

섬유혼입률이 초고강도 강섬유 보강 콘크리트의 인장연화거동에 미치는 영향

Effect of fiber volume fraction on the tensile softening behavior of Ultra High Strength Steel Fiber-Reinforced Concrete

강 수 태* 박 정 준* 이 시 영** 박 건** 홍 기 남*** 김 성 욱****
Kang, Su Tae Park, Jung Jun Lee, Si Young Park, Gun Hong, Sung Wook Kim, Sung Wook

ABSTRACT

Ultra high strength steel fiber-reinforced concrete is characterized with high tensile strength and ductility. This paper revealed the influence of fiber volume fraction on the tensile softening behaviour of ultra high strength steel fiber-reinforced concrete and developed tensile softening model to predict the deformation capacity by finite element method analysis with experimental results. The initial stiffness of ultra high strength steel fiber-reinforced concrete was constant irrespective of fiber volume fraction. The increase of fiber volume fraction improved the flexural tensile strength and caused more brittle softening behaviour. Finite element method analysis proposed by Uchida et al. was introduced to obtain the tensile softening curve from three point notched beam test results and we proposed the tensile softening model as a function of fiber volume fraction and critical crack width.

요 약

초고강도 강섬유 보강 콘크리트의 역학특성은 높은 인장강도와 균열 이후의 높은 연성발현을 들 수 있다. 본 연구에서는 섬유혼입률의 변화에 따른 초고강도 강섬유 보강 콘크리트의 인장연화 특성을 시험적으로 규명하고, 시험결과를 토대로 FEM 해석을 통해 변형성능을 정확하게 추정할 수 있는 인장연화모델을 구축하고자 하였다. 초고강도 강섬유 보강 콘크리트의 인장거동은 강섬유의 혼입률에 관계 없이 일정한 값의 초기강성을 나타내었으며, 강섬유의 혼입률이 증가할수록 초고강도 강섬유 보강 콘크리트의 휨인장강도는 증가하고 연화거동은 취성적인 것으로 나타났다. 노치넨 보에 대한 3점 휨실험 결과를 토대로 초고강도 강섬유 보강 콘크리트의 인장연화곡선을 얻기 위해 Uchida 등이 제안한 역해석법을 사용하였으며, 섬유혼입률과 임계균열폭의 함수로서 인장연화모델을 제안하였다.

* 정회원, 한국건설기술연구원 구조재료연구실 연구원

** 정회원, 충북대학교 토목공학과 박사과정

*** 정회원, 충북대학교 토목공학과 교수

**** 정회원, 한국건설기술연구원 구조재료연구실 책임연구원

1. 서론

콘크리트는 압축강도 및 내구성이 우수한 건설재료로서 강재와 더불어 교량건설에 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 콘크리트는 인장강도와 휨강도가 작아 균열이 발생하기 쉬운 본질적인 결함을 가지고 있으며, 압축강도가 증가함에 따라 취성이 점점 증가하여 실용화에 많은 문제점을 내포하고 있다. 최근에 연구되고 있는 초고강도 강섬유 보강 콘크리트의 역학적 특성은 높은 인장강도와 균열 이후의 높은 연성발현을 들 수 있다. 이러한 초고강도 강섬유 보강 콘크리트의 인장특성은 구조물이 휨파괴와 전단파괴에 도달할 때까지의 연성거동에 있어 매우 중요한 역할을 하게 된다. 초고강도 강섬유 보강 콘크리트를 이용한 구조물에서는 우수한 재료성능에 의해 구조부재의 축소 및 경량화를 도모할 수 있으므로 건설경비의 절감 등이 가능하다. 초고강도 강섬유 보강 콘크리트를 이용한 구조물의 실용화를 도모하며 효율적인 활용 및 사용용도를 개발하기 위해서는 그 역학적 특성을 활용한 설계 및 구조해석기술의 개발이 반드시 필요하다. 그러나 섬유의 하중부담 평가를 포함한 정량적 평가를 위한 시험데이터가 아직 충분하지 않을 뿐 아니라 초고강도 강섬유 보강 콘크리트를 구조부재에 적용하고 그 특성을 이용한 대변형 성능을 기대하기 위해서는 FEM해석 등의 방법에 의해 종국상태 등을 정확하게 추정하는 것이 중요하다. FEM해석을 통해 변형성능을 정확하게 추정하기 위해서는 신뢰성 있는 인장연화모델이 반드시 필요하다.

따라서 본 연구에서는 초고강도 강섬유 보강 콘크리트의 인장연화 특성을 시험적으로 규명하고, 시험결과를 토대로 FEM 해석을 통해 변형성능을 정확하게 추정할 수 있는 인장연화모델을 구축하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

초고강도 강섬유 보강 콘크리트의 인장연화곡선을 구하는 시험방법으로는 일반 콘크리트와 같이 휨시험, 일축인장시험, 그리고 CT(Compact Tension)시험이 있다. 이 중에서 시험이 용이하여 가장 많이 수행되고 있는 시험방법이 휨시험이다. 일축인장시험은 인장연화곡선을 시험적으로 직접 구하는 것이 가능하다는 장점이 있지만 시험의 정확도 확보에 많은 어려움이 있다. CT시험은 작은 공시체 체적에서 큰 파괴면적을 얻고, 공시체 자중에 대한 영향이 작은 것이 큰 장점이다. 그러나 CT법은 기본적으로 휨시험과 같이 간접적으로 인장연화곡선을 구하는 방법으로 시험시 특수한 장치가 필요하여 많이 수행되고 있지는 않다.

본 연구에서는 초고강도 강섬유 보강 콘크리트의 인장연화곡선을 구하기 위해 일본콘크리트공학회(Japan Concrete Institute)의 섬유보강 콘크리트의 하중-변위곡선 시험법(JCI-S-002-2003)에 준하여 3점 휨시험을 수행하였다. 강섬유의 혼입률을 시험변수로 하였으며 강섬유 혼입률의 범위는 부피비로 1%에서 5%까지 1%씩 증가시켜 5개 그룹으로 분류하였다. 본 연구에서 사용된 강섬유는 길이 13mm, 직경 0.2mm의 직선형 강섬유이다. 휨시험체는 100×100×400mm로 제작되었으며 순지간 300mm에 중앙부 노치의 깊이는 30mm로 하였다. 시험체는 시험변수별 5개씩 제작하였다. 표 1에는 본 연구에서 사용한 콘크리트의 배합을 나타내었다.

콘크리트 양생이 종료되고 시험을 수행하기 직전에 다이아몬드 커터기를 이용하여 시험체 중앙에

표 1 콘크리트 배합

콘크리트 배합(상대비*)						
시멘트	배합수	실리카폼	잔골재	충전재	SP제	강섬유
1.00	0.25	0.25	1.10	0.30	0.018	2% vol.

* 상대비: 시멘트에 대한 질량비, 단 강섬유는 전체 체적에 대한 부피비로 나타냄.

노치를 주었다. 노치의 폭은 4mm로 일정하게 유지하였다. 휨시험에 이용한 시험장치는 하중과 변위 조절이 가능한 2,000 kN 용량의 만능재료시험기이며, 하중은 변위조절 방식으로 분당 시편 지간(300mm)의 1/1500의 속도로 재하하였다. 또한, 시험중 시험체 중앙에서의 처짐을 측정하기 위해서 10mm 용량의 LVDT를 양면에 1개씩 설치하였다. 노치부의 균열폭을 측정하기 위해서는 크립게이지를 시험체의 하면에 부착하여 이용하였다. 그림 1은 휨시험의 시험체 및 시험장치에 관한 제원을 나타낸 것이다.

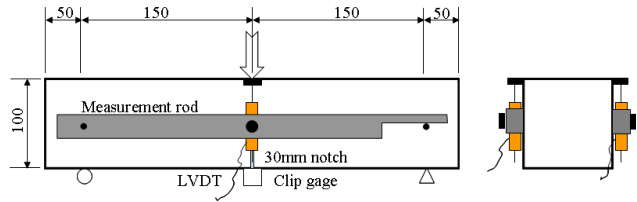


그림 1 휨시험체와 시험장치

3. 실험결과 및 분석

그림 2와 그림 3은 각각 100X100X400mm 시험체의 강섬유 혼입률별 평균하중-CMOD관계와 평균하중-처짐 관계의 실험결과를 나타낸 것이다. 그림 2에서 CMOD의 값은 약 4mm이내까지 측정되었는데 이것은 본 연구에서 사용된 크립게이지의 용량이 5mm이기 때문에 그 이상의 균열폭을 측정할 수 없었기 때문이다. 그림 3은 평균하중과 처짐과의 관계를 나타낸 것으로, 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 초기강성에는 큰 변화가 없으나 최대하중이 점차적으로 증가하고 연화구간에서의 거동이 점점 취성적으로 변화함을 보이고 있다.

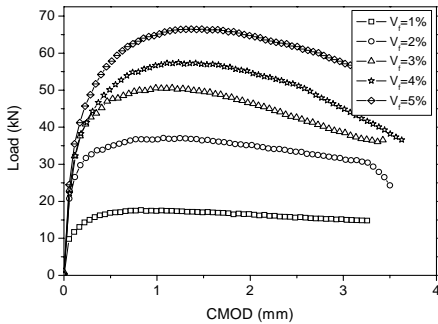


그림 2 평균 하중-CMOD관계의 비교

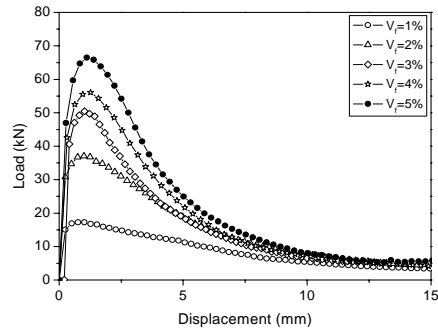


그림 3 평균 하중-처짐 관계의 비교

본 연구에서는 초고강도 강섬유 보강 콘크리트의 인장연화곡선을 얻기 위해 Uchida 등이 제안한 역해석법을 사용하였다. 역해석에 이용한 FEM모델을 그림 4에 나타내었다. 유한요소 모델은 680개의 절점과 1206개의 삼각형 평면응력요소로 구성하였으며, 시험체 중앙의 노치부는 균열진전 상태를 정확하게 평가하기 위해서 매우 세밀하게 모델링하였다.

FEM 역해석을 통해 얻어진 각 강섬유 혼입률에 대한 인장연화곡선을 정리하여 그림 5에 나타내었다. 그림 5는 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 인장강도가 점차적으로 증가함을 보이고 있다. 그리고 공통적으로 모든 인장연화곡선에서 인장강도 이후 일정구간 인장강도를 유지하다가 하중이 감소하기 시작하여 일정응력에서 수렴하는 경향을 나타냄을 그림 5를 통해서 확인 할 수 있다. 또한 점차 인장응력이 감소하는 기울기가 강섬유 혼입률이 증가면서 점점 급해지는 경향을 보이고 있다.

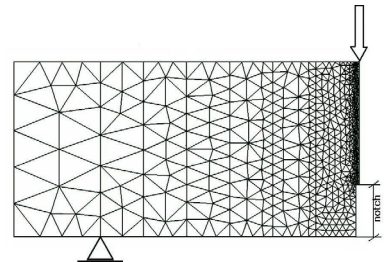


그림 4 FEM 역해석 모델링

본 연구를 통해서 얻은 인장연화곡선은 그림 5에 나타난 바와 같이 크게 인장응력이 일정하게 유지되는 구간과 응력이 감소하는 구간으로 구분할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 인장강도가 일정하게 유지되는 구간을 직선으로 표현하고 응력이 감소하는 구간을 지수함수로 표현하였다. 이때 인장응력이 일정하게 유지되는 구간의 최대변위 w_o 는 그림 5에 보이는 바와 같이 강섬유 혼입률과 관계없이 거의 일정한 값을 나타내는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 5개 혼입률의 평균치를 적용하여 그 값을 0.26mm로 결정하였으며, 이 값을 임계균열폭으로 정의하였다.

실험결과에 대한 회귀분석을 통하여 식 (1)~식 (3)을 인장연화모델로 제안하였다.

$$f_t = 131 \cdot (V_f)^{1/3} - 22 \text{ (MPa)} \quad (1)$$

$$w < w_o \text{ 일 때, } \sigma_w = f_t \text{ (응력이 일정하게 유지되는 구간)} \quad (2)$$

$$w > w_o \text{ 일 때, } \sigma_w = f_t \cdot b^{(w-w_o)} \text{ (응력이 감소하는 구간)} \quad (3)$$

여기서, w_o 는 0.26mm이며, $b = 0.3 - 0.1 \cdot \ln(V_f)$ 이다.

4. 결 론

본 연구에서는 강섬유 혼입률이 초고강도 강섬유 보강 콘크리트의 인장연화거동에 미치는 영향을 파악하였다.

- (1) 초고강도 강섬유 보강 콘크리트에서 강섬유의 혼입률에 관계없이 일정한 값의 초기강성을 나타내었다.
- (2) 강섬유의 혼입률이 증가할수록 초고강도 강섬유 보강 콘크리트의 휨인장강도는 증가하고 연화거동은 취성적인 것으로 나타났다.
- (3) 초고강도 강섬유 보강 콘크리트의 인장연화곡선을 얻기 위해 Uchida 등이 제안한 역해석법을 사용하였으며, 섬유혼입률과 임계균열폭의 함수로서 인장연화모델을 제안하였다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 한국건설기술연구원의 기관고유사업인 ‘하이브리드 사장교용 초고성능 콘크리트 개발’에 관한 일련의 연구로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 橋高儀典など (1997), “高強度コンクリートの破壊パラメータに及ぼす短繊維混入の影響-高強度繊維補強コンクリート(HFRC)の破壊性状に関する研究”, 日本建築學會構造係論文集, Vol. 501, pp.7-12.
2. Wang, Y, Li, V. C. and Backer, S. (1990), "Experimental Determination of Tensile Behavior of Fiber Reinforced Concrete", ACI Materials Journal, Vol. 87, No.5, pp.461-468.
3. 三橋博三など (1993), “破壊力學手法に基づく繊維補強セメント係複合材料の力學特性にする一考察”, 日本建築學會構造係論文集, Vol. 449, pp.1-7.
4. Uchida, Y., Kurihara, N. (1995), "Determination of tension softening diagrams of various kinds of concrete by means of numerical analysis. FRAMCOS-2, Germany, AEDIFICATION.

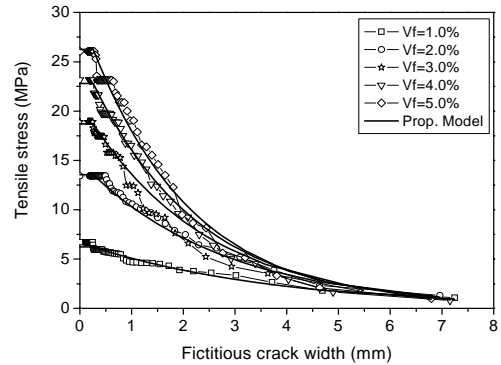


그림 5 역해석결과와 인장연화모델의 비교