치는 영향을 정량적으로 파악하기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기반구축사업 05 기반구축 D04-01과 건설핵심기술사업 05 첨단융합 B01의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Bazant, Z. P. (2004). Probability distribution of energetic-statistical size effect in quasibrittle fracture, Probabilistic Engineering Mechanics, 19(4): 307-319.
2. Bazant, Z. P., Kazemi, M. T. (1991). Size effect in Brazilian split-cylinder tests: measurements and fracture analysis, ACI Material Journal, 88(3): 325-332.
3. Raphael, J. M. (1984). Tensile strength, Concrete International, 81(2): 158-165.
4. 안주옥, 서영갑. (2004). 최신 철근 콘크리트 공학. 시이텍 미디어.
5. 지광습, 오홍섭, 최진혁. (2007). 콘크리트의 순수 등방성 휨인장강도 시험법. 대한토목학회논문집, 27(5A): 753-758.
6. Cusatis G., Bazant Z. P., Cedolin L., "Confinement-Shear Lattice Model for Concrete Damage in Tension and Compression: I. Theory", Journal of Engineering Mechanics-ASCE, Vol. 129, No. 12, pp. 1439-1448, 2003.