

사용중인 구조물의 보강효과에 대한 해석적 연구

Numerical Analysis on External Strengthening Effects in Aged Structures

신 승 교* 임 윤 목** 김 문 겸*** 박 동 철****
Shin, Seung Kyo Lim, Yun Mook Kim, Moon Kyum Park, Dong Chul

ABSTRACT

In this study, a numerical analysis that can effectively predict the effect of strengthening of cracked flexural members is developed using axial deformation link elements. Concrete and interface between concrete and repair material are considered as quasi-brittle material. Reinforcing bars and reinforcing steel plates are assumed to perform as elasto-plastic materials.

Unloading behavior of axial deformation link element is implemented. In the developed numerical model, a flexural member is intentionally cracked by pre-loading, then, the cracked member is repaired using extra elements, and reloaded. The results from analysis of repaired flexural members agrees well with available experiment results. Also, it was shown that the effect of strengthening and the change of failure mode with respect to the time for strengthening and thickness of repair materials.

Based on the results, it was determined that the developed numerical model has a good agreement for determining failure modes and effect of strengthening in cracked flexural members. By utilizing the developed numerical analysis, the time and dimension of external strengthening in an existing cracked flexural member with prediction of failure mechanism can be determined.

1. 서 론

사용중인 구조물은 재령이 증가함에 따라 환경적, 구조적, 재료적 요인 등으로 인하여 균열이 발생하고 구조물의 내력, 내구성 또는 사용성이 저하된다. 그러나 사용중인 구조물에 균열이 발생하였다 고 하여 항상 그 구조물이 불안정한 것은 아니며, 균열의 크기와 위치, 원인 등에 따라 손상정도에 차이가 날 수 있다. 따라서 이러한 균열에 의해 사용중인 구조물의 안전성을 판단하기 위해서는 균열의 원인을 파악하고 평가한 후, 사용중인 구조물의 손상을 지연시키기 위한 보수공법 및 보강공법이 수행되어야 한다^[1]. 여러 가지 보강공법 중 보강재를 구조물 인장부에 부착하는 부착식 보강공법은 감소

* 정회원, 연세대학교 사회환경시스템 공학부 박사과정

** 정회원, 연세대학교 사회환경시스템 공학부 부교수

*** 정회원, 연세대학교 사회환경시스템 공학부 교수

**** 정회원, 현대건설 사원

된 내구성을 회복시켜 주거나 내구성의 증대를 위해 많이 사용되고 있으며, 이 보강공법에 대한 연구가 여러 가지 실험 및 해석적인 연구로 수행되고 있다. 그러나 사용중인 구조물의 보강효과에 대한 연구 중 실험적인 연구는 일부 수행되고 있으나 해석적 연구는 미비한 실정이다. 기존에 수행된 해석적 연구들은 손상을 입지 않은 상태의 구조물을 모형화하여 보강재로 보강한 후 구조물의 보강효과를 예측하는 연구들이 대부분이다. 이는 실제 사용중인 구조물의 보강효과를 연구하기에 적합하지 않다. 실제 사용중인 구조물은 어느 정도 균열이 발생한 상태이며, 이를 해석적으로 연구하기 위해서는 구조물에 손상을 가한 후 보강재를 부착시킨 다음 하중을 가하여 구조물의 보강효과를 예측하는 것이 합당하다.

따라서 본 연구에서는 손상된 구조물의 보강효과를 예측할 수 있는 수치해석 모형을 이용하여 사용중인 구조물의 보강성능을 평가할 수 있는 해석적 연구를 수행하고자 한다. 사용중인 구조물의 파괴거동을 예측할 수 있는 수치해석모형은 축방향 변형요소를 이용하여 모형화한다. 이 수치해석모형을 이용하여 손상된 무보강 부재와 보강 부재의 4점 휨 거동을 살펴보고 실험 결과 및 수치해석 결과의 비교·검토를 통하여 수치해석모형의 타당성을 입증한다. 이를 통하여 손상정도에 따른 사용중인 구조물의 보강효과를 평가하여 부착식 보강공법의 보강설계 기초자료로 제시하고자 한다.

2. 재하 및 제하거동의 구성모델

2.1 가상균열 모델

본 연구에서는 균열의 진행에 대한 요소크기의 영향을 배제하기 위해 파괴에너지의 개념을 도입한 Hillerborg의 가상 균열모델(Fictitious Crack Model)을 사용한다. 가상 균열모델에서는 새로 형성된 균열면을 확대하기 위해 요구되는 에너지가 균열을 생성하기 위해 요구되는 에너지보다 더 크다고 가정한다. 그림 1은 변형을 국소화 현상과 가상균열모델의 개념에 대한 그림이다. 그림 1(a)는 일축 인장응력을 받는 유사취성재료의 응력-변위 곡선 $\sigma(u)$ 가 제시되어 있으며, 유사취성재료의 변위는 게이지 A, B로부터 측정된다. 게이지 A는 국소화 현상이 발생하는 영역 안에서의 균열단면과 관련된 변위를 측정하며, 게이지 B는 국소화 현상이 발생하지 않은 영역 안에서 균열의 외부의 변위를 측정한다. 먼저 그림 1(a)에 나타낸 것과 같이 인장강도 이전까지의 변위는 게이지 A, B 모두 변위가 같음을 알 수 있으나, 인장강도 이후부터 게이지 A는 변형을 국소화 현상에 의해 변위가 늘어나고, 게이지 B의 변위는 감소한다.

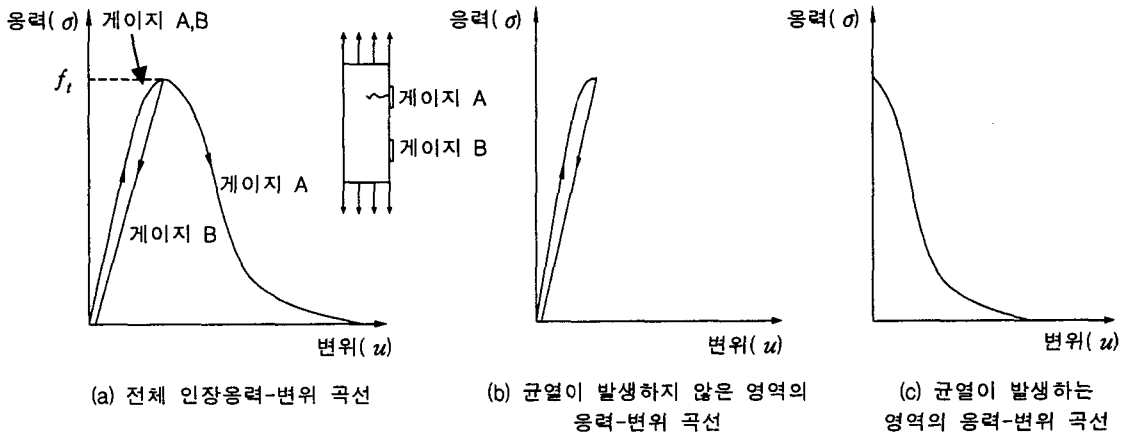


그림 1 변형을 국소화 현상 및 가상균열 모델 개념

극한하중 이후의 구성관계식은 그림 1(c) 에 나타낸 응력-변위 곡선 $\sigma(u)$ 에 의해 구성된다. 이 응력-변위 곡선의 면적은 상수이고 식 (1) 과 같이 재료의 파괴에너지 G_F 로 고려된다.

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

$$u_u = \frac{2G_F}{f_t} \quad (1b)$$

여기서 u_u 는 한계 변위이다.

본 연구에 도입된 가상 균열모델에서 필요한 요소의 기본 물성은 탄성계수 E , 인장강도 f_t , 파괴 에너지 G_F 이다. 구성관계식은 이러한 기본 물성들을 이용하여 인장에 대한 한계 변위 (u_u) 을 포함하는 연화곡선의 형태로 결정된다.

2.2 수치해석에 적용된 재료의 구성모델

구조물에서의 균열 발생은 구조물에 하중이 가해져서 주응력이 인장강도를 넘어서면 발생하며, 발생한 균열이 계속 진전되어 구조물이 파괴에 이르게 된다. 따라서, 물성이 약한 부분에 응력이 집중되는 국소화 영역에서는 균열이 계속 발전하여 파괴에 이르게 되고, 비국소화 영역에서는 균열이 다시 닫히는 현상이 일어난다. 이러한 과정을 변형을 국소화에 따른 파괴현상이라 한다. 본 연구에서는 인장 연화곡선의 제하개념을 도입하여 변형을 국소화에 따른 파괴현상을 재현 할 수 있는 모델을 개발한다. 균열의 열림과 닫힘을 구현함으로써 국소화 현상에 따른 실제 유사취성재료의 파괴해석이 가능하게 된다. 그림 2 는 기본적인 인장 연화곡선에서의 제하경로를 나타낸 경우이다. 그림 2 의 제하경로를 나타내는 식 (2) 와 같다.

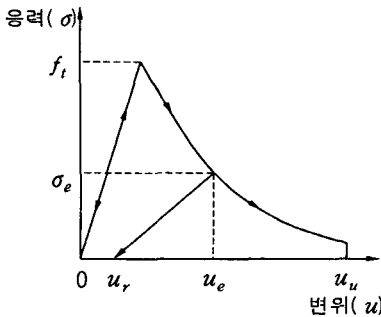


그림 2 인장연화 곡선과 제하경로

$$u_r = \beta(u_e - \frac{\sigma_e}{E} l_e) \quad (2)$$

여기서 E 는 각 요소의 초기 탄성계수이며, β 는 제하경로를 결정하는 상수이다. σ_e , u_e , u_r 는 각각 요소의 응력, 변위, 잔존 변위를 나타낸다. $\beta=0$ 일 때는 균열면에 수직인 전달 응력이 0 에 도달하면서 파괴로 인한 변형이 완전히 회복된 경우를 나타내며, $\beta=1$ 인 경우는 초기 탄성계수에 따라 잔존 변형이 생기는 경우를 의미한다. β 값은 실제 유사취성재료 구조물을 평가할 경우 각각 서로 다른 값을 갖지만 다양한 실험을 거쳐 평균적으로 0.2 의 값이 제시되고 있다.

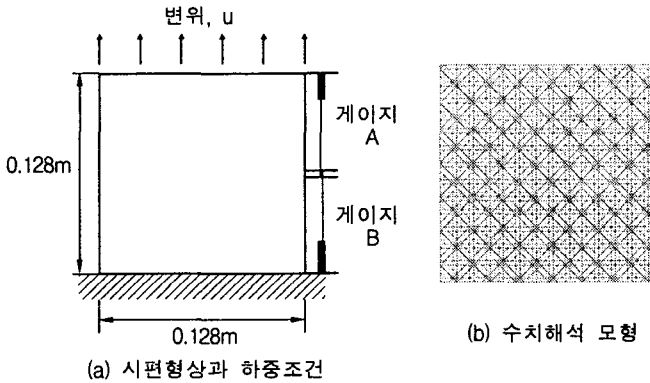
3. 수치해석 모형의 검증 및 결과분석

3.1 직접인장 모델 해석

3.1.1 유사취성재료의 국소화 파괴 거동 해석

본 절에서는 유사취성재료의 실제 거동인 국소화 파괴 현상을 재현할 수 있는 수치해석 모형을 검증하기 위하여 먼저 직접인장 모델에서 해석을 수행하여 해석 결과와 실험 결과를 비교하였다. 해석 대상은 그림 3(a) 와 같은 $0.128\text{ m} \times 0.128\text{ m} \times 0.028\text{ m}$ 의 콘크리트 시편이며, 하중조건은 직접인장 하

중을 적용하였다. 수치해석에서 사용된 물성은 Zongjin^[2]에 의해 수행된 실험에서 제시한 값과 동일한 값인, 콘크리트의 탄성계수 40.0 GPa, 인장강도 4.23 MPa 을 각각 사용하였다. 콘크리트의 파괴에너지는 실험에서 언급을 하지 않아 일반적으로 사용되고 있는 98 N/m 을 사용하였다. 그림 3(b) 는 요소 길이 2.54 mm, 요소개수 7600 개에 대한 수치해석 모형의 형상이다. 본 수치해석에서는 콘크리트의 재료적 특성을 표현하기 위해 각각의 요소에 임의의 물성값을 부여하는 Monte Carlo 시뮬레이션을 도입하였으며, 물성의 확률적 분포(C.O.V=10%)를 이용하여 국소화 영역과 국소화 이외의 영역에서 파괴거동에 대하여 수치해석을 수행하였다. 그림 4 는 콘크리트의 국소화 파괴거동에 대한 실험 결과 및 수치해석 결과의 응력-변위 곡선이다. 그림 4 에 도시한 바와 같이 게이지 A 와 게이지 B 의 거동은 극한응력에 도달하기 전까지는 같은 거동을 하지만 극한응력 이후에는 서로 다른 거동을 하는 것을 수치해석 결과 및 실험 결과에서 알 수 있었다.



(a) 시편형상과 하중조건

(b) 수치해석 모형

그림 3 직접인장 시편의 형상과 수치해석 모형

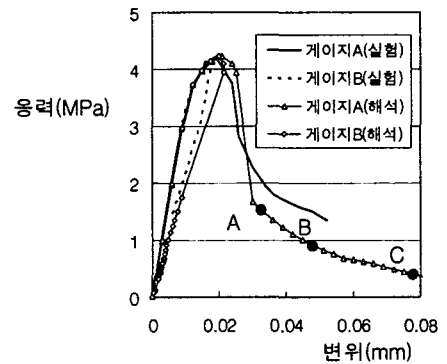
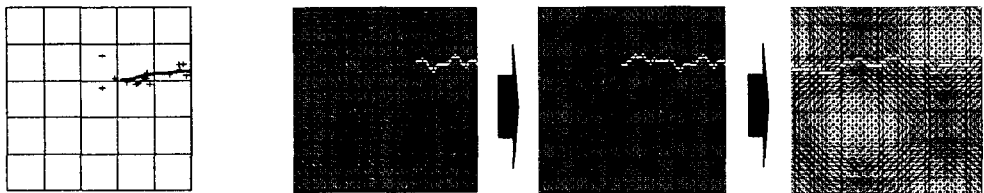


그림 4 국소화 파괴 거동에 따른 응력-변위 곡선

게이지 A 에 측정된 결과로부터 변위가 계속적으로 증가하여 극한응력 이후에도 계속 변위가 증가함을 알 수 있었다. 즉, 게이지 A 의 영역에서는 구조물에 손상을 입히는 균열이 발생한 후 그 균열이 계속 진전되어 구조물 파괴 현상이 발생된 것으로 예측된다. 또한, 게이지 B 에 측정된 결과로부터 극한응력 이전까지 변위가 계속 증가하다가 극한응력 이후부터 변위가 줄어드는 것을 수치해석 결과 알 수 있었으며, 실험 결과도 이와 유사한 거동을 보이는 것을 확인하였다. 해석 결과와 실험 결과에서 약간의 오차가 생기는 것을 알 수 있는데, 이 오차는 해석시에 사용된 콘크리트 파괴에너지 값이 실험에서 주어지지 않아 일반적인 콘크리트의 파괴에너지를 사용하면서 발생한 것으로 추정된다. 그림 5 는 실험 및 수치해석 대상의 파괴형상을 나타낸 그림이다. 앞에서 말한 바와 같이 게이지 A 의 영역에서는 균열이 발생하였으며, 게이지 B 의 영역에서는 균열이 발생되지 않음을 실험 및 수치해석 결과로 알 수 있었다. 그리고 점 A, B, C 의 파괴진전형상을 예측 할 수 있었다. 따라서, 본 연구에 사용된 해석기법이 실제 콘크리트의 역학적 거동인 국소화파괴 현상을 재현할 수 있음을 알 수 있었다.



(a) 공시체의 파괴형상

(b) 수치해석 대상의 파괴형상

그림 5 직접인장 모델의 실험 및 수치해석 파괴 형상

3.1.2 재하 및 제하경로에 대한 검증

제안된 수치해석 모형 중 요소의 제하경로를 결정하는 상수 β 의 변화에 따른 전체 구조물의 거동을 해석하였다. 해석 대상 모형은 $0.254m \times 0.254m \times 0.254m$ 시편이며 하중조건은 직접인장 하중을 적용한 후 하중을 제하하고 다시 하중을 가하는 방법을 사용하였다. 수치해석에 사용된 물성은 Gopalaratnam에 의한 실험과 동일하며 콘크리트의 탄성계수 $31.7GPa$, 인장강도 $3.48MPa$, 파괴에너지 $98N/m$ 를 사용하여 해석을 수행하였다. 수치해석 모형으로는 요소 길이 $5.08m$, 요소개수 7600 개를 사용하였다.

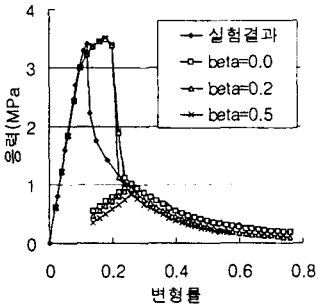


그림 6 β 의 변화에 따른 구조물의
응력-변형률 곡선

그림 6은 β 의 변화에 따른 구조물의 거동을 나타낸 그림이다. 그림에서 보인 것과 같이 직접인장의 경우 β 의 변화에 따라 전체적인 구조물의 거동 및 제하 경로에 차이가 있음을 확인하였다. 또한, 항복응력 전까지는 β 에 관계없이 응력-변형률 곡선이 비슷한 거동을 보이고 있으나 항복응력 이후에는 $\beta=0.0$, $\beta=0.2$, $\beta=0.5$ 에 따라 응력-변형률 곡선이 달라짐을 확인하였다. $\beta=0.0$ 일때의 응력-변형률 곡선이 $\beta=0.2$ 또는 $\beta=0.5$ 일 경우의 응력-변형률 곡선보다 더 실험 결과에 근접함을 알 수 있었다. 그림 10에 도시된 바와 같이 하중을 제거할 경우, $\beta=0.0$ 일 때는 응력-변형률 곡선이 원점으로 돌아가고 $\beta=0.2$ 또는 $\beta=0.5$ 일때는 응력-변형률 곡선이 $\beta=0.0$ 일때의 응력-변형률 곡선과 비교하여 미소한 차이가 보임을 알 수 있었다. 따라서, 요소의 제하경로를 결정하는 β 의 변화에 따른 요소의 거동이 전체 구조물의 역학적 거동에서 제하시 미소한 영향을 미침을 확인하였다.

3.2 균열이 존재하는 보강구조물의 해석

본 절에서는 구조물의 보강시기를 보강시기 1, 2, 3으로 나누어 보강 구조물의 보강효과를 예측하였다. 보강시기 1은 균열이 발생하지 않은 상태에서 초기보강한 것을 나타내며, 보강시기 2는 극한변위의 35% 변위가 발생한 시기에서 제하한 후 보강한 것이며, 보강시기 3은 극한변위의 64% 변위가 발생한 시기에서 제하한 후 보강한 것을 말한다. 그림 7은 콘크리트 지간장(L) $1.2m$, 높이(d) $0.15m$, 두께(t) $0.15m$ 인 균열이 발생된 시편의 그림이며 강판을 인장부에 $1.1m$ 길이로 부착하였다.

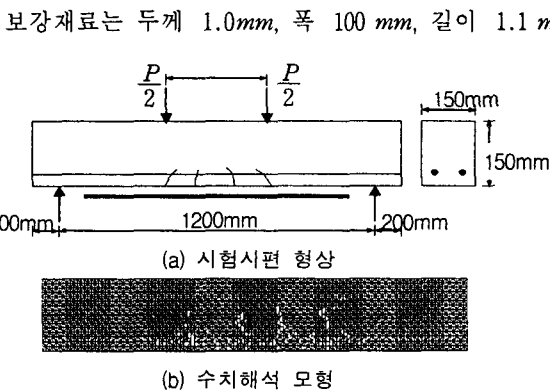


그림 7. 보강 구조물의 시편형상
및 수치해석모형

보강재료는 두께 $1.0mm$, 폭 $100mm$, 길이 $1.1m$ 의 강판을 사용하였다. 수치해석을 위하여 사용한 물성은 실험에서 주어진 값과 동일한 값을 사용하였는데, 강판은 탄성계수 $200.0GPa$, 인장강도 $269.0MPa$ 로 사용하였으며 콘크리트와 강판 사이의 경계면인 에폭시는 탄성계수 $300.0MPa$ 를 사용하였다. 에폭시의 기본적인 물성값인 인장강도 $24.79MPa$, 파괴에너지 $200.00N/m$, 강판의 파괴에너지 $5000.0N/m$ 는 실험에서 주어지지 않아 일반적으로 많이 사용되는 값으로 가정하여 사용하였다.

먼저, 개발된 수치해석 기법의 휨 구조물에의 적용성 검토를 위하여 그림 8에 두께가 $1.0mm$ 인 강판으로 보강되고 균열이 존재하는 휨 부재의

하중-변위 곡선을 제시하였는데, 초기 강성과 콘크리트 부재의 균열 발생시 강성, 또한 강판이 항복했을 경우의 강성이 유사함을 알 수 있다. 또한 강성이 급격히 변하는 위치에서의 하중크기가 유사함을 보여 실험결과와 본 수치해석에 의한 결과가 유사한 거동을 보임을 알 수 있다. 극한하중의 경우 수치해석 결과 80.9 kN 의 값을 보였으며 실험결과와 9.3%의 차이가 발생함을 알 수 있었다. 이는 실험에서 주어지지 않은 물성을 임의로 가정하였고, 잔존변위 또한 다르게 산정되었기 때문에 발생한 오차로 사료된다.

그림 9 는 보강시기에 따른 보강효과를 나타낸 그림이다. 그림 9(a) 는 하중을 재하한 후 보강시기에 대한 제하위치를 나타낸 그림이며, 그림 9(b) 는 보강 후 보강시기에 대한 보강성능을 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 보강시기 1 일 때 극한하중 97.34 kN 으로 가장 큰 값을 보였고, 보강시기 2 와 3 은 유사한 극한하중 값을 보였다. 또한, 보강시기 2 와 3 일 때 변위가 크게 발생하였고, 보강시기 1 인 경우 약 0.00632 m 에서 파괴가 일어났다. 즉 보강시기 2 와 3 일 경우의 파괴는 연성적인 휨 파괴 형태이며, 보강시기 1 일 경우 취성적 거동을 보였다. 변위가 0.0063 m 일 경우를 살펴보면 보강시기 1, 2, 3 에 대하여 하중이 각각 97.1 kN, 54.3 kN, 41.10 kN 의 값이 나타남을 알 수 있다. 따라서, 보강시기 3 인 경우, 동일한 수준의 변위에서는 하중이 작게 산정되나 연성이 크기 때문에 극한하중 값은 보강시기 2 인 경우와 비슷한 결과를 나타내고, 파괴형상은 휨파괴가 일어남을 알 수 있다. 반면 손상이 없는 상태에서 보강할 경우 동일한 수준의 변위에서는 하중이 크게 산정되나, 경계면에서의 계면박리 파괴에 의해 급격한 파괴가 발생하여 보강시기에 따라 파괴형상이 변화됨을 알 수 있었다.

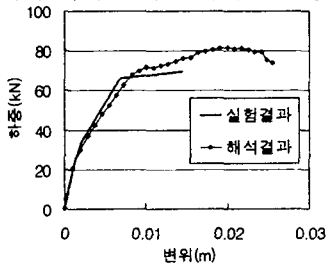
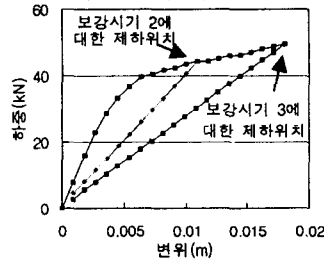


그림 8. 균열이 존재하는 구조물의 하중-변위 곡선



(a) 보강시기에 대한 재하 및 제하곡선

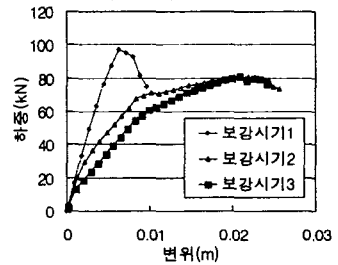


그림 9. 보강시기에 따른 하중-변위 곡선

4. 결 론

1. 재료의 미시적 거동에 따른 구조물의 거시적 거동을 표현할 수 있는 수치해석 기법을 개발하였으며, 개발된 수치해석 기법으로 구조물의 국소화 파괴 현상을 효과적으로 표현하였다. 또한, 하중을 재하-제하-재 재하한 경우 본 수치해석 기법에 의한 재료 및 구조물의 역학적 거동이 실험결과와 유사함을 확인하였다.
2. 검증된 해석기법을 이용하여 균열이 존재하는 구조물의 균열정도를 달리하여 해석을 수행하였다. 그 결과, 균열이 없는 초기상태에 대한 구조물의 보강효과가 균열정도에 따라 최소 1%에서 최대 21% 까지 차이가 발생함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Shin, Y.S. and Hong, G.H., "Flexural behavior of Beams Strengthened with Steel Plates/Carbon Fiber Sheets(CFS) under Pre-Loading Conditions," *KCI Concrete Journal*, Vol.12, 2000, pp.69-77.
2. Peter, H.E., *Concrete Repair and Maintenance Illustrated : Problem Analysis, Repair Strategy, Techniques*, R. S. Means Company, Inc., 1994, pp.197-245.