

유한요소법에 의한 콘크리트의 진행성 파괴해석

Progressive Fracture Analyses of Concrete by Finite Element Methods

송하원*

Song, Ha-Won

요 약

콘크리트의 파괴진행영역은 콘크리트의 균열선단의 브리징영역과 미세균열영역으로 구성되는 비선형영역으로서 콘크리트의 파괴거동을 지배한다. 파괴진행영역을 고려한 파괴역학은 콘크리트에 유용하게 적용될 수 있으며 파괴진행영역 모델의 개발은 콘크리트의 파괴현상을 규명하는데 매우 중요하다. 본 논문에서는 콘크리트의 균열진행을 해석하기 위하여 선형 인장 연화곡선을 사용한 Dugdale-Barenblatt형 모델로 콘크리트의 브리징영역을 모델링하였고 이를 이산균열방법을 사용하여 단지 요소경계면에 파괴진행영역을 발생시켜 유한요소 해석하는 방법과 요소내의 불연속 균열면을 도입한 균열요소를 사용함으로써 이산균열방법의 결점을 보완한 해석방법을 제시하였다. 또한 해석 예를 통해 균열진행해석에 사용된 유한요소모델을 검증하였다.

Abstract

The fracture process zone in concrete is a region ahead of a traction-free crack, in which two major mechanisms, microcracking and bridging, play important roles. The toughness due to bridging is dominant compared to toughness induced by microcracking, so that the bridging is dominant mechanism governing the fracture process of concrete. Fracture mechanics does work for concrete provided that the fracture process zone is being considered, so that the development of model for the fracture process zone is most important to describe fracture phenomena in concrete.

In this paper the bridging zone, which is a part of extended macrocrack with stresses transmitted by aggregates in concrete, is modelled by a Dugdale-Barenblatt type model with linear tension-softening curve. Two finite element techniques are shown for the analysis of progressive cracking in concrete based on the discrete crack approach: one with crack element, the other without crack element. The advantage of the technique with crack element is that it does not need to update the mesh topology to follow the progressive cracking. Numerical results by the techniques are demonstrated.

Keywords : fracture mechanics of concrete, fracture process zone, microcracking, bridging, Dugdale-Barenblatt type model, tension-softening curve, finite element technique, discrete crack

* 정희원, 연세대학교 토목공학과 조교수

• 본 논문에 대한 토의를 1996년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 1996년 6월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근 활발하게 연구되고 있는 콘크리트의 파괴역학 연구의 목적은 작용하는 하중에 대한 콘크리트의 거동을 이해하기 위함이며 특히 일반적인 경계조건과 하중조건에서의 콘크리트의 파괴기동을 예측하는데 있다. 작용하중에 대하여 콘크리트 구조물에 있어서는 미시적균열이 발생하고 이 미시적균열은 국소화되면서 거시적균열로 진행된다. 이때 콘크리트의 균열선단에 발생하는 큰 비선형영역을 파괴진행영역(fracture process zone)이라 하며 이 파괴진행영역은 콘크리트의 파괴기동을 지배한다. 콘크리트 구조물에 발생하는 진행성균열은 구조물을 파괴에 까지 다다르게 할 수 있으며 이때 파괴거동과 극한하중 등을 예측하기 위해서는 진행성 균열에 대한 이해가 필요하다. 특히 압축강도에 비하여 상대적으로 훨씬 낮은 콘크리트의 인장강도로 인하여 소홀히 되어 왔던 콘크리트의 인장거동은 파괴역학의 도입으로 콘크리트 구조물의 진행성파괴에 중요한 역할을 하는 것으로 밝혀졌다. 즉 콘크리트의 파괴진행해석에 사용되는 파괴역학적 모델의 특징은 응력이 인장강도에 도달하면 균열이 발생하므로 균열 발생후 콘크리트의 인장 저항을 완전히 무시한다는 강도기준에서 인장 연화 현상을 고려하는 에너지기준으로 바뀐데 있다.

본 논문에서는 콘크리트 균열진행을 유한요소법을 이용하여 수치해석하기 위하여 먼저 콘크리트의 파괴진행영역의 모델링을 설명하고 이에 대한 유한요소 정규화기법을 설명한다. 사용한 파괴진행영역의 정규화 기법은 일반적인 유한요소를 사용한 방법과 특수한 유한요소 즉 불연속면을 갖고 있는 균열요소를 사용한 방법이다.

2. 콘크리트의 인장파괴 모델

콘크리트의 파괴를 지배하는 미커니즘을 규명하는 것은 콘크리트의 균열진행해석을 위한 모델과 수치해석 프로그램을 개발하는데 필수적이다. 인장파괴 단면에서 균열면의 변위를 제어하는 방법에 의해 일축인장 시험을 실시하면 균열면에서

인장응력이 인장강도에 도달한 후에도 균열면에서 응력이 전달되어 바로 응력이 0이 되지 않음을 알 수 있다(Fig. 1)⁽¹⁾.

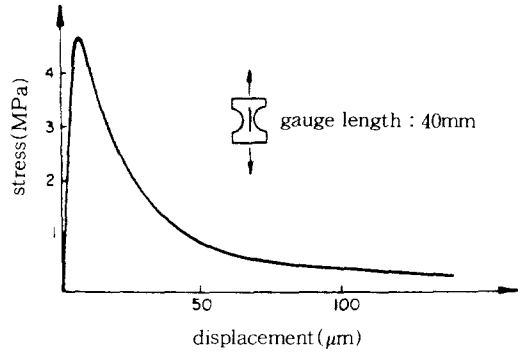
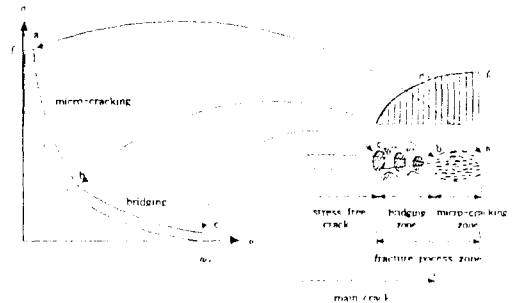


Fig. 1 Tensile stress and displacement curve of concrete

균열면에서 전달응력(transmitted stress : σ_t)이 인장강도(f_t)에 도달한 후 균열개구변위(crack opening displacement : ω)의 증가에 따라 균열면에서의 전달응력은 감소된다. 이처럼 균열변위의 증가에 따른 균열의 전달응력이 감소되는 현상을 인장연화(tension-softening)현상이라 하고, 균열면 전달응력과 탄성변형을 제외한 균열개구변위와의 관계를 나타내는 곡선을 인장연화곡선(tension-softening curve : Fig. 2(a))이라 한다.

한편 콘크리트의 균열선단에서의 파괴진행영역은 Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 미세균열의 발생과 성장이 지배적인 미세균열(microcracking)영역과 골재 경계면의 상호작용 마찰 등에 의해 거시적으로 균열면에서 응력전달이 이루어지는



(a) tension-softening curve (b) fracture process zone
Fig. 2 Tension-softening curve and fracture process zone

브리징(bridging)영역으로 나뉘어지며 콘크리트의 파괴거동을 지배한다. 이러한 파괴진행영역은 인장연화 상태에 있게 된다. 즉 파괴진행영역의 각 점들(Fig. 2(b)의 a, b, c점)은 인장연화 곡선상의 점들(Fig. 2(a)의 a, b, c점)과 대응된다.

Nirmalendran과 Horii⁽²⁾는 콘크리트의 균열진행영역에서의 미세균열과 브리징의 영향을 연구하여 미세균열의 영향은 콘크리트의 전체 강성의 5% 이내의 영향을 미치며 결국 콘크리트의 균열성장의 주된 지배기구는 브리징임을 알아냈다.

균열선단에서의 비선형 거동을 모형화하기 위하여 Fig. 3에서 보이는 것처럼 균열 선단에 전달 응력이 작용한다고 가정하는 Dugdale-Barenblatt형 모델이 있으며 이 모델은 콘크리트의 균열진행 거동을 위한 모델로서 많이 연구되었다.^(3, 4, 5)

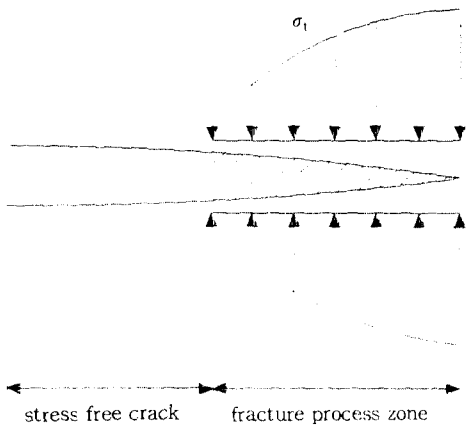


Fig. 3 Dugdale-Barenblatt type model

Horii와 Ichinomiya⁽⁶⁾는 콘크리트의 파괴 실험과 해석적 결과를 비교함에 의하여 Dugdale-Barenblatt형 모델은 콘크리트의 파괴진행영역의 미세균열영역은 잘 표현하지 못하나 브리징영역은 잘 표현함을 밝혔다. 본 논문에서는 콘크리트의 균열성장을 지배하는 브리징영역을 표현하기 위하여 Fig. 4에서 보이는 것처럼 브리징영역의 전달응력을 균열개구변위에 관한 함수로 나타내었고 그 함수로서 위해 다음과 같은 선형 인장연화곡선을 사용하였다.

$$\frac{\sigma_t}{f_t} + \frac{w}{w_c} = 1 \quad (2.1)$$

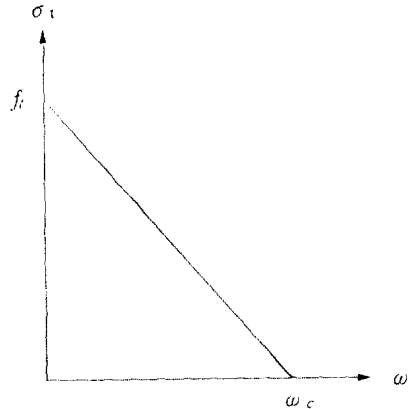


Fig. 4 Linear tension-softening curve

위의 선형 인장연화 곡선식은 실제 실험에서 얻어지는 비선형 인장연화 곡선을 간략화하여 얻어지는 것으로 대략 실제 인장 연화곡선 초반부에서의 접선에 해당한다⁽⁵⁾. 또한 파괴진행영역의 존재로 균열진행 선단에서는 응력이 완화되어 응력 특이성이 없어지므로 식(2.2)와 같이 균열진행선단에서의 모드I 응력확대계수(K_I)가 0이 된다.

$$K_I = 0 \quad (2.2)$$

콘크리트의 파괴진행해석은 대상 구조의 지배방정식과 일반 경계조건 그리고 파괴진행영역과 균열선단에서의 식(2.1), (2.2)를 만족하면서 작용하중에 대한 균열의 진행 및 콘크리트의 변형등을 구하는데 있으며, 본 연구에서는 이를 위해 유한요소 해석기법을 사용하였다. 파괴 진행 해석에 인장연화를 고려한 기준 즉 에너지 기준을 도입하는 것에 의하여 종래 강도기준을 사용한 경우의 문제점의 하나인 해석 결과의 요소 크기 의존성이 제거되며 더 나아가 강도의 크기 의존성도 표현 가능하게 된다⁽⁷⁾. 에너지기준을 사용한 대표적인 파괴역학 모델로는 가상 균열(fictitious crack) 모델⁽⁸⁾과 균열대(crack band)모델⁽⁹⁾이 있다. 가상 균열 모델은 인장강도와 파괴에너지를 재료 특성치로 사용한 반면 균열대모델은 추가로 균열대 폭

을 재료 특성치로 사용하였다. 그러나 종래 강도 기준의 단점을 극복한 이 두 모델은 공통적으로 균열선단의 미시적 거동 혹은 파괴진행영역의 거동은 해석하지 않고 부재의 거시적 거동만을 해석하였다.

3. 균열진행의 유한요소 정규화

콘크리트 균열을 유한요소 해석하기 위한 균열 모델은 균열의 물리적 현상을 잘 표현할 뿐만 아니라 수치적으로 적용하기에도 적합하여야 한다.

유한요소법을 사용하여 콘크리트의 파괴진행을 해석하는 경우 균열모델에는 크게 균열을 기하학적 불연속으로 처리한 이산균열(discrete crack) 방법⁽¹⁰⁾과 균열을 연속체로 처리한 분포균열(smearred crack)방법⁽¹¹⁾이 있다. 분포균열방법은 수치적으로 균열이 발생한 요소의 응력과 변형률의 구성방정식을 수정하는 것에 의해 수치적으로 간단히 적용할 수 있으나, 균열로 인한 변위의 물리적인 불연속을 표현하지 못하는 결점이 있다.

특히 분포균열모델에 강도 기준을 적용하여 균열의 발생과 진행을 판단할 경우 작용 하중은 유한요소의 크기에 의존하며 구조물의 크기효과도 표현할 수 없는 결점이 있다. 이산균열방법은 국소화된 균열을 잘 표현하나 균열이 요소의 경계를 따라 진행하도록 하여야 하거나 새로운 요소로의 분할 또는 절점을 추가해야 하는 결점을 갖고 있다.

본 논문은 기존의 이산균열방법을 사용하여 콘크리트의 파괴진행영역을 유한요소 경계에 표현하여 유한요소 해석하는 방법과 균열이 요소의 경계를 따라 진행하도록 하여야 하는 결점을 해결하기 위해 요소안에 불연속면을 갖고 있는 균열요소를 사용한 유한요소 해석방법을 다룬다. 사용한 유한요소는 4절점 사각형 isoparametric 요소이고 두번째 방법에서 균열요소의 불연속면은 불연속형상함수를 도입하여 처리한다⁽¹²⁾. 즉 콘크리트의 파괴진행영역은 균열요소안의 불연속면으로서 표시되며 이때 불연속면의 상대변위는 요소안에서 일정하다고 가정하였다.

3.1 유한요소 정식화

Fig. 5에서 보는 바와 같이 불연속면 Γ_d 을 포함하고 있는 연속체 Ω 에 가상일의 원리를 적용하면 식 (3.1)을 얻는다.

$$\int_{\Omega} \sigma_{ij} \cdot \delta \epsilon_{ij} d\Omega = \int_{\Omega} f_i \cdot \delta u_i d\Omega + \int_{\Gamma} \bar{t}_i \cdot \delta u_i d\Gamma + \int_{\Gamma_d} t_i^d \cdot \delta w_i d\Gamma \quad (3.1)$$

여기서 σ_{ij} 는 연속체내에서의 응력, $\delta \epsilon_{ij}$ 는 가상 변형률, f_i 는 물체력 그리고 δu_i 는 가상변위를 나타내며 \bar{t}_i 는 연속체 경계 Γ 에 작용하는 표면력(traction)이고 t_i^d 와 δw_i 는 각각 내부 불연속면 Γ_d 에 작용하는 표면력과 가상 내부 불연속 변위이다.

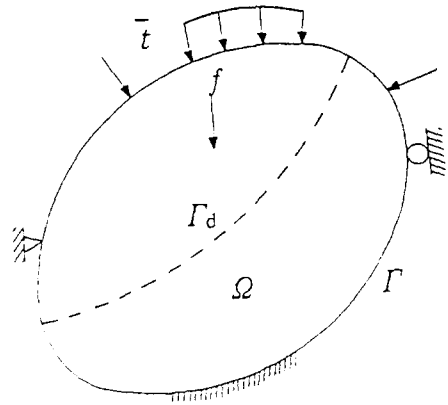


Fig. 5 Continuum with discontinuous line

변형증분이 미소일 때 연속체가 선형거동을 한다고 가정하면 연속체와 불연속면에서의 구성방정식은 다음 식들과 같이 표현된다.

$$\Delta \sigma_{ij} = L_{ijkl} \Delta \epsilon_{kl}, \quad \Delta t_i^d = \ell_{ij} \Delta w_j \quad (3.2)$$

여기서 L_{ijkl} 은 연속체의 4차 구성재료 텐서이며 ℓ_{ij} 는 불연속 균열면 Γ_d 에서 전달응력과 불연속 변위 관계식으로 표현되는 2차 텐서이다.

한편 식(3.2)를 이용하여 식(3.1)을 증분형으로 수정하면 다음의 증분형 평형방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \delta(\Delta \epsilon_{ij}) L_{ijk} \epsilon \Delta \epsilon_{k\ell} \Omega \\ &= \int_{\Omega} \Delta f_i \delta(\Delta u_i) d\Omega + \int_{\Gamma} \Delta \bar{t}_i \delta(\Delta u_i) d\Gamma \\ &+ \int_{\Gamma_d} \delta(\Delta \omega_i) \ell_{ij} \Delta \omega_j d\Gamma \end{aligned} \quad (3.3)$$

3.2 유한요소 이산화

본 논문에서는 먼저 균열 진행 해석을 위해 불연속면을 포함하지 않는 연속체에서 일어나는 유한요소 전체 강성 행렬을 수정하여 균열 진행 영역을 포함한 수정된 강성행렬로 바꾸는 방법을 설명한다. 연속체가 불연속면을 포함하지 않으므로 즉식(3.1)에서 마지막항을 제외한 식이 평형방정식이 된다.

N개의 절점을 갖는 유한요소의 강성행렬을 K_{NN} 이라 하고 선단절점(y점)을 제외한 균열 진행 영역의 절점수를 n이라 하면 균열 진행 영역의 절점들을 포함한 연속체의 유한요소 이산화는 Fig. 6과 같이 나타낸다.

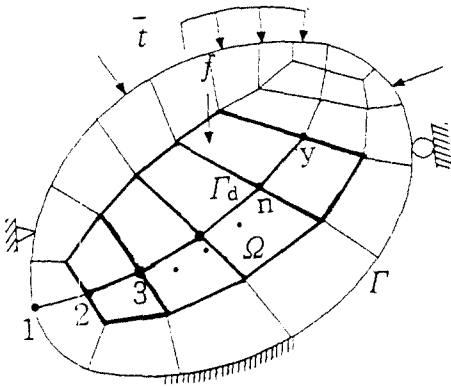


Fig. 6 Finite element nodes without cracked elements

즉 균열 진행 영역을 포함하여 일어나는 총절점수 $N+n+1$ 인 연속체의 유한요소 평형방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} K_{NN} & K_{Nn} & K_{N1} \\ K_{nN} & K_{nn} & K_{n1} \\ K_{1N} & K_{1n} & K_{11} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u^N\} \\ \{u^n\} \\ \{u^y\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{f^N\} \\ \{f^n\} \\ \{f^y\} \end{Bmatrix} \quad (3.4)$$

여기서 u 는 변위이며 f 는 절점에 작용하는 하중을 나타낸다. 균열 진행 영역의 조건식(2.1)을 다시 쓰면 다음식이 된다.

$$\frac{2u^n}{\omega_c} - \frac{f^n}{f_i} = 1, \quad n=1, 2, 3, \dots, n \quad (3.5)$$

그리고 균열 진행 영역 선단(y점)에서는 다음과 같다.

$$u^y = 0, \quad f^y = f_i \quad (3.6)$$

식(3.4), (3.5) 그리고 (3.6)을 사용하여 수정된 평형방정식은 다음 식과 같다.

$$\begin{bmatrix} K_{NN} & K_{Nn} & 0 & [-1] \\ K_{nN} & K_{nn} & [-1] & 0 \\ K_{1N} & K_{1n} & 0 & 0 \\ 0 & [\frac{2}{\omega_c}] & [\frac{1}{f_i}] & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u^N\} \\ \{u^n\} \\ \{f^N\} \\ \{f^y\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ 0 \\ \{f_i\} \\ \{1\} \end{Bmatrix} \quad (3.7)$$

식(3.7)로 수정된 평형 방정식을 사용하면 작용 하중에 대해 균열면이 주어진 균열 진행 조건식(3.5)와 (3.6)을 만족하면서 진행되는 콘크리트의 파괴진행을 해석할 수 있다. 위에서 설명한 유한요소 해석방법은 기존의 요소를 사용하고 얻어진 전체 강성도행렬을 수정하는 것만으로 균열 진행을 해석할 수 있어 간단하나 균열 진행을 요소의 경계사이에 발생시켜야 하므로 미리 균열 진행 방향을 알아 유한요소 이산화를 해야 하는 결점과 균열 진행 절점의 수만큼 전체 자유도가 증가하는 결점이 있다. 이러한 결점을 보완하기 위하여 요소내에 균열을 포함할 수 있는 균열 요소에 의한 균열의 유한요소 해석기법은 다음과 같다.

식(3.3)을 균열 요소들을 포함한 유한요소법을 이용하여 풀기 위하여 영역 Ω 는 M개의 유한요소 영역들로 이산화된다. 이들 요소들은 균열의 발생과 함께 요소내에 불연속면이 만들어진다. 1개의 요소에 만들어 지는 불연속면은 1개의 불연속 절점을 갖는다. Fig. 7은 n개의 균열 요소를 포함한 연속체의 유한요소 이산화를 나타낸다.

이때 균열 요소 즉 불연속면을 포함한 유한요소 Ω^e (Fig. 8)의 변위는 절점에서의 변위증분 $\Delta \bar{u}$ 와

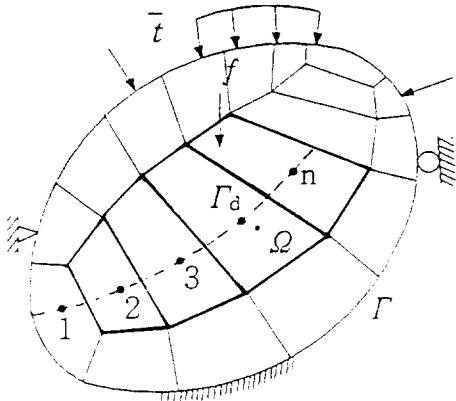


Fig. 7 Finite element with cracked elements

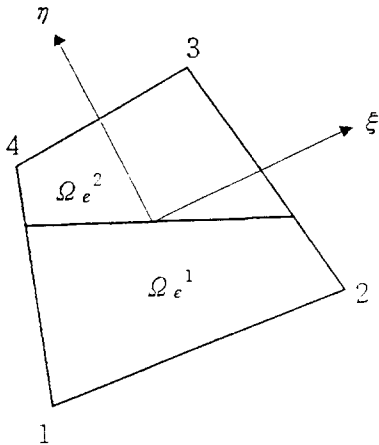


Fig. 8 Cracked element with discontinuous line

불연속 절점에서의 불연속 변위증분 $\Delta \bar{w}$ 로 표현된다.

즉

$$\Delta u = N \Delta \bar{u} + N^d \Delta \bar{w} \quad (3.8)$$

이며 여기서 N 은 일반적인 유한요소 형상함수¹³⁾이며 N^d 는 불연속 형상함수이다. 불연속 형상함수 N^d 는 영역 Ω_c^1 과 Ω_c^2 에서 다음과 같다.

Ω_c^1 에서

$$N_1^d = -\frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta)$$

$$N_2^d = -\frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta) \quad (3.9)$$

Ω_c^2 에서

$$N_1^d = \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta)$$

$$N_2^d = \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta) \quad (3.10)$$

식(3.8)로부터 Ω_c^e 위의 변형을 증분 $\Delta \epsilon$ 과 변위 Δu 의 관계식은 다음식으로 표현된다.

$$\Delta \epsilon = B \cdot \Delta u + B^d \cdot \Delta w \quad (3.11)$$

여기서 $B^{(d)} = \begin{bmatrix} N_{x^{(d)}} & 0 \\ 0 & N_{y^{(d)}} \\ N_{y^{(d)}} & N_{x^{(d)}} \end{bmatrix}$ 이다.

위의 식 (3.9)와 (3.10)을 식(3.3)에 대입하여 $\Delta \bar{u}$ 와 $\Delta \bar{w}$ 에 관하여 정리하면 다음식을 얻는다.

$$\sum_{e=1}^M \begin{bmatrix} \int_{\Omega^e} B^T L B d\Omega & \int_{\Omega} B^T L B^d d\Omega \\ \int_{\Omega} (B^d)^T L B d\Omega & \int_{\Omega} (B^d)^T L B^d d\Omega - \int_{\Gamma_c} (N^d)^T \ell N^d d\Gamma \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \bar{u} \\ \Delta \bar{w} \end{Bmatrix} = \sum_{e=1}^M \begin{Bmatrix} \int_{\Omega} N^T \cdot \Delta f d\Omega + \int_{\Gamma} \cdot \Delta \bar{t} d\Gamma \\ \int_{\Omega} (N^d)^T \cdot \Delta f d\Omega + \int_{\Gamma_c} (N^d)^T \cdot \Delta \bar{t} d\Gamma \end{Bmatrix} \quad (3.12)$$

균열요소내의 불연속면은 콘크리트의 균열진행영역을 표현하고 불연속면(Fig. 9)의 인장응력 σ_1 과 변위 w_1 의 관계는 Dugdale-Barenblatt형 모델의 전달응력과 균열 개구변위의 관계와 같으며 본 논문에서는 식(2.1)의 선형 인장응력화곡선식을 사용한다. 즉 식(2.1)로부터 구한 식(3.2)의 균열면에서의 구성방정식 ℓ_{ij} 는 식(3.13)과 같다.

$$\ell_{ij} = \begin{bmatrix} -\frac{f_t}{w_c} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

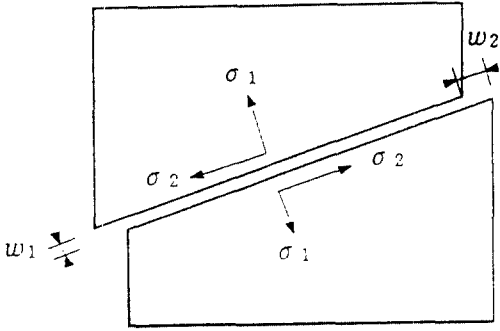


Fig. 9 Stresses and displacements of discontinuous line

4. 해석예

개발된 프로그램을 검증하기 위하여 균열 발생 시 Fig. 10(a)에서 보는 것과 같은 이상적인 응력-변형률 관계를 갖는 인장 공시체(Fig. 10(b))를 해석 하였다. Fig. 10(c)는 4절점 사각형 요소를 사용한 공시체의 유한요소 이산화를 나타낸다. 균열요소를 사용하지 않았을 경우 공시체의 좌측경계에서 균열이 발생한다고 가정하였으며 균열요소를 사용한 유한요소 해석을 위해서는 요소 ①과 ②에 균열을 다른 요소보다 먼저 발생시키기 위하여 다른 요소보다 조금 작은 인장강도를 사용하였다. 이로 인하여 요소 ①과 ②에서 균열이 발생하

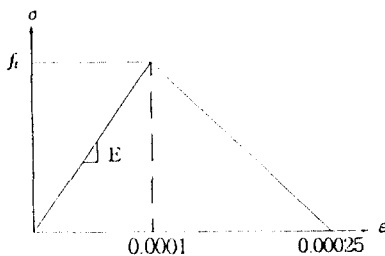


Fig. 10(a) Stress-strain relationship of tension bar

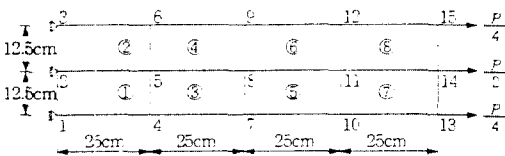


Fig. 10(c) Finite elements of tension bar

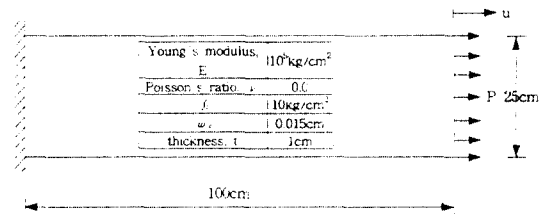


Fig. 10(b) Tension bar

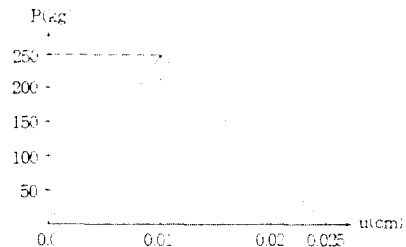


Fig. 10(d) Results of tension bar

였고(요소 ①과 ②에서 점선으로 표시) 발생과 함께 요소 ①과 ②는 균열요소가 된다. 두가지 유한요소 해석으로 하중 P와 변형 u의 관계를 구하였으며 Fig. 13에서 보는것처럼 두 해석 결과는 이론치와 동일한 결과를 얻었다.

분포 균열모델을 사용한 Oliver의 결과¹⁴⁾와의 비교를 위해 Fig. 11(a)와 같이 공시체의 중앙이 다른 단면보다 좁은 인장 공시체를 해석하였다.

대칭성을 고려하여 공시체의 반을 4절점 사각형 요소를 사용하여 이산화하였다(Fig. 11(b)). 균열은 최소 단면의 경계를 따라서 일어난다고 가정하여 균열요소를 사용하지 않고 해석하였다. Fig. 11(c)는 해석 결과와 Oliver의 결과¹⁴⁾와의 비교를 나타낸다.

균열요소를 사용한 진행성 균열해석을 위해 Fig. 12(a)와 같은 notch를 갖고 있는 콘크리트 보를 해석하였다. 집중 하중 P의 증가와 함께 notch위에서만 균열이 발생하는 것으로 가정하여 균열요소를 사용하였으며 새로운 절점을 추가하는 것 없이 해석하였다. 파괴전행영역이 하중 작용점까지 진행하였을 때 계산을 완료하였으며 Fig. 12(b)는 해석결과 얻어진 보의 극한 하중과 극한 하중 이후의 하중-처짐 관계 곡선이다.

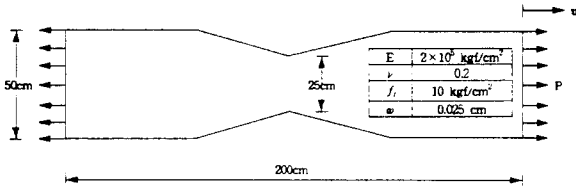


Fig. 11(a) Tension specimen with narrow width at center

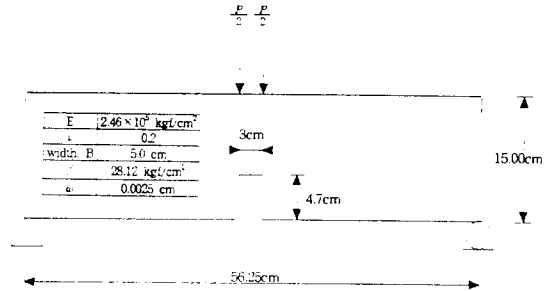


Fig. 12(a) Single-notched concrete beam

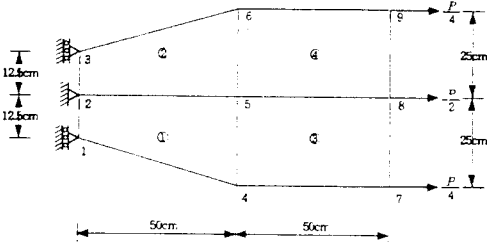


Fig. 11(b) Finite element discretization of tension specimen

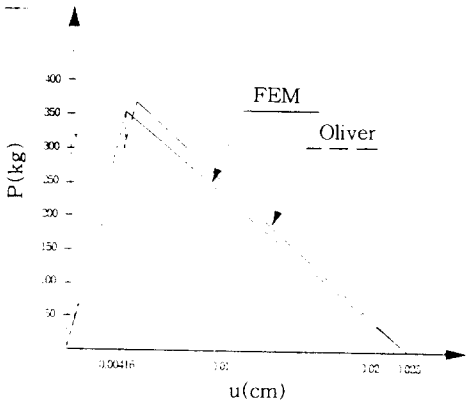


Fig. 11(c) Comparison of results between FEM and Oliver

극한 하중 이후의 실제 거동의 올바른 해석과 실험 결과와의 비교를 위해 해석 대상 콘크리트의 실험에서 구한 인장 강도와 인장 연화 곡선의 정보가 필요하며 구해진 인장 연화곡선에서 본 해석 알고리즘에 필요한 한계 균열 개구변위를 어떻게 정할 것인가 등의 연구와 본 수치해석 알고리즘에 비선형 인장연화곡선을 사용하기 위한 연구가 현재 진행 중이다.

5. 결 론

콘크리트의 파괴진행영역은 콘크리트의 균열

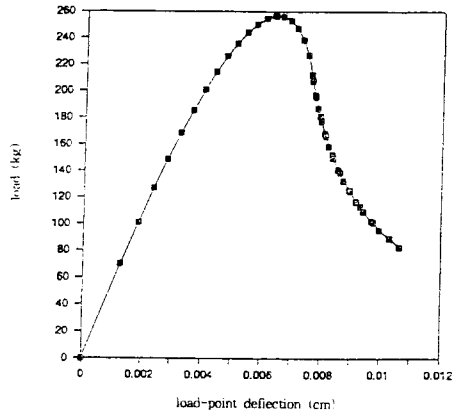


Fig. 12(b) Result from the present analysis with linear tension-softening relation

선단에 존재하는 비선형 영역이며 콘크리트의 파괴거동을 지배한다. 본 논문에서는 콘크리트의 진행성 파괴를 해석하기 위하여 콘크리트의 파괴진행영역을 모델링하였고 이를 기존의 유한 요소를 사용하여 단지 구조 경계면에 파괴진행영역을 발생시켜 유한요소 해석하는 방법과 요소내의 불연속 균열면을 도입한 균열요소를 사용하여 유한요소 해석하는 방법을 제시하였다. 균열면의 구성 방정식은 선형 인장 연화곡선을 사용한 Dugdale-Barenblatt형 모델로 모델링하였고 이산균열방법의 결점을 보완한 균열요소를 사용한 균열진행 해석은 균열요소에 변위의 불연속을 포함하고 있는 특별한 형상 함수를 도입하여 처리하였다. 해석 예를 통하여 콘크리트의 균열진행 해석에 사용된 프로그램을 검증하였다.

감사의 글

본 연구는 1994년도 연세대학교 학술연구비 지원으로 수행 되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Peterson, P. E., "Crack Growth and Development of Fracture Zones in Plain Concrete and Similar Materials", *Report TVBM-1006*, Div. of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1981.
2. Nirmalendran, S. and Horii, H., "Analytical Modeling of Microcracking and Bridging in the Fracture of Quasi-Brittle Materials", *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 40, (4), 1992, pp. 863-886.
3. Li, V. and Liang, E., "Fracture Process in Concrete and Fiber Reinforced Cementitious Composites", *J. Eng. Mech.*, ASCE, Vol. 112, No. 6, 1986, pp. 566-586.
4. Horii, H. "Model of Fracture Process Zone and a System of Fracture Mechanics for Concrete and Rock", *Fracture Toughness and Fracture Energy*, Mihashi, H., et. al. (ed), Balkema Rotterdam, 1989, pp. 406-422.
5. Ratanalert, S. and Wecharatana, M. "Evaluation of the Fictitious Crack and Two Parameter Fracture Models", *Fracture Toughness and Fracture Energy*, Mihashi, H., et. al. (ed), Balkema Rotterdam, 1989, pp. 345-366.
6. Horii, H. and Ichinomiya, T., "Observation of the Fracture Process Zone by the Laser Speckle Method and Governing Mechanism in Fracture of Concrete", *Int. J. Fracture*, Vol. 51, 1991, pp. 19-29.
7. Rots, J. G., et al., "Smearred Crack Approach and Fracture Localization of Concrete", *Heron*, Vol. 30, 1985
8. Hillerborg, A, Modeer, M. and Peterson, 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
9. Bazant, Z. P. and Oh, B. H., "Crack Band Theory for Fracture of Concrete", *Materials and Structures*, Vol. 16, 13, 1983, pp. 155-177.
10. Ngo, D. and Scodelis, A. C., "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams", *J. Amer. Conc. Inst.*, Vol. 64, 3, 1967, pp. 152-163.
11. Rashid, Y. R., "Ultimate Strength Analysis of Reinforced Concrete Pressure Vessels", *Nucl. Engrg. Des.*, Vol. 7, 4, 1968, pp. 334-344.
12. Wan, R. G., et. al, "A Finite Element Method for the Analysis of Shear Bands in Geomaterials", *F. E. in Anal. and Design*, Vol. 7, 1990, pp. 129-143.
13. Zienkiwicz, O. C. and Taylor, R. L., *The Finite Element Method*: 4th Edition, London, MacGraw-Hill Book Company, Vol. 1, 1989.
14. Oliver, J., "A Consistent Characteristic Length for Smearred Cracking Model", *Int. J. Num. Meths. Engrg.*, Vol 28, 1989, pp. 461-474.

(접수일자 : 1995. 11. 8)