

콘크리트의 계면 파괴와 균열 전파 : 파괴기준과 수치모의

Interface Fracture and Crack Propagation in Concrete: Fracture Criteria and Numerical Simulation



이광명*

Lee, Kwang-Myong

요 약

콘크리트의 역학적거동은 다양한 종류의 균열의 발생과 전파에 의하여 영향을 받는다. 최근 고성능 콘크리트의 개발이 이루어지면서 계면파괴와 계면역에서의 균열양상에 대한 연구가 중요한 분야로 부각되고 있다. 탄성이며 균질한 재료에 적용되는 균열전파에 대한 기준은 계면역에서 균열이 진전하는 경우에는 유효하지 않으며 이 경우에는 콘크리트에서 균열전파를 예측하기 위하여 구성재료들의 파괴인성과 그들사이 계면의 파괴인성의 상대적인 크기를 고려하여야 한다. 본 논문에서는 계면균열 선단에서 계면파괴역학변수인 에너지해방률과 하중위상각을 수치해석방법을 이용하여 구하는 방법과 계면에서의 균열전파의 예측을 위한 에너지해방률에 기초를 둔 파괴기준을 제안하였다. 계면역에서의 균열양상을 조사하기 위하여 계면균열을 가진 이상복합모델에 대한 실험과 수치해석연구를 수행하였으며 대체적으로 실험결과와 기준을 이용하여 예측한 결과가 서로 일치하는 결과를 얻었다.

Abstract

The mechanical behavior of concrete is strongly influenced by various scenarios of

* 정회원, 성균관대학교 공과대학 토목공학과 조교수

• 본 논문에 대한 토의를 1997년 2월 27일까지 학회로 보내
주시면 1997년 4월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

crack initiation and crack propagation. Recently, the study of the interface fracture and cracking in interfacial regions is emerged as an important field, in the context of the development of high performance concrete composites. The crack path criterion for elastically homogeneous materials is not valid when the crack advances at an interface because, in this case, the consideration of the relative magnitudes of the fracture toughnesses between the constituent materials and the interface are involved. In this paper, a numerical method is presented to obtain the values of two interfacial fracture parameters such as the energy release rate and the phase angle at the tip of an existing interface crack. Criteria based on energy release rate concepts are suggested for the prediction of crack growth at the interfaces and an hybrid experimental-numerical study is presented on the two-phase beam composite models containing interface cracks to investigate the cracking scenarios in interfacial regions. In general, good agreement between the experimental results and the prediction from the criteria is obtained.

keywords : interface fracture mechanics, interfacial fracture energy, energy release rate, phase angle, two-phase composite

1. 서 론

콘크리트의 역학적성질 중 특히 강도(strength)와 인성(toughness)은 콘크리트 내에서 일어나는 균열의 양상에 의하여 많은 영향을 받는다. 보통강도 콘크리트에 외력이 작용하면 부착면에 이미 존재하고 있거나 새로 발생한 미세균열들이 계면을 따라 성장하여 모르타르 속으로 진전하고 다른 골재 주변의 부착균열과 합쳐져 파괴가 일어나게 된다.¹⁾ 고강도 콘크리트에서는 모르타르균열이 먼저 발생하여 외력이 증가하면 이들 균열이 골재를 뚫고 진전하는 경향을 보인다.²⁾ 이러한 균열양상의 차이가 역학적성질의 차이를 야기시키며 특히 고강도 콘크리트는 계면에서 미세균열의 발생이 감소함으로써 비탄성변형량이 줄어들어 대체로 취성적인 성향을 보인다. 이러한 콘크리트의 균열양상을 규명하기 위한 시도가 예전부터 이루어져 왔으며, 최근 파괴역학의 발전으로 비교적 간단한 경우의 균열문제의 해를 구할 수 있게 되었다.³⁾ 그러나 실제적으로 외력이 비대칭으로 작용하거나 또한 구조불

이 기하학적으로 복잡한 양상을 띄게 되므로 이러한 경우의 균열문제를 풀기 위해서는 수치해석방법이 필요하다.

탄성이며 균질한 취성재료에서는 일반적으로 균열선단에서 주응력이 최고가 되는 방향으로 균열이 진전하게 된다. 이러한 파괴규준은 모르타르에서 균열이 발생하여 모르타르 내를 전파할 때에는 적용될 수 있으나, 균열이 골재 주위의 계면역(interfacial region)에 도달하는 경우에는 명백히 유효하지 않으며, 이 때 콘크리트에서 균열전파를 예측하기 위해서는 계면, 모르타르, 골재 각각의 파괴인성의 상대적인 크기를 고려하여야 한다. 단지 모르타르와 골재의 부착면에서 미세균열의 발생만을 예측하기 위해서는 Mohr-Coulomb 파괴규준을 사용할 수도 있다.⁴⁾

본 논문에서는 계면역에서 미세균열이 아닌 주균열(major crack)의 전파를 연구할 목적으로 에너지해방률의 개념을 이용한 파괴규준을 제안하였으며, 골재와 모르타르로 이루어진 이상합성모(two-phase composite model)의 실험과 수치모의를

통해 파괴규준의 적용성 여부를 조사하였다. 이러한 파괴규준에 기초한 해석방법을 모르타르-골재 계면뿐만 아니라 신·구콘크리트의 접착면, 콘크리트와 철근의 부착면 등에서의 균열전파의 연구를 위해 적용한다면 궁극적으로 콘크리트의 역학적 성질의 개선, 콘크리트와 철근의 부착성능의 향상, 신·구콘크리트 접착면에서의 균열억제 등을 성취할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 계면역에서의 균열성장규준

2.1 계면파괴역학개념

계면파괴역학에 대한 설명이 많은 기존의 자료^{5,6,7)}에 주어져 있으므로 본 절에서는 균열전파규준을 이해하는데 필요한 개념만을 언급하기로 한다. 모르타르와 골재로 이루어진 콘크리트와 같이 두 가지의 균질한 재료로 이루어진 복합체에서는 평면변형하에서 탄성계수 부조화 변수(elastic modulus mismatch parameter) α 및 β 에 의하여 계면 균열장(interface crack field)이 지배를 받는다.

$$\alpha = \frac{\bar{E}_m - \bar{E}_a}{\bar{E}_m + \bar{E}_a}, \quad \beta = \frac{1}{2} \frac{\mu_m(1-2\nu_a) - \mu_a(1-2\nu_m)}{\mu_m(1-\nu_a) + \mu_a(1-\nu_m)} \quad (1)$$

여기서, $E = E/(1-\nu^2) = 2\mu/(1-\nu)$ 이고 E , μ 와 ν 은 각각 탄성계수, 전단계수 및 포아송 계수이며 첨자 m과 a는 모르타르와 골재를 나타낸다.

평면탄성문제에서 균열선단 부근의 응력장은 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_{22} + i\sigma_{12} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} r^{i\epsilon} \quad (2)$$

여기서, $K = K_1 + iK_2$ 는 계면응력 확대계수(interface stress intensity factor)이고 진동지수(oscillation index) ϵ 은 β 의 함수로서 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{1-\beta}{1+\beta} \right) \quad (3)$$

균열선단에 작용하는 응력상태를 표시하는 하중

위상각(loadng phase angle)은 계면파괴역학에서 중요한 변수로 간략히 위상각(phase angle)이라 한다. 위상각은 식 (2)로부터 인장과 전단응력의 비로서 다음과 같이 정의된다.

$$\hat{\phi} = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}(K \hat{L}^{\epsilon})}{\text{Re}(K \hat{L}^{\epsilon})} \right] \quad (4)$$

여기서 \hat{L} 은 참고길이(reference length)이다. 참고길이는 임의로 정할 수 있으나 일반적으로 균열의 길이, 부재의 두께 등의 시편의 치수와 관계한 길이 또는 소성역(plastic zone)의 길이, 진행역(process zone)의 길이와 같은 재료적 특성치로 그 값을 취한다. 보통은 시편의 치수 중에서 한 값을 택하여 임의의 참고길이 \hat{L} 을 정하고 이에 상응하는 $\hat{\phi}$ 를 결정한다. 하중위상각을 구함에 있어 균열해석상 혼동이 되지 않도록 참고길이를 일관성있게 정하여야 한다.

2.2 계면에 접근하는 균열의 전파

콘크리트를 모르타르와 골재로 이루어진 이상복합체로 간주할 때 모르타르에서 발생한 균열은 골재에 도달하여 모르타르와 골재의 경계면을 따라 돌아가거나 골재를 뚫고 진전한다. 균열이 골재에 도달하여 골재를 뚫지 않고 돌아나갈 조건을 에너지해방률의 개념을 이용하여 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\Gamma_i(\hat{\phi})}{\Gamma_a} < \frac{G_d}{G_p^{\max}} \quad (5)$$

여기서, Γ_i 는 하중위상각의 함수로 나타내어지는 계면파괴인성이고 Γ_a 는 골재의 모우드 I 하에서의 파괴인성으로 각각 에너지해방률의 임계값으로 나타내며, G_p^{\max} 은 Fig. 1(a)에 보여진 바와 같이 골재를 뚫고 가는 균열의 최대에너지해방률이고, G_d 는 Fig. 1(b)에 보여진 바와 같이 골재를 돌아나가는 균열의 에너지해방률이다. G_d/G_p^{\max} 는 반무한평면의 균열문제의 해를 수치해석방법을 이용하여 계산할 수 있다.⁸⁾ 콘크리트를 구성하고 있는 모르타르와 골재간 계면의 파괴인성인 Γ_i 는 하중위상각이

커질수록 즉 전단의 효과가 커질수록 그 값이 증가하는 경향을 보이는데 대표적으로 샌드위치시편을 이용한 실험으로부터 구한다.^{9,10)}

3.2 계면에 위치하고 있는 균열의 전파

보통강도 콘크리트와 같이 모르타르와 골재사이의 부착이 모르타르와 골재보다 약한 경우에는 계면에서 미세균열이 발생하여 계면을 따라 진전하기

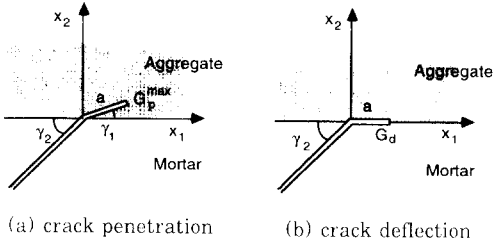


Fig. 1 Crack geometry

나 혹은 모르타르 속으로 전파하게 된다. 이 때 계면에서 발생한 균열이 모르타르 속으로 진전할 조건은 다음과 같다.

$$\frac{\Gamma_i(\hat{\phi})}{\Gamma_m} > \frac{G}{G'_{max}} \quad (6)$$

여기서, Γ 는 하중위상각의 함수로 나타내어지는 계면파괴인성이고 Γ_m 는 모르타르의 모드 I 하에서의 파괴인성으로 각각 에너지해방률의 임계값으로 나타내며, Fig. 2에 보여진 바와 같이 G 는 계면 방향의 에너지해방률, G'_{max} 는 모르타르 속으로 전파하는 균열의 최대에너지해방률이다. 우변에 주어진 G/G'_{max} 는 수치해석방법을 이용하여 구할 수 있다.¹¹⁾

일반적으로 콘크리트를 균등, 균질한 재료로 간주할 때에는 위에서 언급한 파괴규준의 적용이 필요하지 않으나 보다 정확한 균열의 성장경로를 조사하기 위해서는 식 (5)와 식 (6)에 주어진 파괴규준이 필요하다. 콘크리트에서의 균열전파뿐만 아니라 섬유보강 콘크리트에서 모르타르와 섬유사이의 경계면, 콘크리트와 철근사이의 부착면, 신·구 콘크리트의 접착면, 합성기둥 혹은 합성보에서 콘크리트와 철골의 부착면 등에서의 균열전파를 연구할

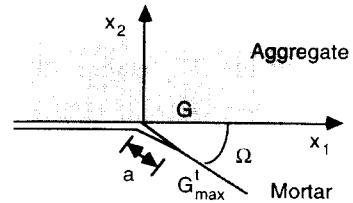


Fig. 2 Conventions for a crack kinking out of an interface

목적으로도 위의 파괴규준을 적용할 수 있으리라 사료된다.

3. 계면파괴변수의 수치적 평가방법

2절에서 설명한 파괴규준을 적용하기 위해서는 임의의 외력이 작용할 때 식 (5)와 식 (6)에 나타나 있는 두가지의 계면파괴변수인 에너지해방률과 이에 상응하는 위상각을 구하여야 한다. 하중상태와 기하적 형상이 간단한 경우에는 이들을 이론적으로 계산할 수 있으나, 일반적으로 수치해석을 이용하여 구하는 편이 편리하다. 본 논문에서는 여러 수치해석방법 중에서 널리 쓰이고 있는 유한요소법을 이용하여 에너지해방률과 위상각을 구하는 방법을 제안하였다.

3.1 에너지해방률의 수치계산

계면방향으로의 에너지해방률(G)은 계면응력 확대계수의 향으로 다음과 같이 표현된다.

$$G = \frac{(1/\bar{E}_1 + 1/\bar{E}_2)}{2 \cosh^2(\pi\epsilon)} |K|^2 \quad (7)$$

여기서, $|K|^2 = K_I^2 + K_{II}^2$ 이고, $\cosh^2(\pi\epsilon) = 1/(1-\beta^2)$ 이다. 이 때 식 (7)의 에너지해방률을 단위 균열의 진전에 따른 포텐셜에너지(J)의 변화인 J -적분식을 이용하여 결정할 수 있다.

$$G = J_{,i} = -\frac{\partial \Pi}{\partial u} \quad (8)$$

유한요소해석에서는 식 (8)을 기초로 하여 가상 균열증가방법(virtual crack extention method)

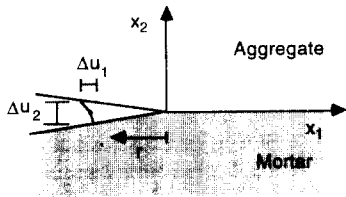
에 의하여 J를 계산한다.¹²⁾ 즉 균열이 있는 물체에 가상으로 균열을 진전시켰을 때 발생하는 포텐셜에너지의 변화를 수치적으로 구하여 J 혹은 G를 구하는 방법이다. 이 방법은 선형, 비선형 탄성재료와 탄소성재료뿐만 아니라 이러한 재료 사이의 계면 방향의 에너지해방률을 구하는 목적으로도 적용할 수 있다.

3.2 하중위상각의 수치계산

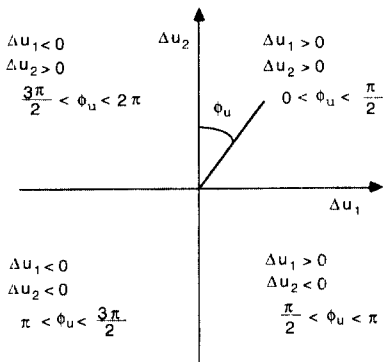
수치적으로 위상각은 식 (4)의 정의와 인장과 전단 모우드와 관계된 균열표면변위(crack surface displacement)를 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다. 먼저 식 (4)의 위상각을 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$K \hat{L}^{i\epsilon} = |K| e^{i\phi} \quad (9)$$

한편, 상하 균열면의 마주보고 있는 두 점의 상대 변위는 계면응력확장계수의 향으로 표현된다(Fig. 3(a) 참조).



(a) The crack tip region for an interfacial crack



(b) The rules for the calculation of ϕ_u

Fig. 3 Calculation of ϕ_u

$$\Delta u_2 + i\Delta u_1 = \frac{4K(1/\bar{E}_1 + 1/\bar{E}_2)}{(1 + 2i\epsilon)\cosh(\pi\epsilon)} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} r^{i\epsilon} \quad (10)$$

이 때 식 (10)을 위상각의 향으로 표현하면 다음과 같다.

$$|\Delta u| e^{i\phi_u} = C \hat{L}^{1/2} K \hat{L}^{i\epsilon} \left(\frac{r}{L}\right)^{1/2+i\epsilon} e^{-i\phi_c} \quad (11)$$

여기서,

$$C = \frac{4(1/\bar{E}_1 + 1/\bar{E}_2)}{\sqrt{2\pi(1 + 4\epsilon^2)\cosh(\pi\epsilon)}} \quad (12)$$

이고, $|\Delta u|$ 와 ϕ_u 는 각각 $\Delta u_2 + i\Delta u_1$ 의 절대값(modulus)과 편각(argument)으로 ϕ_u 은 Fig. 3(b)를 참조하여 구하며, ϕ_c 은 $(1 + 2i\epsilon)$ 의 편각이다. 이 때 식 (9)를 식 (11)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$|\Delta u| e^{i\phi_u} = C \hat{L}^{1/2} \left(\frac{r}{L}\right)^{1/2} |K| \exp\left[i\left(\phi_u + \epsilon \ln\left(\frac{r}{L}\right) - \phi_c\right)\right] \quad (13)$$

마지막으로 위식의 양변을 비교함으로써 다음과 같이 위상각과 $|K|$ 를 구할 수 있다.

$$\phi_u = \phi_c - \epsilon \ln \frac{r}{L} + \phi, \quad (14)$$

$$|K| = \frac{|\Delta u|}{C \sqrt{r}} \quad (15)$$

유한요소해석을 통해 얻어진 변위 (Δu_2 , Δu_1)를 식 (14)와 식 (15)의 ϕ 와 $|K|$ 를 계산하는데 사용한다. 계산치의 정확도는 균열선단주위의 절점들의 수치적인 오차에 좌우된다. 균열선단에서 후방으로 떨어진 거리를 나타내는 r 은 가상균열증가방법에 의해 계산된 G 를 식 (7)에 대입하여 얻은 $|K|$ 와 식 (15)로부터 계산된 $|K|$ 가 일치할 때의 값으로 결정한다. 위와 같이 위상각을 수치적으로 결정하기 위해서는 식 (14)와 식 (15)만을 사용하게 되므로 계산이 간단하며, 이때 주의할 사항은 ϕ_u 의 값의 결정과 일관성 있게 참고길이를 정하는 것이다.

4. 수치적 평가방법을 이용한 계면파괴변수의 계산에

4.1 모델

Fig. 4에 나타나 있는 보를 예제로 하여 수치적으로 에너지해방률과 하중위상각을 계산하여 정해와 비교함으로써 수치적인 방법의 신뢰성을 조사하였다. 해석에 이용한 보의 Fig. 4에서 보이는 바와 같이 4점 휨을 받고 있으며 재료 1과 재료 2의 두 층으로 이루어져 있다. 위의 보를 계산예로 선택한 이유는 에너지해방률에 대한 정해가 존재하여 수치해와 간단히 비교할 수 있기 때문이다.¹³⁾ 실제적으로 재료 2가 골재이고 재료 1이 모르타르인 경우뿐만 아니라 재료 2가 구콘크리트이고 재료 1이 신콘크리트인 경우와 재료 1이 콘크리트이고 재료 2가

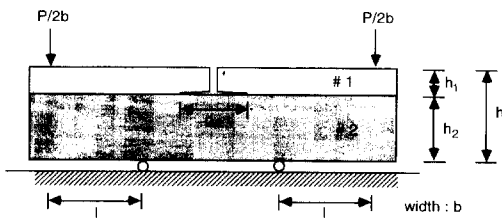
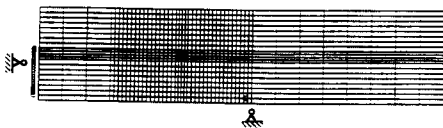
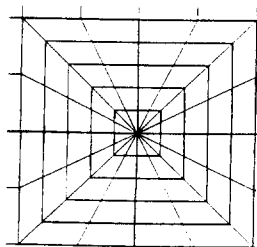


Fig. 4 Bimaterial beam model subjected to four-point bending



(a) Mesh for a half model



(b) Mesh around the crack tip

Fig. 5 Mesh used in finite element calculations of a four point bending specimen

강인 경우 등을 생각할 수 있다. 수치해석결과와 정해를 비교하기 위하여 두 재료의 강성비인 E_2/E_1 과 두께비인 h_1/h_2 의 두가지를 변수로 하여 유한요소 해석을 수행하였다. 수치해석시 고려한 다섯 가지 경우에 대한 E_2/E_1 , α , β , ϵ 값이 Table 1에 정리되어 있다. $h_1/h_2 = 1.0$ 일 때 해석에 사용한 유한요소 모델은 Fig. 5에 나타나 있다. 모델이 대칭임을 고려하여 보의 우측반만을 해석시 고려하였으며 유한요소망은 평면변형 8절점 요소로 이루어져 있다. 균열선단 주위를 5줄의 요소환으로 에워싸고 균열선단에 제일 가까운 환은 16개의 6절점 삼각형특이 요소로 구성되어 있다.

Table 1 Five material combinations considered in the finite element calculations of four-point bending specimen

E_2/E_1	ν_1	ν_2	α	β	ϵ
1.0	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0
2.5	0.3	0.3	-0.483	-0.122	-0.039
5.0	0.3	0.3	-0.667	-0.190	-0.061
10.0	0.3	0.3	-0.818	-0.234	0.076
25.0	0.3	0.3	-0.923	-0.264	0.086

4.2 에너지 해방률과 하중위상각의 계산

유한요소해석 결과와 3절에서 설명한 방법을 사용하여 에너지해방률과 하중위상각을 계산하였다. Fig. 6과 7에 Table 1에 주어진 다섯가지 경우에 대하여 h_1/h_2 에 따른 에너지해방률과 하중위상각이 나타나 있다. Fig. 6의 에너지해방률은 다음과 같은 정해와 수치해석을 통한 결과와의 비교를 위하여 $P^2 l^2 (1-\nu_2^2)/E_1 h^3 b^2$ 로 나누어 무차원화되도록 하였다.

$$\frac{G_c E_2 h^3 b^2}{P^2 l^2 (1-\nu_2^2)} = \frac{3}{2} \left[\frac{1}{\eta_1^3} - \frac{\lambda}{\eta_2^3 + \lambda \eta_2 + 3\lambda \frac{\eta_1 \eta_2}{\eta_1 + \lambda \eta_2}} \right] \quad (16)$$

여기서, $\lambda = \frac{(1-\nu_1^2)E_2}{(1-\nu_2^2)E_1}$, $\eta_i = \frac{h_i}{h}$ ($i=1,2$) 이다.

무차원화한 에너지해방률을 비교해 보면 h_1/h_2 이 1.0에 가까워지고 E_2/E_1 가 커짐에 따라 수치해석

결과와 정해의 차이가 점점 커졌으나 전반적으로는 거의 일치함을 알 수 있다. 이러한 차이는 유한요소의 수와 분할방법 등에 의한 수치적인 오차에 기인한 것으로 판단된다. 하중위상각을 결정하기 위한 참고길이는 2.54mm이었으며 Fig. 7로부터 두 재료의 탄성계수 값의 차이가 커짐에 따라 하중위상각이 약간씩 증가하며 두층의 두께비가 커질수록 증가율이 작아지는 경향을 보였다. 이로서 에너지해방률과 하중위상각을 수치적으로 계산할 수 있음을 예제를 통해 검증하였는데, 일반적인 구조물의 유한요소해석의 경우보다는 본 예제와 같은 경우에는 균열선단 주위역에서 요소의 분할과 크기조정에 특히 주의를 기울여야 할 것으로 사료된다.

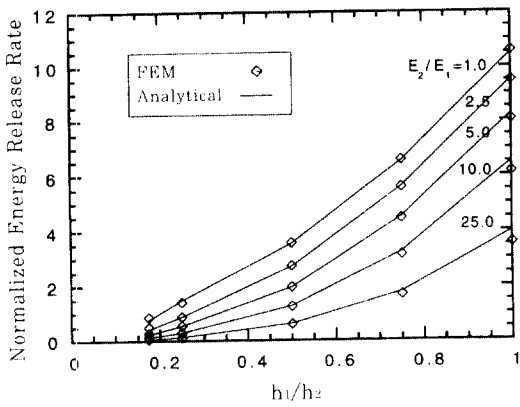


Fig. 6 Trends in energy release rate

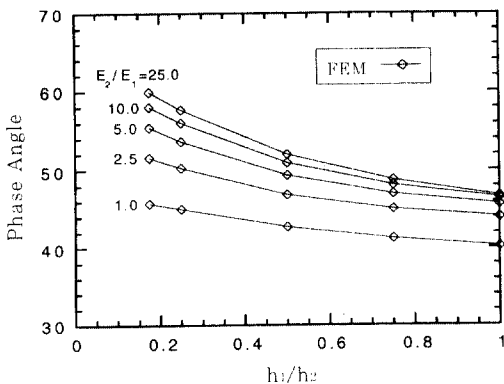


Fig. 7 Trends in phase angle

5. 이상합성보를 이용한 파괴규준의 적용에

5.1 이상합성보 모델과 실험

계면역에서 균열의 전파를 연구하기 위하여 Fig. 8의 모르타르와 골재판으로 이루어진 합성보 모델을 이용하여 실험과 수치해석을 수행하였다. 이 모델은 골재판의 설치각도를 조절하여 균열이 골재와 이루는 각을 여러가지로 변화시킬 수 있으며 또한 하중조건을 바꾸어 균열선단에서의 응력상태를 모드 I에서 모드 II까지 다양하게 얻을 수 있다. 이러한 합성보 모델을 이용한 연구의 주 목적은 콘크리트에서 일어나는 균열 문제에 식 (5)에 주어져 있는 규준의 실제 적용성을 검토하여 보고자 함이다. 아울러 균열이 골재판을 돌아가는 경우, 즉 계면 파괴가 일어난 경우에는 실험결과로부터 계면 파괴인성을 얻을 수 있다.

실험에 사용된 보의 치수는 228.6mm(길이) × 76.2mm(높이) × 25.4mm(폭)이었으며 골재판의 치수는 50.6mm(길이) × 12.7mm(높이) × 25.4mm(폭)이었다. 균열이 골재판과 이루는 각은 90°로 조정하였다. 균열길이(a)와 전단길이(l1)는 각각 25.4mm와 57.15mm이었다. 합성보 모델을 제작하기 위하여 고강도(HSM)와 보통강도(NSM)의 두가지 모르타르와 골재로는 화강암(G)이 사용되었다. 모르타르의 배합비, 사용한 재료의 역학적성질, 모르타르와 골재의 조합에 따른 α , β , ϵ 값이 Table 2, Table 3, Table 4에 각각 정리되어 있다. 제작된 보 시편을 28일간 양생한 후에 4점 휨실험을 실시하여 측정된 최대하중을 균열이 처음으로 전파할 때의 하중 즉 균열하중으로 간주하였다.

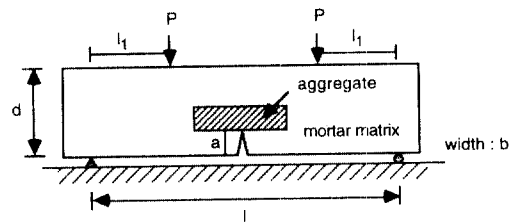


Fig. 8 Geometry and loading configuration of a beam model

Table 2 Mix proportions for the mortar mixes
(by weight)

	W/(C+SF)	FA/(C+SF)(%)	SF/C(%)	HRWR/C(%)
NSM	0.50	2.0	0.0	0.0
HSM	0.28	2.0	10.0	2.0

Table 3 Mechanical properties for the mortars and granite

	σ_c (MPa)	E(GPa)	G_c (J/m ²)	ν
NSM	42.5	27.8	10.3	0.22
Granite	140.1	55.3	17.5	0.16

Table 4 α , β and ϵ values for two bimaterial combinations

	α	β	ϵ
NSM/G	0.320	0.099	0.032
HSM/G	0.163	0.049	0.015

5.2 유한요소해석과 수치모의

유한요소법으로부터 얻은 결과와 4절에서 설명된 방법을 이용하여 실험한 보시편의 골재판과 모르타르간 계면방향으로의 에너지해방률과 위상각을 계산하였다. 이를 위하여 계면을 따라서 2.286mm의 작은 균열을 가상으로 삽입하였으며, 보를 구성하고 있는 재료들은 선형 탄성으로 가정하였다. 유한요소망은 4절의 보의 경우와 비슷하게 분할하였다. 위상각의 계산을 위하여 사용한 참고길이는 2.54mm이었다.

NSM/G으로 이루어진 보의 경우 골재를 돌아가는 균열의 하중위상각은 37°이었으며 NSM/G 계면의 파괴인성은 5.0J/m², 4점 휨 파괴인성 시편의 실험으로부터 얻은 화강암의 모우드 I 파괴인성은 17.5J/m²이었다.¹⁰⁾ 이 때 식 (5)의 규준을 적용해 보면 다음과 같다.

$$\frac{\Gamma_i(37^\circ)}{\Gamma_c} = \frac{5.0}{17.5} = 0.28(0.37 = \frac{G_d}{G_p^{max}}) \quad (17)$$

여기서 우변의 G_d/G_p^{max} 값은 He와 Hutchinson⁸⁾의 수치해석결과이다. 즉 좌변이 우변보다 작게 되어 균열이 골재판을 돌아갈 것으로 예측되었는데, 이는 계면균열이 일어난 실험결과와 일치하였다. 이때 2.22kN에서 2.63kN의 범위의 균열하중으로부터 수치해석방법을 이용하여 계면파괴인성 Γ

(37°) 값이 4.9J/m²과 6.8J/m²의 범위에 있는 것으로 예측되었다. 이 값은 샌드위치 브라질리언시편을 사용하여 직접 측정된 값인 5.0J/m²보다 약간 크지만 서로 다른 형태의 시편임을 고려할 때 대체적으로 일치하는 것으로 볼 수 있다.

HSM/G으로 이루어진 보의 경우 골재를 돌아가는 균열의 하중위상각은 41°이었으며 샌드위치시편으로부터 얻은 HSM/G 계면의 파괴인성은 8.0J/m²이었다. 이 때 식 (5)의 규준을 적용해 보면 다음과 같다.

$$\frac{\Gamma_i(41^\circ)}{\Gamma_c} = \frac{8.0}{17.5} = 0.46(0.30 = \frac{G_d}{G_p^{max}}) \quad (18)$$

여기서 G_d/G_p^{max} 값은 He와 Hutchinson⁸⁾의 수치해석결과이다. 이 경우는 좌변이 우변보다 크게 되어 균열이 골재판을 뚫고 지나갈 것으로 예측되었는데 이는 골재가 파괴된 실험결과와 일치하였다. 이때 균열하중으로부터 수치해석을 이용하여 구한 화강암의 파괴인성이 평균적으로 25.0J/m² 인 것으로 예측되었다. 이 값은 직접 측정된 값인 17.5J/m²보다 34%나 큰 경향을 보였다. 이는 직접 측정된 경우에 이상합성보실험에 사용한 시편보다 1/4 정도로 작은 시편을 사용하였고 이상합성보에서 화강암편이 모르타르의 건조수축에 의한 압축응력을 받게 되어 경계조건이 파괴인성시험시편과 차이를 보이기 때문인 것으로 판단된다.

실험과 수치해석을 수행한 결과 균열의 방향을 예측하기 위한 목적으로 식 (5)에 주어져 있는 파괴규준의 적용이 가능하며 에너지해방률과 위상각을 계산하기 위한 수치해석방법도 계면에서의 균열전파를 조사하는데 유용한 것으로 판단된다. 그러나 아직도 다양한 경우의 계면파괴인성 값의 측정치가 부족하고 계면파괴역학이론이 선형탄성인 재료에만 적용할 수 있다는 점을 해석결과의 분석시 고려하여야 할 것이다.

5. 결 론

콘크리트의 계면파괴와 균열전파를 조사하기 위하여 파괴규준과 수치해석방법이 제시되었으며 간단한 예제에 통하여 수치해석방법의 신뢰성을 검증

하였다. 이상합성보의 실험과 수치해석을 수행하여 균열양상에 대한 실험결과와 해석결과가 대체적으로 일치하는 결과를 얻음으로써 본 논문에서 제안한 파괴규준의 적용성을 입증하였다. 콘크리트에서 일어나는 균열의 전파를 연구하기 위해서는 앞으로 파괴역학 실험뿐만 아니라 파괴역학변수에 대한 모르타르의 건조수축이 미치는 영향 등을 실험 및 수치해석적으로 연구하여야 할 것이며, 그렇게 함으로써 콘크리트의 거동에 대한 이해를 높일 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Liu, T.C.Y., Nilson, A.H., and Slate, F.O., "Stress-strain Response and Fracture of Concrete under Uniaxial and Biaxial Compression," *ACI Journal*, Vol. 69, May, 1972, pp. 291-295.
2. Wittmann, F.H., "Micromechanics of Achieving High Strength and Other Superior Properties," *Proceedings of a Workshop on High Strength Concrete*, University of Illinois at Chicago Circle, Dec., 1979, pp. 8-30.
3. Zaitsev, Y., "Crack Propagation in a Composite Model," *Fracture Mechanics of Concrete*, F.H. Wittmann, Ed., Elsevier Science Pub., Netherlands, 1983, pp. 251-299.
4. Yamaguchi, E., and Chen, W.-F., "Microcrack Propagation Study of Concrete under Compression," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 117, No. 3, 1991, pp. 653-673.
5. Lee, K.M., Buyukozturk, O., and Oumera, A., "Fracture Analysis of Mortar-aggregate Interfaces in Concrete," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 118, No. 10, 1992, pp. 2031-2047.
6. Rice, J.R., "Elastic Fracture Concepts for Interfacial Cracks," *J. Appl. Mech.*, Vol. 55, 1988, pp. 98-103.
7. Hutchinson, J.W., and Suo, Z., "Mixed Mode Cracking in Layered Materials," *Advances in Applied Mechanics*, Vol. 29, Academic Press, 1992, pp. 63-191.
8. He, M.-Y., and Hutchinson, J.W., "Crack Deflection at an Interface between Dissimilar Elastic Materials," *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 25, 1989, pp. 1053-1067.
9. 이광명, "모르타르-갈재 계면의 파괴인성에 관한 연구," *대한토목학회논문집*, 제15권, 제2호, 1995, pp. 357-365.
10. Buyukozturk, O., and Lee, K.M., "Assessment of Interfacial Fracture Toughness in Concrete Composites," *Cement & Concrete Composites*, Vol. 15, 1993, pp. 143-151.
11. He, M.-Y., and Hutchinson, J.W., "Kinking of a Crack out of an Interface," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 56, 1989, pp. 270-278.
12. Parks, D.M., "The Virtual Crack Extension Method for Nonlinear Material Behavior," *Comp. Meth. Appl. Mech. Engng.*, Vol. 12, 1977, pp. 353-364.
13. Charalambides, P.G., Lund, J., and Evans, A.G., "A Test Specimen for Determining the Fracture Resistance of Bimaterial Interfaces," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 56, 1989, pp. 77-82.

(접수일자 : 1996.)