폴리머침투콘크리트 휨부재의 비선형 파괴해석
Nonlinear Fracture Analysis of Polymer-Impregnated Concrete Flexural Members

변근주*, ○ 이상민**, 유동우***, 김태진****
Byun, Keun-Joo Lee, Sang-Min You, Dong-Woo Kim, Tae-Jin

ABSTRACT

The objective of this study is to develop analytical techniques of polymer-impregnated concrete flexural members for its proper applications. Crystalline methyl methacrylate(MMA) is chosen as a monomer of polymer impregnants. On the basis of experimental results of this study, a model for fracture analysis of flexural members, fracture toughness, fracture energy, critical crack width, and tension softening relations near crack tip are formulated in terms of member depth, initial notch length and the flexural strength of normal concrete.

The structural analysis procedure and the finite element computer program developed in the study are applicable to evaluate elastic behavior, ultimate strength, and tension softening behavior of MMA type PIC structural members subject to various loading conditions. It is concluded that the developed structural analysis procedure and the finite element computer program are applicable to analysis and design of in-situ and precast PIC structural members.

1. 서론

폴리머-콘크리트 복합체는 제조특성에 따라서 폴리머시멘트콘크리트(PCC), 폴리머침투콘크리트(PIC) 및 폴리머콘크리트(PC)의 3분야로 분류된다. 이중 폴리머침투콘크리트는 표면으로부터 폴리머침투제를 침투시킨 후 중합과정을 거쳐 제조되므로 제조공정과 제조장비가 간단하고 역학적 특성, 인성, 내구성 및 내화학성이 가장 우수한 것으로 알려져 있다. 지금까지 이 분야에 관한 많은 연구가 진행되어 왔으나, 아직도 폴리머침투콘크리트 구조부재의 설계이론 및 해석모형이 확립되어 있지 않기 때문에 응용에 제한을 받고 있는 실정이다.

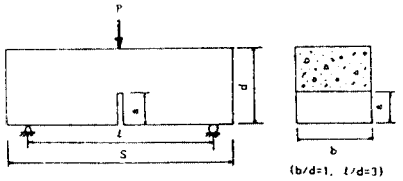
일반적으로 폴리머침투콘크리트 구조물의 하중단계별 거동은 재료내부에 형성된 미세균열의 누적, 연결 및 전파에 의하여 고차의 비선형성을 보이므로 기존의 해석모형으로는 폴리머침투콘크리트 구조부재 내부에 발생한 미세균열영역의 응력분포, 균열전파특성, 균열선단의 응력집중에 관한 예측이 곤란하며, 거대구조물의 경우에는 부재의 크기효과가 반영되지 못하므로 실제 거동을 과대 평가하게 된다. 최근 이러한 문제를 해결하기 위하여 콘크리트구조물의 해석에 에너지평형개념에 근거한 비선형 파괴역학이 도입되고 있다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 MMA계 폴리머침투콘크리트를 대상으로 재료의 파괴인성, 파괴에너지와 휨부재의 파괴거동을 실험적으로 구명한 후, 폴리머침투콘크리트 휨부재의 탄성거동, 극한거동, 인장연화거동을 일괄적으로 해석할 수 있는 해석과정과 비선형구조해석 프로그램을 개발하는데 연구의 목적이 있다.

* 정회원 연세대학교 토목공학과 교수
** 정회원 쌍용중앙연구소 선임연구원
*** 정회원 연세대학원 토목공학과 박사과정
**** 정회원 연세대학원 토목공학과 석사과정

2. 시편제작 및 실험방법

본 연구에서는 폴리머침투콘크리트 휨부재의 파괴특성에 미치는 부재의 크기효과를 평가하기 위하여 보시편의 지간/깊이(ℓ/d)

비는 3, 폭/깊이(b/d)비는 1로 고정시킨 상태에서 시편깊이를 7.5cm, 10cm, 15cm로 변화시켜 보시편을 제작하였다. 보시편의 제작에 사용한 보통콘크리트의 배합은 굵은골재 최대치수 10mm, W/C비 50%, 잔골재율 52%, 슬럼프 7.5±1cm 이며, 함침기법-열촉매중합법을 적용하여 MMA침투콘크리트를 제조한 후에 초기인공균열/시편깊이(a/d) 비가 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5가 되도록 콘크리트용 절단기를 이용하여 초기인공균열(notch)을 제작하였다. 변위제어방식으로 중앙집중하중을 재하하였고, 임계응력확대계수와 파괴에너지의 산정을 위하여 보시편이 극한하중에 도달한 이후 극한하중의 25~95% 에 대응하는 인장연화구간에서 3~4회의 하중제거 및 재재하하여 하중-처짐곡선과 하중-균열개구변위곡선의 하중이력곡선을 X-Y레코더로 출력하였다. 실험방법은 RILEM 50-FMC의 제안방법을 적용하였으며, 실험시편의 형상 및 실험장치의 구성은 그림 1 및 그림 2와 같다.



b x d x ℓ x S
PIC-A-Series = 15cm x 15cm x 45cm x 55cm
PIC-B-Series = 10cm x 10cm x 30cm x 40cm
PIC-C-Series = 7.5cm x 7.5cm x 22.5cm x 32.5cm
(a/d = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5)

그림 1 실험시편의 형상

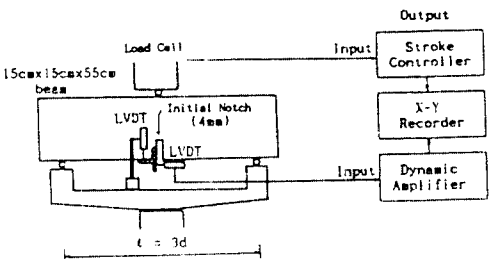


그림 2 실험장치의 구성

3. 폴리머침투콘크리트의 파괴특성

3.1 임계응력확대계수

본 연구에서는 폴리머침투콘크리트의 임계응력확대계수(critical stress intensity factor:K_{Ic})를 산정하기 위하여 초기인공균열선단에 존재하는 파괴진행영역을 고려할 수 있는 이변수파괴모형(TPFM)을 적용하였다. 이변수파괴모형은 실측하중-균열개구변위 거동에 근거하고 있으므로 콘크리트재료 파괴인성 평가에 널리 적용되는 방법으로 식 (1)~(4)에 제시된 바와 같다.

$$K_{Ic} = \frac{1.5\, P_{max}\, \ell \sqrt{\pi\, a_e}}{b\, d^2}\, f(\alpha) \qquad (1)$$

$$a_e = a \left(\frac{C_u}{C_i}\right) \left\{\frac{V_1(\beta)}{V_1(\alpha)}\right\} \qquad (2)$$

$$f(\alpha) = \frac{1.99-\alpha(1-\alpha)(2.15-3.93\alpha+2.7\alpha^2)}{\sqrt{\pi}\,(1+2\alpha)(1-\alpha)^{3/2}} \qquad (3)$$

$$V_1(\alpha) = 0.76 - 2.28\alpha + 3.87\alpha^2 - 2.04\alpha^3 + 0.66/(1-\alpha)^2 \qquad (4)$$

여기서 K_{Ic}는 임계응력확대계수, P_{max}는 작용하중, a_e는 유효균열길이, b, d, ℓ은 시편의 폭, 깊이, 지간, $\alpha=a_e/d$, $\beta=a/d$, C_i는 초기 컴플라이언스, C_u는 극한하중에 대응하는 하중제거 컴플라이언스이며 일반적으로 하중-균열개구변위 곡선의 하강부에서 극한하중의 95%에 대응하는 하중제거 컴플라이언스를 적용한다. 임계응력확대계수와 유효균열폭의 분석결과는 그림 3 및 4와 같으며, 시편의 크기에 무관하게 일반화된 회귀식은 식 (5)~(8)과 같다. 그림 3에 의하면 W/C비 50%, 굵은골재 최대치수 10mm, 압축강도 257kg/cm^{2}인 보통콘크리트의 임계응력확대계수는 2.22~2.48kg/mm$^{3/2}$, MMA계 폴리머침투제의 함유율이 4.9 wt%인 폴리머침투콘크리트는 4.70~6.74kg/mm$^{3/2}$로 보통콘크리트에 비하여 2.12~2.72배 증가하는 것으로 나타났다.

1) 폴리머침투콘크리트 :

$$\left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{rp}}\right)^2 = 0.326d + 0.052 \qquad (5)$$

$$\left(\frac{a_e}{d}\right) = (1.243-0.014d)\left(\frac{a}{d}\right) + 0.017d - 0.125 \qquad (6)$$

2) 보통콘크리트 :

$$\left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{rc}}\right)^2 = 0.169d + 3.600 \qquad (7)$$

$$\left(\frac{a_e}{d}\right) = (1.120-0.004d)\left(\frac{a}{d}\right) + 0.013d - 0.062 \qquad (8)$$

여기서 K_{Ic}는 임계응력확대계수(kg/cm$^{3/2}$), a_e는 유효균열길이(cm), d는 부재깊이(cm), σ_{rp}와 σ_{rc}는 폴리머침투콘크리트와 보통콘크리트의 휨강도(kg/cm^2) 이다. 문헌분석에 의하면 폴리머함유율과 폴리머침투콘크리트의 임계응력확대계수는 선형관계를 갖는 것으로 알려지고 있으므로, 식 (5)와 (7)을 폴리머함유율의 함수로 표현하면 식 (9)와 같다.

$$\left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{rp}}\right)^2=(0.032P+0.169)d-0.724P+3.6 \quad (9)$$

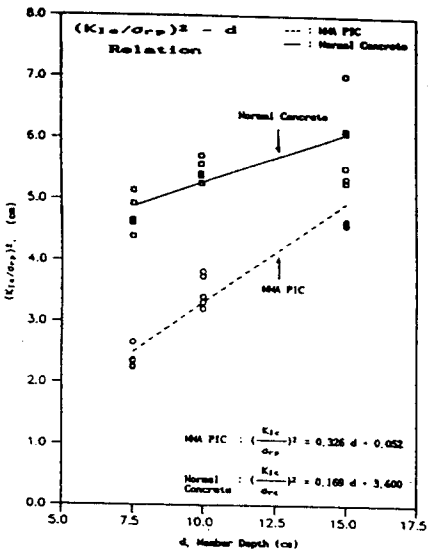


그림 3 임계응력확대계수의 분석결과

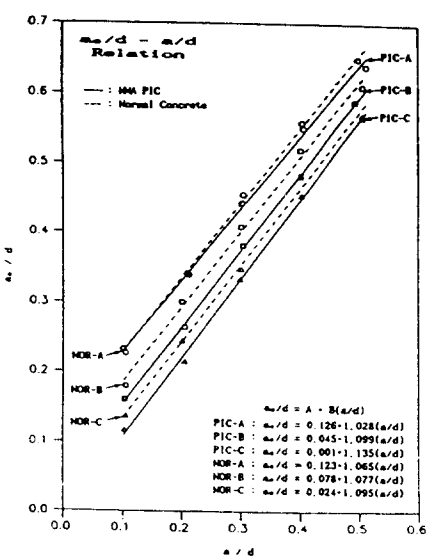


그림 4 유효균열길이의 분석결과

한편 실측된 하중-균열개구변위곡선으로부터 산정된 초기 컴플라이언스 및 하중제거 컴플라이언스를 도시하면 그림 5 및 6과 같다.

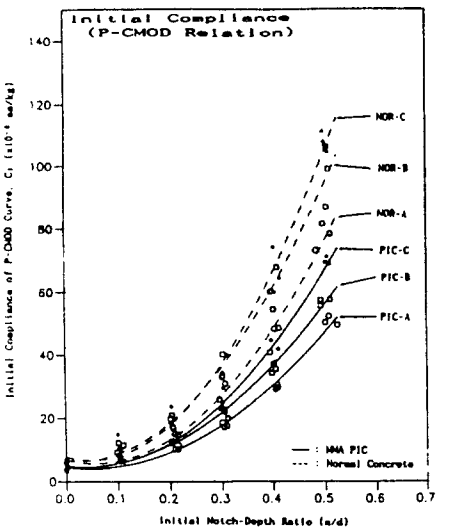


그림 5 초기 컴플라이언스의 분석결과

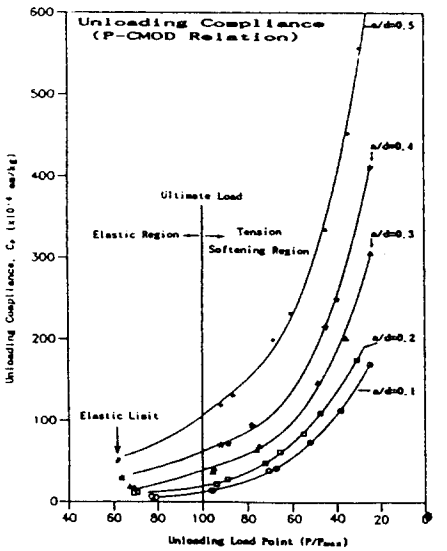


그림 6 하중제거 컴플라이언스의 분석결과

3.2 파괴에너지

균열과 평행한 평면상에서 균열이 단위면적 만큼 진전하는데 필요한 에너지를 파괴에너지라고 정의한다. 따라서 선형탄성재료의 경우 물리적 의미에서 J적분과 일치하지만, 폴리머침투콘크리트와 같은 대부분의 폴리머-콘크리트 복합체는 극한하중 이후의 하중단계에서 파괴진행영역의 변형률국부화

로 소성변형과 에너지의 손실이 발생하고, 이로부터 하중제거효과가 수반되므로 J적분은 개념적으로 의미를 상실한다. 즉 파괴에너지는 안정 균열전파과정에서 발생하는 에너지의 소산을 고려하고 있으므로 J적분 보다는 재료특성의 합리적 평가기준으로 판단된다. 콘크리트재료의 파괴에너지 평가방법으로는 RILEM 50-FMC 추천방법과 村上법이 제안되어 있으나 본 연구에서는 식 (10)과 같이 보시편의 불안정 균열전파 개시점까지 소비된 손실에너지 D_o를 고려할 수 있는 村上법을 적용하였다.

$$G_F = \frac{\int_0^{\delta_c} P\,du - D_o}{b(d-a)} \qquad (10)$$

여기서 δ_c는 파단시의 임계처짐이다.

본 연구에서 수행한 폴리머침투콘크리트 보시편의 파괴실험에 의하면 MMA계 폴리머 침투제가 4.9 wt% 함유된 폴리머침투콘크리트의 파괴에너지는 36.02~57.14kg/m, 보통콘크리트는 6.44~14.29kg/m로 폴리머의 침투로 파괴에너지가 3.57~4.35배 증진되는 것으로 나타났다. 폴리머침투콘크리트의 파괴에너지와 임계균열폭을 휨강도, 초기인공균열비와 부재깊이의 함수로 일반화시키면 그림 7 및 식 (11)~(14)와 같다.

1) 폴리머침투콘크리트 :

$$\frac{W_c\,\sigma_{rp}}{G_F} = 2.376\,d - 7.740 \qquad (11)$$

$$\frac{G_F}{\sigma_{rp}} = 0.001\{8.63-0.21d-(4.41-0.03d)(\frac{a}{d})\} \qquad (12)$$

2) 보통콘크리트 :

$$\frac{W_c\,\sigma_{rp}}{G_F} = 2.848\,d - 8.998 \qquad (13)$$

$$\frac{G_F}{\sigma_{rp}} = 0.001\{5.674-0.15d-(3.00-0.02d)(\frac{a}{d})\} \qquad (14)$$

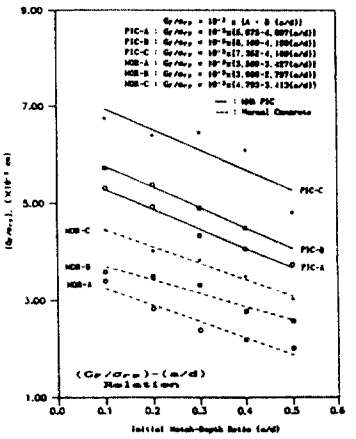


그림 7 파괴에너지(G_F/σ_{rp})의 분석결과

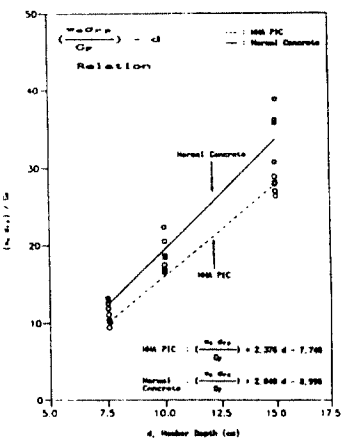


그림 8 임계균열폭의 분석결과

3.3 인장연화모형

폴리머침투콘크리트의 인장연화모형을 정식화하기 위하여 모형보의 하중-균열개구변위곡선중 인장연화 구간만을 각각 최대값으로 나누어 그림 9와 같이 일반화시켰다. 식 (15)는 그림 9에 도시된 일반화된 하중-균열개구변위관계를 상관관계가 가장 높은 5차 곡선으로 회귀분석한 결과이다.

$$\frac{\sigma_{ri}}{\sigma_{rp}} = 1+A(\frac{W_i}{W_c})+B(\frac{W_i}{W_c})^2+C(\frac{W_i}{W_c})^3+D(\frac{W_i}{W_c})^4+E(\frac{W_i}{W_c})^5 \qquad (15)$$

여기서 σ_{rp}는 폴리머침투콘크리트의 휨강도 (kg/cm^2)이며, σ_{ri}는 임의 균열폭에 대응하

는 균열결합응력(kg/cm²), wc는 임계균열폭(cm), wi는 σri에 대응되는 균열폭(cm)이다. 폴리머침투콘크리트의 경우에는 A=-3.6983, B=6.8088, C=-6.3326, D=2.1478, E=-0.0665 이며, 보통콘크리트의 경우에는 A=-4.4730, B=10.3547, C=-12.5083, D= 7.0374, E=-1.4169 의 회귀곡선 상수를 적용한다. 식 (15)는 고차의 비선형 함수이므로 이를 유한요소해석에 적용할 경우 균열진전시 분리절점에서 형성된 이산화방정식의 해를 산정하기 위해서는 수렴조건이 만족될 때 까지 반복계산 과정이 요구된다. 그러나 분리절점의 균열결합력과 균열폭과의 관계가 선형인 경우에는 이산화방정식의 해를 산정하는데 반복계산과정이 필요하지 않으므로 본 연구에서는 식 (15)를 식 (16), (17)과 같이 3개의 직선으로 구성되는 인장연화모형으로 근사화시킨다.

$$G_F = 1/2\ (\sigma_{rp}w_1+\sigma_{r1}w_2-\sigma_{r2}w_1+\sigma_{r2}w_c) \quad (16)$$

$$\sigma_{ri} = \sigma_{rp}-(\sigma_{rp}-\sigma_{r1})\left(\frac{w_i}{w_1}\right), \qquad 0 \le w_i < w_1$$

$$\sigma_{ri} = \sigma_{r1}-(\sigma_{r1}-\sigma_{r2})\left(\frac{w_i-w_1}{w_2-w_1}\right), \qquad w_1 \le w_i < w_2$$

$$\sigma_{ri} = \sigma_{r2}\left(\frac{w_c-w_i}{w_c-w_2}\right), \qquad w_2 \le w_i < w_c \quad (17)$$

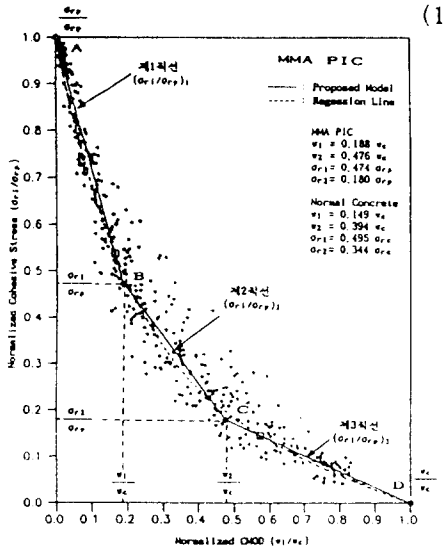


그림 9 폴리머침투콘크리트의 인장연화모형

4. 폴리머침투콘크리트의 비선형 파괴해석

본 연구에서는 폴리머침투콘크리트 휨부재의 비선형 파괴해석을 수행하기 위하여 유한요소법을 적용하였으며, 균열전파는 절점분리로 표현하였다. 대상구조의 탄성거동 해석에는 하중증분법과 반복계산법을 조합하여 사용하고, 인장연화거동 해석에는 가상균열모형과 3개 직선으로 구성되는 인장연화모형을 적용하여 균열진전 단계별로 파괴거동을 해석한다. 유한요소분할은 일정변형 삼각형요소를 이용하였다.

4.1 이산화방정식

초기인공균열을 갖고 있는 경우 균열선단의 파괴진행영역 내에 있는 임의 절점 i에 3개의 직선으로 구성되는 인장연화모형을 적용하여 산정된 균열결합력 Qi가 작용할 때, 분리절점에서 발생한 i점의 절점변위를 wi로 정의한다. 이때 n개의 분리절점 1~n까지의 균열폭 w1~wn에 대한 이산화방정식의 기본식은 식 (18)로 표현된다.

$$w_i = \sum_{j=1}^{n} K_{ij} Q_i + C_i P \quad (18)$$

여기서 wi는 절점 i에서의 균열폭, Qi는 절점 i에서의 등가 균열결합력, Kij는 절점 j에 단위하중이 작용할 때 절점 i에서 발생하는 균열폭, Ci는 작용하중으로 단위하중이 작용할 때 절점 i에서의 균열폭, P는 작용하중이다.

4.2 균열전파 개시상태

초기인공균열의 유무에 따라 균열전파개시상태에 대응하는 휨부재의 극한하중은 식 (19)와 (20)을 이용하여 산정 가능하다.

1) 초기인공균열이 없는 휨부재의 경우:

$$P_{max} = \frac{\sigma_{rp}\, b\, d^2}{1.5\, \ell} \quad (19)$$

2) 초기인공균열이 있는 휨부재의 경우:

$$P_{max} = \frac{K_{Ic}\, b\, d^2}{1.5\, \ell \sqrt{a_e}\, f(a_e/d)} \quad (20)$$

여기서 Pmax는 대상구조의 극한하중, ℓ, b, d는 부재의 지간, 폭과 깊이, σrp는 휨인장강도, f(ae/d)는 식 (3)을 이용하여 계산하며, 유효균열길이 ae는 식 (6)을 이용한다.

5. 파괴해석 결과

본 연구에서 개발된 폴리머침투콘크리트의 인장연화모형, 휨부재의 균열전파 해석과정, 비선형 파괴해석프로그램을 검증하기 위하여 실험결과와 해석결과를 비교하였다.

해석대상구조의 요소분할 예는 그림 10과 같으며, 해석결과는 그림 11 및 12와 같다. 분석결과로 부터 본 연구의 해석결과는 탄성거동, 극한거동 및 인장연화거동에 대하여 모두 실측결과를 잘 따르는 것으로 나타났다. 그림 11와 12는 부재깊이 d=15cm, 보통콘크리트의 압축강도 σ_{CK}=257kg/cm^2, MMA계 폴리머함유율 P=4.9wt%, a/d=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5를 입력한 결과이며, 프로그램 내에서 자동 계산된 폴리머침투콘크리트의 압축강도 σ_{cp}=654kg/cm^2, 탄성계수 E_{cp}=4.24x10^{5}kg/cm^2, 임계응력확대계수 K_{Ic}=214.48kg/cm$^{3/2}$, a/d에 대응되는 파괴에너지 G_F는 각각 0.529, 0.490, 0.452, 0.414, 0.376, 0.338kg/cm 이다.

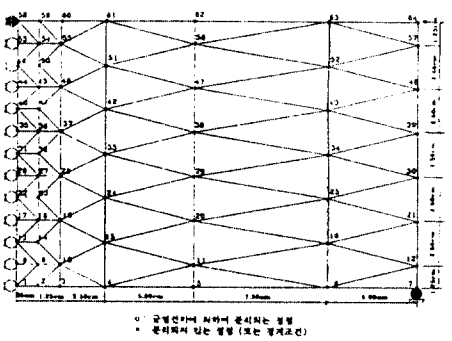


그림 10 요소분할 예

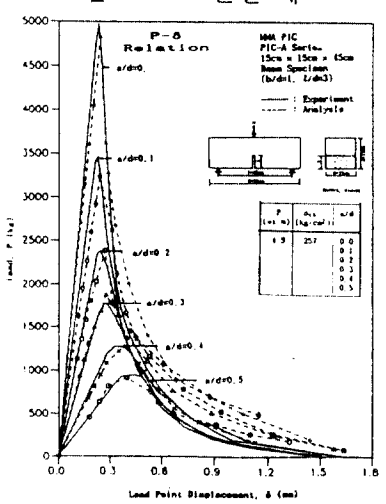


그림 11 하중-처짐관계

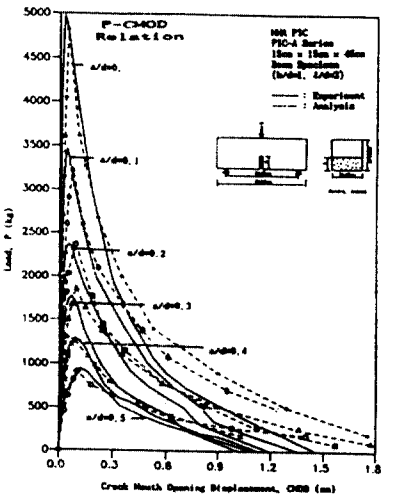


그림 12 하중-균열개구변위관계

6. 결론

본 연구에서는 폴리머침투콘크리트의 임계응력확대계수, 파괴에너지 및 임계균열폭의 산정공식을 정식화 하였으며, 이들을 변수로 하여 휨부재의 탄성거동, 극한거동 및 인장연화거동을 해석할 수 있는 비선형 파괴해석 프로그램을 개발하였다. 개발된 인장연화모형, 파괴해석과정 및 해석프로그램은 실험결과를 잘 반영하고 있으므로 폴리머침투콘크리트 휨부재의 설계 및 해석에 적용 가능한 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Auskern, A.B. and Horn, W.H., "Fracture Energy and Strength of Polymer Impregnated Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.4, No.5, 1974, pp.785-795.

2. Petersson, P., Crack Growth and Development of Fracture Zones in Plain Concrete and Similar Materials, *Report TVBM - 1006*, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, 1981, pp.1-169.

3. Jeng, Y.S. and Shah, S.P., "A Two Parameter Fracture Model for Concrete", *Journal of Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol.111, No.10, 1985, pp.1227-1241.