

콘크리트 구조물 파괴에서의 국소화된 균열진행해석

Analysis of Crack Localization in Fracture of Concrete Structures

구 자 춘* 송 하 원** 심 별*** 우 승 민*** 변 근 주**
Koo, Ja Choon Song, Ha Won Shim, Byul Woo, Seung Min Byun, Keun Joo

ABSTRACT

In this paper, the embedded crack approach that crack is modeled by discontinuous line inside finite element is applied for localized progressive fracture analysis. The algorithm for progressive fracture analyses of concrete structure are enhanced by introducing nonlinear softening curve and unloading algorithm of tension-softening curve which can simulate localized fracture of concrete. The failure analysis results are compared with existing test results for varification.

1. 서론

매입균열법은 요소 내부에 불연속면을 매입한 요소를 균열요소로 이용하여 해석하는 방법으로, 요소를 재분할할 필요 없이 균열이 발생한 요소를 매입균열요소로 해석하여 계산의 복잡성을 배제한다¹⁾. 한편 콘크리트 구조물의 국소화된 진행성 파괴 해석에 관한 기존 연구는 적용 연화모델의 단순화, 요소 균열각의 제한, 국소화 알고리즘의 미적용 등으로 인해 실제 거동과는 많은 차이를 보이고 있다. 따라서 본 논문에서는 매입균열법의 알고리즘에 비선형 인장연화 곡선을 적용하고 균열의 확대진행뿐 아니라 균열의 닫힘을 구현함으로써 콘크리트의 국소화된 파괴를 재현할 수 있는 알고리즘을 추가하였다. 개발된 프로그램을 이용하여 각종 모드의 파괴 예제에 대한 유한요소해석을 실시하여 해석결과를 실험결과 및 타 연구자의 해석결과와 비교하여 프로그램을 검증하였다.

2 균열 파괴 진행영역의 모델링

기존 매입균열법의 전개과정은 Malvern(1969)이 제시한 수정가상일의 원리를 기본식으로 하여 불연속 형상함수를 개발하고, 이를 이중사상기법에 적용하여 매입균열요소의 요소강성행렬을 구하여 해석한다¹⁾. 이중사상기법을 적용한 요소강성행렬식에는 선적분항이 존재하는데 이는 매입균열면에서의 강성 계산시에 나타나는 항으로 다음과 같다.

$$\int_{S_{12}} N^{(\beta)T} [\eta] N^{(\beta)} dS \quad (1)$$

식(1)의 $N^{(\beta)}$ 는 매입균열면의 형상함수를, S_{12} 는 요소 내의 매입균열면을 의미한다. 그리고 $[\eta]$ 는 매입균열면의 구성방정식을 의미하는 것으로 인장 및 전단의 상호작용을 무시하는 경우 다음과 같다.

* 유신코퍼레이션 구조부 사원

** 정희원, 연세대학교 토목공학과 교수

*** 정희원, 연세대학교 대학원 박사과정

$$\eta^e = \begin{bmatrix} \eta_{nn} & 0 \\ 0 & \eta_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

일반적인 인장연화곡선 $\sigma = f(w)$ 와 전단연화곡선 $\tau = g(\delta)$ 을 사용하는 경우 식(2)의 η_{nn} 과 η_{tt} 는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_{nn} = \left. \frac{\partial f(w)}{\partial w} \right|_{f, w}, \quad \eta_{tt} = \left. \frac{\partial g(\delta)}{\partial \delta} \right|_{\tau, \delta}, \quad (3)$$

이는 물리적으로 연화곡선의 기울기를 의미한다. 여기서 f_c 는 인장강도, w_c 는 한계균열열림변위, τ_c 는 전단강도, δ_c 는 한계균열마끄러짐변위이다. 첨자 n,t는 균열의 수직방향과 접선방향을 의미한다.

콘크리트에 하중이 가해져서 주응력이 인장강도를 넘어서면, 균열이 발생하고 발생한 균열중 주된 균열만이 국소적으로 진행되는 과정을 거쳐 파괴에 이르게 된다. 이를 해석적으로 재현하기 위해서는 인장연화곡선에 제하개념을 도입하여 비국소화된 영역에서의 균열이 닫히는 현상을 모델링하고, 국소화된 영역에서의 균열은 계속해서 진행되어 주균열(main crack)로 발전하는 모델링이 필요하다²⁾. Fig. 1은 비선형연화곡선에서의 여러가지 제하경로를 갖는 경우를 나타낸다. 이 그림상의 제하경로는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

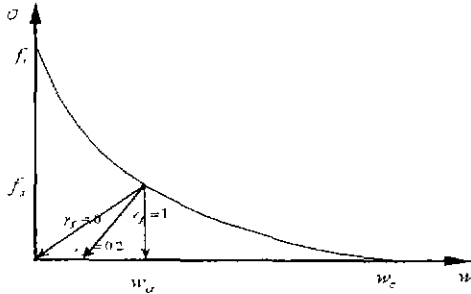


Fig. 1 Softening curve and unloading paths

$$w = \left[\gamma_f + (1 - \gamma_f) \frac{\sigma}{f_c} \right] w_c \quad (4)$$

여기서, $\gamma_f = 0$ 일 때는 균열면에 수직인 전달응력이 0에 도달하면서 파괴로 인한 변형이 완전히 회복된 경우를 나타낸다. 그리고 $\gamma_f = 1$ 은 파괴로 인한 변형이 회복불가능한 상태인 경우를 나타낸다. 여러 번의 실험을 거쳐 $\gamma_f = 0.2$ 가 제안되었다.

3. 진행성 파괴해석 예

노치가 있는 보모델의 모드 I 파괴해석을 수행하였다. 해석에 사용한 실험모델의 형상은 Fig. 2

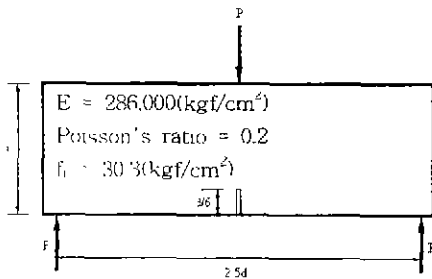


Fig. 2 Three point bending fracture test

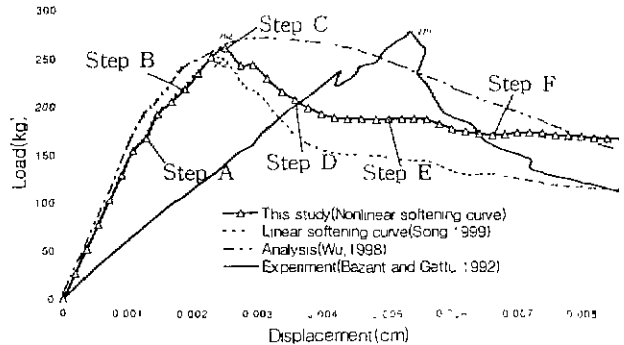


Fig. 3 Comparison with force-displacement relations

와 같고 높이 $d = 7.8\text{cm}$, 두께 $b = 3.8\text{cm}$ 이다. Fig. 3은 실험결과와 타 연구자의 해석결과를 본 연구의 결과와 비교한 것이다. 변위가 0.002476cm 일 때 최대하중 262kgf 으로 예측되며 최대하중 이후의 거동도 재현됨을 볼 수 있다. 실험에서 얻은 최대하중은 279kgf 이다

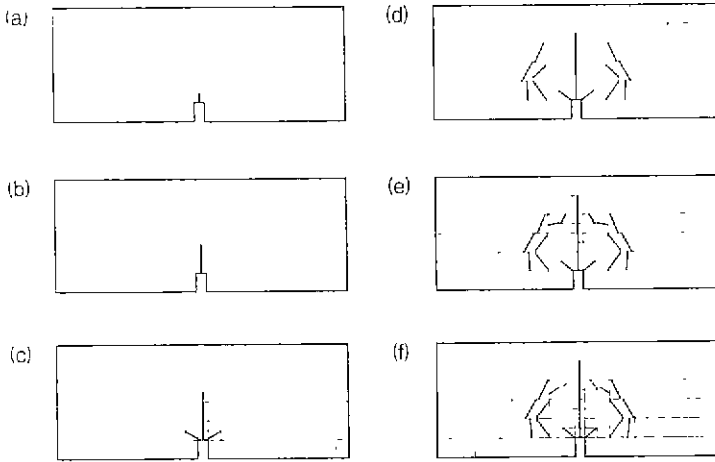


Fig. 4 Progressive cracking at different displacement steps

해석결과도 본 해석결과와 같이 실험결과와의 차이가 발생함을 알 수 있다.¹¹ 그 차이를 규명하기 위해서는 실험에서 사용한 경계조건과 실험결과에서 제시한 탄성계수의 타당성 여부의 확인이 필요하다. Fig. 4는 Fig. 3의 변위단계에 따른 균열의 진전을 나타낸다.

한편 전단을 고려한 혼합모드의 파괴해석을 수행하였는데, 비대칭 노치가 있는 보의 휨실험을 바탕으로 혼합모드의 파괴해석을 수행하였다.¹¹ Fig. 5는 해석대상모델의 형상을 나타내며, 해석 결과는 Fig 6과 같다. 각 변위단계에서의 균열진행은 Fig. 7에 나타내었다.

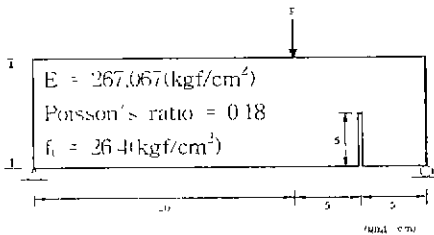


Fig 5 Mixed mode fracture specimen

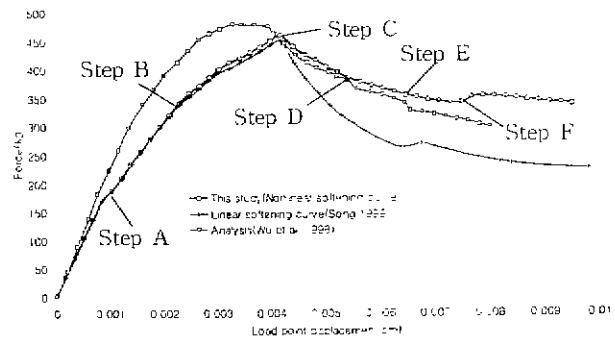


Fig. 6 Comparison with other analyses of mixed mode fracture

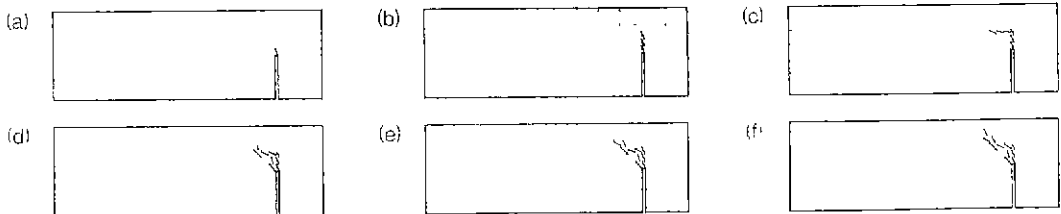


Fig. 7 Progressive cracking at different displacement steps

또한, 콘크리트 시편의 앵커볼트 인발실험¹²에 대해서 유한요소 파괴진행해석을 수행하였다. 실험모델의 형상(Fig 8)과 해석결과는 Fig. 9-10과 같다. 물성치는 $E = 404,000(\text{kg/cm}^2)$, $\nu = 0.18$, $f_t = 59$

실험결과와 비교해 볼 때 최대하중값이 실험결과보다 조금 작게 나타나고 해석에 사용한 물성치와 실험에서 얻은 물성치의 차이로 인하여 관계곡선의 차이가 있지만, 최대하중 이후의 파괴거동을 거의 동일한 형태로 재현하였다. 해석결과와 실험결과와의 초기강성에서 많은 차이가 있는 것은 해석에서 균열요소의 사용과 무관하게 발생하며 탄성해석은 탄성계수와 포아송비에 의해 계산되므로 단순 경계조건과 주어진 탄성계수를 사용하는 경우, Wu et. al.의

(kgf/cm^2)이며, 1/2 모델링하였다. 해석결과를 보면 최대하중 이후 하중값이 어느정도 완만한 기울기를 유지하다가 갑자기 급경사를 이루며 감소하는 상태가 되는 것을 알 수 있는데, 이는 비국소화 영역의 균열의 제하로 인하여 국소화 영역에 하중이 집중되면서 급격히 파괴에 이르는 것을 나타내는 것으로 보인다

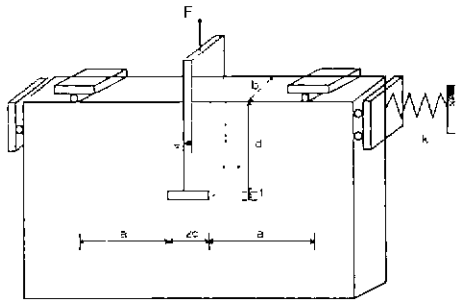


Fig. 8 Pull-out test fracture specimen

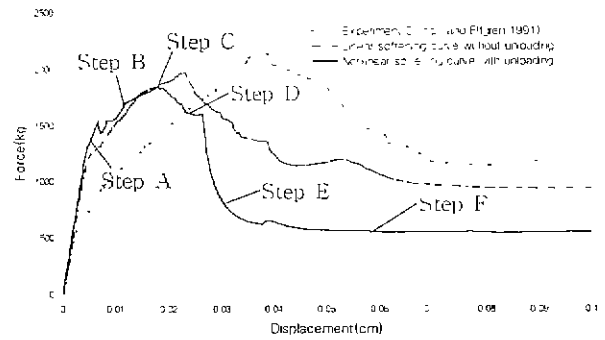


Fig. 9 Comparison with force-displacement relations

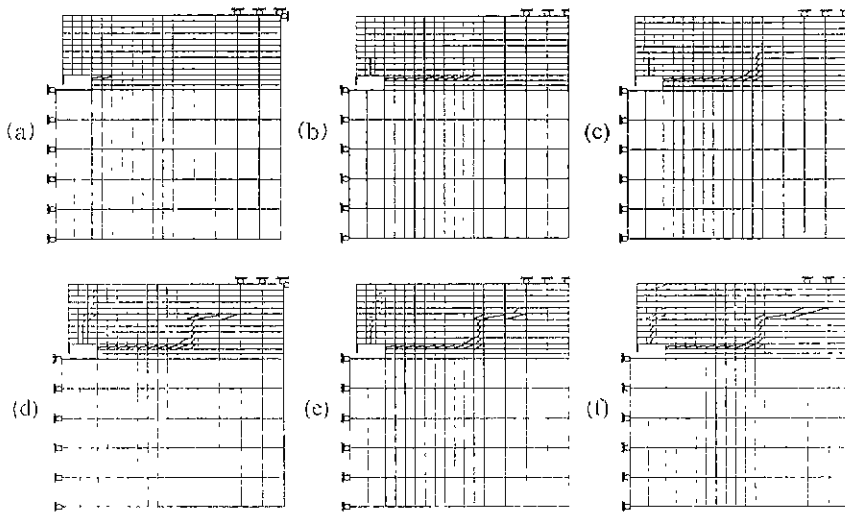


Fig. 10 Progressive cracking along with different displacement steps

참고문헌

- 1) 송하인, 김형운, 우승만 (1999), "콘크리트의 변형률 국소화 및 진행성 파괴에 관한 연구", 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 11, No. 3, pp 181-192
- 2) Homi, H and Inoue, J. (1998), "New directions - Analysis of Cracking Localization and Ultimate Strength of Structures in Civil Engineering"
- 3) Wu, Z, Machida, A and Gao, D (1998), "Development of Mixed Finite Element Method for Composite Discontinuous Analysis", JSCE Journal, 508, pp 149-159
- 4) Uchida, Y, Rokuko, K and Koyanagi, W (1998), "Cracking Behavior of Concrete under Mixed Mode Loading", Proc of 48th Annual Conf of JSCE, Vol. 3-12, pp 710-711
- 5) Ohlsson, U and Olofsson, T (1997), "Mixed-Mode Fracture and Anchor Bolts in Concrete Analysis with Inner Softening Bands", J Eng Mech, ASCE, Vol. 123, No. 11, pp 1027-1033

4. 결론

매입균열 유한요소 해석에 비선형 연화곡선을 도입하고 콘크리트의 파괴진행영역에서의 균열의 열림과 닫힘을 고려하여 비국소화 영역에서 균열의 제하(unloading)를 모델링하여 균열이 국소화된 후 진행되는 파괴를 보다 강화하게 예측할 수 있었다 개발한 프로그램을 모드 I 파괴, 혼합모드 파괴, 앵커볼트 인발파괴 등에 적용하여 검증하였다