

노치가 있는 콘크리트의 인장파괴 거동에 관한 연구

A Study on the Tensile Failure of a Notched Concrete



이준석*

Lee, Jun Seck



최일윤*

Choi, Il Young



엄주환**

Um, Ju Hwan



방춘석**

Bang, Chun Seck

ABSTRACT

A 2-dimensional homogenized crack model together with finite element procedure is proposed to investigate the crack generation and propagation within concrete specimen subjected to tensile loading. Constitutive relationship of the concrete including a tensile crack is derived through the consideration of a velocity discontinuity along the crack face and equilibrium as well as compatibility equation at the same time. When a strain softening material law is used for the modelling of a tensile crack, a 1-dimensional analytical solution for the homogenized crack model is also derived to demonstrate that the proposed model is independent of the mesh size and numbers.

The numerical analyses of notched concrete involving 1- and 2-dimensional finite element models are shown to be consistent with those from experimental data. Furthermore, mesh sensitivity of the finite elements including strain softening model is successfully overcome. The proposed model can be expanded to higher dimension and future studies will be concentrated on the modelling of crack propagations in 3-

* 한국고속철도건설공단 토목궤도연구원실

** 정회원, 한국고속철도건설공단 토목궤도연구원실

• 본 논문에 대한 토의를 1997년 12월 30일까지 학회로 보내주시면 1998년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

dimensional space.

Keywords : Smearred crack model, Homogenized crack model, Velocity discontinuity, Strain softening behavior, Crack propagation.

1. 서론

부근 콘크리트의 인장균열 및 이의 전파는 지난 10여년간에 걸쳐 다양한 방법에 의해 연구되어 왔으며 각종 실험결과와 이를 모형화하기 위한 수치해석 방법들이 제안되었다. 이들 방법들은 일반적으로 노치를 포함한 콘크리트 시편에 대해 1축 인장시험이나 3점 휨시험을 통해 콘크리트의 인장력을 초과하는 하중상태에 대한 변형률 연화현상에 그 초점을 맞추어 왔으며, 유한요소법 등을 이용한 수치해석 모형도 변형률 연화영역에 대한 요소망의 객관성 (mesh objectivity)을 유지하는 방법에 대해 논의하고 있다. 이중 유한요소법을 이용한 인장균열의 전파양상은 크게 두가지 방법으로 대별할 수 있다. 첫째는 가상균열 모델¹⁾ (fictitious crack model)을 이용하는 것으로서 유한요소망의 경계를 따라 균열이 전파하는 현상을 모형화할 수 있으며 최근에는 유한요소망의 자동생성기법을 이용한 모델도 제시된 바 있다.²⁾ 둘째로, 유한요소망내 적분점에서의 최대 주응력이 콘크리트의 인장강도를 초과하는 경우, 요소내에 균열이 등분포 상태로 생성된다고 가정하여 수치해석을 수행하는 분산균열(smearred crack) 모델³⁾은 초기 유한요소망을 계속하여 쓸 수 있다는 장점이 있다. 분산균열 모델은 균열의 발생에 의한 균열변형률을 도입함으로써 분산균열의 구성방정식을 유도하게 되며 최근에는 분산균열 모델의 여러 파생 모형들이 제안되고 있다. 이중에서도 특히 변형된 Voigt-Reuss 모델⁴⁾과 특성값 (characteristic length)을 이용한 분산균열 모델⁵⁾은 유한요소망의 객관성을 유지할 수 있는 것으로 알려져 있다. 한편 인장균열에 대한 부가적인 형상함수 (shape function)를 도입한 일종의 embedded 균열 모델⁶⁾도 제시된 바 있다.

본 연구에서는 콘크리트의 인장파괴 양상을 모형화하기 위하여 2개의 대칭형 노치를 포함한 콘크리트

시편을 중심으로 기존의 실험결과와 유한요소법을 이용한 수치해석 결과를 비교하여 제안한 인장파괴 모형의 적정성과 유한요소망의 객관성을 나타내고자 한다. 콘크리트 인장균열의 모형화는 일종의 분산균열 모델인 균질화된 균열(homogenized crack) 모델을 사용하며 수치해석의 적정성을 평가하기 위하여 제안한 모델을 1차원 및 2차원의 경우로 나누어 유한요소해석을 실시한다. 1차원 분산균열 모델을 사용하는 경우에는 엄밀해 (analytical solution)을 유도할 수 있으며 이 결과, 제안한 분산균열 모형이 유한요소의 크기에 관계없음을 규명하였고 따라서 변형률 연화영역에 있어서 유한요소망의 객관성을 유지할 수 있다. 본 연구에서 제안한 분산균열 모형은 3차원 영역으로 확대될 수 있으며 향후 이에 대한 연구가 계속될 것이다.

2. 균질화된 균열 모형

균질화된 균열 모형을 유도하기 위하여 Fig. 1과 같은 콘크리트 시편내의 인장균열을 고려하고 다음과 같은 기본 가정을 도입한다. 즉,

- 균열의 폭은 좁은 골재의 폭과 유관한 것으로 볼 수도 있으나⁷⁾ 본 연구에서는 유한요소망의 크기에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정한다.

- 발달한 인장균열은 무시할 수 있는 불성을 가지고 있으며 균질화된 균열은 주위 콘크리트와 완전 부착되어 있다. 이는 다음에서 고려하는 균열을 따른 평행방정식 및 적합방정식의 적용에 사용된다.

- 콘크리트의 국부파괴는 인장균열에 국한한다.

다음에서는 위와 같은 가정을 통하여 인장균열을 포함한 콘크리트의 물성 및 각 구성체, 즉 인장균열 및 균열을 포함하지 않은 콘크리트의 구조관계식 (structural matrix)을 유도한다.

콘크리트의 주응력이 인장력에 도달하게 되면

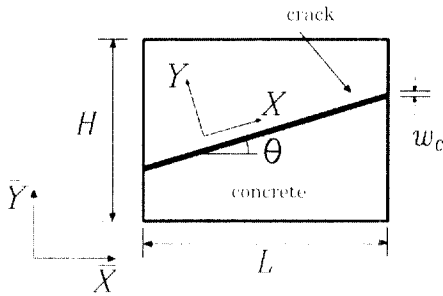


Fig. 1 modelling of tensile crack within concrete specimen

Fig. 1과 같은 인장 균열이 발생한다고 가정한다. 이제 인장균열과 평행인 국부좌표계 X-Y를 따른 콘크리트 및 인장균열내의 응력 및 변형률을 각각 σ_i, ϵ_i 와 σ_j, ϵ_j 로 표기하고 인장균열을 포함한 대표단면 (Representative Elementary Volume, REV)의 응력 및 변형률을 σ, ϵ 라 하면 다음과 같은 관계식을 정의할 수 있다.

$$\dot{\sigma} = \mu_i \dot{\sigma}_i + \mu_j \dot{\sigma}_j \quad (1a)$$

$$\dot{\epsilon} = \mu_i \dot{\epsilon}_i + \mu_j \dot{\epsilon}_j \quad (1b)$$

여기서 $\dot{\sigma} = \{\dot{\sigma}_x, \dot{\sigma}_y, \dot{\tau}_{xy}\}^T$ 및 $\dot{\epsilon} = \{\dot{\epsilon}_x, \dot{\epsilon}_y, \dot{\gamma}_{xy}\}^T$ 이고 μ_i 및 μ_j 는 콘크리트와 균열의 체적비를 의미하며 $\mu_i + \mu_j = 1$ 이다. Fig. 1에서 균열의 체적비, μ_j 는 $\frac{w_c}{h \cos \theta}$ 로 표현할 수 있다. 한편 Fig. 1의 인장균열을 따른 평행방향식 및 직각방향식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_i = \sigma_{ii} = \sigma_{jj}; \tau_{ij} = \tau_{ji} = \tau_{xy}; \epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_{ij} \quad (2)$$

이 관계식은 참고문헌 (5)의 변형된 Voigt-Reuss 모델과 상응한다. 이제 인장균열을 포함하지 않는 콘크리트와 인장균열의 구성방향식을 도입하면

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_i &= [D] \dot{\epsilon}_i \\ [\delta] \dot{\sigma}_i &= [K] \dot{g} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서

$$\begin{aligned} [\delta] &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \dot{g} &= \begin{bmatrix} \dot{g}_y \\ \dot{g}_x \end{bmatrix}^T \\ [K] &= \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

이며 \dot{g} 는 인장균열과 수직 및 평행인 속도 불연속계 (velocity discontinuity 혹은 displacement gradient)이며 특히 \dot{g}_x 는 인장균열의 확대비율을 의미한다.

인장균열의 폭, w_c , 는 유한요소로 나타내는 주변 콘크리트의 크기에 비해 무시할 수 있을 정도이므로 식 (1)의 μ_i 는 1에 접근하는 값을 지니게 되고 식 (2)를 이용하여 식 (1b)는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 즉,

$$[\delta] \dot{\epsilon} = [\delta] \dot{\epsilon}_i + \mu \dot{g}, \quad (5)$$

여기서 $\mu = \frac{\mu_j}{\omega_c} = \frac{1}{h \cos \theta}$ 이다. 한편 식 (1), (3)

및 식 (5)를 식 (2)에 대입하면 다음과 같은 구조관계식 (structural relationship)을 얻을 수 있다. 즉,

$$[\delta] \dot{\epsilon}_i = [S] \dot{\epsilon} \quad (6)$$

혹은,

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_i &= [S_1] \dot{\epsilon} \\ \dot{g}_i &= [S_2] \dot{\epsilon} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,

$$\begin{aligned} [S] &= ([I] + \frac{1}{\mu} [B])^{-1} ([A] + \frac{1}{\mu} [B] [\delta]) \\ [S_1] &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \end{bmatrix} \\ [S_2] &= \frac{1}{\mu} ([\delta] - [S]) \end{aligned} \quad (8)$$

그리고

$$\begin{aligned} [A] &= \begin{bmatrix} -D_{21} & K_{11} & -D_{23} \\ C_1 & \mu C_1 & C_1 \\ -D_{31} & -D_{32} & K_{22} \\ C_2 & C_2 & \mu C_2 \end{bmatrix} \\ [B] &= \begin{bmatrix} 0 & K_{12} + \mu D_{23} \\ & C_1 \\ K_{21} + \mu D_{32} & 0 \\ & C_2 \end{bmatrix} \\ C_1 &= D_{22} + \frac{K_{11}}{\mu} \\ C_2 &= D_{33} + \frac{K_{22}}{\mu} \end{aligned} \quad (9)$$

마지막으로 식 (1a) 및 식 (3)으로부터 인장균열을 포함한 콘크리트의 구성방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\sigma} = [D^{cr}] \dot{\epsilon} \quad (10)$$

여기서

$$[D^{cr}] = \mu_1 [D][S_1] + \mu_2 [K][S_2] \approx [D][S_1] \quad (11)$$

으로 되며 전체좌표계로의 변환은 변환 행렬을 사용하여 구할 수 있다.

3. 소성연화의 모형화

본 절에서는 식 (3)에서 도입한 바 있는 인장균열의 구성방정식, $[K]$, 에 대하여 논의한다. 이제 외부 하중에 의해 콘크리트 내부에 인장균열이 발생하였다면 다음 식과 같은 초기 구성방정식을 가정할 수 있다.

$$[K^c] = \begin{bmatrix} K_N & 0 \\ 0 & K_S \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서 K_N, K_S 는 인장균열의 수직 및 전단 강성계수이고 흔히 다음 식에 의해 유추할 수 있다.

$$K_N = \frac{E_c}{\omega_c(1 - \nu_c^2)}; K_S = \frac{E_c}{2\omega_c(1 + \nu_c)} \quad (13)$$

윗 식에서 알 수 있는 바와 같이 인장균열의 강성계수는 균열이 없는 콘크리트의 탄성계수, E_c , 및 포아송비, ν_c 의 함수이고 균열의 폭과 큰 연관관계를 보인다. 따라서 균열의 폭이 매우 미소한 경우에는 윗 식은 실용성이 없다. 본 연구에서는 매개변수 연구를 통하여 초기 인장균열의 강성계수를 도출하였으며 초기값이 작을수록 취성상태를 나타낸다.

초기 인장균열이 하중증가로 인해 발달하게 되면 고전적인 탄소성 이론에 의해 탄소성 영역의 구성방정식을 유도할 수 있으며 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$[K^{cp}] = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \quad (14)$$

식 (14)에 대한 자세한 설명은 여기에서는 생략하기로 하며 전단균열의 경우, 참고문헌 (10)을 참고할 수 있을 것이다. 인장균열의 경우에는 K_{11} 에 대해 탄소성 이론을 적용하고 coupling 거동은 없다고 가정할 수 있다. 또한 전단 강성계수의 경우도 그 역할이 미미하므로 다음 식과 같이 보정할 수 있다.

$$[K^{cp}] = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 \\ 0 & \beta K_S \end{bmatrix} \quad (15)$$

일반적으로, β 는 10-3 정도의 값을 적용하며¹⁰ 다음에서 논의할 매개변수 해석결과 이 계수는 전단 거동에 대한 민감도가 낮은 것으로 평가된다.

4. 균질화된 균열의 1차원 모형

본 절에서는 콘크리트 인장균열의 발달에 적용 가능한 소성연화 모형을 1차원영역에서 논의하여 제안한 균질화된 균열모형이 유한요소망의 크기에 무관함을 밝히고자 한다. 이를 위하여 Fig. 2와 같은 콘크리트 공시체가 1차원 거동을 하는 것으로 가정하고 다음 식과 같은 항복함수를 도입한다.

$$F = \sigma - f_t(1 - \zeta \epsilon^n) = 0 \quad (16)$$

여기서 f_t 및 ζ 는 각각 콘크리트의 인장강도 및 음수가 아닌 상수를 의미하며 Fig. 2의 H 는 균질화된 균열의 크기를 나타낸다. 콘크리트 공시체가 항복강도를 초과하는 경우, 소성연화 영역의 기울기, E_t , 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있으며 snap-back 거동은 없는 것으로 가정한다.

$$E_t = \frac{-\zeta f_t E_c}{E_c - \zeta f_t} \quad (17)$$

이제 1차원 콘크리트 시편의 평형방정식을 통하여 균열을 포함한 콘크리트의 탄성계수, E^{cr} , 를 구하면

$$E^{cr} = \frac{-\zeta f_t L}{HE_c - \zeta L f_t} E_c \quad (18)$$

으로 되고 이는 H 의 함수로 되어 유한요소법을 적용할 경우, 요소망에 따라 다른 결과를 나타낸다. 한편 본 연구에서 제안한 속도 불연속계를 도입하고 식

(2) 및 식 (11)을 고려하면 균질화된 균열요소의 탄성계수, E^{eq} , 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다¹¹⁾.

$$E^{eq} = -\frac{K_{11}E_c^{eq}}{K_{11} + \mu E_c^{eq}} \quad (19)$$

여기서 E_c^{eq} 는 인장균열이 발생한 하중영역에서의 콘크리트 탄성계수이며

$$E_c^{eq} = -\frac{K_{11}E_c}{K_{11} + \mu E_c} \quad (20)$$

로 표현된다. 한편 K_{11} 을 구하기 위하여 식 (16)의 항복함수를 다음과 같이 조정하면

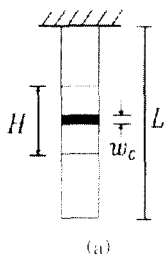
$$F = \sigma - f_t(1 - \alpha g^p) = 0 \quad (21)$$

K_{11} 은

$$K_{11} = -\frac{\alpha f_t K_N}{K_N - \alpha f_t} \quad (22)$$

와 같이 도출할 수 있다. 마지막으로 전체 콘크리트 시편의 응력-변형률 관계식, E^* , 는 평형방정식으로 부터 다음과 같이 유도할 수 있다

$$E^* = \frac{LK_{11}}{2E_c - LK_{11}} E_c \quad (23)$$



(a)

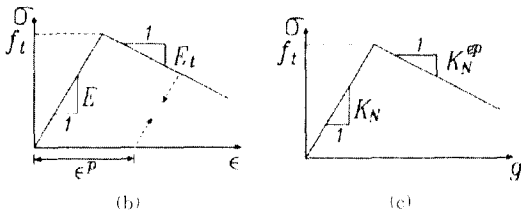


Fig. 2 modelling of strain softening behaviour
(a) notched bar
(b) stress-strain relation of the cracked concrete
(c) stress-strain relation using velocity discontinuity

윗 식에서 알 수 있는 바와 같이 탄소성 영역의 강성도는 균질화된 균열의 높이, H , 와 무관하며 따라서 유한요소망의 객관성을 유지할 수 있다.

5. 수치해석 예

제안한 균질화된 균열모형의 적용성을 검토하기 위하여 노치를 포함한 콘크리트 공시체의 인장시험 결과¹²⁾를 토대로 수치해석 결과와 비교하였다. 인장균열의 연화모형은 참고문헌 (12)에서 제안한 식을 적용하며 다음과 같이 표현된다.

$$F = \sigma - f_t(e^{-\alpha w_c^p}) = 0 \quad (24)$$

이제 식 (24)를 본 연구에 적용하기 위하여

$$\omega_c = \eta g^p \quad (25)$$

와 같은 관계식이 성립한다고 가정한다. 즉, 인장균

Table 1 Material properties of concrete

Net area	Notch	Compressive strength	Tensile strength	Young's modulus	Poisson's ratio
mm ² ×mm	mm ² ×mm	MPa	MPa	GPa	-
51×19	3×13	43.90	3.66	34.15	0.17

Table 2 Material coefficient used in the analysis

K_c	K_t	β	η	a	b
MPa/m	MPa/m	-	m	-	-
1300	50	0.001	0.1	1.0	1.01

열의 폭은 소성 속도불연속계 및 상수로 표현된 η 의 함수이다. 즉 식 (24)는

$$F = \sigma - f_t(e^{-a(\eta g^p)^b}) = 0 \quad (26)$$

와 같이 나타낼 수 있다.

Table 1은 수치해석에 사용된 각종 물성을 기술하고 있으며 이는 실험을 통하여 얻은 데이터와 동일하다. 한편 Table 2는 수치해석에 사용된 각종 계수를 나타내고 있으며 이들 중 일부는 매개변수 해석을 통하여 획득하였으나 다음에서 설명하는 민감도 해석 결과 인장균열의 초기 물성은 그 영향이 크지 않음을 알 수 있다. Fig. 3은 수치해석에 사용한 각종 유한요소망을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와

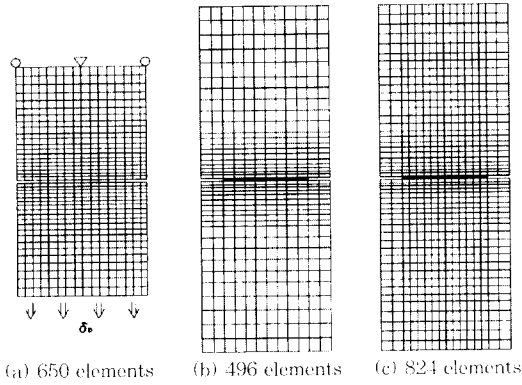


Fig. 3 various meshes used in the analysis

같이 콘크리트 노치에 대한 유한요소망의 크기 및 갯수를 변화시킴으로써 유한요소망의 객관성을 검토하였다.

Fig. 4는 2개의 노치를 포함한 콘크리트 공시체에 대한 실험 및 1차원, 2차원 유한요소해석의 결과를 도시하였다. 이 경우 1차원 유한요소 해석은 21개의 평면응력 요소에 대하여 포아송비를 0으로 가정함으로써 그 효과를 나타내었으며 2차원 해석의 경우는 650개의 요소를 사용하였다. 1차원요소를 사용한 유한요소해석의 경우, 노치의 모형화는 노치 위치에 상응하는 유한요소에 대해 인접한 요소보다 약간 작은 인장력을 가정함으로써 인장균열이 한 요소에만 집중되도록 하였다. 따라서 Fig. 4와 같이 노치부의 인장응력이 콘크리트의 인장강도에 도달하기 전까지는 선형 거동을 하게 되며 인장균열이 발생한 유한요소는 균열의 선단(crack tip)이 급격히 발달하여 요소 전체로 전파하게 된다. 한편 본 연구에서 채택한 콘크리트의 구성방정식은 탄성한계에 이르기까지는 선

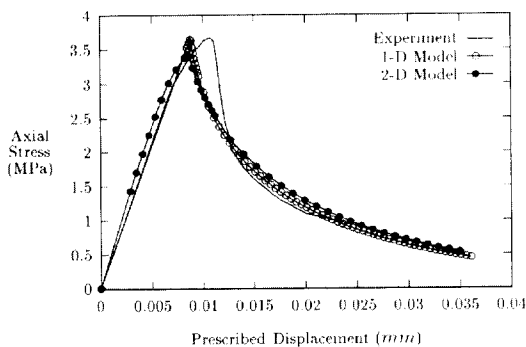
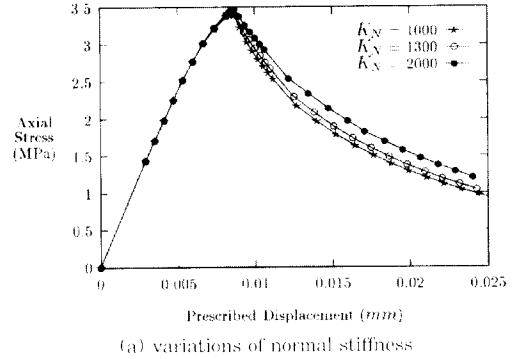
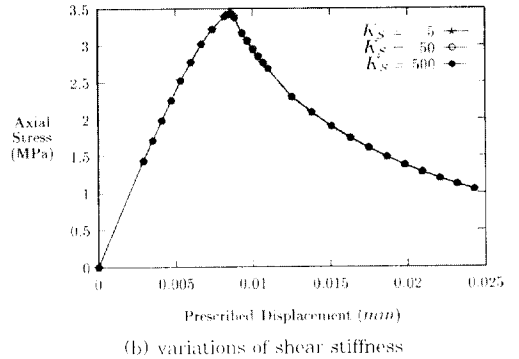


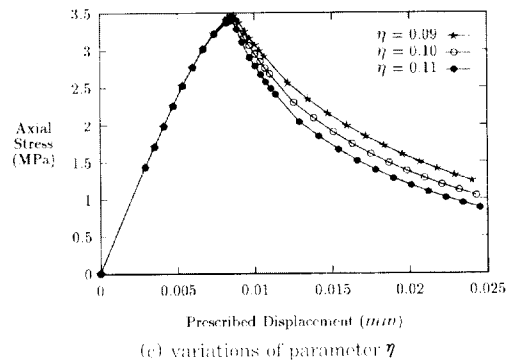
Fig. 4 load-displacement relationship of a notched concrete



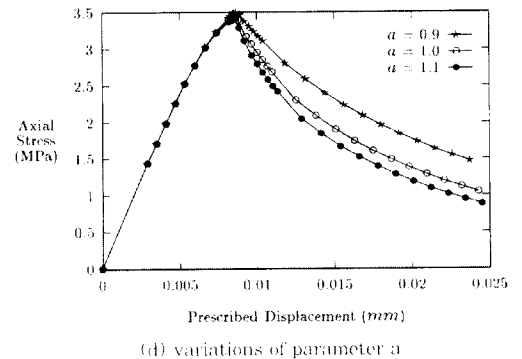
(a) variations of normal stiffness



(b) variations of shear stiffness



(c) variations of parameter η



(d) variations of parameter a

Fig. 5 parametric studies of proposed model

형 탄성거동을 하는 것으로 가정하였으므로 실험과 같은 비선형 거동을 모형화할 수는 없다. 따라서 그림에서 알 수 있는 바와 같이 콘크리트의 인장강도 부근에서 실험과 수치해석간에 차이가 발생하게 된다. 2차원 유한요소를 이용한 수치해석 결과 극한강도는 1차원 모형 및 실험결과에 비해 작게 되며 이는 균열의 선단부에서 발생하는 응력집중 현상에 의해 균열이 인접한 유한요소로 전파되기 때문인 것으로 사료된다.

다음으로는 선택한 계수들의 민감도를 분석하기 위하여 Fig. 3(a)의 요소망을 중심으로 매개변수 해석을 실시하였으며 그 결과는 Fig. 5에 표시하였다. Fig. 5(a) 및 5(b)는 각각 인장균열의 수직 강성도, K_v , 및 전단 강성도, K_s , 의 변화에 따른 응력-변위의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 수직 강성도가 작을수록 취성변형을 일으키며 일정값 이하에서는 취성 파괴를 일으키게 되나 전단 강성도는 그 영향이 없음을 알 수 있다. Fig. 5(c) 및 5(d)는 소성 연화의 정도를 나타내는 대표적인 계수에 대한 민감도 분석결과를 도시하였으며 연화의 크기와 계수 a , η 는 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 계수 a 및 b 는 실험곡선으로부터 유추할 수 있으나 본 연구에서 사용된 변위와 속도 불연속계와의 관계 계수 η , 식 (25), 는 경험적으로 가정하였다.

마지막으로 유한요소망의 객관성을 조사하기 위하여 Fig. 3의 3가지 요소망에 대하여 유한요소 해석을 실시하였다. 여기서 Fig. 3(a)는 노치 부분을 한 층의 유한요소망으로 구성하였고 Fig. 3(b) 및 3(c)는 두 개의 층으로 구성하여 그 효과를 분석하였으며

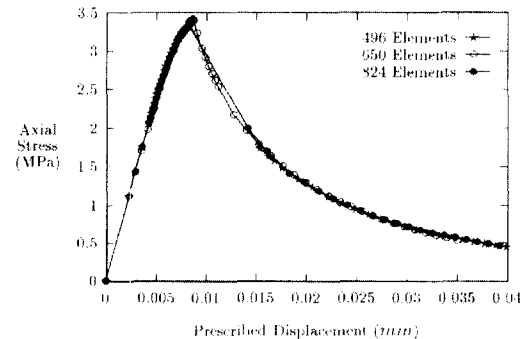


Fig. 6 load-displacement relationship of a notched concrete with differement meshes

Fig. 6에 유한요소망의 크기에 따른 응력-변위도를 도시하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 제안한 모형은 유한요소의 크기 및 갯수에 관계없이 소성연화 영역에서의 객관성을 유지할 수 있다. 한편 노치 부분을 2개의 층으로 모형화한 Fig. 3(b) 및 3(c)의 경우에는 급격한 소성연화 현상이 발생하고 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 분산균열 모형의 일종인 균질화된 균열모형을 제안하였다. 제안한 모형의 가장 큰 장점은 소성연화 영역에 있어서 유한요소망의 객관성을 유지할 수 있다는 점이며 이를 위하여 속도 불연속계 (velocity discontinuity) 개념을 도입하였다. 본 연구에서 제안한 모형을 통한 수치해석 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 속도 불연속계의 도입을 통하여 인장균열의 폭 및 유한요소망의 크기를 구성방정식에서 효과적으로 제거하였다. 따라서 수치해석시 유한요소망의 객관성을 유지할 수 있다.
- 2) 수치해석 결과를 통해 제안한 모형이 실험 결과와 상응하는 거동을 보였으며 민감도 해석결과 전단 강성도의 영향이 없음을 밝혔다.

제안한 모형은 큰 어려움없이 3차원 영역으로 확대가 가능할 것으로 판단되며 참고문헌 13에 논의한 방법과 비슷한 맥락에서 추후 논의될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. A. Hillerborg, M. Mod er and P-E Petersson, "Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by means of Fracture Mechanics and Finite Elements", Cement & Con. Res., Vol. 6, 1976 pp.773-782.
2. P. Bocca, A. Carpinteri and S. Valente, "Mixed Mode Fracture of Concrete", I. J. Solids & Str., Vol. 27, pp 1139-1153, 1991.
3. Z. Ba uant and B. H. Oh, "Crack Band Theory for Fracture of Concrete", Mat. & Str., Vol. 16, 1983

- pp.155-177.
4. R. de Borst and P. Nauta, "Non-orthogonal Cracks in a Smeared Finite Element Model", Eng. Comput., Vol. 2, 1985 pp.35-46.
 5. E. Yamaguchi and W-F Chen, "Cracking Model for Finite Element Analysis of Concrete Materials", J. Eng. Mech, Vol. 116, 1990 pp.1242-1260
 6. J. Oliver, "A Consistent Characteristic Length for Smeared Cracking Models", I. J. Num. Meth. Eng., Vol. 28, 1989 pp.461-474
 7. H. R. Lotfi and P. B. Shing, "Embedded Representation of Fracture in Concrete with Mixed Finite Elements", I. J. Num. Meth. Eng., Vol. 38, 1995 pp.1307-1325.
 8. R. Larsson and K. Runesson, "Element-embedded Localization Band based on Regularized Displacement Discontinuity", J. Eng. Mech, Vol. 122, 1996 pp.402-41
 9. M. Ortiz, Y. Leroy and A Needleman, "A Finite Element Method for Localized Failure Analysis", Comp. Meth. App. Mech. & Eng., Vol. 61, 1987 pp.189-214.
 10. J. S. Lee and G. N. Pande, "A New Joint Element for the Analysis of Media Having Discrete Discontinuities", submitted to I. J. Mech. Cohesive-Frict. Mat., 1997
 11. J. S. Lee and G. N. Pande, "Application of a Homogenisation Technique to a One Dimensional Bar exhibiting Strain-softening Behaviour", Mat. & Str., Vol. 30, 1997.
 12. V. S. Gopalratnam & S. P. Shah, "Softening Response of Plain Concrete in Direct Tension, ACI J., 1985 pp.310-323.
 13. J. S. Lee, G. N. Pande, J. Middleton and B. Kralj, "Numerical Modelling of Brick Masonry Panels subject to Lateral Loadings", Comp. & Struct., Vol. 61, 1996 pp.735-745.

요 약

본 연구에서는 유한요소법을 이용한 콘크리트 인장균열의 발생 및 전파양상을 모형화하기 위하여 분산 균열(smeared crack) 모델의 일종인 2차원 균질화된 균열(homogenized crack)모형을 제안하였다. 제안한 모형은 인장균열면을 따라 속도 불연속계(velocity discontinuity)를 도입하고 평형방정식 및 적합 방정식을 이용하여 인장균열을 포함한 콘크리트의 구성방정식을 유도할 수 있으며 인장균열이 소성인화 거동을 하는 경우, 유한요소망내에서 객관성이 유지될 수 있음을 밝히기 위하여 1차원 영역내에서 엄밀해를 유도하였다.

제안한 모형을 이용한 1차원 또는 2차원 유한요소 해석은 기존의 노치를 포함한 콘크리트 시편에 대한 실험과 상응하는 결과를 보였을 뿐만 아니라 유한요소망의 객관성이 유지되고 있음을 밝혔다. 제안한 모형은 큰 어려움없이 3차원 영역으로 확대할 수 있을 것이며 이에 대한 추가적인 연구가 계속될 것이다.

(접수일자 : 1997. 8. 8)