보수·보강된 RC 구조물의 경계면 파괴를 고려한 수치해석 기법 개발

Development of Numerical Tool considering Interfacial Fracture Behavior in Repaired RC Structures

임윤묵* 김문겸** 신승교*** 고태호****
Lim, Yun Mook Kim, Moon Kyum Shin, Seung Kyo Ko, Tae Ho

Abstract

In this study, a numerical simulation that can effectively predict the interfacial fracture behavior in repaired structures is developed using the axial deformation link elements. In repaired structures, concrete and interface are considered as quasi-brittle materials, and steel plate as a repair material and reinforcement are modeled as elasto-plastic materials. The behavior of repaired reinforced concrete structures under flexural loading conditions is numerically simulated, and compaired with experimental results. The strengthening effect according to the length and thickness of the repair material is studied and rip-off, debonding and rupture failure mechanisms of interface between substrate and repair materials are detected. It is shown that the interface properties affect on the mechanical behavior of repaired structures. Therefore, the developed numerical method using axial deformation link elements can be used for determining the strengthening effects and failure mechanism of repaired structures.

1. 서론

최근 우리나라의 경우 급속한 경제 성장기에 건설된 구조물이 20~30년 이상의 사용기간 경과로 노후화됨에 따라 대형 토목구조물의 안전 및 유지관리에 대한 관심이 증가하고 있다. 구조물은 완공 후 시간이 지남에 따라 각종 원인에 의한 손상이 진행되어 기대했던 수명을 다하지 못하고 그 성능을 상실하는 경우가 많으며 적절한 유지관리를 실시하지 않으면 균열의 확대, 철근부식 등에 의하여 구조물 내력성능이 점차 저하되고 내구 수명이 단축된다. 따라서, 사용성이나 내구성을 확보하기 위해 적절한 시기에 보수 및 보강하는 조치가 필요하다. 기존 구조물에 새로운 보강재를 접합하여 보수·보강하게 되면 보강재와 피보강재 사이에 경계면이 발생하게 되는데 이러한 경계면의 박리파괴는 보수·보강 효과를 현저히 감소시키고 구조물의 사용연한 또한 감소시키게 된다. 그러므로 보수·보강 구조물의 거동은 경계면의 성능과 직접적으로 연관된다고 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 경계면의 파괴거동을 예측할 수 있는 수치해석 모형을 개발하며, 이를 통하여 보수·보강 구조물의 하중증가에 따른 내력성능 저하 및 보강재와 피보강재 사이의 상호작용 등의 제반문제에 대한 해석적 연구를 수행한다. 또한 개발된 수치해석 기법을 보수·보강 구조물에 적용시켜 그 활용성에 대해 검토하고 보강길이, 보강두께 등의 변화에 따른 보강효율을 평가하였다.

* 정회원,연세대학교 토목공학과 조교수 *** 정회원,연세대학교 토목공학과 박사과정
** 정회원,연세대학교 토목공학과 교수 **** 정회원,연세대학교 토목공학과 석사과정

2. 유사취성 재료의 파괴기준

유사취성재료의 인장강도는 압축강도에 비해 현저하게 낮으므로 인장강도는 재료의 파괴거동에 지배적인 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 유사취성재료 파괴기준을 인장에 의한 파괴로 가정하여 각 요소마다 인장응력-변위 곡선을 적용하여 수치해석 모델링에 사용하였다[1]. 각 요소에서 절점의 상대 변위에 의한 응력이 탄성-소성 구성관계식을 따라 구성되고 탄성 한계변위 이후는 손상에 의한 연화현상이 발생하고 극한변위 이후는 균열면 상에 응력전달이 없는 것으로 제시하였다.

보강재와 피보강재 사이에 발생하는 경계면에서의 부착력은 많은 경우 두 재료 사이에서 전달되는 전단응력에 의해 표시된다. 따라서 피보강재인 콘크리트와 보강재의 부착응력의 분포는 그림 1과 같이 탄성한계 상태, 탄·소성 상태, 균열 진행상태, 파괴진행상태로 나누어 전단응력에 준하여 나타내는 것이 일반적이다. 그림 2는 하중단계별 전단부착응력의 분포를 수치해석 상의 결과로 나타내었는데, 이는 그림 1에서 제시한 이론적인 부착 응력의 분포와 유사한 거동을 함을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용한 파괴기준을 이용하여 경계면의 전단부착파괴 거동을 효과적으로 모델링할 수 있는 타당성을 제시하였다.

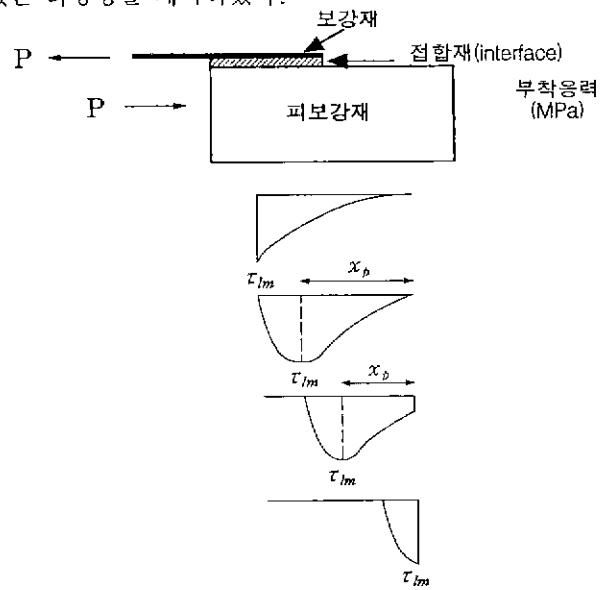


그림 1. 하중단계별 부착응력 상태변화

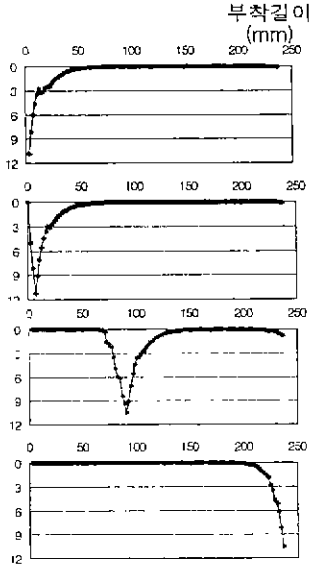


그림 2 부착응력변화 수치해석 결과[2]

3. 철근 및 보강판의 구성관계식

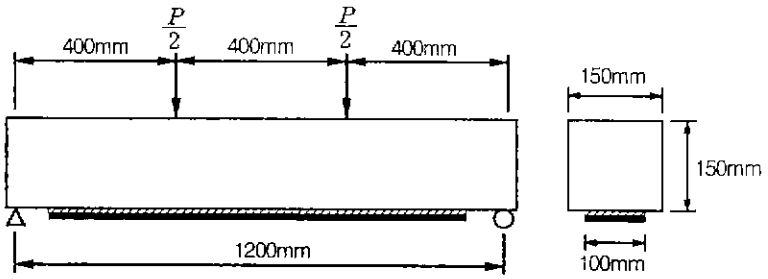
구조물내의 철근의 영향은 부착영역에 걸쳐 하중이 재 분배됨으로써 고려되는 데 부착력은 콘크리트와 철근의 변형 적합 조건에서 얻을 수 있다. 철근의 항복은 임의의 단면에서 발생하는 응력이 항복응력보다 클 때 발생하고 변형률이 극한 변형률에 도달할 때 철근은 파괴된다고 가정한다 콘크리트 내부의 철근 모델은 선형 탄성부분과 항복 후의 소성부분을 갖는 이중선형(bilinear)의 평균응력과 평균변형률의 형태로 주어지며, 항복 후의 모델은 응력의 증가없이 변형이 발생하는 완전소성거동

을 하는 것으로 모델링하였다. 콘크리트 균열사이의 철근의 응력은 콘크리트와의 부착효과 때문에 균일하지 않으며 철근의 항복은 균열면에서 철근이 항복에 도달할 때 발생한다. 철근이 항복하면 철근의 평균응력-평균변형률은 더 이상 탄성관계를 유지하지 않는다.

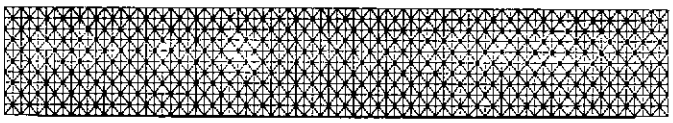
최근에는 강판접착공법과 함께 탄소섬유나 유리섬유를 이용한 복합재료를 보강재로 사용하는 보강공법이 많이 이용되고 있다. 이러한 보강재료의 구성모델은 각 재료의 특성에 따라 다르게 나타나지만 FRP나 CFS의 경우는 각 보강재의 일축인장강도를 파괴기준으로 하여 인장강도에 도달하기 전까지의 거동을 선형탄성으로 가정하였다. 강판은 철근의 구성모델과 같이 선형탄성부분과 항복 후의 소성부분을 갖는 이중선형(bilinear)의 평균응력과 평균변형률의 형태로 가정하였다[3]. 강판은 복합재료 보강재에 비하여 높은 인장강성을 가지고 있으며 경화후 수축이 없고 모든 방향의 인장력에 대응할 수 있어 응용범위가 넓은 장점을 가지고 있다.

4. 경계면을 포함하는 구조물 해석

본 연구에서는 경계면을 포함한 휨 모델의 역학적 특성 파악을 위하여 그림 3(a)와 같이 콘크리트 인장부에 강판이 부착된 구조물을 고려하였다. 휨 시편은 길이 $1.2m$, 높이 $0.15m$, 두께 $0.15m$인 콘크리트 시편이며 강판을 콘크리트 인장부에 $1.1m$ 길이로 부착하였다. 수치해석을 위하여 사용한 물성은 실험에서 주어진 값과 동일한 값을 사용하였으며 콘크리트는 탄성계수 $26.35GPa$, 인장강도 $2.57MPa$, 파괴에너지 $67.1N/m$를 사용하였고 철근은 탄성계수 $200.0\ GPa$, 항복강도 $414.0MPa$을 사용하였으며 강판은 탄성계수 $200.0GPa$, 인장강도 $269.0\ MPa$을 사용하였다. 콘크리트와 강판 사이의 경계면인 에폭시는 탄성계수 $300.0\ MPa$, 인장강도 $24.79\ MPa$, 파괴에너지 $5000.0N/m$를 사용하였다. 수치해석에 사용한 모델링은 그림 3(b)에 나타난 것과 같이 4 점휨 하중이 작용하고 요소길이 $15mm$, node 수 964개, 요소개수 2707개를 사용하였다



(a) 4점휨 모델 실험시편의 형상 [4]



(b) 수치해석 모형

그림 3. 보강판을 부착한 실험시편의 형상과 수치해석 모델

먼저 4 점휨이 작용하는 무보강 보에서의 역학적 거동과 강판 두께 $1mm$, $1.5mm$로 변화시켰을 때 하중-변위 곡선 및 파괴형상을 실험과 비교하였다. 그림 4는 무보강 상태에서 4 점휨이 작용하는 철근콘크리트 보의 중앙부에서의 처짐에 대한 하중-변위 곡선을 실험값과 비교한 것이다. 전반적으로 실험값의 처짐이 해석값의 처짐보다 크게 나타나는데, 실험에서는 지점부의 처짐 및 기타 여러 가지 원인에 의한 처짐 등이 포함되어 일반적으로 수치해석보다 처짐값이 크게 나타나고 수치해석에서 철근과 콘크리트 사이에 완전부착 거동을 하는 것으로 모델링하였기 때문에 발생하는 오차로 추정된다. 따라서 철근과 콘크리트 사이의 부착에 관계하는 경계면의 물성치를 보다 정확히 모델링한다면 실험값에 근접하는 하중-변위 곡선을 도출할 수 있을 것으로 예상된다. 보강길이 $1.1m$, 강판두께 $1\,mm$로 보강을 한 경우, 4 점휨을 가하였을 때 하중-변위 곡선이 그림 5에 나타나 있다. 실험결과와 수치해석 결과를 비교해 보면 탄성구간에서 초기 기울기가 매우 크게 나타남을 볼 수 있는 데, 이는 본 연구에 사용된 모델의 강성이 크다는 것을 의미한다. 다시말해, 실험에서 처짐 측정시 단부의 처짐 및 기타 기계적인 측정오차가 포함될 수 있으므로 발생하는 오차로 생각된다.

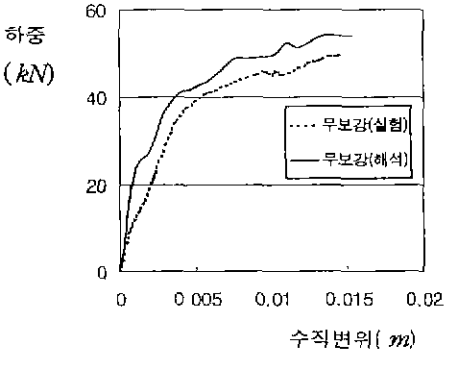


그림 4 무보강보의 하중-처짐 곡선

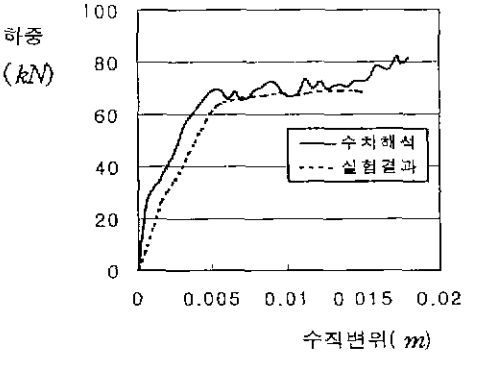


그림 5. 보강한 보의 하중-처짐 곡선

보강 두께 $1mm$인 경우, 실험값이 최대하중은 $70kN$이고 수치해석값의 최대하중은 $73kN$ 으로 오차 5% 이내에 들며 탄성 이후의 구간에서도 거동이 비슷하게 나타남을 알 수 있다. 그림 6 은 보강길이 $1.1m$, 보강두께 $1mm$일때의 파괴형상을 비교해 놓은 것인데, 실험과 수치해 모두 인장부에서 균열이 시작되어 압축부로 진전되는 휨파괴 형태임을 확인할 수 있다.

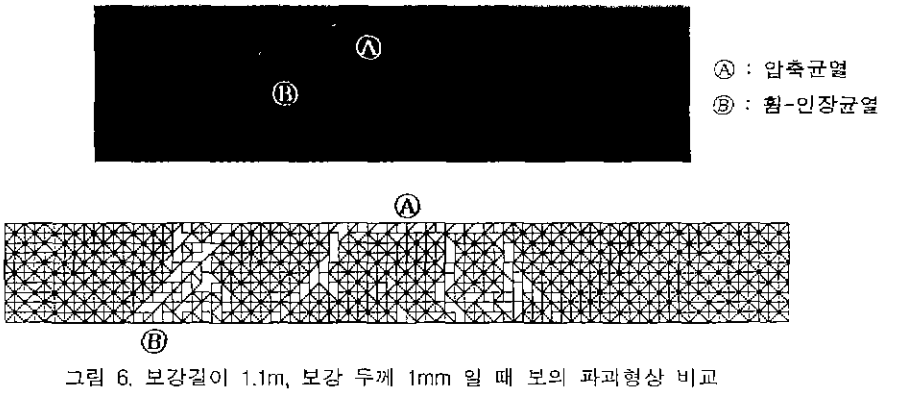


그림 6. 보강길이 1.1m, 보강 두께 1mm 일 때 보의 파괴형상 비교

이 결과로부터 보강판 길이, 보강판 두께변화에 따른 RC 보의 거동을 살펴 보았다. 먼저 보강판 두께를 $1mm$로 일정하게 하고 보강 길이를 변화시켜 보강효과를 살펴보았는데, 보강판 길이가 길수록 보강효과가 커짐을 그림 7에서 확인할 수 있다. 그림 7을 검토하면 전 지간장의 90% 길이로 보강하였을 때 보강효과가 1.4로 전면보강과 같은 보강효과가 나타남을 알 수 있다. 이는 보강 길이가 감소함에 따라 극한하중이 급격히 감소하는 일반적인 실험결과들과 경향이 일치하며, 보강길이는 보강효과 면에서나 조기파괴를 방지할 수 있다는 면에서 전 지간장에 대해 보강하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

본 연구에서 보강판 길이를 $1.1m$로 하였을 때의 보강효과가 전면보강 했을 때의 보강효과와 일치하였으므로 보강길이를 $1.1m$로 일정하게 한 후, 보강 두께를 $0.5mm$, $1.0mm$, $1.5mm$, $2.0mm$, $2.5mm$로 변화시켜 보강효과를 살펴보았는 데, 그 결과가 그림 8에 나타나 있다. 그림 8을 검토하면 보강 두께가 증가함에 따라 더 이상 보강효과가 나타나지 않음을 확인할 수 있는데, 이는 강판 두께가 어느 한계값 즉, 최대 철근비를 초과하는 값이 되면 오히려 보강효과가 떨어지는 실험결과와 경향이 같음을 알 수 있다. 일반적으로 강판 보강에서 보강 길이가 충분하지 않을 경우, 보강 두께가 어느 한계값 이상이 되었을 때 그림 9에 나타난 것과 같이 보강판이 콘크리트 인장부를 물고 떨어지는 단부박리 파괴와 같은 조기파괴가 발생하여 극한 하중의 감소를 유발하게 된다

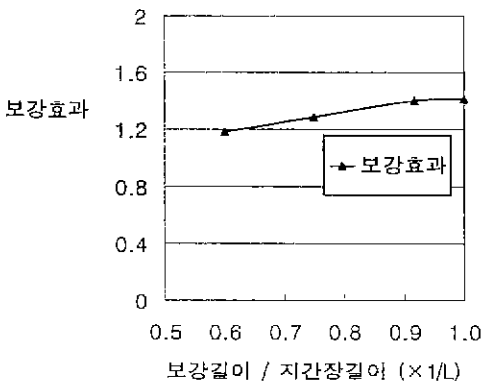


그림 7. 보강길이 변화에 따른 보강효과

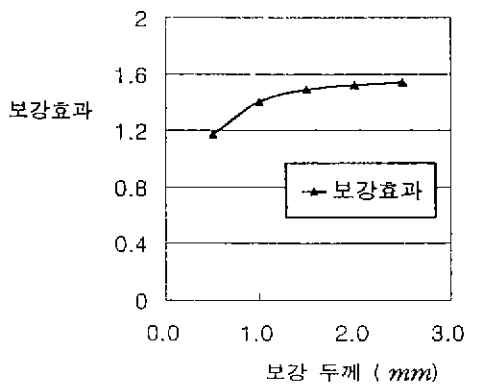


그림 8. 보강길이 변화에 따른 보강효과

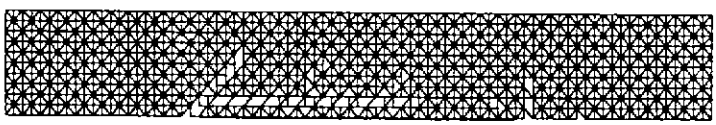


그림 9. 단부박리파괴(rip-off) 형상

경계면의 물성변화에 따른 역학적 거동 파악을 위해 경계면 재료의 탄성계수, 인장강도 및 파괴에너지 등을 변화시켜 해석을 실시하였다. 수치모델은 보강길이 $1.1m$, 보강두께 $1mm$ 이며, 하중조건은 4점 휨하중을 작용하였다. 그림 10은 경계면 탄성계수 $300\,MPa$, 경계면 인장강도 $18MPa$일 때 경계면의 파괴에너지 변화에 따른 하중-변위 응답을 나타낸 것이다. 경계면 파괴에너지가 $60N/m$인 경우, 수직변위가 $0.01m$에 도달하였을 때 구조물이 파괴에 도달하였고 파괴에너지가 100, 200, 300 N/m일 경우에는 모두 동일한 거동이 나타났다. 다시 말해서 경계면 재료의 파괴에너지 값이 한계값 이상으로 증가함

에 따라 구조적 거동의 변화가 나타나지 않음을 확인할 수 있었다. 즉 조기파괴를 발생시키지 않기 위해서는 일정한 값 이상의 극한 파괴에너지를 갖는 경계면 재료를 사용해야 함을 확인할 수 있었다. 경계면의 인장강도가 일정할 때 경계면의 탄성계수 변화에 따른 하중-변위 곡선은 그림 11에 나타내었는데 경계면 탄성계수가 클수록 구조물의 보강효과를 증가시킬수 있음을 확인할 수 있었다.

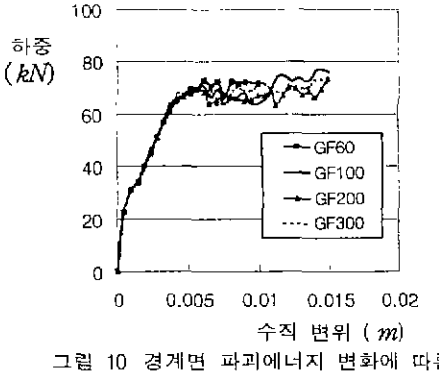


그림 10 경계면 파괴에너지 변화에 따른 하중-변위 응답

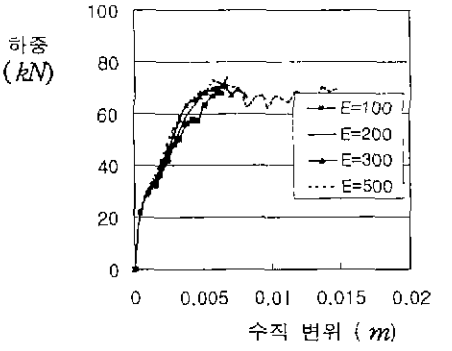


그림 11. 경계면의 탄성계수 변화에 따른 하중-변위응답(인장강도 12MPa)

5. 결 론

1) 유사취성파괴 거동을 보이는 경계면의 역학적 특성에 대한 해석을 위하여 재료의 미시적인 파괴거동을 효과적으로 표현할 수 있는 파괴역학적 개념의 구성관계식을 도입하였다. 미시영역에서의 파괴는 인장에 의한 파괴라는 전제하에 축방향 변형요소를 이용하여 수치해석기법을 개발하였다.
2) 보강길이 및 보강두께의 변화에 따른 보강효과를 확인하였고, 이로부터 보강길이 및 두께의 증가에 따라 보강효과가 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 본 연구에서 개발된 수치해석을 이용하여 보강길이 및 두께의 변화에 따른 구조물의 역학적인 거동을 예측할 수 있음을 알수있었다.
3) 경계면 재료의 물성 변화에 따른 역학적 거동 변화를 파악하였으며, 경계면의 인장강도가 일정한 경우, 경계면의 탄성계수가 클수록 구조물의 보강효과를 증가시킬수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 허우영, **경계면 파괴를 고려한 보수·보강 구조물의 수치해석기법 개발**, 연세대학교 석사학위논문, 1999
2. 박진완, **구조 보강재와 피보강재 접합경계면의 역학적 특성에 관한 해석적 연구**, 연세대학교 석사학위논문, 1998
3. Saleh, A.L. and Aliabadi, M H., "Crack Growth Analysis in Reinforced Concrete Using BEM," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.124, 1998, pp.949-958
4. Hussain, M., Sharif, A., Basunbul, I A , Baluch, M.H., and Al-Sulaimani, G.J., "Flexural Behavior of Precracked Reinforced Concrete Beams Strengthened Externally by Steel Plates," *ACI Structural Journal*, Vol.92, 1995, pp.14-22