

구조 보강재와 피보강재 접합경계면의 역학적 특성에 관한 해석적 연구

Numerical Analysis of Interfacial Fracture Behavior in Repaired Structures

박진완* 신승교** 임윤목*** 김문겸****
Park, Jin Wan Shin, Seung Kyo Lim, Yun Mook Kim, Moon Kyum

ABSTRACT

An interface always appears when a repair material is applied to an aged infrastructure system for repair. These repaired structures have the high chance to fail along the interface because of the stress concentration/discontinuity along the interface. So, mechanical properties of the interface have much influence on the behavior of repaired structure systems. In this paper, numerical tool that can predict effectively the interfacial fracture behavior is developed using axial deformation link elements, and this numerical technique is applied to the interfacial failure behavior. The results coincide with the ultimate strength and failure profile on the interfacial behavior of carbon fiber sheets for strengthening structures with epoxy adhesion. Thus, the mechanical behavior of the interface up to failure can be predicted using numerical technique with the proposed axial deformation link elements.

1. 서 론

최근 우리나라에서는 대형 구조물의 붕괴사고 이후 노후된 구조물의 안전성에 대한 관심이 늘고 있으며 이러한 노후된 구조물의 경우, 경제적인 방법의 하나로 보수·보강 방법을 사용하는 경우가 많다. 보수·보강 방법으로는 일반적으로 기존 구조물에 보수·보강재를 부착하는 방법이 있는데 보수·보강재를 부착하는 경우, 기존 구조물과 새로이 부착된 보수·보강재 사이에 경계면이 형성되고 구조물의 거동은 이 접합 경계면의 물성과 직접적으로 관련된다⁽¹⁾. 보수·보강된 구조물에서는 기존 구조물과 보강재료 사이의 접합 경계면으로부터 파괴가 진행되므로 접합 경계면에서의 구조물의 손상 예측 및 손상의 정도에 따른 안전성의 문제를 고려하지 않을 수 없다. 일반적으로 구조물의 파괴거동을 예측하기 위해서는 구조물을 구성하는 재료의 미시적인 균열현상을 규명하고, 규명되어진 균열현상 모형을 통하여 전체 구조물의 파괴거동을 이해하여야 한다. 그러나 접합 경계면 해석의 난해함 때문에 현재까지는 주로 실험에 의존하였다. 또한 개발된 수치모델들도 재료의 거시적 거동은 파악할 수는 있으나 균열거동과 같은 국부적인 거동까지는 모형화할 수 없는 단점을 가지고 있었다. 그러므로, 미시역학적 관점에서 재료의 파괴거동을 잘 표현할 수 있는 수치해석 모형의 필요성을 강조하지 않을 수 없다. 따라서 접합경계면의 파괴거동을 미시적으로 예측할 수 있는 수치모형을 개발하여 구조물의 균열 및 파괴현상을 역학적인 연구를 통하여 정확히 예측하고, 파괴부위, 균열의 확대 및 진행경로 예측, 또한 하중에 의한 구조적 성능저하를 예측하는 등의 제반문제를 해석적으로 연구할 수 있게 하는 것이 필요하다.

* 유니슨(주) 연구원

** 연세대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

*** 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 조교수

**** 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수

본 연구에서는 직접인장 및 전단 등 다양한 하중이 작용하는 경우에 대하여 접합경계면의 역학적 특성인 탄성계수 E , 파괴에너지 G_F , 인장강도 f_t 에 따른 거동을 분석하여 접합면 특성을 해석적으로 파악하고, 작용하중 각각의 경우에 대하여 구조계의 안전성을 최대한으로 확보할 수 있는 접합경계면의 재료 특성을 검토한다.

2. 유사취성 재료의 파괴조건

유사취성 재료를 모형화하기 위한 방법으로 균열의 진행에 대하여 파괴에너지 개념을 이용한 Hilerborg⁽²⁾의 가상균열 모델(Fictitious Crack Model)을 사용하였다. 이 때 필요한 요소의 기본물성은 탄성계수 E , 인장강도 f_t , 파괴에너지 G_F 이다. 이러한 기본물성들을 이용하여 인장에 대한 한계 균열폭을 포함하는 구성관계식의 형태가 결정된다. 가상균열 모델에서 변형의 국소화는 극한하중 이후에 발생하고, 극한하중 이전의 구성관계식은 일반적인 응력-변위 곡선에 의해 나타나게 된다. 한편, 극한하중 이후의 구성관계식은 응력-균열폭 곡선 $\sigma(w)$ 에 의해 나타나며 응력-균열폭 곡선의 면적은 상수로서 재료의 파괴 에너지 G_F 가 된다.

$$G_F = \int_0^{w_c} \sigma(w) dw \quad (1)$$

여기서, w_c 는 한계균열폭이다.

3. 유사취성 재료에의 적용

요소에 임의의 물성을 도입하는 확률론적 방법에 근거한 모형을 이용하여 유사취성 재료에 대한 적용성을 검토하였다. 요소에 확률론적 방법을 적용할 수 있는 물성은 탄성계수, 인장강도, 탄성한계변형률과 파괴에너지 등이다. 각 요소에 임의의 물성을 부여하기 위해 본 연구에서는 정규분포를 갖는 Monte Carlo 시뮬레이션을 적용하였다. 수치해석 검증을 위해 사용한 시편 및 수치해석모형은 Fig.1과 같으며 요소갯수 7660개, 탄성계수의 평균은 $31.7GPa$, 인장강도의 평균은 $3.48MPa$, 파괴에너지의 평균은 $41.7N/m$ 를 적용하였고 각각 10%의 c.o.v를 적용하였다.

직접인장하중이 작용하는 경우에 대해 Monte Carlo 시뮬레이션을 적용한 결과와 적용하지 않은 결과에 대해 해석을 실시하여 구성방정식만 도입한 경우는 극한하중 이후의 연화거동을 보이지 못하고 급격하게 파괴되었지만, 확률론적 개념을 도입한 경우는 극한하중 이후의 유사취성적인 거동을 실제로 가깝게 나타냄을 알 수 있었다. 본 연구에서 제안한 모델의 검증을 위해 인장하중이 작용하는 경우에 대한 실험결과와 비교한 자료가 Fig.2에 나타나 있다. 최대하중 이후의 거동은 파괴에너지에 따라 조금씩 다른 거동을 보이나 최대하중의 경우 실험값과 수치해석 결과가 오차 5.5% 이내로 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 실험결과와 경우 수치해석 결과와 달리 최대하중 이후 급격히 감소하는 현상을 보이는데 이는 수치해석에 사용된 각 요소의 구성관계식에 기인한다. 본 연구에서는 선형 응력-변위 관계식을 사용하였는데 선형-선형 응력-변위 관계식을 사용하면 실험결과에 보다 가까운 응답을 얻을 수 있을 것이다.

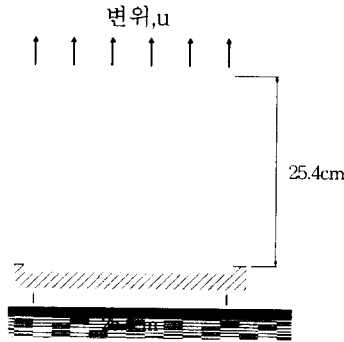


Fig.1 Numerical Modeling

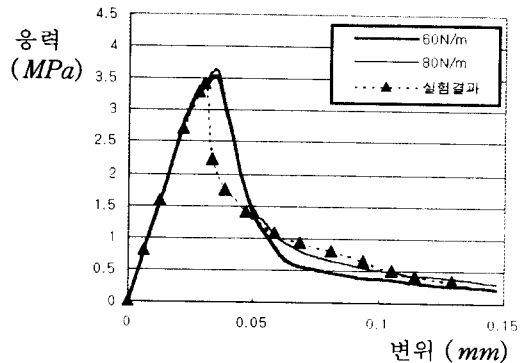


Fig.2 Comparison of Numerical Results with Experimental Results⁽³⁾

4. 접합경계면을 포함하는 구조물 해석

본 연구에서는 접합경계면의 역학적 특성 파악을 위하여 Fig. 3과 같이 콘크리트부에 탄소섬유쉬트가 부착된 구조물을 고려하였다. 콘크리트부의 크기는 $8\text{cm} \times 10\text{cm} \times 26\text{cm}$ 이며 폭 2cm , 4cm 인 두 종류의 탄소섬유쉬트를 각각 4cm , 8cm , 16cm , 20cm , 24cm 길이로 부착하였다. 수치해석을 위하여 사용한 물성은 실험에서 주어진 값과 동일한 값을 사용하였으며 콘크리트는 탄성계수 23.96GPa , 인장강도 2.46MPa , 파괴에너지 30.0N/m 을 사용하였고 탄소섬유쉬트는 탄성계수 244.27GPa , 인장강도 4478.27MPa , 파괴에너지 5000.00N/m 를 사용하였으며 콘크리트와 탄소섬유쉬트 사이의 접합경계면에 폭시는 탄성계수 2.95GPa , 인장강도 49.76MPa , 파괴에너지 200.00N/m 를 사용하였다.

실험에서 사용한 하중제어법을 사용하여 수치해석을 행하였으며 실험에서 계산된 파괴하중을 부착면적으로 나눈 평균부착응력을 이용하여 실험값과 해석값을 비교하였다. 실험결과 및 해석결과는 다음 Fig. 4에 나타난 바와 같다. 탄소섬유쉬트의 폭과 길이가 커질수록 평균부착응력이 작아지는 것을 실험값과 해석값 모두에서 관찰할 수 있으며 이 원인은 부착길이가 길어질수록 극한상태에서 변형률과 부착응력이 분포하는 일정한 영향길이가 존재하여 부착 저항력의 크기가 일정해지기 때문이라고 분석된다.

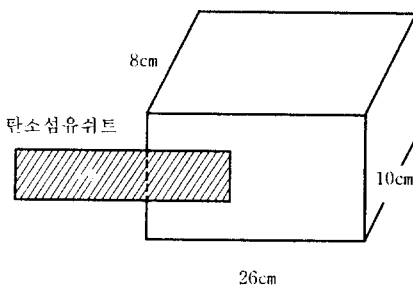


Fig.3 Test Specimen

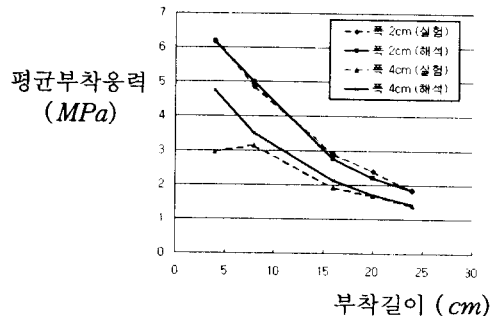


Fig.4 Comparison of Numerical Results with Experimental Results

폭 2cm 의 탄소섬유쉬트를 사용한 경우에는 실험값과 수치해석값과의 오차가 3% 이내이고 폭이 4cm 인 경우에는 오차가 10% 로 발생했다. 이것은 실험시 탄소섬유쉬트의 폭이 좁은 경우보다 넓은 경우에서 에폭시의 부착두께의 분포가 고르지 않았거나 부착위치의 선정 또는 하중의 편심에 의한 비틀림

등의 원인으로 분석된다. 탄소섬유쉬트의 폭이 4cm 인 경우 부착길이 4cm 에 대해 수치해석결과와 실험결과 사이에 많은 오차가 발생하는데 이것은 평균부착응력의 감소 경향으로 보았을 때 실험에서 발생한 시공 및 실험오차로 보인다. 콘크리트와 탄소섬유쉬트의 부착력은 두 재료 사이에서 전달되는 전단응력에 의해 결정되며 보강구조물의 부착면 전체에서 동시에 발생하는 것이 아니라 부분적으로 집중되는 응력에 의해 발생하므로 부착응력의 집중현상을 파악하는 것이 중요하다. 수치해석 방법을 이용하여 극한하중 이전의 상태, 극한하중 작용시, 극한하중 이후의 경우에 대한 부착응력의 분포를 Fig.5에 나타내었고 부착길이에 따른 균열형상을 Fig.6에 제시하였다. 시편의 부착파괴는 부착길이에 관계없이 탄소섬유쉬트가 콘크리트를 물고 떨어지는 현상을 실험에서와 같이 확인할 수 있었고 부분적으로 탄소섬유쉬트가 드러나는 현상도 관찰할 수 있었다. 이것은 예폭시의 인장강도가 콘크리트의 인장강도보다 상대적으로 커서 균열이 약한 콘크리트 쪽으로 진행되는 것으로 판단된다.

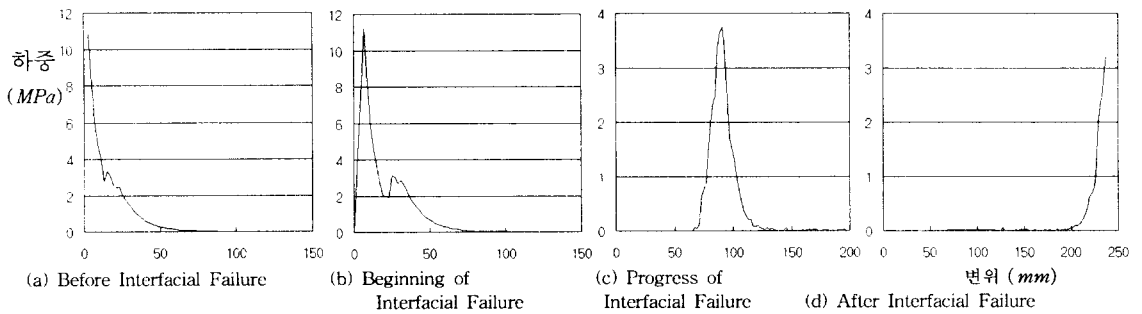


Fig.5 Bond Stress



Fig.6 Crack Shapes

5. 결 론

- 1) 본 연구에서 개발한 축방향 변형요소(Axial Deformation Link Element)를 이용하여 일반적인 유사취성 재료의 거동을 실제와 유사하게 모형화 할 수 있었다.
- 2) 상온에서 유사취성 파괴거동을 하는 예폭시를 접합경계면으로 사용한 해석결과를 통하여 본 연구에서 제안한 수치해석 모형이 접합경계면의 거동 및 균열형상을 잘 모형화함을 알 수 있었고 해석결과가 실험결과와도 잘 일치함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) Gemert, D. A., and Bosch, M. C. J., "Repair and Strengthening of Reinforced Concrete Structures by means of Epoxy Bonded Steel Plates," *International Conference on Deterioration*, Bahrain, 1985, pp.181-192.
- 2) Hillerborg, A., Modeer, M., and Petersson, P. E., "Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by means of Fracture Mechanics and Finite Elements," *Cement and Concrete Research*, Vol.6, 1976, pp.773-782
- 3) Gopalarantnam, V. S. and Shah, S. P., "Softening Reponse of Plane Concrete in Direct Tension," *ACI Journal*, No.3, 1985, pp.249-310.