

고인성 복합재료로 휨 보강된 구조물의 거동에 관한 수치해석적 연구

Numerical Simulation on the Behavior of ECC-Strengthened Flexural Structures.

신 승 교* 임 윤 묵** 김 장 호***
Shin, Seung Kyo Lim, Yun Mook Kim, J. Jang Ho

ABSTRACT

One of the most important characteristics of Engineered Cementitious Composite (ECC) is its strain hardening behavior up to 5~6% of strain under a tensile loading. So, the ductile behavior of ECC should be utilized in applications to maximize the performance of structures. Thus, in this study, the ductile behavior of ECC as a repair material applied to the tensile region under flexural loads is numerically examined using a developed numerical model. Several strain capacities of ECC are examined to predict the behavior of ECC strengthened flexural structures. The results show that a certain optimal level of ductility in ECCs for repair applications exists and it is an important factor to consider when using ECC as a repairing material.

1. 서론

우리나라의 경우 60~70년대에 건설된 콘크리트 구조물이 20~30년 이상의 사용기간 경과로 노후화됨에 따라 대형 사회기반구조물의 안전 및 유지관리에 대한 관심이 증대되고 있다. 구조물은 완공 후 시간이 지나면서 각종 원인에 의하여 기대했던 수명을 다하지 못하고 그 기능을 상실하는 경우가 많으며, 적절한 유지관리를 실시하지 않으면 균열의 확대, 부재의 부식 등에 의하여 구조물이 손상되어 내력능력이 점차 저하되고 내구 수명이 단축된다. 따라서 사용성이나 내구성을 확보하기 위해 구조물의 재시공보다는 적절한 시기에 타당한 방법으로 보수 및 보강하는 조치가 필요하다. 현재, 많은 구조물의 노후화가 진행됨에 따라 구조물의 보수·보강 수요가 빠른 속도로 증대되고 있으며 앞으로 구조물의 보수·보강 문제는 사회적 문제로까지 대두될 가능성이 크다. 현재까지의 보수·보강은 그 효과가 만족스럽지 못한 경우가 종종 발생하였으며 보강 후에도 매년 막대한 유지관리 비용이 들어가는 등 경제적 측면에서도 문제의 심각성을 보인 바 있어, 복합재료를 이용하여 외부에서 보강재를 접착하는 접착식 공법에 대한 연구가 최근 다양하게 이루어지고 있다.

노후 구조물 보강을 위해 시멘트계 재료 및 폴리머계 재료를 포함한 다양한 보강재료들이 개발되어

* 정희원, 연세대학교 토목공학과 박사후연구원

** 정희원, 연세대학교 토목공학과 부교수

*** 정희원, 세종대학교 토목공학과 조교수

왔다. 노후 구조물 보강을 위한 보강재료 선정시 기존재료와 보강재료 사이의 일체거동이 가장 중요한 문제가 되며, 따라서 시멘트계 보강재료는 기존 재료인 콘크리트와 유사한 역학적 특성을 가지고 있어 보강재료로서 가장 적합하다.

이에 본 연구에서는 최근 새롭게 개발되고 있는 시멘트계 고인성 복합재료를 이용한 보수·보강 방법에 대한 해석적인 연구를 수행하여 콘크리트 구조물 보수·보강의 기초 자료로서 제시하고자 한다. 콘크리트 구조물의 인장부가 손상되었을때 고인성 복합재료에 의한 구조물의 보강 성능을 평가하고 역학적 거동을 예측한다. 고인성 복합재료의 특성 중 가장 중요한 인성의 변화가 보수·보강된 구조물의 거동에 미치는 영향을 보강재료의 두께의 변화와 함께 비교·검토한다.

2. 수치해석 모델

본 연구에서는 균열진행에 대한 요소크기의 영향을 배제하기 위해 파괴에너지 개념을 도입한 Hillerborg(1976)의 가상균열모델(fictitious crack model)을 사용하였다. 가상균열 모델에서는 새로 형성된 균열면을 확대하기 위해 요구되는 에너지가 균열을 생성하기 위해 요구되는 에너지보다 더 크다고 가정한다. 가상균열 모델에서 변형의 국소화는 극한하중 이후에 발생하고 따라서 극한하중 이전의 구성관계식은 그림 1에 보이는 것처럼 응력-변위 곡선에 의해 정의될 것이라고 가정한다. 한편 극한하중 이후의 구성관계식은 응력-균열폭 곡선 $\sigma(u)$ 에 의해 특성화 될 것이다. 이 곡선의 면적은 상수이고 식 (1)과 같이 재료의 파괴에너지 G_F 로 고려된다.

$$G_F = \int_0^{u_n} \sigma(u) du \quad (1)$$

여기서 G_F 는 파괴에너지, u_n 는 한계 균열폭이다.

가상 균열 모델에서 필요한 요소의 기본 물성은 탄성계수 E , f_b , 파괴에너지 G_F 이다. 이러한 기본 물성들을 이용하여 인장계균열폭(u_w)을 포함하는 구성관계식을 적용한 연화곡선의 형태다.

3. 수치해석 기법의 검증

고인성 복합재료와 같은 인장경화거동을 하는 재료에 대한 본 기법의 적용성 검토를 위하여 그림 2(a)와 같이 $7.6cm \times 20.5cm$ 편을 고려하였다.^[3] 그림 2(b)는 요소길이 $0.38cm$, 요소개수 축방향 변형요소를 이용한 수치해석 모형을 나타낸다. 수치해 물성은 실험^[1]에서 제시한 값과 동일한 값을 사용하였으며, 탄성 $20.0GPa$, 인장강도 f_t 는 $2.5MPa$ 이며 극한강도는 $5.0MPa$ 였다. 직접인장 하중이 작용하는 경우의 수치해석 결과, 고인성 하중-변위 응답이 그림 3에 나타나 있다. 인장강도까지는 탄성 고 인장강도에 도달한 이후에는 인장경화 현상에 의해 하중에 저

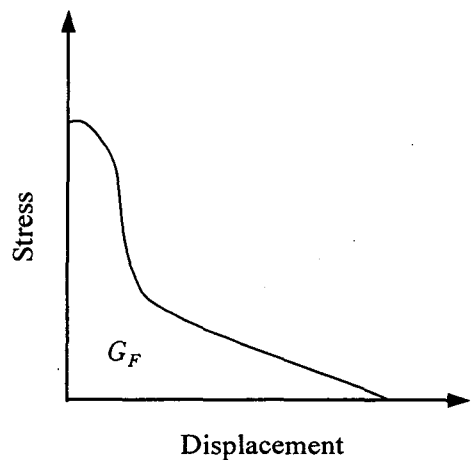
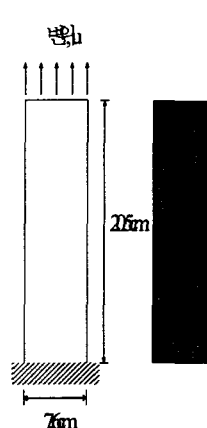


그림 1. 가상균열모델



(a) 시편형상 (b) 수치해석 인장강도에 대한 한가 결정된 수치해석 인 실험시 1629개의 석을 위한 계수 E 를 사용하여 복합재료의 거동을 하향하는 거

등을 관찰할 수 있다. 다시 말해, 인장강도에 도달한 후에도 재료가 파괴에 이르지 않고 충분한 연성을 확보하며 하중을 견디는 거동을 보임을 알 수 있다. 또한, 그림 3을 세 영역으로 구분하면 탄성영역의 점 A, 인장경화영역의 점 B, 파괴영역 또는 연화영역의 점 C로 나누어 볼 수 있다. 수치해석 결과와 기존의 실험 결과를 비교해 보면 인장응력의 경우 약 2~30% 정도의 오차를 보이며 변형률의 경우 약 6~9% 정도의 오차를 나타내고 있다. 그러나 실험값과 수치해석에 적용된 고인성 복합재료의 파이버의 종류가 다르고 정형화된 물성이 없기 때문에 이러한 오차는 허용 범위내에 있다고 판단된다. 그리고 기존 실험결과와 수치해석 결과가 비슷한 경향을 나타내고 있으므로 탄성영역 및 인장경화 영역, 연화영역에서 각각 본 연구에서 수행되는 수치해석모델의 타당성을 입증하였다.

수치해석 결과로부터 각 요소들을 이용하여 재료의 파괴거동을 그림 4에 제시하였다. 앞에서 언급한 그림 3의 세 영역 즉, 탄성영역 및 인장경화 영역, 연화영역으로 구분하여 재료의 파괴거동을 모형화 하였다. 그림 4(a)는 탄성영역에 존재하는 점 A, 그림 4(b)는 인장경화영역의 점 B, 그림 4(c)는 연화영역에 있는 점 C에서의 고인성 복합재료의 파괴형상을 각각 나타내었고 이를 실험 시편의 파괴형상과 비교하였다. 점 A에서는 일부 요소들이 인장경화영역에 들어간 것을 알 수 있으며 인장경화현상으로 인하여 응력 및 변형률이 증가 되는 점 B 부분에서는 많은 숫자의 요소가 인장경화영역에 들어가 있음을 알 수 있다. 점 C에서는 대부분의 요소가 인장경화 또는 연화영역에 있어 재료가 파괴에 이르게 됨을 파악할 수 있었다.

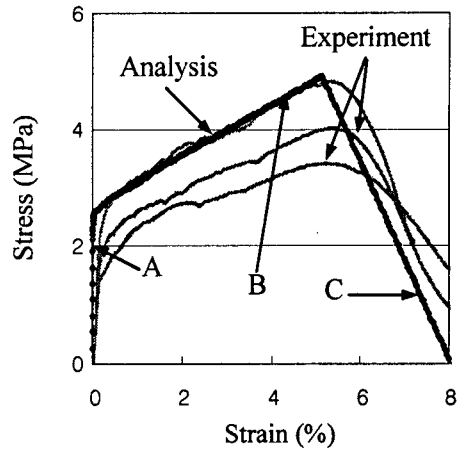


그림 3. 고인성 복합재료 직접인장 시험의 응력-변형률 응답

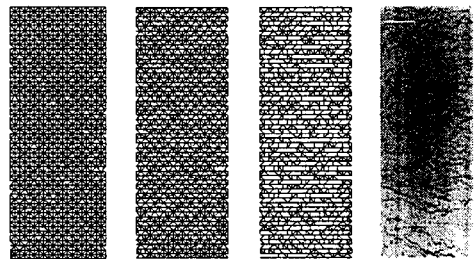


그림 4. 고인성 복합재료 직접인장 시험의 파괴형상

4. 고인성 복합재료의 보강효과

본 연구에서 개발된 수치해석 기법을 이용하여 휨 보강된 무근 콘크리트 보의 거동을 검토한다. 균열이 발생한 인장측 부재를 고인성 복합재료를 교체하고 구조물의 내하력 증가현상을 수치해석을 통하여 무보강 콘크리트 구조물과 비교, 검토한다. 휨 구조물의 인장 부재에 대하여 고인성 복합재료의 치환율 5%, 10%, 20%, 30%로 각각 달리 하여 상호 비교함으로써 두께 변화에 따른 보강효과를 파악한다. 또한, 동일한 방법으로 보강재료를 고강도 콘크리트로 하여 재료의 특성에 따른 보강효과를 파악한다. 먼저, Control beam의 거동을 파악하기 위한 수치해석 모델로서 그림 5와 같이 보의 지간 20.5cm, 단면은 7.6cm×3.8cm인 시편을 사용하였고 수치해석에 사용된 콘크리트의 물성은 탄성계수 E 는 30.0GPa, 인장강도 f_t 는 2.5MPa, 파괴에너지는 100.0N/m 를 각각 사용하였다. 고인성 복합재료의 경우는 탄성계수 E 는 20.0GPa, 인장강도 f_t 는 2.5MPa이며 극한강도 βf_t 는 5.0 MPa이다. 그림 6에 무보강 콘크리트 보를 기준으로 하여 두께를 달리한 고인성 복합재료로 보강된 보의 수치해석 결과를 하중-변위 곡선으로 제시하였다. 무보강 콘크리트 보가 극한 하중점 이후 한 순간에 급작스러운 파괴를 일으키는 반면 고인성 복합재료로 보강한 보의 보강 두께가 두꺼워짐에 따라 극한

하중과 극한변위가 점차 증가되는것으로 나타났다. Control beam과 비교할 때 고인성 복합재료의 보강 두께가 두꺼워짐에 따라 극한하중은 Control beam에 비해서 5% 보강시 10.4%, 10% 보강시 17.2%, 20% 보강시 26.3%, 30% 보강시 40.4%가 증가함을 알 수 있었다. 극한변위는 고인성 복합재료 5% 보강시는 변화가 미소하며, 10% 보강시 18.7%, 20% 보강시 37.3%, 30% 보강시 93.3%가 증가됨을 파악하였다. 따라서, 고인성 복합재료를 이용한 보강효과는 극한하중의 증가보다 극한변위 증가가 더욱 두드러지게 나타나는 것을 알 수 있었으며 고인성 복합재료가 휨 거동 구조물의 연성을 최고 2배정도 까지 증가시키는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 콘크리트 보의 손상 단면을 고인성 복합재료로 교체하는 단면 교체공법을 축방향 변형요소를 이용한 해석적 기법을 통하여 접근하였다. 보강 구조물에 대한 수치해석적 연구를 수행하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 개발된 수치해석 기법의 검증은 위하여 고인성 복합재료의 직접인장 모델 해석을 수행하여 이를 기존의 실험 자료와 비교 분석한 결과, 개발된 수치해석 기법의 타당성 및 적용성을 확인하였다.
2. 무균 콘크리트 보에 대하여 검증된 해석기법을 이용하여 Control beam을 기준으로 고인성 복합재료의 두께에 따른 보강효과를 검토한 결과 두께를 5%~30% 보강시 그 보강효과는 극한하중 및 극한변위가 각각 10.4%~40.4%, 18.7%~93.3% 정도 증가하였음을 알 수 있었다. 따라서 휨 거동 콘크리트 구조물의 보강시 고인성 복합재료를 이용하여 보강하면 강도증가 뿐만아니라 연성확보 측면에서도 보강효과가 뛰어남을 알 수 있다.

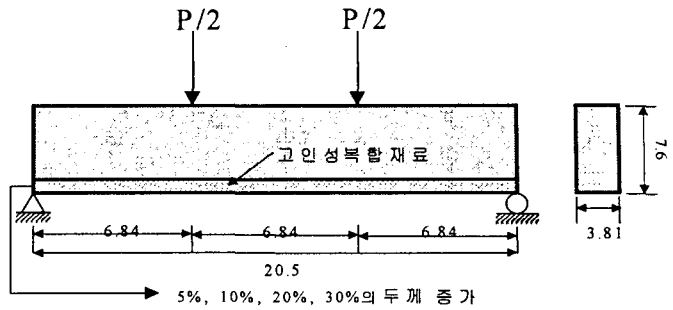


그림 5. 고인성 복합재료로 보강된 시편

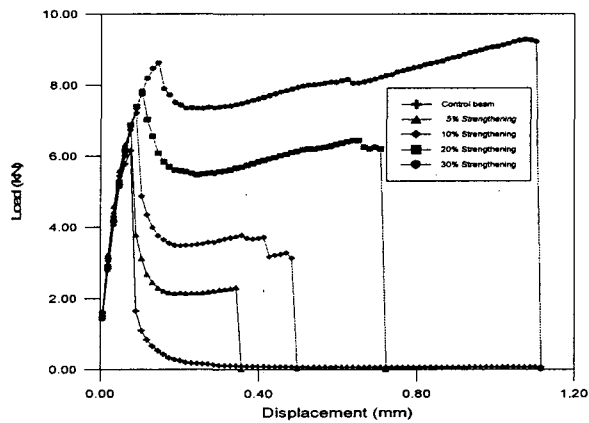


그림 6. 고인성 복합재료 두께 변화에 따른 보강효과

참고문헌

1. Lim, Y.M., 1996, *Interface Fracture Behavior of rehabilitated Concrete Infrastructures Using Engineered Cementitious Composite* ph.D. thesis, University of Michigan
2. Lim, Y.M., Kim, M.K., Kim, J.J.H., and Shin, S.K., 2002, "Is Ductility Important for Repair Application?," in Proceedings of DFRCC, Gifu, Japan, pp.199-208.