

초고성능 콘크리트의 인장거동 설계기준 정립에 관한 연구

The Design Guidelines for the Tensile Behavior of Ultra-High Performance Concrete

강 수 태* 조 창 빈** 박 종 섭** 박 정 준* 류 금 성* 김 병 석***
Kang, Su Tae Joh, Changbin Park, Jong Sup Park, Jung Jun Ryu, Gum Sung Kim, Byung Suk

ABSTRACT

To design structures with Ultra High Performance Concrete (UHPC), it is necessary to estimate the mechanical properties first of all. The most attractive characteristics of UHPC are the considerable tensile strength and behavior. Therefore the most important thing in order to properly design UHPC structures is to establish the constitutive model to represent the tensile behavior of UHPC. In this study, it was tried to find out the tensile behavior of UHPC by experiments and analyses. Through comparisons with the French SETRA/AFGC recommendations and the Japanese recommendations for the Ultra High-Strength Fiber-Reinforced Concrete Structures, a reasonable model which could represent the tensile stress-strain relationship in the structural design was proposed

요 약

UHPC를 이용한 구조물 설계가 이루어지기 위해서는 우선적으로 재료의 역학적 거동 특성을 명확히 규명하여야 하며, 일반 콘크리트와 비교할 때 가장 큰 특징은 구조적으로 유효한 인장강도 및 인장거동이다. 따라서 UHPC를 활용한 적절한 설계가 되기 위해서는 특히 UHPC의 인장거동의 특성을 나타내는 구성모델의 확립이 무엇보다 중요하다고 말할 수 있다. 본 연구에서는 UHPC의 인장거동을 실험 및 해석을 통해 규명하고자 하였다. 프랑스 SETRA/AFGC에서 제시한 설계기준(안)과 일본 JSCE에서 제시한 초고강도 섬유보강 콘크리트의 설계·시공지침(안)과의 비교를 통해 UHPC의 인장연화거동과 인장응력-변형률 관계에 대해 합리적인 거동모델을 제시하였다.

* 정희원, 한국건설기술연구원 구조재료연구실 연구원
** 정희원, 한국건설기술연구원 구조시스템연구실 선임연구원
*** 정희원, 한국건설기술연구원 구조시스템연구실 책임연구원

1. 서론

UHPC의 가장 큰 장점 중의 하나는 인장강도의 향상과 높은 인성을 들 수 있다. UHPC의 직접인장강도는 10MPa 이상을 나타내고, 강섬유 혼입효과로 인해 인장거동 시 변형률 경화거동을 보이며 높은 연성과 인성을 나타낸다. UHPC를 이용한 구조물 설계가 이루어지기 위해서는 우선적으로 재료의 역학적 거동 특성을 명확히 규명하여야 하며, 일반 콘크리트와 비교할 때 가장 큰 특징은 구조적으로 유효한 인장강도 및 인장거동이다. 따라서 UHPC를 활용한 적절한 설계가 되기 위해서는 특히 UHPC의 인장거동의 특성을 나타내는 구성모델의 확립이 무엇보다 중요하다고 말할 수 있다.

현재까지 전세계적으로 UHPC를 이용한 구조물 설계에 가장 일반적으로 사용되어지고 있는 설계기준 또는 지침으로는 프랑스의 SETRA/AFGC Recommendations [SETRA/AFGC, 2002]과 일본의 JSCE 초고강도 섬유보강 콘크리트의 설계·시공지침(안)[JSCE, 2006]을 들 수 있다. 이 외에도 독일 DAFStB의 UHPC 설계기준(안)[DAFStB, 2003], 호주의 UHPC를 이용한 프리스트레스 콘크리트 보에 대한 설계 가이드라인[Gowripalan and Gilbert, 2000], 미국 MIT의 UHPC 콘크리트 거동의 최적설계 방법[MIT, 2003] 등이 있다.

여기에서는 KICT[2006]에서 개발한 초고성능 콘크리트(Ultra High Performance Concrete, UHPC)의 인장거동을 평가하고, UHPC를 이용한 구조 부재의 설계 시 현재 제시되어 있는 프랑스의 SETRA/AFGC Recommendations 또는 일본 JSCE의 초고강도 섬유보강 콘크리트의 설계·시공기준(안)과의 비교를 통해 설계에 이용할 수 있는 인장구성모델을 제시하고자 하였다.

2. UHPC 인장연화거동 실험결과 및 비교

강수태 등[2007]은 UHPC의 직접인장실험과 노치넨 보에 대한 휨인장실험의 결과를 근거로 하여 Uchida 등이 제안한 역해석법을 이용하여 인장연화곡선을 구하였으며, JSCE[2004]에서 제시하고 있는 인장연화모델과 비교하였다. 그 결과는 그림 1과 같다. 그림 1에서 'Experimental Result'는 직접인장실험으로 구한 인장연화거동을 의미하고, 'Analytical Result'는 휨시험결과의 역해석을 통해 구한 인장연화거동을 나타낸다. KICT에서 수행한 실험을 통해 해석적으로 구한 인장연화거동은 직접인장 결과와 비교할 때 거의 유사한 거동을 보이며, JSCE에서 제시하고 있는 인장연화곡선 모델과 비교할 때 유사한 거동특성을 나타내었다. 따라서 JSCE와 같은 형태로 인장연화모델을 나타낼 수 있으며, 형상은 그림 2와 같이 모델화하여 사용해도 좋다. 그림 2에서 f_{tk} 는 설계기준 인장강도를 나타내고, w_p 는 균열발생 후 일정응력을 유지하는 구간에서의 최대 균열개구변위를 의미하며, w_u 는 인장응력이 더 이상 존재하지 않는 상태에서의 균열개구변위를 나타낸다. 표준배합을 이용하여 표준 고온양생을 실시한 UHPC의 경우에는 JSCE에서 제시하는 인장연화모델에 근거하여, 설계기준 인장강도, $f_{tk}=8.8\text{MPa}$, $w_p=0.5\text{mm}$, $w_u=4.3\text{mm}$ 를 이용할 수 있다.

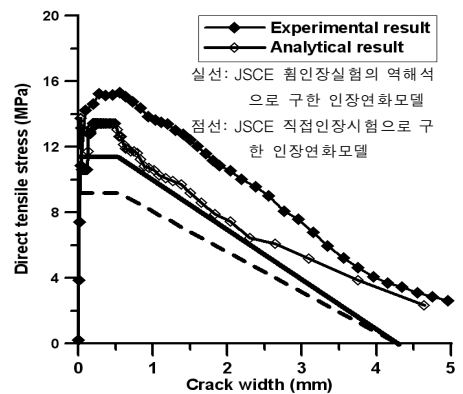


그림 1 JSCE 인장연화모델과의 비교

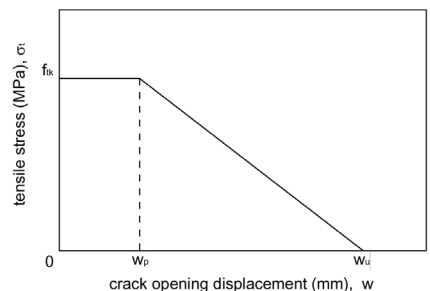


그림 2 UHPC의 인장연화모델

3. UHPC 인장거동 모델

한편 KICT의 UHPC를 설계에 반영함에 있어 현재 제시되어 있는 프랑스의 SETRA/AFGC Recommendations 또는 일본 JSCE 섬유보강 초고강도 콘크리트의 설계·시공지침(안)을 사용 가능성 여부를 파악해 보았다. 실제 UHPC의 압축거동 및 인장거동을 반영하여 적층법을 이용한 단면해석을 통해 실험결과와 해석결과를 비교하였다.

우선 UHPC를 설계에 반영함에 있어 현재 제시되어 있는 프랑스의 SETRA/AFGC Recommendations 또는 일본 JSCE 섬유보강 초고강도 콘크리트의 설계·시공지침(안)에 대해 적용성을 검토하였다. 인장연화곡선을 응력-변형률 곡선으로 변환하기 위해 적용하는 등가균열간격은 JSCE에서는 L_{eq} , SETRA/AFGC에서는 L_c 를 사용하고 있으며, SETRA/AFGC에서의 값과 JSCE의 값 사이에서 극한변형률이 상당한 차이를 보였다. L_{eq} 와 L_c 는 각각 다음의 식으로 주어진다.

$$L_{eq} = 0.8h \left\{ 1 - \frac{1}{(1.05 + 6h/l_{ch})^4} \right\}, \quad L_c = \frac{2}{3}h$$

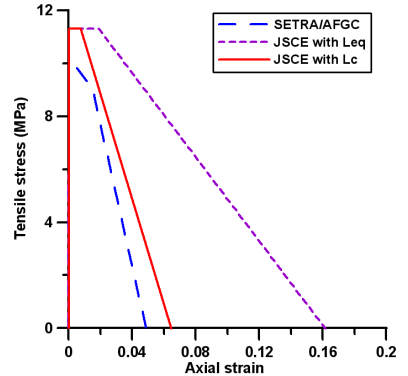


그림 3 인장응력-변형률 관계의 비교

위 식에서 l_{ch} 는 파괴에너지와 인장강도, 탄성계수로부터 구해지는 재료의 특성길이를 나타내고, h 는 단면의 높이를 의미한다. 그림 3은 SETRA/AFGC에서 제시하는 인장응력-변형률 곡선, JSCE에서 제시하는 인장응력-변형률 곡선 그리고 JSCE에서의 인장응력-변형률 곡선에서 사용한 L_{eq} 대신 SETRA/AFGC에서의 L_c 를 사용한 경우를 비교하여 나타낸 것이다. JSCE에서 L_{eq} 대신 L_c 를 사용한 경우 SETRA/AFGC에서의 거동과 상당히 유사함을 알 수 있다.

그리고 UHPC 보에 대해 실제 UHPC의 압축거동 및 인장거동을 반영한 단면해석을 통해 실험결과와 해석결과를 비교를 통해 JSCE와 SETRA/AFGC 설계기준의 적합성을 평가하였다. 실험결과에 따르면 JSCE에서 제시하는 L_{eq} 보다는 SETRA/AFGC에서 제시하는 L_c 를 적용하는 것이 실제거동과 유사한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 그림 4는 SETRA/AFGC의 L_c 를 적용한 경우와 JSCE의

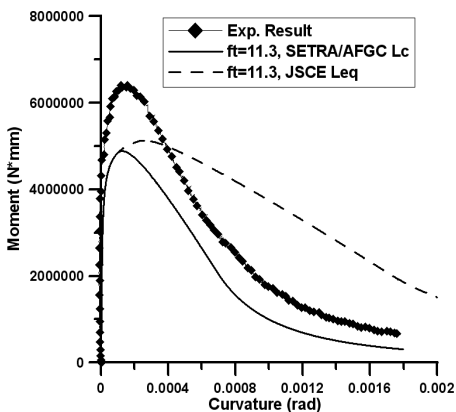


그림 4 SETRA의 L_c 와 JSCE L_{eq} 의 비교

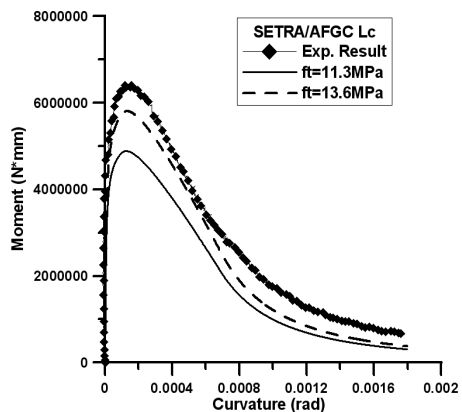


그림 5 인장강도 변화에 따른 인장거동 비교

L_{eq} 을 적용한 경우를 비교하여 나타낸 것이다. 이러한 결과는 단면의 높이가 100mm의 시험체에 대한 결과를 근거로 확인된 것으로 실제 구조물에서의 특성은 큰 단면크기를 가진 실험체의 실험결과를 근거로 확인해야 할 것으로 판단된다. JSCE에서 제시한 L_{eq}/h 와 h 의 관계 그래프는 작은 값의 h 에 대해서는 상당히 과소평가하는 경향이 있는 것으로 판단된다. 그림 5는 JSCE[2006] 연구에서의 평균인장강도 11.3MPa 대신 강수태 등 [2007]에서 구한 평균인장강도 값인 13.6MPa를 적용한 경우에 대해 비교 검토한 결과로서 실험결과와 해석결과가 아주 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 본 연구의 결과를 근거로 판단할 때

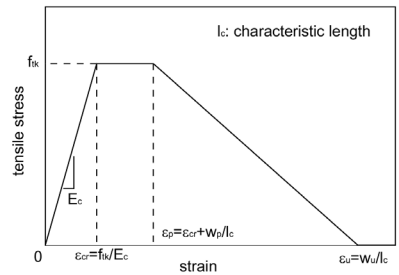


그림 6 UHPC의 인장응력-변형률 곡선

KICT에서 개발한 UHPC의 역학적 특성값을 사용하여 설계를 할 경우, $L_{eq} = L_c = 2/3h$ 를 사용한다면 SETRA/AFGC 또는 JSCE의 설계기준을 따르는 것에 따른 큰 차이는 없을 것으로 판단된다. 본 연구로부터 인장응력-변형률 관계는 그림 6에 나타낸 모델을 이용해도 된다. 이 곡선은 그림 2에 나타낸 인장연화곡선을 바탕으로 특성길이 l_c 을 이용하여, 이것을 인장응력-변형률 곡선으로 변환한 것이다. 특성길이, l_c 는 단면의 높이, 단면형상에 의해 다르다. 표준배합에 대해 표준 고온양생을 실시한 UHPC에 있어서 사각형 또는 T형 단면의 경우, $l_c = 2/3h$ 을 사용할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 UHPC의 인장거동을 실험 및 해석을 통해 규명하고자 하였다. 프랑스 SETRA/AFGC에서 제시한 설계기준(안)과 일본 JSCE에서 제시한 초고강도 섬유보강 콘크리트의 설계·시공지침(안)과의 비교를 통해 UHPC의 인장연화거동과 인장응력-변형률 관계에 대해 합리적인 거동모델을 제시하였다.

감사의 글

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

참고문헌

1. Ultra High Performance Fiber-reinforced Concretes, BFUP Groups, AFGC/SETRA, 2002.
2. Recommendations for Design and Construction of Ultra High-Strength Fiber-Reinforced Concrete Structures, -Draft, JSCE, 2004.
3. DAfStB, State-of-the-art Report on Ultra-High-Performance Concrete - Concrete Technology and Design, draft 3, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton/German Association for Reinforced Concrete, Berlin, Germany, 2003.
4. N. Gowripalan and R. I. Gilbert, Design Guidelines for RPC Prestressed Concrete Beams, The University of New South Wales, Australia, 2000.
5. MIT, Model-Based Optimization of Ultra High Performance Concrete Highway Bridge Girders, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, 2003.
6. 한국건설기술연구원, 콘크리트 교량의 내구성 향상 기술 개발, 2006.
7. 강수태 외, 'UHPC의 직접인장응력과 균열개구변위와의 관계에 관한 실험적 연구', 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, pp. 433-436, 2008.