

균열제어 기능성 복합재료를 이용한 RC 휨 부재 보강수치해석

Numerical Simulation of Rehabilitated Flexural RC Member using High Performance Composite

신 승 교* 김 태 균** 임 윤 묵***
Shin, Seung Kyo Kim, Tae Kyun Lim, Yun Mook

ABSTRACT

In this study, a numerical model is developed using axial deformation link elements that can effectively predict the failure behavior of RC type structures. Using this model, numerical analysis was performed to investigate the strengthening effect and failure behavior of structures repaired with a new material. High-Performance Cementitious Composites, which is characterized by its ductility with 5% strain-capacity is used as a repair material. To investigate the validity of developed numerical model, simulations of direct tension specimen and flexural specimen are performed and the results are compared with published ones. The similar analysis is performed for RC beam. Through this study, it is seen that predicted response has a good agreement with the experimental results.

Using this verified numerical model, the strengthening effect of repaired with HPCC structure is analyzed through load-displacement curve and failure modes. Also, the same numerical analysis is performed in RC beam repaired with HPCC. The effect of HPCC ductility is estimated for the overall behavior of structures. Based on the results, the fundamental data are suggested for repaired structures with HPCC.

1. 서 론

60-70 년대에 건설된 콘크리트 구조물은 30~40 년이 지난 현재, 완전철거 하거나 또는 보수·보강을 통해 내구연한을 증가시켜야 하는 상태에 놓여있다. 대부분의 전문가들은 구조물 철거보다는 보수·보강에 의한 내구성 증진의 필요성을 강조하고 있다. 구조물의 보수·보강에 있어서 가장 중요한 3 요소는 구조물의 현 상태평가, 보강공법, 보강재료의 선택이라고 할 수 있다. 노후된 구조물을 보수·보강할 목적으로 시멘트계 재료에서부터 폴리머계 재료까지 매우 다양한 재료들이 개발되었다.

* 정희원, 연세대학교 사회환경시스템 공학부 박사후 연구원
** 정희원, 삼성물산(주) 건설부문 사원
*** 정희원, 연세대학교 사회환경시스템 공학부 부교수

그러나, 폴리머계 재료는 콘크리트와의 적합성 문제로 콘크리트 구조물의 보수·보강에 매우 제한적으로 사용되어 왔다. 기존 재료와 보강재의 적합성은 구조물의 보수·보강에 있어 매우 중요한 문제이며, 시멘트계 보강재는 투수성, 온도팽창계수와 같은 물리적 성질과 역학적 성질이 콘크리트와 거의 동일하기 때문에 가장 바람직한 보강재료로 간주되며 또 현재 많이 사용되고 있다.⁽¹⁾

최근에는, 탄성계수, 극한강도, 극한 변형률을 제한적으로 제어하여 기존재료와 가장 적합한 물성 및 역학적 성질을 갖는 다양한 시멘트계 복합재료가 개발되었다. 현재, 미시역학적 모델을 바탕으로 고인성 복합재료 중 하나인 ECC(Engineered Cementitious Composite)라 불리는 새로운 시멘트계 복합재료가 개발되었는데, 이 ECC는 탄성계수와 극한강도는 콘크리트와 유사하지만 연성은 콘크리트보다 훨씬 큰 특징을 가지고 있다. 따라서, 콘크리트 구조물의 보강에 가장 적합한 재료로서 그 적용성이 확대되고 있다.⁽²⁾

본 연구에서는 ECC가 휨 하중을 받는 무근 콘크리트 보의 보강에 사용되었을 때, ECC의 연성이 보강한 구조물에 어떠한 거동적 특성을 부여하는 요인인지를 파악하고자 한다. 수치해석기법은 구조물의 거시적, 미시적 거동파악에 적합한 축방향 변형요소를 사용하였다. 우선 ECC의 인장경화거동을 수치해석 기법을 이용하여 모델링하고 이 결과를 실험값과 비교·검토한다. 또한, 보강재의 인성이 콘크리트 구조물에 미치는 영향을 파악하기 위하여 ECC로 보강된 구조물에서 보강재료의 연성에 따른 구조물의 거동을 수치해석적으로 파악한다.

2. 수치해석 모델

재료의 파괴거동을 모형화하기 위해 가상균열모델을 도입하였고, 고인성 복합재료의 구성관계식이 그림 1에 제시되어 있다. 응력은 초기균열강도 f_t 까지 선형적으로 증가하며 초기균열강도를 넘어서면 극한강도 βf_t 까지 인장경화현상을 보인다. 극한강도계수 β 는 고인성 복합재료의 특성에 따라 변화하는데 본 연구에서는 2.0의 값이 사용되었다.⁽²⁾ 고인성 복합재료는 응력이 극한강도 βf_t 를 넘어서면 파괴되는 것으로 가정하였다.

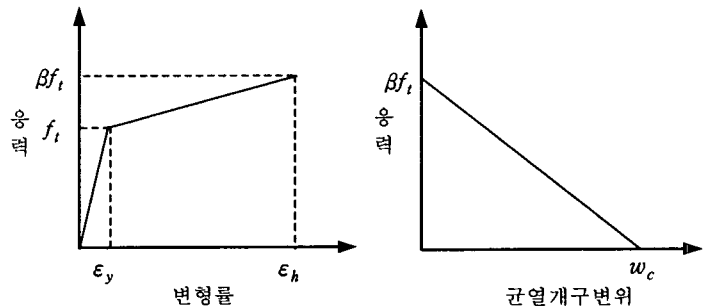


그림 1 고인성 복합재료의 구성관계식

3. 개발된 수치해석 기법의 검증

ECC 재료에 대한 개발된 수치해석기법의 적용성 검토를 위하여

직접인장모델에 대해 수치해석을 수행하였다. 시험 시편의 크기는 $7.6\text{cm} \times 20.5\text{cm}$ 이며 축방향 변형요소의 길이는 0.38cm , 요소개수는 1629개이다. 시험 시편과 수치해석모델이 그림 2에 제시되어 있다. 수치해석모델에 적용된 재료의 물성은 실험⁽²⁾과 동일한 값을 사용하였으며, 탄성계수 20.0GPa , 초기균열강도 2.5MPa , 극한강도 5.0MPa 이다. 직접인장시편의 실험 및 수치해석 결과가 그림 3에 제시되어 있다. 그림 3에서 알 수 있듯이 ECC는 초기균열강도 (2.5MPa)까지는 선형적으로 증가하고 초기균열강도를 지나 극한강도 (5.0MPa)에 이르기까지 인장경화현상을 보인다. 이러한 인장경화 거동이 일반 콘크리트와는 다른 ECC 재료의 거동이며 연성을 확보하여 갑작스러운 취성과

괴를 방지하게 된다. 수치해석 결과가 탄성영역, 인장경화영역, 파괴영역의 세 구간에서 모두 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

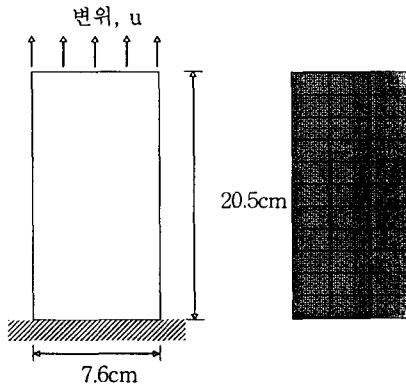


그림 2 실험시편 및 수치해석 모형

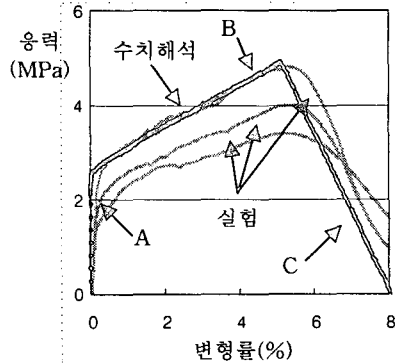


그림 3 실험시편 및 수치해석 모형

그림 4는 ECC의 직접인장시험에서 균열이 발생되어 전파되는 과정을 나타내고 있다. 점 A에서는 미세균열이 발생되지만 대부분의 요소는 여전히 탄성영역 내에 있고 일부 요소는 인장경화영역에 들어가 있음을 확인할 수 있다. 점 B에서는 인장경화영역에 있는 요소들이 증가하면서 균열이 시편 전반부로 진전되어 나가는 것을 볼 수 있다. 하중이 계속 증가하면 대부분의 요소들이 인장경화영역을 넘어서 그림 4(c)와 같이 시편이 파괴에 이르게 된다.

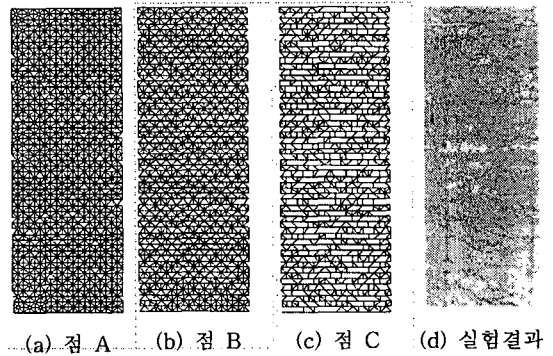
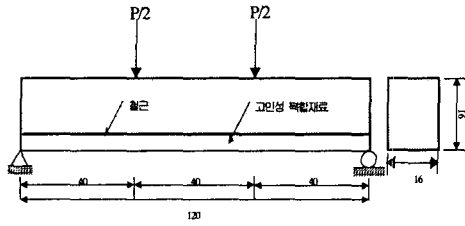


그림 4 ECC 직접인장 시험의 균열진전 형상

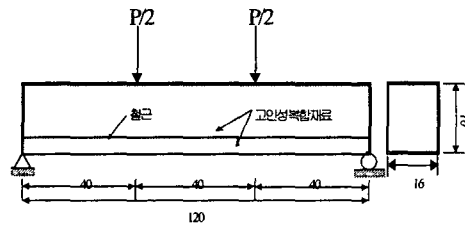
4. 고인성 복합재료로 단면을 보강한 철근 콘크리트 보의 해석

검증된 수치해석 모델을 이용하여 철근 콘크리트 보를 고인성 복합재료와 고강도 콘크리트로 보강한 후 구조적 거동 특성을 파악하였다. 특히, 고인성 복합재료로 보강한 보에 대하여 철근의 응력과 보 최하단 부위의 균열열림을 검토하여 고인성 복합재료가 철근과 보 인장부에 미치는 보강효과를 검토하였다. 또한, 고인성 복합재료의 인성을 변화시켜 수치해석을 수행하여 인성이 철근과 인장부에 미치는 응력감소 및 균열감소 효과를 검토하였다. 고인성 복합재료로 철근 콘크리트 보의 인장부를 그림 5(a), 그림 5(b)와 같이 철근 아래 부분을 보강한 보를 Repair I, 철근 아래·위를 보강한 보를 Repair II로 간주한다. 본 수치해석을 위한 철근 콘크리트 및 고인성 복합재료의 물성은 표 1에 제시되어 있다.

그림 6에 Repair I과 Repair II의 하중-변위 곡선을 Control Beam과 비교하여 제시하였다. 초기 강도는 Control Beam이 더 크지만 곡선의 후반부에서는 Repair II의 극한강도가 가장 큰 것으로 나타났다. 고인성 복합재료로 보강한 보의 초기 기울기가 낮은 것은 고인성 복합재료의 탄성계수가 콘크리트 보다 작기 때문이라고 판단된다.



(a) Repair I 모델 (단위:cm)



(b) Repair II 모델 (단위:cm)

그림 5 철근 콘크리트보 해석모델

그림 7에서는 고인성 복합재료가 철근의 응력감소에 미치는 영향을 산정하기 위하여 해석모델의 철근요소들의 응력을 나타내었다. 그림으로부터, Control Beam에 비하여 Repair I, Repair II의 철근요소의 응력이 현저히 감소하는 것을 알 수 있으며 이는 고인성 복합재료의 보강이 철근의 응력 집중을 분산시킴으로서 철근의 급작스러운 파괴가 방지되는 것을 의미한다. 그림 8에서 각각의 보에 대한 철근의 최대응력을 나타내었다. Control beam에 비하여 Repair I은 20.0%의 응력감소를, Repair II는 32.7%의 응력감소 현상을 보이고 있다.

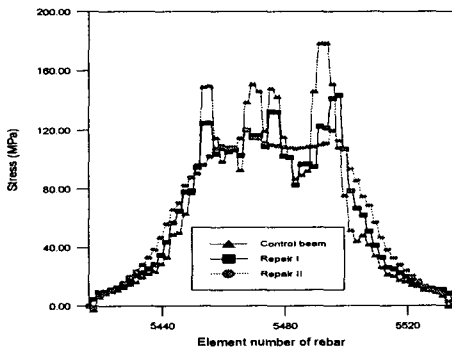


그림 7 고인성 복합재료 보강시 철근요소의 응력 변화

표 1 철근 콘크리트보 해석모델

물 성		기 호	크 기
콘 크 리 트	탄성계수	E_c	26.4 GPa
	인장강도	f_{tc}	2.8 MPa
	파괴에너지	G_{Fc}	96.8 N/m
철 근	탄성계수	E_{ss}	200.0 GPa
	항복강도	f_{sy}	414.0 MPa
고 인 성 복 합 재 료	탄성계수	E	20.0 GPa
	인장강도	f_t	2.5 MPa
	극한강도	βf_t	5.0 MPa
고 강 도 콘 크 리 트	탄성계수	E_{hc}	43.6 GPa
	인장강도	f_{thc}	5.2 MPa
	파괴에너지	G_{Fhc}	174.4 N/m

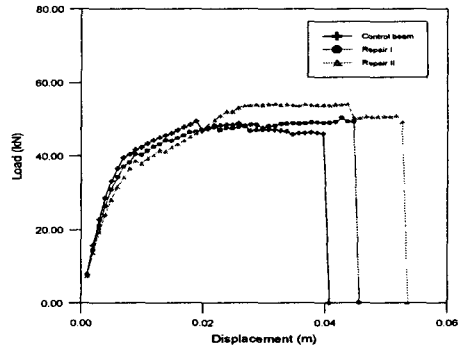


그림 6 고인성 복합재료 보강두께에 따른 수치해석 결과

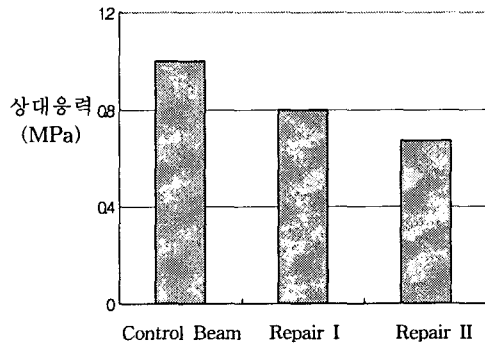


그림 8 철근요소의 최대응력 변화

그림 9에서는 고인성 복합재료가 균열 제어에 미치는 효과를 살펴보기 위하여 해석모델 바닥 부분에서의 고인성 복합재료의 균열열림을 제시하였다. 철근에 미치는 응력이 감소하는 것과 마찬가지로 Control Beam에 비하여 Repair I, Repair II의 균열폭이 급격히 줄어드는 현상을 확인할 수 있다. 이는 고인성 복합재료에서 다수의 미세한 균열이 발생하여 구조물의 인장부가 Damage Tolerant한 거동을 보이고 있어 구조적 안정성을 가지는 것을 의미한다. 그림 10에서는 각각의 보에 대하여 고인성 복합재료의 최대 균열폭의 크기를 나타내었다. Control beam에 비하여 Repair I은 75.0%, Repair II는 95.1%의 균열폭 감소를 각각 보이고 있어 고인성 복합재료의 보강효과를 잘 나타내고 있다.

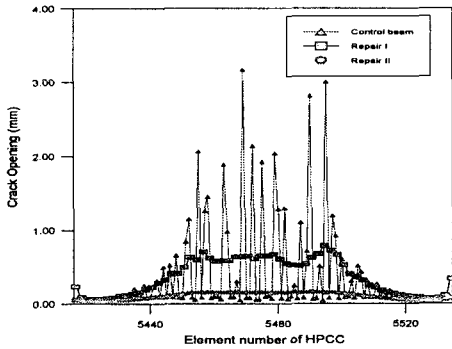


그림 9 고인성 복합재료 요소의 균열열림 비교

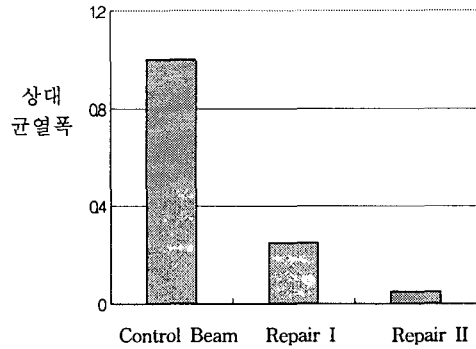


그림 10 고인성 복합재료 요소의 최대 균열열림

5. 결론

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 검증을 위하여 고인성 복합재료의 직접인장 모델 해석과 휨 모델 해석을 수행하였다. 또한, 철근 콘크리트보에 대한 적용성 검증을 위해 철근 콘크리트 모델 해석을 수행하였고 이를 기존의 실험 자료와 비교 분석한 결과, 개발된 수치해석 기법의 타당성 및 적용성을 확인하였다.
- 2) 철근 콘크리트 보에 대하여 수치해석을 실시한 결과 고인성 복합재료로 보강한 경우 철근 요소의 응력이 Control Beam에 비하여 Repair I은 20.0%, Repair II는 32.7% 감소하였으며, 균열폭은 Repair I이 75.0%, Repair II는 95.1%의 감소를 보였다. 즉, 고인성 복합재료로서 구조물을 보강할 경우 철근의 응력 분배와 인장부의 미세균열의 발생으로 인하여 보다 안정적인 구조적 거동을 보일 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Li, V. C., and Wu, H. C., (1992) "Psudo Strain-Hardening Design in Cementitious Composites," *Proceedings of International Workshop on HPFRCC*, Chapman and Hall, pp. 371-387.
2. Lim, Y. M., (1996) *Interface Fracture Behavior of rehabilitated Concrete Infrastructures Using Engineered Cementitious Composite*, Ph.D. thesis, University of Michigan, Ann Arbor.