

적층한 콘크리트 복합구조체의 파괴역학적 거동

Fracture Behavior of a Stacked Concrete Structure Based on the Fracture Mechanics



김상철*

Kim, Sang-Chul



김연태**

Kim, Yeon-Tae

ABSTRACT

The objective of this study is to simulate the fracture behavior of composite structure bonded with more than 2 different cementitious materials. For this, concrete and cement were stacked and bonded in a direction perpendicular to loading and specimens were tested. Each constituent material of concrete and cement was fabricated independently also, and three point bending and indirect tensile tests were carried out for the acquisition of measured values applicable to the proposed model.

As a result of comparing theoretical results and experimental ones, it was found that the proposed model derived from fictitious crack theory can be used to predict the fracture behavior of composite structures on the basis of well agreement with experimental results. It was also noted that the degree of improvement of fracture energies and strengths is greatly dependent on the stacking sequence of layers composing of a composite structure. Thus, it can be concluded that brittleness or ductility of a composite structure can be accomplished by a proper arrangement of layers on one's purpose throughout the proposed analysis.

keywords : fracture, composite structure, three point bending test, indirect tensile test, progressive fracture mode, stacking sequence, fracture energy

* 정회원, 한서대학교 토목공학과 조교수

** 서울산업대학교 구조공학과 교수

• 본 논문에 대한 토의를 1999년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 1999년 8월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

일반적으로 구조물은 의도된 소요 기능을 수행하기 위해 축조되며, 이러한 기능을 더 이상 수행하지 못하게 되었을 때에는 파괴된 것으로 간주된다. 이러한 파괴적 개념에 대해서는 토목이나 건축구조물의 경우 강도확보나 사용성에 의해 평가를 내리는 것이 일반적이며 특히, 콘크리트 구조물인 경우는 강도가 매우 중요한 역할을 하고 있어 설계나 시공시 콘크리트의 강도 규정에 대해 중점적으로 치중해 왔다. 그러나 콘크리트는 준 취성재료(quasi-brittle material)로서 강도 이외에도 자체적으로 갖고 있는 에너지가 중요하게 작용한다. 그 일례로 고강도콘크리트인 경우에는 강도가 높은 반면 취성에 가까운 파괴를 나타내어 급작스러운 구조물 붕괴를 초래할 수 있다. 이러한 현상은 강도이외에도 다른 주요한 인자에 대한 고려가 필요하다는 것을 제시하고 있으며, 갑작스런 파괴현상을 방지하기 위해서는 다른 특수한 재료를 혼입하던지 서로 결합시키므로써 원재료가 갖고 있는 문제점의 보완이 가능하고, 그 효과에 대해서는 파괴역학적 개념을 적용하므로써 설명이 가능하다고 판단된다.

이에 본 연구에서는 하중이 작용하고 있는 방향에 대해 직각방향으로 시멘트를 기초로 하는 재료들을 적층·결합시킨 복합구조체 즉, 진행파괴모드(Progressive Fracture mode : PF mode)의 구조체에 대한 파괴현상을 규명하고자 하였다. 가상균열이론을 기초로 하여 적절한 구조물의 파괴거동을 시뮬레이션할 수 있는 이론식을 도출하였고, 이 식을 콘크리트와 시멘트를 결합한 복합구조체에 적용하여 실험과 해석결과를 비교하였다.

본 연구결과는 콘크리트의 포장설계시 덧씌우기를 실시하는 도로포장의 파괴거동에 활용할 수 있으며, 콘크리트 구조물에서 신·구콘크리트의 거동 및 구조물의 목적에 맞게 강도적인 측면과 연성 향상 등을 위해 성질이 다른 두 종류 이상의 재료를 효과적인 방법으로 배열·결합시키는 문제에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 가상균열이론에 따른 복합구조체의 균열수치해석

구성재료를 하중작용방향에 직각으로 적층한 진행파괴모드에서의 수치해석은 3점휨을 받는 보에 대해 절점 n까지 직선 노치를 두고 균열이 계속적으로 진행하면서 균열이 발생되지 않은 부분은 개구변위를 닫기 위해 필요로 하는 응력과 균열이 발생된 부분은 정의된 응력-분리곡선(stress-separation curve)으로부터 응력을 산출한다⁽¹⁾. 이때 각 절점에서의 개구변위(w_i)와 처짐량(δ)은

$$w_i = \sum_{j=1}^{n-1} a_{ij}\sigma_j + c_i P \quad (1)$$

$$\delta = \sum_{j=1}^{n-1} b_j \sigma_j + d_p P$$

으로부터 산출하며, 위의 식을 매트릭스 형식으로 나타내면,

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1(n-2)} & a_{1(n-1)} & c_1 \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2(n-2)} & a_{2(n-1)} & c_2 \\ a_{31} & a_{32} & \dots & a_{3(n-2)} & a_{3(n-1)} & c_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{(n-1)1} & a_{(n-1)2} & \dots & a_{(n-1)(n-2)} & a_{(n-1)(n-1)} & c_{n-1} \\ b_1 & b_2 & \dots & b_{n-2} & b_{n-1} & d_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \vdots \\ \sigma_{n-1} \\ P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ \vdots \\ w_{n-1} \\ \delta \end{bmatrix} \quad (2)$$

혹은,

$$[C] \{F\} = \{A\} \quad (3)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서,

a_{ij} = 등가단립하중 (= 단위응력 × 요소길이)이 절점 j에 작용할 때 절점 i에서의 개구변위

c_j = 단위하중(P=1)이 작용할 때 절점 j에서의 개구변위

b_j = 등가단립하중이 절점 j에 작용할 때 하중작용선상에서의 처짐량

d_p = 단위하중이 작용할 때 하중작용선상에서의 처짐량

σ_j = 절점 j의 단립응력

w_i = 절점 i의 개구변위

$\delta =$ 하중작용선상의 총처짐량을 나타낸다.

그러나, 진행파괴모드로 적층한 복합구조물의 파괴거동은 각각의 층이 쌓아 올려진 순서에 따라 영향을 받기 때문에 만약 적층순서가 강성이 높은 재료 위에 낮은 재료가 있게 되면 하층에 균열이 진행하면서 상층에도 동시에 균열이 발생할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 상층에 발생한 동시발생균열의 선단위치를 찾는 작업이 필요하며 이를 위해 영향매트릭스 [C]의 배열을 새로운 선단위치에 따라 변화하는 방법을 사용하였다. 계산방법은 먼저 식(2)를 사용하여 하층의 첫절점이 재료의 인장강도값에 도달하였다고 가정하였을 때 첫 절점에서의 개구변위는 0이 되며, 이 때의 경계조건은 $\sigma_1 = f_t, w_1 = w_2 = \dots = w_{n-1} = 0$ 으로 나타낼 수 있다. 이로부터 n개의 미지수 $\sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_{n-1}, P, \delta$ 들이 결정되며 이들의 응력값이 상층에서의 인장강도를 초과하는지 검토한다. 만약 초과되는 절점이 존재하면 먼저 선형보간법을 이용하여 2차균열선단위치를 가정하고 영향매트릭스에서 임의의 2차균열선단 절점위치에 대한 행과 열은 식(4)에서 구한 값들로 대체한다.

$$\{X\} = [A]^{-1}[\{\Delta\} - [C']\{F\}] \quad (4)$$

여기서,

$$[A] = \begin{bmatrix} \sigma_k & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_k & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_k & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} \sigma_1 & \sigma_2 & \dots & \sigma_{k-1} & \sigma_k & \sigma_{k+1} & \dots & \sigma_{n-1} & P/A_x \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \sigma_k \end{bmatrix}$$

[C'] =

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2} a_{11} & \dots & a_{1(k-1)} & 0 & a_{1(k+1)} & \dots & a_{1(n-1)} & c_1 \\ \frac{1}{2} a_{12} & \dots & a_{2(k-1)} & 0 & a_{2(k+1)} & \dots & a_{2(n-1)} & c_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{1}{2} a_{1(k-1)} & \dots & a_{(k-1)(k-1)} & 0 & a_{(k-1)(k+1)} & \dots & a_{(k-1)(n-1)} & c_{k-1} \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} a_{1(k+1)} & \dots & a_{(k+1)(k+1)} & 0 & a_{(k+1)(k+1)} & \dots & a_{(k+1)(n-1)} & c_{k+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_1 & \dots & b_{k-1} & 0 & b_{k+1} & \dots & b_{n-1} & d_p \end{bmatrix}$$

이다. 이 때 상층의 균열선단 절점위치 U_1 에서의 응력은 상층의 인장강도와 동일하여야 하며 만약 그 경계조건이 만족되지 않으면 균열선단 U_1 에 대한 새로운 위치가 가정되어야 하고 위에 서술한 방법이 반복된다.

균열이 하층의 다음 절점으로 진행하면 하층의 첫 절점은 열리게 되고 두 번째 절점은 인장강도에 도달하게 되어 경계조건은 $\sigma_2 = f_t, w_2 = w_3 = \dots = w_{n-1} = 0, w_1 \neq 0, \sigma_1 = \sigma(w_1)$ 이 된다. 또한, 상층의 경계조건은 상층의 인장강도를 f'_i 라 하였을 때 $w_{U1} \neq 0, \sigma_{U1} = \sigma(w_{U1}), \sigma_{U2} = f'_i, w_{U3} = w_{U4} = w_{U5} = \dots = w_{n-1} = 0$ 을 만족하도록 하고, 하층의 절점 1과 상층의 절점 U_1 에서의 개구변위 w_1 과 w_{U1} 은 응력-분리곡선의 조건이 만족되도록 하여 방정식을 푼다.

이상의 방법으로 각 절점을 따라 균열을 진행시키므로써 진행파괴모드로 구성된 보의 하중-변위곡선(P- δ curve) 및 하중-개구변위곡선(P-CMOD curve)을 구할 수 있게 된다.

3. 실험재료 및 방법

3.1 재료 및 시험체제작

굵은골재로 최대크기 9.5mm(3/8 inch)의 콩

Table 1 Mix proportion

Material	Max. agg. Size(mm)	W/C (%)	S/a (%)	Unit content (kg/m ³)			
				Water	Cement	Sand	Coarse aggregate
Concrete	9.5	55	50	187	341	886	886
Cement paste	2.0	45	-	484	1077	420	-

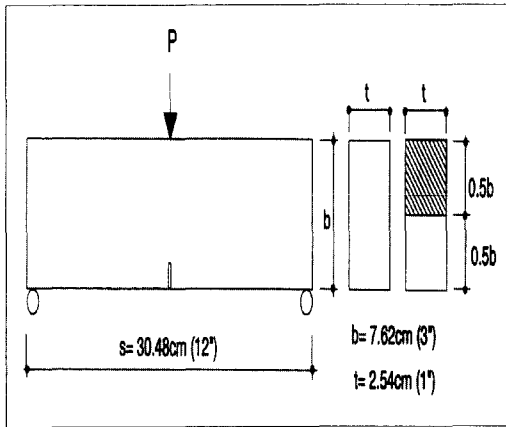


Fig. 1 Dimensions and configuration of testing specimens

자갈과 강모래를 1일간 오븐에 건조시킨 후 함습을 유지하도록 1일간 대기중에 방치하였다. 먼저 Table 1의 배합표에 따라 믹싱한 후 3점휨시험과 간접인장강도시험을 위해서는 빔 몰드에, 압축강도시험을 위해서는 실린더 몰드에 콘크리트를 투입하였다. 보 공시체는 높이, 길이 및 두께가 각각 7.62cm×30.48cm×2.54cm(3"×12"×1")와 3.81cm×30.48cm×2.54cm(1.5"×12"×1") 2가지를 제작하였는데, 7.62cm 높이의 보는 수치해석 입력데이터로 사용될 재료의 물성치를 산출하기 위하여 제작되었고, 3.81cm 높이는 차후 시멘트페이스트와 결합하여 총 두께 7.62cm가 되도록 하여 실험치와 해석치와의 결과를 비교하기 위해 제작하였다. 타설된 보 공시체는 내부에 존재하는 기포를 제거하기 위해 탁상형 바이브레이터를 사용하여 재료분리가 발생하지 않는 범위로 알려져 있는 5Hz의 진동수로 1분간 진동다짐을 실시하였다⁽²⁾. 다짐을 마친 공시체는 온도 25℃, 습도 99%를 유지한 항온항습실에서 증기양생하였고 재령 1일후 탈형하여 항온항습실에서 소요되는 재령이 확보될 때까지 계속해서 양생하였다.

높이 3.81cm의 콘크리트 시편은 재령 14일이 경과된 후 크기 3.81cm×30.48cm×2.54cm(1.5"×12"×1")의 시멘트페이스트로 덧붙이기를 실시하여 전체 시험체 크기가 7.62cm×30.48cm×2.54cm(3"×12"×1")가 되도록 하였다. 이 때 시멘트페이스트와 기존 양생된 콘

크리트간의 강력한 부착을 위해 에폭시를 시멘트페이스트와 접촉되는 콘크리트 시편 표면에 발라주고 시멘트페이스트를 타설하여 2층 복합구조가 되도록 하였다.

제작된 공시체는 메이슨리 절단기 (masonry saw)를 사용하여 보 깊이에 대한 노치의 비가 1/6(1.27cm)이 되도록 절단한 후 항온항습실에서 소요되는 재령기간까지 증기양생하였다.

3.2 시험방법

3.2.1 3점휨시험

Fig. 1(a)와 같이 3점휨시험은 MTS를 사용하여 실시하였다. 시험을 실시하기에 앞서 공시체의 개구변위 (CMOD)를 측정하기 위해 노치 하단부에는 extensometer를 부착하였고, 하중 작용선 방향에서의 처짐량은 LVDT를 사용하여 측정하였다. 하중재하속도는 0.003cm/min로 개구변위값이 일정한 값으로 증가될 수 있도록 재하속도를 조정하였다.

3점휨시험을 실시하는 동안 재료계수를 산정하기 위해서 RILEM에서 제안하고 있는 일련의 하중 재하 및 비재하(loading and unloading)를 실시하였다. 일반적으로 RILEM에서 제안하고 있는 방법은 하중이 최고절점에 도달한 후 하중 최고값의 95%에 도달하였을 때 비재하시험을 실시하도록 하고 있으나⁽³⁾, 실제 시험상에서는 제시된 위치에서 비재하를 실시하기가 현실적으로 어려우므로 하중이 최대값에 도달한 이후 임의의 위치에서 비재하를 실시하고 보간법을 이용하여 다음 식과 같이 비재하시의 컴플라이언스 값(C_u)을 구하였다

$$C_u = C_i + (C_p - C_i) \times 0.05 P_{\max} / (P_{\max} - P) \quad (5)$$

여기서, P는 비재하가 실시될 당시의 실제 하중값이고, C_p 는 그 때의 컴플라이언스값이며 C_i 는 P-CMOD곡선의 초기 컴플라이언스값을 나타낸다. 비재하시험은 하중치가 거의 0에 도달하였을 때 다시 하중을 재하하여 구조체가 완전히 파괴될 때까지 하중을 가하였다. Fig. 2는 재하 및 비재하시의 하중-개구변위곡선을 나타낸 것이다.

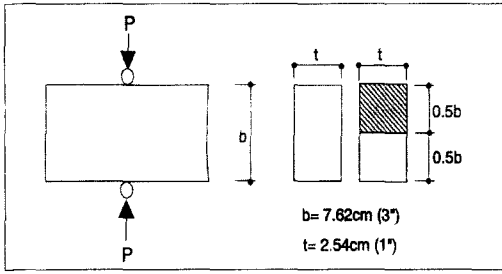


Fig. 2 Typical load versus crack mouth opening displacement curve

3.2.2 간접인장응력시험

인장강도는 콘크리트와 같이 인장에 의해 파괴 거동이 특성화되는 재료에 있어서 기본적인면서도 파괴거동 시뮬레이션을 위해 매우 중요한 요소이다. 그러나 기존의 여러 시험결과에서도 밝힌 바와 같이^(4, 5, 6) 시멘트를 기초로 하는 재료에 있어서 직접인장강도시험은 시편의 철손장치부에서 응력집중현상이 발생하며 주하중이 작용하기 이전에 사전파괴 (premature failure)가 발생할 우려가 있어 시험이 용이하지 않을 뿐 아니라, 그 결과치에 대해서도 신빙성이 떨어진다. 따라서 본 실험에서는 직접인장응력을 보완한 간접인장시험을 실시하였다. 실험 방법은 3점휨시험으로 분리된 시편을 사용하여 Fig. 1(b)와 같이 시편중심 상하단에 롤러를 두고 하중을 가하여 할렬될 때

의 파괴하중치를 실험에서 산정하였다. 하중재하 속도는 변위량에 의해 조절되도록 하고 그 크기는 0.0254cm/min로 하였다. 이 때의 할렬인장 강도(f_t)는 다음 식에 의해 산정하였다⁽⁴⁾.

$$f_t = \frac{2P_{max}}{\pi bt} \quad (6)$$

여기서 P_{max} 값은 측정된 최대하중값이고, b와 t는 보의 깊이와 두께를 나타낸다.

4. 실험결과 및 고찰

각 재료별로 실험을 통해 측정된 재료의 평균 특성치는 Table 2와 같다. 산정된 재료적 물성치는 이미 알려져 있는 바와 같이 강성은 콘크리트가 시멘트페이스트보다 크게 나타났으나, 파괴에너지는 콘크리트가 시멘트페이스트에 비해 낮게 산출되었다. 콘크리트는 내부에 조골재를 포함하고 있으므로 일반적으로 균열궤적선(crack path)이 골재의 위치에 따라 움직이므로 시멘트페이스트에 비해 단위균열을 발생시키기 위해서 소요되는 파괴에너지값이 높게 나타나야 할 것으로 예상된다. 그러나 이 현상에 대해 파괴에너지는 물-시멘트비와 관계가 있기 때문에 물-시멘트비가 0.4이상인 경우에는 배합비나 시험방법에 관계없이 물-시멘트비가 증가할수록 파괴에너지가 감소된다⁽⁷⁾는 연구결과와 일치한다.

Table 2 Experimental results of concrete(age=28 days) and cement paste(age=14 days)

Items	Concrete (H material)		Cement paste (L material)	
	Average	S.D	Average	S.D
Young's modulus E(GPa)	39.72	1.81	14.89	0.15
Measured Peak Load P_{max} (kN)	1.117	0.097	0.833	0.099
Critical Stress Intensity Factor K_{Ic} (MPa·m ^{1/2})	0.988	0.136	0.620	0.025
Critical Crack Tip Opening Displacement CTOD _c (×10 ⁻³ cm)	0.881	0.234	1.054	0.066
Fracture Energy G_f (kPa·cm)	7.110	0.415	9.404	0.860
Theoretical Tensile Strength f_t (MPa)	3.676	0.032	3.146	0.041
Indirect Tensile Strength f'_t (MPa)	2.527	0.030	2.409	0.028
Compressive Strength f'_c (MPa)	42.156	0.044	35.109	0.025

Note: S.D=standard deviation

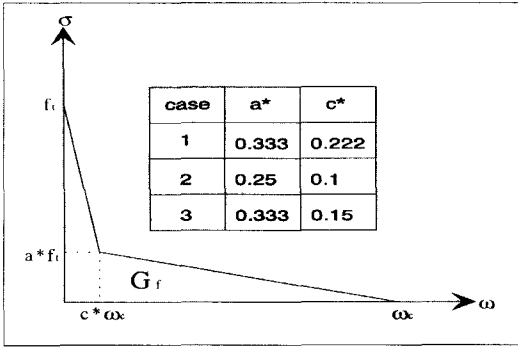


Fig. 3 Different configurations of bilinear stress-separation curve

파괴계수의 수치해석을 실시하기 위해 입력값으로 사용되는 인장강도의 경우 앞서 간접인장강도시험을 통해 얻은 인장강도치를 사용하여 실험 결과에 시뮬레이션시킨 결과 인장강도값이 매우 낮게 평가되었다. 이와같은 결과는 시멘트를 기초로 하는 재료에 있어서 보다 일반적으로 많이 사용되고 있는 실린더를 이용한 할렬인장시험을 실시하여도 50%이상 오차가 발생하는 것으로 기존 연구⁽⁶⁾에서 나타나고 있으며, 시험 결과상의 오차는 실험방법이나 공시체의 형상 및 크기에 따라 크게 의존하고 있는 것으로 연구보고되고 있다^(4, 8). 따라서 수치해석에 사용될 인장강도값을 산정하기 위해 탄성계수(E), 임계응력확대계수(K_{IC}^s), 임계균열선단개구변위(CTOD_c)들이 재료의 특성을 나타내는 계수들로 크기에 의존하지 않는 상수로 보고, 보가 인장을 받을 때 균열은 보의 중심으로부터 단부로 진행된다고 하여 계산하면 다음 식과 같은 이론적 인장강도를 산정할 수 있다.

$$f_t = \frac{4}{\pi} \frac{(K_{IC}^s)^2}{E \cdot CTOD_c} \quad (7)$$

인장시험을 통해 산출한 인장강도값과 이론적 인장강도값을 비교하면 Table 2와 같이 이론적 인장강도값이 간접인장시험을 통한 결과보다 다소 높게 나타났으며, 실제 실험결과에 따른 파괴거동곡선을 시뮬레이션하는데 비교적 잘 적용되었다.

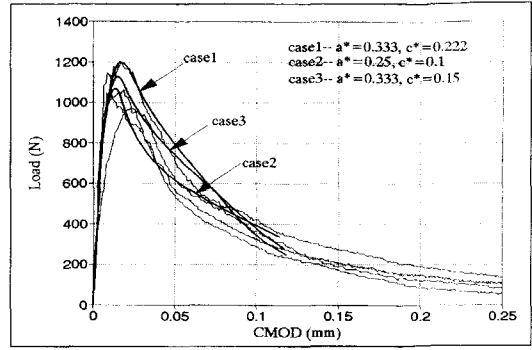


Fig. 4 Experimental results versus numerical results associated with different parameters of a' and c' in concrete

5. 수치해석과 실험결과와의 비교

5.1 응력-분리곡선 관련 파라미터 결정

하중과 변위곡선의 수치해석적 안정성과 곡선의 해상도는 탄성계수, 파괴에너지, 인장강도이외에 응력-분리곡선($\sigma-w$ curve)에 의존하게 된다. 따라서 두 개 이상 적층하여 이루어진 복합구조의 파괴거동을 시뮬레이션하기 위해서는 복합구조를 구성하는 각 구성층의 파괴거동을 특성화할 응력-분리곡선을 찾는 것이 필요하다. 이에 본 연구에서는 3점휨시험을 실시하여 얻어진 결과를 통해 $\sigma-w$ 곡선을 찾도록 하였다.

응력-분리곡선은 과거의 연구결과^(7, 8, 9)에서 알려져 있는 바와 같이 콘크리트의 파괴거동을 효과적으로 시뮬레이션할 수 있는 쌍일차곡선(bilinear curve)을 사용하였다. 쌍일차곡선의 형상은 Fig. 3과 같이 인장강도 f_t , 파괴에너지 G_f 와 비연속 절점계수들(a^* 와 c^*)에 의해 특성화되며 이미 실험을 통해 파괴에너지와 인장강도는 산출하였으므로 수치해석을 통해 적절한 응력-분리곡선을 찾는 것이 필요하다.

Fig. 4와 5는 콘크리트 및 시멘트의 경우 서로 다른 비연속 절점계수 a^* 와 c^* 를 사용하여 수치해석을 통해 얻어진 하중-개구변위 곡선과 실험치를 각각 비교한 것으로 콘크리트와 시멘트의 경우 $a^*=0.25$, $c^*=0.1$ 을 사용하였을 때가 다른 절점계수값들을 사용했을 때보다 비교적 잘 일치

하였다. 따라서 본 다중복합구조의 파괴거동에 대한 수치해석을 위한 입력값으로 모든 구성재료에 대해 동일한 절점계수 $a^* = 0.25$, $c^* = 0.1$ 을 사용하였다.

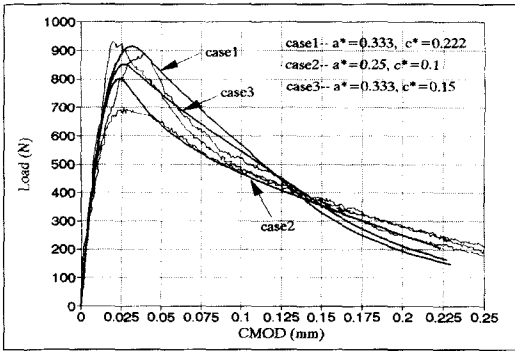


Fig. 5 Experimental results versus numerical results associated with different parameters of a^* and c^* in cement paste

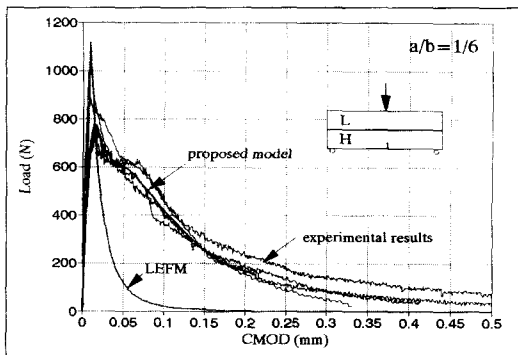


Fig. 6 Comparison of P-CMOD curves between experiments and numerical analysis in H-L layer sequence

5.2 이중으로 적층한 PF모드의 수치해석 결과와 실험결과와의 비교

앞서 단층재료 해석에서 결정된 재료계수를 사용하여 진행파괴모드로 적층시킨 이중복합구조의 파괴거동을 시뮬레이션하였다. 해석에 사용한 각각의 구성요소의 재료적 특성값은 Table 2의 실험을 통해 얻어진 결과를 사용하였으며 보의 크기는 실험에서 사용한 크기와 동일한 $7.62\text{cm} \times$

$2.54\text{cm} \times 30.48\text{cm}$ 로 하였다. 초기 노치 크기는 1.27cm (노치비=1/6)로 하고 각각에 대한 영향 매트릭스는 범용프로그램인 ABAQUS를 사용하여 구하였다. Fig. 6과 7은 비선형해석에 의한 이론적 계산결과와 선형파괴역학(LEFM)에 의한 해석결과 및 실험결과치를 함께 도시한 것으로 이들 그림에서 비선형파괴역학을 이용한 해석방법이 선형파괴해석방법보다 실제 실험결과에 보다 유사하게 접근하고 있음을 알 수 있다. LEFM에 의한 해석에서는 곡선부와 좌표축에 둘러싸인 면적이 과소평가되었는데, 이는 선형파괴역학에서 사용하고 있는 임계에너지해방율(critical strain energy release rate; G_{IC})값은 실제 실험상에서 나타나고 있는 곡선형상의 균열진행과 달리 직선균열(sharp crack)로 가정하여 산출함으로 인해 발생된 것으로 판단된다.

상층보다 하층의 강성이 우수하도록 적층시킨(H-L sequence) 이중구조에서는 Fig. 6과 같이 극한 최대하중을 통과한 이후 개구변위값에 대해 하중치가 원활히 감소하지 않고 일부 구간에서 거의 동일한 하중값으로 개구변위만 증가하는 하중저감의 일시적 정지현상이 나타났다. 이와 반면에 Fig. 7과 같이 상층이 하층보다 강성이 높은 방향으로 적층(L-H sequence)시킨 구조물의 경우에는 하중-변위곡선이 최대값을 통과한 후 하중값이 일시적으로 급격히 떨어지고 그 후에는 일반적인 단층구조에서 나타나는 곡선형상을 나타내었다.

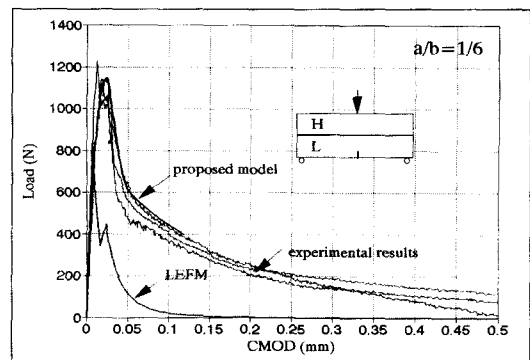


Fig. 7 Comparison of P-CMOD curves between experiments and numerical analysis in L-H layer sequence

이러한 두 복합구조물간의 서로 상반된 파괴거동은 각 복합구조물을 구성하는 구성재료간의 서로 다른 파괴에너지와 인장강도로 인해 발생된 것으로 그 발생원인은 Fig. 8에 나타난 두 개의 서로 다른 응력-분리곡선의 크기를 통해 설명할 수 있을 것으로 사료된다. 그림에서 H-L 적층구조물과 같이 균열이 낮은 파괴에너지를 갖고 있는 층을 통과하여 새로운 상층의 높은 파괴에너지를 갖는 층을 통과하기 시작하면 새로운 균열선단의 파괴진행영역은 그림 상의 a-b케적곡선을 더 이상 따르지 않고 a'-b'의 케적선을 따르게 된다. 이러한 케적선의 확대는 단위 개구변위나 혹은 단위 하중작용방향 변위를 유발하기 위해 보다 높은 파괴에너지가 필요하게 되는 것을 의미하며 결국 균열이 상층을 통과하기 시작하는 시점부터 P-CMOD나 P- δ 곡선에서의 하중값은 에너지를 증가하는 방향으로 이동하게 된다. 이와 반대로 L-H 적층의 경우처럼 균열이 파괴에너지가 높은 층에서 낮은 층으로 이동하게 되면 파괴영역은 그림의 a'-b' 케적곡선 대신에 a-b곡선을 따르게 되어 새로운 층을 통과할 때 에너지흡수율이 감소되므로써 P-CMOD곡선은 연직방향의 하향곡선으로 나타나게 된다.

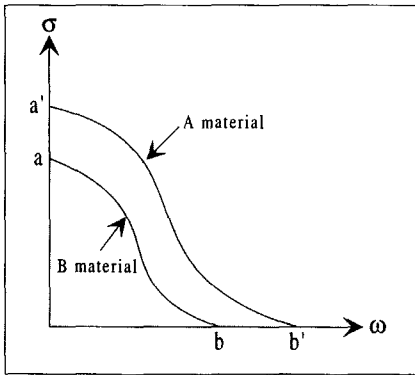


Fig. 8 Schematic illustration of σ - w curve in the two-layer system with different fracture energy values

Fig. 9는 2개로 적층한 복합구조와 그 적층구조를 구성하는 단층재료들간의 P-CMOD곡선을 비교하여 나타낸 것으로 H-L과 L-H 복합구조의

곡선 초기구배는 H와 L재료의 구배를 산술적으로 평균한 값보다 크게 산출되었다. 그러나 L-H 순으로 적층한 구조에서 하중 극대값은 그림과 같이 H-L로 적층한 경우보다 높은 값을 나타내고 있는데, 이에 대한 이유는 L-H로 적층하였을 경우에 강성이 높은 재료가 낮은 재료 위에 적층되었으므로 동일한 변위 및 처짐을 유발하기 위해서는 보다 높은 하중치가 필요하기 때문에 크게 나타난 것으로 판단된다.

본 연구는 복합재료의 구성재료를 효율적으로 배열하므로써 강도증진 효과를 기대할 수 있음을 제시하고 있다.

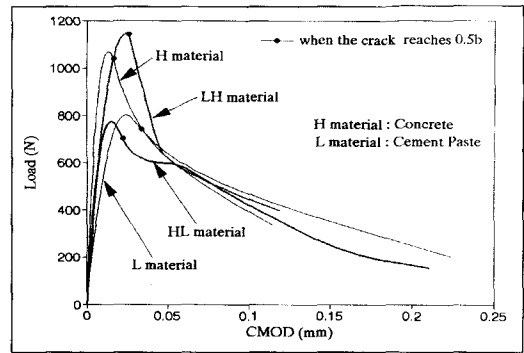


Fig. 9 Comparison of numerical results between H-L sequence and L-H sequence in the two-layer system

6. 결론

2개층 이상 결합한 복합구조에 대해 비선형과 파괴역학을 이용하여 해석한 결과와 실험결과의 비교·분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 간접인장시험을 통해 구한 인장강도값보다는 탄성계수, 임계균열선단개구변위 및 임계응력 확대계수를 이용하여 산출한 이론적 인장강도값이 하중-변위곡선을 시뮬레이션하는데 있어서 실제에 보다 유사하게 접근하였다.

2) 제안한 이론식을 이용하여 파괴진행방향으로 적층한 복합구조물의 파괴거동을 시뮬레이션할 수 있으며 선형파괴역학 개념을 이용한 복합구조물해석은 실제의 거동보다 과소 평가되었다.

3) 파괴진행모드 방향으로 적층된 복합구조에 있어서 파괴에너지와 강도의 상승은 구성재료의 적층순서에 의존하며, 구조물의 목적에 부합하도록 구성재료들을 적절히 배열하므로써 구조물의 취성 혹은 연성을 상승시킬 수 있다.

참고문헌

1. 김상철, "콘크리트 복합체의 비선형파괴해석", 콘크리트학회지, 제9권4호, 1997년 8월, pp.187~196.
2. Ziegeldorf, S., "Phenomenological Aspects of the Fracture of Concrete", *Fracture Mechanics of Concrete*, 1983, pp.31~41.
3. Karihaloo, B.L., and Nallathambi, "Notched Beam Test : Mode I Fracture Toughness", *Fracture Test Methods for Concrete*, RILEM 89-FMT, 1991, pp.1~86.
4. Kennedy, J.W., and Hudson, W.R., "Application of the Indirect Tensile Test to Stabilized Materials", *Highway Research Record 235*, Washington D.C., 1968, pp.36~48.
5. Luong, M.P., "Tensile and Shear Strength of Concrete and Rock", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 35, 1990, pp.127~135.
6. Wright, J.E., "Comments on an Indirect Test on Concrete Cylinders", *Magazine of Concrete Research* 7, 1955, pp.87~96.
7. Hordijk, D.A., Vanmier, J.M., and Reinhardt, H.W., "Material Properties", *Fracture Mechanics of Concrete Structure*, 90-FMA Fracture Mechanics to Concrete-Application RILEM, 1987, pp.67~127.
8. Liaw, C.J., "Effects of Temperature on the Fracture Behavior of Early Aged Concrete Pavement and Asphalt Concrete Overlay", Master Thesis, The Ohio State University, 1992.
9. Elice, M., and Planas, J., "Size Effect and Experimental Validation of Fracture Models", *NATO Advanced Research Workshop*, Northwestern University, Evanston, Illinois, July 1990.

요 약

본 연구는 시멘트를 기초로 하는 준 취성재료를 2개 이상 결합시킨 복합구조체의 파괴거동을 시뮬레이션 하는 데 그 목적이 있다. 이를 위해 작용하중방향에 직각으로 콘크리트와 시멘트를 적층하여 시편을 제작하였고, 비선형파괴해석에서 사용되는 각 구성재료별 파괴계수들을 구하기 위해 콘크리트와 시멘트 각각에 대해 3점휨시험 및 간접인장강도시험을 실시하였다. 시험을 통해 산정한 계수들을 도출한 이론식에 적용하여 복합체로 제작한 시편의 실험 결과치와 비교한 결과, 가상균열이론에 입각한 이론치와 실험결과치는 거의 유사한 경향을 나타내었다. 또한, 파괴에너지와 강도의 향상은 복합체를 구성하는 구성재료의 적층순서에 크게 의존하는 것으로 나타났다. 따라서 구조물의 목적에 맞게 복합체를 적절히 배열하므로써 구조물의 취성과 연성을 상승시킬 수 있음을 본 연구를 통해 알 수 있었다.

(접수일자 : 1998. 7. 21)