

ECC의 1축 인장 거동 해석

Numerical Analysis of ECC Uniaxial Tension Behavior

김 윤 용* 이 방 연** 권 승 희*** 김 정 수****
Kim, Yun Yong Lee, Bang Yeon Kwon, Seung-Hee Kim, Jeong-Su

ABSTRACT

ECC is a special kind of high performance cementitious composite which exhibits typically more than 2% tensile strain capacity by bridging microcracks at a crack section. Therefore, micromechanics should be adopted to obtain multiple cracking and strain hardening behavior. This paper propose a linear elastic analysis method to simulate the multiple cracking and strain hardening behavior of ECC. In an analysis, the stress-crack opening relation modified considering the orientation of fibers and the number of effective fibers is adopted. Furthermore, to account for uncertainty of materials and interface between materials, the randomness is assigned to the tensile strength(σ_{fci}), elastic modulus(E_{ci}), peak bridging stress(σ_{Bi}) and crack opening at peak bridging stress(δ_{Bi}), initial stress at a crack section due to chemical bonding, (σ_{0i}), and crack spacing($\alpha_c X_d$). Test results shows the number of cracking and stiffness of cracked section are important parameters and strain hardening behavior and maximum strain capacity can be simulated using the proposed method.

요 약

ECC는 섬유가 매트릭스의 균열 면에서 가교작용을 통하여 균열의 폭을 제어함으로써 미세한 다중 균열(multiple cracking)을 발생시키면서 인장변형을 경화 거동을 보이는 섬유복합재료이다. 따라서 다중 균열과 인장변형을 경화 거동을 보일 수 있도록 마이크로역학에 기반하여 재료를 설계한다. 이 연구에서는 ECC의 다중 균열과 변형을 경화 거동을 모사할 수 있는 해석 방법을 제시하고자 한다. 이 과정에서 균열 면에서 이론적으로 유도된 가교응력-개구변위 관계에서 섬유의 방향과 유효 섬유의 개수를 고려하여 수정된 응력-변위 관계를 사용하였으며, 매트릭스 및 섬유-매트릭스 계면의 불확실성을 고려하기 위하여 각 요소의 매트릭스 균열 강도(σ_{fci}) 및 탄성계수(E_{ci}), 균열면 최대 응력(σ_{Bi}) 및 변위(δ_{Bi}), 계면의 화학적 부착에 의한 균열면의 초기 응력(σ_{0i}), 균열 간격($\alpha_c X_d$)이 일정 범위 내에서 무작위로 선택되도록 하였다. 해석결과 변형을 경화거동 및 최대 변형을 충분히 모사할 수 있는 것으로 나타났으며, 균열 개수 및 균열면의 강성이 해석의 중요한 변수임을 확인할 수 있었다.

* 정희원, 충남대학교 토목공학과 교수

** 정희원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 박사과정

*** 정희원, 명지대학교 토목공학과 교수

**** 정희원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 박사후과정

1. 서론

ECC(Engineered Cementitious Composite)는 시멘트계 매트릭스에 2% 이내의 합성섬유를 혼입함으로써 2~5% 정도의 인장변형률 경화 거동을 보이는 고인성 섬유복합재료이다. 이러한 고인성은 PVA 섬유가 매트릭스의 균열 면에서 가교작용을 통하여 미세한 균열 폭으로 제어함으로써 발현된다. 따라서 다중 균열(multiple cracking)과 변형률 경화 거동을 보일 수 있도록 마이크로 역학에 기반하여 설계하여야 한다. 이 연구에서는 ECC의 다중 균열과 변형률 경화 거동을 모사할 수 있는 해석 방법을 제시하고자 한다. 이 과정에서 균열 면에서 이론적으로 유도된 응력-변위 관계에서 섬유의 방향과 유효 섬유 개수를 고려하여 수정된 응력-변위 관계를 사용하였으며, 재료 및 재료들 사이 계면의 불확실성을 고려하기 위하여 재료물성은 일정 범위내의 값에서 무작위로 선택되도록 하였다.

2. 이론적 배경 및 해석 방법

2.1 변형률 경화 거동을 위한 조건

PVA 섬유와 모르타르로 구성된 섬유복합재료가 안정상태 균열(steady state cracking)과 다수의 다중 균열(multiple cracking)에 의하여 변형률 경화 거동을 하기 위해서는 두 가지 조건을 만족하여야 한다¹⁻²⁾. 첫 번째 조건은 첫 번째 균열이 발생하게 되는 매트릭스의 강도가 균열면의 최대 응력보다 작아야 한다. 이를 수식으로 표현하면 식 (1)과 같다. 이 조건을 만족하면 섬유의 뽑힘이나 파괴에 의한 첫 번째 균열 발생 이후에 유발되는 응력의 급격한 저하를 막게 되고, 이 조건이 만족되지 않으면 변형률 경화 거동이 나타나지 않게 된다.

$$\sigma_{fc} < \sigma_B \quad (1)$$

여기서 σ_{fc} 는 매트릭스의 균열강도이며, σ_B 는 균열면의 최대 응력이다. 두 번째 조건은 에너지 조건으로서 매트릭스에 균열이 발생하였을 때 일정한 하중과 균열폭 상태에서 일정한 폭을 갖는 균열이 전파되기 위한 조건이다. 이를 수식으로 표현하면 식 (2)와 같다.

$$J_{tip} \leq \sigma_B \delta_B - \int_0^{\delta_B} \sigma(\delta_B) d\delta \equiv J'_b \quad (2)$$

여기서 J_{tip} 은 매트릭스의 균열선단 파괴인성이며, J'_b 은 균열면 보상에너지이다. 첫 번째와 두 번째 조건에 대하여 그림 1에 개념적으로 나타내었다. 이론적으로 식 (2)의 조건을 만족하면 안정상태 균열이 발생하지만 재료 및 계면의 불확실성 때문에 J'_b 와 J_{tip} 의 비가 3.0 이상일 경우 섬유복합재료가 변형률 경화 거동을 안정적으로 나타낼 수 있는 것으로 나타났다³⁾. 이러한 두 조건을 통하여 미세 균열에 의한 변형률 경화 거동을 설명할 수 있다. 매트릭스에 첫 번째 균열이 발생한 후 균열면에서 섬유의 가교작용에 의하여 총 하중을 저항할 수 있게 되며(응력 조건), 섬유의 가교작용에 의하여 섬

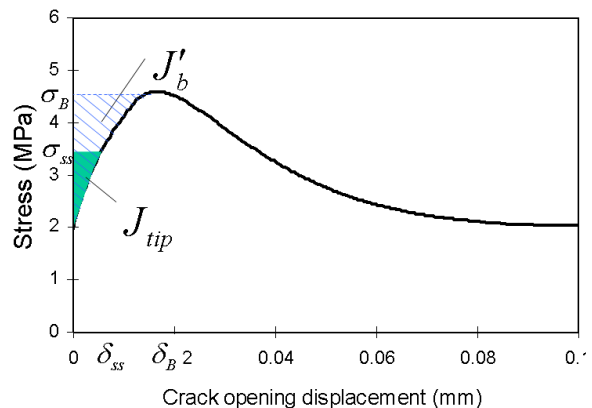


그림 1 균열면 응력과 균열 개구 변위 관계

유는 매트릭스와의 계면 작용을 통하여 하중을 다시 매트릭스로 전달하게 된다. 이로 인하여 매트릭스에 유발되는 응력이 증가하게 되어 첫 번째 균열이 발생한 영역 이외에서 추가적인 균열이 발생하게 된다. 이러한 과정은 균열면에 유발된 응력이 σ_B 보다 크게 되어 연화 거동을 하게 되기 전까지 반복된다. ECC에서 균열면의 강성이 매트릭스의 강성보다 작기 때문에 ECC의 변형 능력은 균열면의 개수에 따라 달라지게 된다. Wu와 Li⁴⁾는 섬유가 균열면에서 가교작용을 충분히 발휘하기 위한 최소의 균열 간격(X_d)을 이론적으로 유도하여 제시하였으며, 최종 균열 간격은 X_d 와 $2X_d$ 사이가 된다고 보고하였다.

2.2 해석 방법

ECC에 사용되는 매트릭스 및 균열면 거동은 실제 비선형성을 보이기 때문에 정확한 거동을 모사하기 위해서는 비선형 해석 및 매트릭스와 균열면에서의 연화 거동 등도 고려하여 해석하여야 한다. 이 연구는 이러한 해석을 위한 사전 연구로서 매트릭스와 균열면이 선형 탄성 거동을 한다고 가정하였다. 그러나 매트릭스 및 섬유-매트릭스 계면의 불확실성을 고려하기 위하여 각 요소의 매트릭스 균열 강도(σ_{fci}) 및 탄성계수(E_{ci}), 균열면 최대 응력(σ_{Bi}) 및 그때의 변형(δ_{Bi}), 계면의 화학적 부착에 의한 균열면의 초기 응력(σ_{0i})이 일정 범위에서 무작위로 선택되도록 하였다. 해석 절차는 1) 요소 정의, 2) 요소별 응력-변형률(변위) 관계 부여, 3) 변위 제어를 통한 각 요소별 유발된 응력 계산(σ_{idi}), 4) σ_{idi} 를 σ_{ci} 와 σ_{Bi} 와 비교하는 과정으로 이루어진다. 4)의 과정에서 σ_{idi} 가 σ_{fci} 보다 크게 되면 그 요소는 균열면의 응력-변위 관계를 따르도록 하였으며, 이 과정은 특정 요소에서 유발된 응력이 σ_B 보다 크게 되면 해석을 종료하도록 하였다.

3. 검증 시험 및 결과 분석

표 1은 이 연구에서 해석에 사용된 재료 물성값을 나타낸다⁵⁾. 매트릭스에 관련된 변수의 기준 값은 실험을 통해 구하였으며, 균열면의 거동 특성에 대한 기준 값은 이론적으로 유도된 응력-변위 관계를 단면에서 섬유의 기울어진 각도와 섬유 사이의 간격을 고려하여 수정한 후 이를 선형으로 모사하여 구하였다. 균열 간격은 이론적으로 유도된 식을 통하여 최소 균열 간격 값을 구하고, 최종 균열 간격은 불확실성을 고려하여 3.5에서 7.0 사이 값 중에 무작위로 선택되도록 하였다. 그림 2는 실험 결과와

표 1 재료 물성값

변수 명	기준 값	불확실성을 고려한 변수의 범위
σ_{fci} (MPa)	2.7	2.4~3.5
E_{ci} (GPa)	23.1	18.5~27.7
σ_{Bi} (MPa)	3.6	3.2~4.0
δ_{Bi} (mm)	0.13	0.091~0.17
σ_{0i} (MPa)	1.8	1.6~2.0
X_d (mm)	3.5	
$\alpha_c X_d$	3.5~7.0	

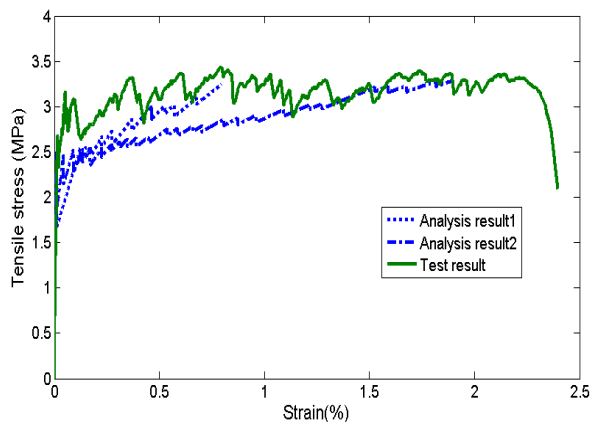


그림 2 실험 및 해석 결과

해석 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 실험 결과는 약 2.2%의 인장 변형 능력을 보이고 있으며, 이후 국부적으로 균열 면에서 섬유나 뽑힘에 의해 균열면의 연화 거동이 나타남으로써 전체 거동이 연화 거동으로 나타났다. 해석은 재료 및 계면의 불확실성을 고려하여 총 16번 해석하였으며, 그림 2에는 대표적인 2개의 결과를 나타내었다. 해석 결과 1은 약 1% 정도의 인장 변형 능력을 보이고 해석 결과 2는 약 2%의 인장 변형 능력을 보이고 있다. 이를 통하여 변수의 값에 따라 인장 변형 능력에 큰 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 이 연구에서는 총 6개의 변수에 무작위성을 부여하였는데, 인장 변형 능력에 큰 영향을 미칠 것으로 생각되는 변수는 균열 개수와 균열면의 강성이다. 균열의 개수는 해석 결과 1과 해석 결과 2에서 각각 22개와 27개였으며, 균열면의 평균 강성은 각각 15.0 MPa/mm와 13.5 MPa/mm였다. 이와는 반대로 매트릭스의 평균 탄성계수는 2.22×10^4 MPa와 2.33×10^4 MPa였다. 강성이 작을수록 동일 하중의 변화에 대하여 더 큰 변형이 발생하는 사실로부터 균열 개수 및 균열면의 강성이 해석을 통하여 ECC의 인장 거동을 해석할 때 중요한 변수임을 확인할 수 있다. 또한 그림 2에서 해석 결과는 확실한 변형률 경화 거동을 나타내고 있지만 실험 결과는 거시적으로 보았을 때 소성거동에 가까운 거동을 나타내고 있다. 이러한 차이는 해석은 유발된 응력이 균열면의 최대 응력에 도달하면 연화 거동이 바로 나타나서 해석을 종료하도록 하였기 때문에 지속적으로 변형률 경화 거동을 보이는 반면, 실제 ECC의 거동은 균열면이 균일하지 않기 때문에 균열면에서의 거동이 복잡하여 연화 거동과 경화 거동이 동시에 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

이 연구에서는 ECC의 다중 균열과 변형률 경화 거동을 모사할 수 있는 해석 방법을 제시하고자 하였으며, 재료들은 선형탄성 거동을 한다고 가정하였다. 재료 및 계면 사이의 불확실성을 고려하기 위하여 재료물성은 일정 범위내의 값에서 무작위로 선택되도록 하였다. 해석 결과와 실험 결과를 비교해 본 결과 이 연구에서 제시한 해석 방법을 통하여 ECC의 변형률 경화 거동을 모사할 수 있음을 확인하였다. 추후 ECC의 정확한 거동을 모사하기 위하여 비선형 해석 및 매트릭스와 균열면에서의 연화 거동 등도 고려하여 해석을 수행할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2007-331-D00470).

참 고 문 헌

1. Li, V.C. and Leung, C.K.Y., "Steady state and multiple cracking of short random fiber composites", ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol.188, No.11, 1992, pp.2246-2264.
2. Li, V.C. and Wu, H.C., "Conditions for pseudo strain-hardening in fiber reinforced brittle matrix composites", Journal Applied Mechanics Review, Vol.45, No.8, 1992, pp.390-398.
3. Fischer, G. and Li, V.C., "Influence of matrix ductility on tension-stiffening behavior of steel reinforced engineered cementitious composites (ECC)", ACI Structural Journal, Vol.99, No.1, 2002, pp.104-111.
4. Wu, H.C. and Li, V.C., "Stochastic process of multiple cracking in discontinuous random fiber reinforced brittle matrix composite", Internal Journal of Damage Mechanics, Vol.4, No.1, 1995, pp.83-102.
5. Kim, J.S., "Development of ECC (Engineered Cementitious Composite) Produced with ground granulated blast furnace slag for processibility enhancement", PhD Thesis, KAIST, 2008, 136pp.