

다중균열분산특성을 고려한 HPFRCC부재의 휨해석

Flexural Analysis of HPFRCC Beam Considering Multiple Cracks

장규현*

신경준**

신용석***

Jang Kyu-Hyeun Shin Kyung-Joon Shin Yong-Seok

ABSTRACT

In this paper, analysis method of HPFRCC is proposed as predicting properties flexural behavior. For analyzing HPFRCC beam, properties of strain-hardening, multiple cracking, and crack spacing control are considered as non-homogeneous material properties of the beam. This paper focused on the deflection, maximum moment of the flexural beam, distribution of crack width with the monte carlo simulation.

1. 연구배경 및 목적

시멘트계 재료는 우수한 압축강도에 비해 균열이 발생하기 쉬운 결점을 가지고 있으며, 최대응력에 도달한 이후에 균열의 발생과 함께 급격한 파괴가 발생하는 취성적인 성질을 가지고 있다. 이러한 성질을 개선하기 위해 높은 연성을 갖는 고인성 섬유복합재료에 대한 관심이 크게 증가하고 있으며, 특히 High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites(이하, HPFRCC)이 국내에 소개되면서 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. HPFRCC는 휨모멘트 또는 인장력 작용 하에 있어서 초기 균열이 발생한 이후에도 급격한 부재 강성의 감소 없이 변형 증가와 함께 응력이 증가하는 변형률 경화(Strain Hardening)특성과 다수의 미세 균열이 발생함으로써 균열폭을 일정폭 이하로 유지할 수 있는 제어 특성을 나타내어 에너지 흡수능력 및 변형 능력이 향상시킬 수 있는 특징이 있다. 본 논문에서는 HPFRCC보의 휨거동 특성을 예측할 수 있는 방법을 제안하고자 한다. HPFRCC휨부재의 비균질성을 고려하여 균열 발생 단계를 적절히 묘사하고 변형률 경화 특성과 다중 균열, 그리고 균열폭 제어 특성을 휨해석에 반영하고자 한다. 그리고 Monte Carlo Simulation을 통해서 HPFRCC휨 부재의 처짐과 최대휨모멘트, 균열폭에 대한 분포를 확인하고자 한다.

2. HPFRCC의 배합설계

HPFRCC의 성능을 발휘할 수 있는 표1과 같은 배합을 결정하였다. 시멘트와 물, 규사를 먼저 배합하여 시멘트 페이스트 상태를 만든 후에 섬유를 혼입하여 비빔을 실시하였다. 배합에는 핸드믹서를 사

* 정회원, 동부건설 토목사업부

** 정회원, 서울대학교 대학원

*** 정회원, 현대산업개발

용하였으며, 섬유 혼입량은 2%이고, 적절한 양의 고성능유동화제의 첨가로 양호한 유동성을 확보할 수 있었고 분리 저감제를 사용하여 배합시 페이스트와 섬유가 분리되는 현상을 방지 하였다.

3. HPFRCC의 부재 실험

휨 부재의 4점 재하 실험을 위하여 두께 30mm, 폭 100mm, 길이 400mm, 그리고 두께 100mm의 보를 제작한 후, 부재는 탈형 후 수중 양생하였으며 28일이 지난 후 강도를 측정하였다. 그림 2에서 보와 같이 4점재하의 휨 실험을 수행하였으며, 휨 구간의 길이는 300mm로 설정하여 하중을 재하였다. 30mm 두께인 부재는 JCI-SF4에서처럼 부재 내에 처짐 측정의 기준점을 설정하기가 곤란하기 때문에 그림에 보인바와 같이 부재 외부에 측정기준점을 두고 LVDT를 이용하여 중앙부 변형량을 측정하였다. 균열폭을 측정하기 위해서 4점 재하 시험 중 주균열(국소화 진행 예상 균열)이 생기는 위치에 COD(Crack Opening Displacement) gauge를 설치하고 이를 이용하여 주균열의 균열폭을 측정하였다.(그림1) 압축시편은 지름 100mm, 높이 200mm의 크기로 제작하여 시험 하였다. HPFRCC의 인장 특성을 알아보기 위하여 그림 2와 같은 직접 인장 시편을 제작 하였다. 크기는 전체 길이 430mm, 폭 130mm, 중앙부 최소폭 60mm이다. 그리고 중앙부에 균열을 유도하기 위하여 곡률을 두었으며, 시편 양쪽에 변위계를 설치하여 부재의 변형률을 측정하였다. 그 결과를 해석시 인장 특성에 고려하였다.

표 1 배합설계표

	W/C	S/C	Unit Content(kg/m ³)			sp	mc	Fiber
			C	W	S			
mix	0.46	1.0	863	397	863	-	-	12mm 2%

sp : super plasticizer , mc : methyl cellulose

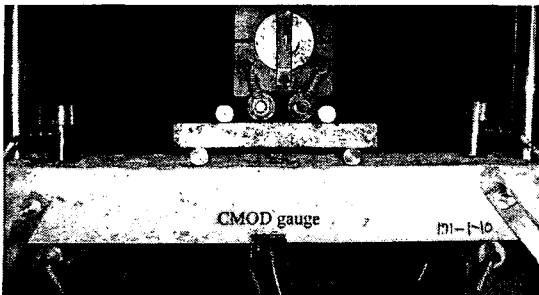


그림 1 Test Setup for Crack width

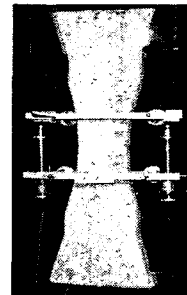


그림 2 직접인장시험

4. HPFRCC보의 해석 모델

4점 재하되는 휨부재를 모델링하기 위해서 하중이 재하되는 등모멘트구간을 여러 개의 요소로 나누었다. 나누어진 각각의 요소들은 서로 다른 재료 물성치를 갖도록 모델링하였다. 여기서 재료 물성치는 초기 균열강도와 파괴 강도를 말하는 것으로 각각의 요소에 다른 강도를 부여함으로써 균열의 진행과 다중균열을 묘사하고자 하였다. 각 강도는 실험값과 일본 JSCE TC 334에서 제안하고 있는 값을 기준으로 하였으며, 이를 정규분포로 가정하고, 분포 내에서 임의의 값을 추출하여 각 요소에 부여하

여 비균질보로써 해석하였다. 이때 임의 강도를 추출하여 요소에 부여하는 과정에서 Monte Carlo Simulation을 이용하였다. HPRCC의 인장영역에서 가상변형률경화성질(pseudo-strain hardening)은 bilinear 응력 - 변형률 관계로 표현된다.(maalej , M. & Li, V. C. 1994) 이것은 압축측에서도 마찬가지로이다. 또한 압축 연화와 콘크리트의 파괴도 고려하여 모델링 하였다. 4절점 휨 실험에서 ECC의 국소화(localization)와 연화(softening)는 최대응답이전에 중요한 영향을 미칠 것이다. 사실 최대하중-처짐 이전 응답의 50%까지 재료의 국소화와 관계가 있다. 이것은 응력 - 균열폭 관계에 영향을 끼치는 HPRCC의 연성거동에 기인한다. 그리고 연화를 선형으로 최대부터 응력이 "0"이 될까지 모델링하였다. 균열이 요소의 인장축 하단부터 진행됨에 따라, 응력분포는 4개의 과정을 거치게 된다. 단계1은 균열 발생 전 단계이고, 단계 2~4는 균열이 점차 진행되면서 응력 분포이다. 단계2부터 초기 균열이 발생하고 다중균열이 진행되는 상태이며, 단계3에 이르러 요소에 균열의 국소화가 진행되기 시작하고, 단계4가 파괴상태를 묘사하는 것이다.

5. 해석결과

해석시 수행한 1000개의 case중 임의로 하나의 case에 대한 해석결과를 그림 3에 실험결과 함께 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 등 모멘트 구간 내에 Homogeneous Property(동일물성치)를 부여하여 균질보로 해석할 경우 최대 휨 강도는 실험결과와 비슷한 결과를 보이지만 처짐의 경우 과다산정 되는 경향이 있다. 그러나, Random Property(임의물성치)를 부여하여 비균질보로 해석한 경우는 파괴시의 처짐값과 휨강도가 실험값과 유사한 경향을 나타냈다.

그림 4에서 보는 바와 같이 균열폭의 경우는 균질보로 해석한 경우는 각각의 요소의 균열폭이 모두 같은 값을 보이며, 이것은 실제 거동과는 차이가 있다. 실제 실험 양상을 보면 균열이 순차적으로 발생하며, 균열폭도 각각 다르게 발생한다. 그러나 균질보의 경우 동일 균열폭의 생성으로 인하여 부재의 거동을 지배할 수 있는 가장 큰 균열폭을 갖는 요소를 모델링하는데 무리가 있으며, 평균 균열폭 개념으로 요소의 균열폭을 산정함에 따라 균열폭이 과소평가 될 수 있다. 또한 균열폭증가 양상이 균질보의 경우 항상 선형에 가깝게 증가하게 된다.

비균질보로 해석한 경우는 여러 개의 요소들이 각각 다른 균열폭을 갖도록 묘사하는 것이 가능하였으며, 균질보 해석에 비하여 균열폭과 처짐등의 거동을 실제와 유사하게 나타낼 수 있었다.

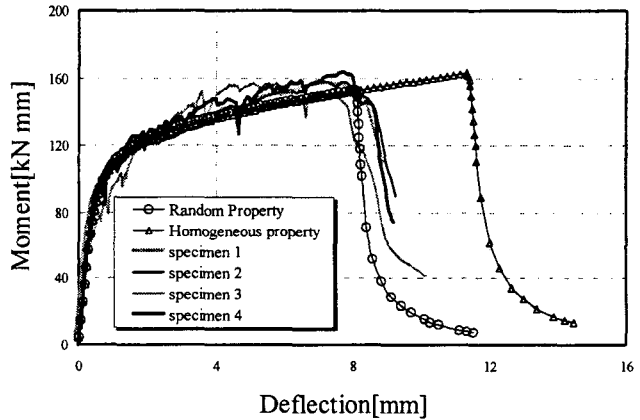


그림 3 모멘트 -처짐 곡선 비교

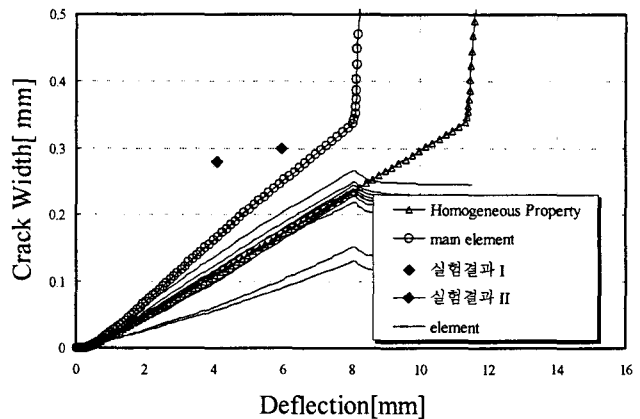


그림 4 균열폭-처짐곡선 비교

확률분포에서 임의로 물성치를 추출하는 case를 1000회 수행한 결과 최대 처짐의 평균이 8.88이고 이때의 표준편차가 0.879이었다. 그리고 최대 휨 모멘트값의 평균은 156.015이고 표준편차는 3.078로 나타났다. 표5.1은 신뢰도99%범위와 실험결과를 비교한 것이다. 표에서 보듯이 실험결과 처짐 값과 휨모멘트가 모두 신뢰도 99%범위내로 들어오는 것을 확인 할 수 있다. 그림 5.3에서 박스표시는 신뢰도 구간을 나타낸 것으로 최대 처짐과 최대 휨 모멘트가 모두 신뢰도를 만족하는 것을 확인 할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 HPRC의 다중 균열 특성을 고려할 수 있는 휨해석 방법을 제안하고자 하였으며, 실험결과를 통하여 해석방법의 적절성을 확인하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) HPRC의 인장, 압축 특성을 고려하여 비균질보로 휨해석을 실시한 결과 균질보로 해석한 결과 보다 실험 결과에 유사한 경향을 얻을 수 있었다. 균질보로 해석시 처짐과 휨강도가 과다 산정되고, 균열폭은 과소 평가 되는 것에 비하여 비균질보로 해석한 결과 처짐과, 휨강도, 균열폭이 실험결과와 유사한 경향을 보였다.

(2) 비균질보로 휨해석을 실시함으로써, 실제 거동처럼 여러 개의 균열이 부재에 순차적으로 생기는 것을 모사 할 수 있었다.

(3) 비균질보로 해석한 결과 처짐에 따른 균열폭의 증가가 실험결과처럼 비선형 증가형태를 보였으나, 균질보의 경우 선형 증가형태를 보였다.

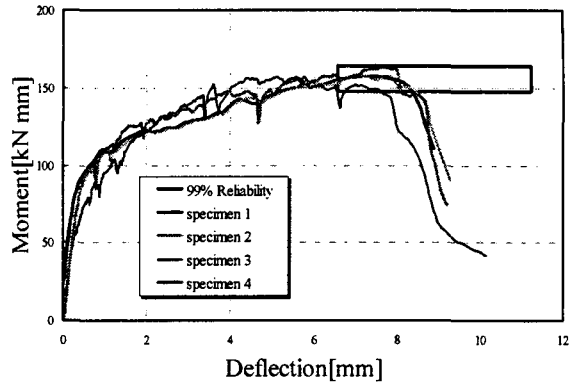


그림 5 신뢰도99% 범위에서 실험결과 비교

표 2 신뢰도99%범위에서 실험결과 비교

해석 결과 (신뢰도99%범위)		실험 결과			
		시편 I	시편 II	시편 III	시편 IV
최소 처짐	최대 처짐	처짐(mm)			
6.557	11.213	7.920	7.535	7.616	7.760
최소 모멘트	최대 모멘트	모멘트(KNmm)			
147.858	164.173	162.3	149.1	156.8	157.4

참고문헌

1. Naaman, A.E. and Reinhardt, H.W. "Characterization of high performance fiber reinforced cement composites", in 'High Performance Fiber Reinforced Composites 2'(RILEM proceeding 31, Eds Naaman and Reinhardt, E&FN spon, London, 1996)1-23.
2. C. K. Y. LEUNG, V. C. Li, "New Strength - based Model for the debonding of discontinuous fibres an elastic matrix", 1991 Chapman & Hall
3. V. C. Li, "Micromechanics of crack bridging in fibre-reinforced concrete ",materials and Structures, 1993