

폴리머 침투콘크리트의 재료특성과 휨부재의 비선형 파괴해석

Material Properties of Polymer-Impregnated Concrete and Nonlinear Fracture Analysis of Flexural Members

변근주*

이상민**

최홍식***

노병철****

Byun, Keun Joo Lee, Sang Min Choi, Hong Shik Lho, Byeong Cheol

요 약

폴리머 침투콘크리트는 경화된 보통 콘크리트에 폴리머 침투제를 침투시켜 제조되는 신소재의 폴리머-콘크리트 복합체이다. 본 연구는 아크릴계 열가소성수지를 이용한 폴리머 침투콘크리트를 개발하고 폴리머 침투콘크리트 휨부재의 기동평가를 위한 재료모델, 구조해석 과정과 구조해석 프로그램을 개발하는데 목적이 있다.

본 연구는 크게 두 부분으로 구성된다. 첫번째 단계에서는 결정성 고분자모노머인 methyl methacrylate(MMA)를 대상으로 침투성, 반응성, 열적 안정성 및 물성개선 효과를 종합적으로 분석하여 폴리머 침투제의 구성비와 제조공정을 정립하고, 본 연구의 실험자료로 부터 폴리머 침투콘크리트의 제 강도특성, 파괴인성, 파괴에너지, 응력-변형률 관계 및 인장연화 관계를 보통 콘크리트의 압축강도와 휨강도, 폴리머 함유율, 부재깊이, 초기 인공균열깊이 등의 함수로 각각 실험공식을 도출한다.

두번째 단계에서는 MMA계 폴리머 침투콘크리트 구조부재의 하중단계별 탄성거동, 극한거동 및 인장연화거동을 해석하기 위한 구조해석 과정과 구조해석 프로그램을 개발하고, 연구결과의 타당성과 적용성을 입증하기 위하여 폴리머 침투콘크리트와 보통 콘크리트 모형의 하중단계별 실측 균열거동과 비교 분석한다. 본 연구로 부터 개발된 폴리머 침투콘크리트의 제조공정, 제 실험공식 및 구조해석 프로그램은 실측 거동을 잘 반영하고 있으므로 제한된 범위내에서 MMA계 폴리머 침투콘크리트 구조부재의 제조, 물성평가 및 거동해석에 적용 가능한 것으로 사료된다.

Abstract

The objective of this study is to develop polymer-impregnated concrete(PIC), which is a newly developed composite material made by impregnating polymer impregnants into hardened normal concrete, and to develop analytical techniques for its proper applications. Crystalline methyl methacrylate(MMA) is chosen as a monomer of polymer impregnants. The compositions of polymer impregnants and producing processes are developed by analyzing the effects of penetration, polymerization, thermal safety, and strengthening characteristics. On the basis of experimental results of this study, various strength characteristics and stress-strain constitutive relations are formulated in terms of the compressive strength of normal concrete and the polymer loadings, which can be applied for analysis and design of PIC members. In order to provide a model for fracture analysis of flexural members, fracture toughness, fracture energy, critical

* 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수, 공학박사
** 정회원, 쌍용양회 중앙연구소 선임연구원, 공학박사
*** 정회원, 충청전문대학 토목공학과 조교수, 공학박사
**** 정회원, 연세대학교 토목공학과, 박사과정

• 본 논문에 대한 토의를 1994년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 1994년 8월호에 토의회담을 게재하겠습니다.

crack width, and tension softening relations near crack tip are also formulated in terms of member depth, initial notch depth, 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. The accuracy and effectiveness of the developed computer program is examined by comparing the analytical results with the experimental results. Therefore, 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.

keywords : Polymer-Impregnated Concrete(PIC), Methymethacrylate(MMA), stress-strain relation, three-line tension softening model, fracture energy, stress intensity factor, fictitious crack model, initial notched beam, numerical analysis.

.....

1. 서론

폴리머 침투콘크리트(Polymer-Impregnated Concrete : PIC)는 고분자 폴리머 입자가 콘크리트의 내부공극을 채우고 있으므로 보통 콘크리트에 비하여 결합재의 강성과 밀도가 증가되고, 내부공극 및 초기결합부가 감소하므로 골재와 결합재의 부착특성이 크게 향상된다⁽¹⁾. 따라서 폴리머 침투콘크리트는 공극에 존재하는 폴리머입자의 영향으로 보통콘크리트에 비하여 미세균열의 성장과 전파가 억제되며 균열저항성이 개선되므로 프리캐스트 구조부재 및 노후 콘크리트의 강도증진에 효과적인 구조재료로 알려져 있다⁽²⁾.

그러나 폴리머 침투콘크리트의 재하단계별 구조거동은 재료내부에 형성된 폴리머 입자의 분포 및 결합조직의 영향으로 보통 콘크리트와는 매우 상이하므로 재료특성을 구조거동의 해석에 반영하기가 용이하지 않다. 따라서 개발된 신소재 콘크리트가 구조재료로 보다 적극적으로 활용되기

위해서는 개선된 재료특성이 반영된 일반화된 재료모델과 설계기준이 실험 및 해석적 방법을 통하여 정립되고 검증되어야 한다.

이러한 연구의 필요성으로 부터 본 연구에서는 MMA계 폴리머 침투콘크리트를 대상으로 극한하중 이후 부재가 완전 파단될 때까지의 재하단계별 균열거동을 해석할 수 있는 응력-변형을 관계와 인장연화 관계를 일반화하고, 휨부재의 탄성거동, 극한거동, 인장연화 거동을 일괄적으로 해석할 수 있는 비선형 파괴해석 프로그램을 개발하고자 한다.

2. 재료특성 평가실험

2.1 실험시편의 제작

2.1.1 사용재료

시편제작에 사용한 시멘트는 비중 3.15의 보통 포틀랜드시멘트이며, 잔골재는 한강산, 굵은골재

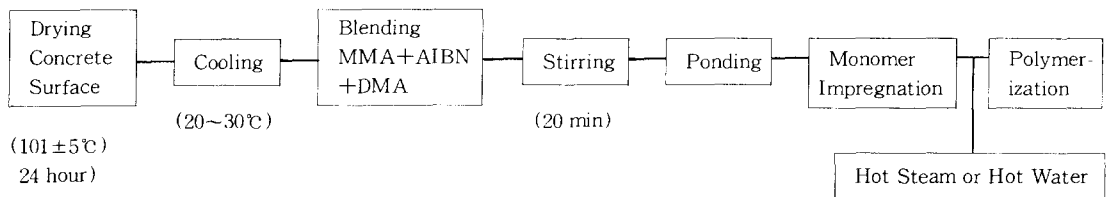


Fig. 1 Impregnation and Polymerization Process of PIC

는 골재번호 #8로 표준입도 내에 있는 부순물이다. 폴리머 침투제에 사용한 모노머는 결정성 아크릴수지인 공업용 MMA이며, 반응개시제로는 질소화합물계의 AIBN, 촉진제로는 액상의 DMA를 사용하였다.

2.1.2 보통 콘크리트 시편의 제작 및 양생

실험시편의 제작에 사용한 보통 콘크리트의 배합은 Table 1과 같다. 콘크리트의 타설완료 후 1일간 대기양생을 실시하였고, 이후 폴리머 침투제의 침투직전까지 약180일 수중양생을 실시하였다. 원주형시편은 15 × 30cm, 보시편은 15cm × 15cm × 45cm(A Type), 10cm × 10cm × 30cm(B Type), 7.5cm × 7.5cm × 22.5cm(C Type)의 3종류로 제작하였다. 굵은 골재의 최대치수를 10mm로 선정하고 슬럼프치 7.5cm를 얻기 위하여 보통보다 큰 52%의 s/a가 사용되었다.

Table 1 Mix proportion of normal concrete

W/C (%)	Water kg/m ³	Cement kg/m ³	Sand kg/m ³	Gravel kg/m ³	s/a %	Slump cm
50	244	400	878	809	52	7.5±1

2.1.3 폴리머 침투콘크리트의 제조

폴리머 침투콘크리트의 제조과정은 Fig. 1에 도시된 바와 같이 함침기법-열촉매중합법을 적용한다⁽³⁾.

2.1.4 인공균열

보시편의 파괴실험을 위하여 폴리머 침투콘크리트의 제조 후, 콘크리트용 절단기를 이용하여 인공균열을 만들었다. 초기 인공균열은 폭 4mm, 인공균열 깊이/시편 깊이 비는 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5의 5가지로 변화시켰다. 균열폭 4mm는 절단기의 틈날의 규격에 맞추어 정한 것이다.

2.2 실험방법

폴리머 침투콘크리트 원주형 시편의 일축압축 실험은 KS F 2405에 준하였으며, 초기인공균열을 갖는 보시편의 파괴실험은 KS F 2408과 RILEM

50-FMC위원회의 실험방법을 적용하였다. 파괴 실험은 하중재하 개시 후, 30~60초이내에 극한하중에 도달하도록 변위 제어속도를 조절하였으며, 극한하중에 도달한 후에는 시험기의 servo-valve가 갖는 feed-back기능을 이용하여 0.4~0.5 mm/min의 변위제어속도로 하중을 재하하였다.

3. 응력-변형률 구성 모델의 공식화

3.1 재료특성의 분석

3.1.1 일축압축강도 특성

폴리머 침투콘크리트는 보통 콘크리트의 공극으로 폴리머 침투제를 침투시켜 제조되므로 폴리머 함유율에 따라 압축강도가 크게 변화한다^(4,5). Fig. 2는 폴리머 함유율의 변화에 따른 폴리머 침투콘크리트의 강도증가비를 분석한 것으로 폴리머 함유율이 증가함에 따라 압축강도의 개선율이 크게 증가됨을 알 수 있다. 실험자료로부터 폴리머 함유율과 압축강도비의 상관관계를 회귀분석하면 식 (1)과 같다.

$$\frac{\sigma_{cp}}{\sigma_{ck}} = 1.0 - 0.013P + 0.067P^2 \quad (1)$$

여기서, σ_{cp} 와 σ_{ck} 는 폴리머 침투콘크리트와 보통 콘크리트의 압축강도(kg/cm²), P는 폴리머 함유율(wt%)로 폴리머 중합반응 후, 보통 콘크리트 중량에 대한 폴리머 침투콘크리트 중량의 증가비를 의미한다. 따라서 폴리머 함유율이 0%라는 것은 보통 콘크리트를 의미한다.

3.1.2 응력-변형률 특성

폴리머 함유율이 상이한 폴리머 침투콘크리트 원주형 시편의 일축압축실험으로부터 도출한 응력-변형률 곡선은 Fig. 3과 같다. Fig. 3에 의하면 W/C 비가 50%인 보통 콘크리트에 폴리머 침투제를 완전침투(함유율 5.5 wt%) 시킬 경우, 응력-변형률 곡선의 탄성한계가 압축강도의 75%까지 증가하며, 극한강도에 대응하는 변형률도 보통 콘크리트의 0.002에 비하여 약 40%(0.0028) 증가하는 것으로 나타났다.

3.1.3 탄성계수와 포아슨비

응력-변형률 곡선에서 극한강도의 50%에 대응되는 항선탄성계수를 도출하면 Fig. 4와 같다. 분석된 실험자료로부터 항선탄성계수의 실험공식을 폴리머 함유율의 함수로 공식화하면 식 (2)와 같다.

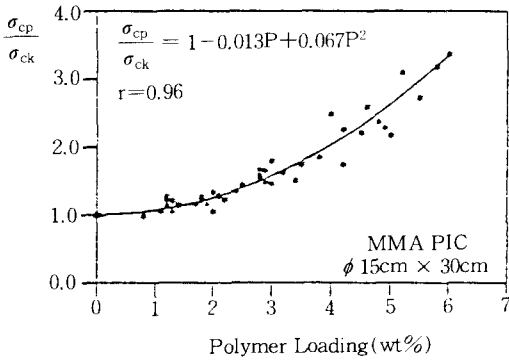


Fig. 2 Compressive strength of MMA PIC

여기서 E_{cp} 는 폴리머 침투콘크리트의 탄성계수 (kg/cm^2), E_c 는 보통 콘크리트의 탄성계수 (kg/cm^2)이다.

한편 응력-변형률 곡선의 탄성범위 내에서 재료의 포아슨비를 분석하면 보통 콘크리트의 포아슨비(ν_c)는 평균 0.21, 폴리머 함유율이 5.5wt%인 폴리머 침투콘크리트의 포아슨비(ν_p)는 평균 0.28이다. Fig. 3으로 부터 포아슨비의 실험공식을 도출하면 식 (3)과 같다.

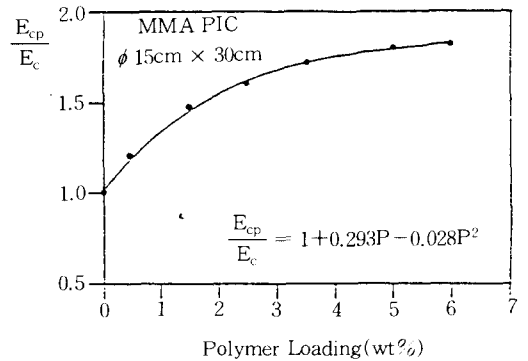


Fig. 4 Modulus of elasticity of MMA PIC

$$\nu_p = \nu_c(1 + 0.062P) \quad (3)$$

3.2 응력-변형률 관계의 공식화

본 연구에서는 폴리머 침투콘크리트의 응력-변형률 관계를 보통 콘크리트와 동일한 형태로 공식화하기 위하여 보통 콘크리트에 대한 기존의 응력-변형률 모델 중 엄밀성이 널리 인정되고 있는 Saenz의 모델을 적용하고자 한다.

Saenz의 모델은 식 (4)와 같다.

$$\sigma_p = \frac{E_{po} \varepsilon_p}{1 + \left(\frac{E_{pi}}{E_{po}} - 2\right) \left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{po}}\right) + \left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{po}}\right)^2} \quad (4)$$

여기서 σ_p 는 폴리머 침투콘크리트의 임의 응력, ε_p 는 σ_p 에 대응되는 변형률이다. 식 (4)에서 변수인 σ_{cp} 는 식 (1)에서 이미 폴리머 함유율의 함수로

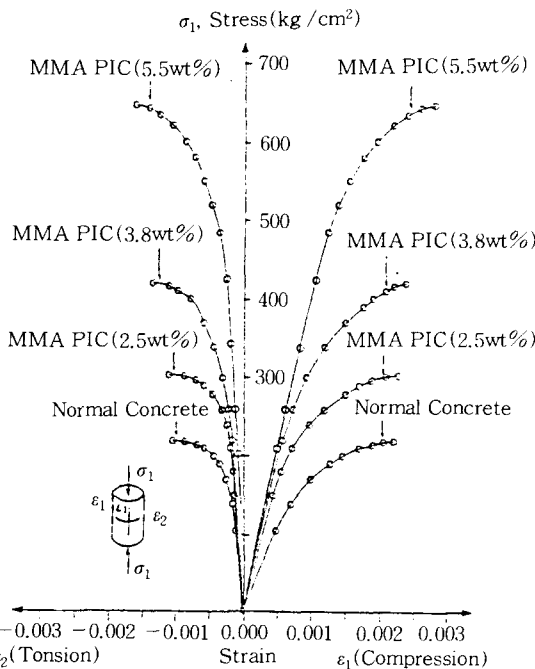


Fig. 3 Stress-strain relation of MMA PIC

$$\frac{E_{cp}}{E_c} = 1 + 0.293P - 0.028P^2 \quad (2)$$

제시되어 있으므로 응력-변형률 관계의 공식화에 사용된 ϵ_{po} , E_{pi}/E_{po} , σ_{cp} , E_{pi} 를 각각 폴리머 함유율의 함수로 표시하면 일반적인 재료모델로 공식화가 가능하다. 따라서 Fig. 3을 이용하여 응력-변형률 관계의 공식화에 필요한 영향변수를 폴리머 함유율의 함수로 회귀분석하였으며, 그 결과는 식 (5), (6)과 같다.

$$\epsilon_{po} = \epsilon_{co}(1 + 0.029P + 0.0085P^2) \quad (5)$$

$$\frac{E_{pi}}{E_{po}} = \frac{E_{ci}}{E_{co}}(1 + 0.186P - 0.039P^2) \quad (6)$$

여기서 $E_{po}(= \sigma_{cp} / \epsilon_{po})$ 는 폴리머 침투콘크리트의 극한 압축강도에 대응하는 항선탄성계수(kg/cm²)이고, E_{ci} 와 $E_{co}(= \sigma_{ck} / \epsilon_{co})$ 는 보통 콘크리트의 초기 접선탄성계수(kg/cm²)와 보통 콘크리트의 극한 압축강도에 대응하는 항선탄성계수이다. 도출된 실험식의 엄밀성을 검증하기 위하여 폴리머 함유율에 따른 폴리머 침투콘크리트의 응력-변형률 관계를 산정하고, 실험자료와 비교 분석한 결과는 Fig. 5와 같다. 분석결과, 제안된 응력-변형률 관계는 실험결과를 잘 반영하므로 폴리머 침투콘크리트 휨부재의 구조해석을 위한 재료모델로 적용 가능한 것으로 판단되나, 제시된 재료모델은 W/C 비 40~60%인 보통 콘크리트에 MMA계 폴리머 침투제를 침투하였을 때를 적용 대상으로 한다.

4. 인장연화모델의 공식화

4.1 파괴인성의 분석

4.1.1 임계응력 확대계수

본 연구에서는 폴리머 침투콘크리트의 파괴인성 평가를 위하여 Jenq-Shah가 제안한 이변수 파괴모델(TPFM)⁽⁶⁾을 적용하였으며, 폴리머 침투콘크리트 보시편의 type별 임계응력 확대계수의 산정결과는 Fig. 6과 같다.

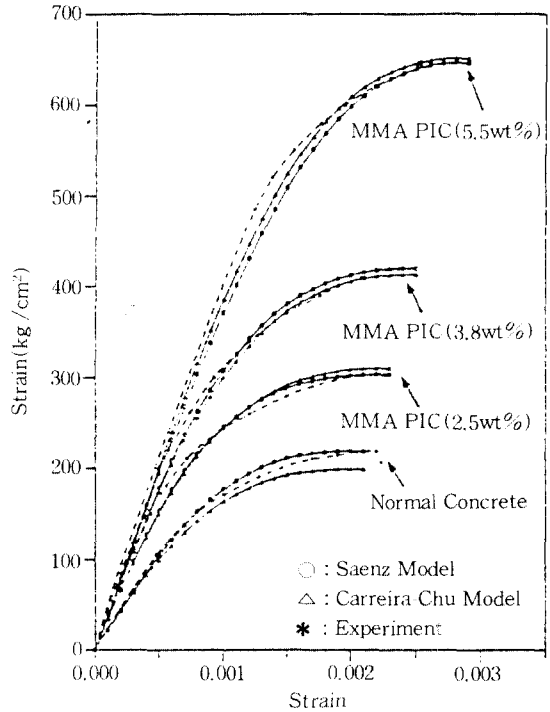


Fig. 5 Verification for proposed stress-strain model of MMA PIC

한편 Fig. 6에 의하면 W/C 비 50%, 굵은골재 최대치수 10mm, 압축강도 257kg/cm²인 보통 콘크리트의 임계응력 확대계수는 2.22~2.48kg/mm^{3/2}이지만, 여기에 MMA계 폴리머 침투제를 4.9wt% 침투시키면 임계응력 확대계수 K_{Ic} 는 4.70~6.74kg/mm^{3/2}(148.6~204.6kg/cm^{3/2})로 보통 콘크리트에 비하여 2.12~2.72배 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 Fig. 6을 이용하여 임계응력 확대계수를 일반화하였으며, 이를 위하여 보시편의 type별로 평균 임계응력 확대계수를 산정하고 이를 휨강도로 나눈 후, $(K_{Ic} / \sigma_{tp})^2$ 과 부재깊이와의 관계를 회귀분석하였다. 회귀분석결과, 도출된 임계응력 확대계수 공식은 식 (7) 및 (8)과 같다. 식 (7)은 폴리머 완전 침투콘크리트를 적용대상으로 하며, 식 (8)은 보통 콘크리트의 경우이다.

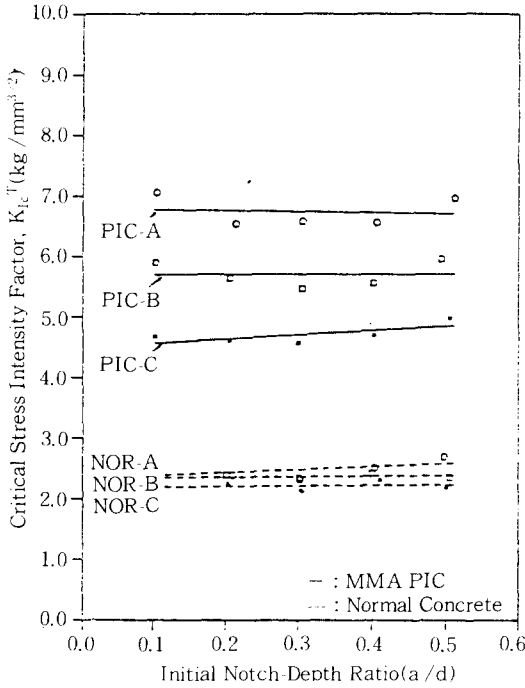


Fig. 6 Critical stress intensity factor of PIC

$$\left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{rp}}\right)^2 = 0.326d + 0.052 : \text{MMA-PIC} \quad (7)$$

$$\left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{rc}}\right)^2 = 0.169d + 3.600 : \text{Normal} \quad (8)$$

여기서 K_{Ic} 는 임계응력 확대계수($\text{kg}/\text{cm}^{3/2}$), σ_{rp} 와 σ_{rc} 는 폴리머 침투콘크리트와 보통 콘크리트의 휨강도(kg/cm^2)이다.

4.1.2 유효 균열깊이

이변수 파괴모델에서는 임계응력 확대계수의 평가시 초기 인공균열 선단에서 안정 균열전파가 진행되는 동안 진전된 미세균열깊이를 고려하고 있다⁽⁶⁾. 본 연구로 부터 도출된 보시편의 type별로 초기 인공균열 깊이와 유효 균열깊이의 관계는 Fig. 7과 같으며, Fig. 7을 이용하여 폴리머 침투콘크리트 보시편의 초기 인공균열 깊이와 유효 균열깊이의 관계를 공식화하면 식 (9)와 같다. 여기서 유효균열은 실험값이 아니고 Jenq-Shah의 이변수파괴 모델에서 제안한 식을 근거로 계산한

것이다.

$$\left(\frac{a_c}{d}\right) = (1.243 - 0.014d)\left(\frac{a}{d}\right) + 0.017d - 0.125 \quad (9)$$

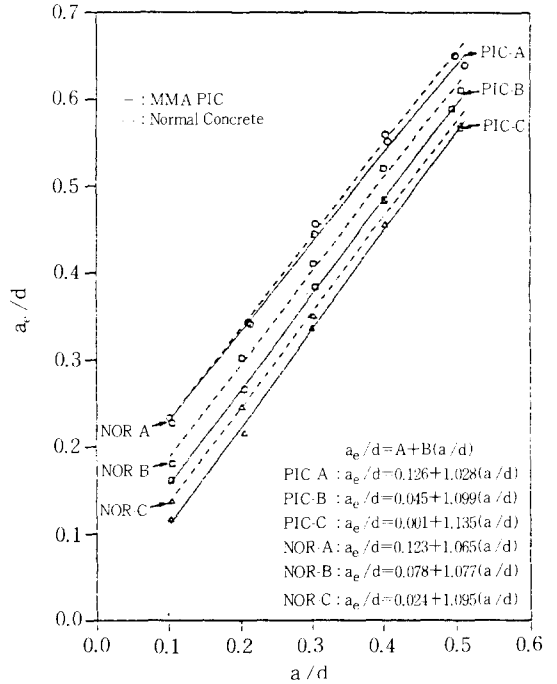


Fig. 7 Effective crack depth of notched beam specimen

4.2 파괴 에너지의 분석

균열과 평행한 평면상에서 균열이 단위면적만큼 진전하는데 필요한 에너지를 파괴 에너지라고 정의한다.⁽⁷⁾

본 연구에서는 보시편의 하중-처짐곡선에서 불안정 균열전파 개시점까지 소비된 손실에너지 D_0 를 고려하고 있는村上범을 폴리머 침투콘크리트의 파괴 에너지 평가에 적용하였다.

본 연구에서 수행한 폴리머 침투콘크리트 보시편의 파괴실험에 의하면 MMA계 폴리머 침투제가 완전함유된 폴리머 침투콘크리트의 파괴 에너지는 $36.02 \sim 57.14 \text{kg}/\text{m}$, 보통 콘크리트는 $6.44 \sim 14.29 \text{kg}/\text{m}$ 의 범위인 것으로 나타났다. 폴리머 침투콘크리트의 파괴 에너지를 재료의 강도, 초기

인공균열비와 부재깊이의 함수로 일반화시키기 위하여 실측된 파괴 에너지를 횡강도로 나눈 값을 초기인공균열비의 함수로 표현하였다. 폴리머 침투콘크리트 보시편의 type별로 분석된 파괴에너지는 Fig. 8과 같다.

본 연구로 부터 도출된 폴리머 완전 침투콘크리트의 파괴 에너지 산정공식은 식 (10)과 같다.

$$\frac{G_F}{\sigma_{rp}} = 0.001[8.63 - 0.21d - (4.41 - 0.03d)\left(\frac{a}{d}\right)] \quad (10)$$

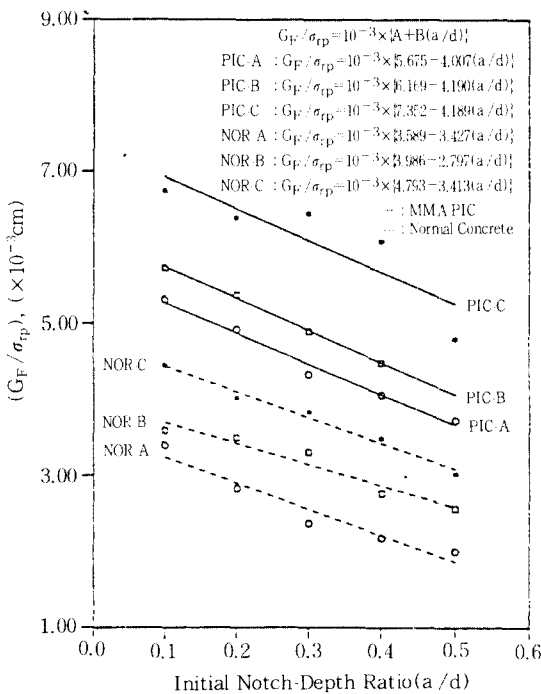


Fig. 8 Generalized fracture energy of MMA PIC

4.3 인장연화 모델의 공식화

일반적으로 콘크리트 재료에 존재하는 미세균열은 실제 균열과는 달리 균열면의 마찰팽창 기동과 골재 맞물림 등에 의하여 어느정도 인장응력을 부담할 수 있는데, 이와 같이 실제 거시균열의 선단에서 미세균열이 전파되는 구간을 파괴진행 영역(fracture process zone)이라고 정의한다. 따라서 구조기동을 엄밀히 평가하기 위해서는 균열선

단의 파괴진행 영역에 대한 모델화가 필수적이며, 본 연구에서는 폴리머 침투콘크리트를 대상으로 극한하중 이후의 파괴거동을 합리적으로 해석할 수 있는 인장연화 모델을 제안하고자 한다.

4.3.1 보시편의 실측 인장연화 관계

폴리머 침투콘크리트의 인장연화 모델을 공식화하기 위하여 본 연구에서 도출한 보시편의 하중-균열 개구변위 곡선 중 인장연화 구간만을 일반화시키면 Fig. 9와 같다. 식 (11)은 Fig. 9를 상관관계가 가장 높은 5차 곡선으로 회귀분석한 결과이다. 회귀곡선식은 보통 콘크리트의 경우에는 96%, 폴리머 침투콘크리트의 경우에는 98%의 높은 상관관계를 나타내었다.

$$\frac{\sigma_{ri}}{\sigma_{rp}} = 1 + A\left(\frac{W_i}{W_c}\right) + B\left(\frac{W_i}{W_c}\right)^2 + C\left(\frac{W_i}{W_c}\right)^3 + D\left(\frac{W_i}{W_c}\right)^4 + E\left(\frac{W_i}{W_c}\right)^5 \quad (11)$$

여기서 σ_{rp} 는 폴리머 침투콘크리트의 횡강도(kg/cm^2)이며, σ_{ri} 는 임의 균열폭에 대응하는 균열 결합응력(kg/cm^2), w_c 는 임계 균열폭(cm), w_i 는 σ_{ri} 에 대응되는 균열폭(cm)이다. 폴리머 침투콘크리트의 경우에는 $A=-3.6983$, $B=6.8088$, $C=-6.3326$, $D=2.1478$, $E=-0.0665$ 이며, 보통 콘크리트의 경우에는 $A=-4.4730$, $B=10.3547$, $C=-12.5083$, $D=7.0374$, $E=-1.4169$ 의 회귀곡선 상수를 적용한다.

4.3.2 인장연화 모델의 공식화

Fig. 9에서 보는 바와 같이 3개 직선으로 구성된 인장연화 모델은 A, B, C 및 D점을 중심으로 직선성분이 구분되며, 절곡점 B와 C의 좌표에 따라 균열진전에 대응하는 분리절점의 균열 결합력이 변화하므로 해석결과를 지배하는 주요 영향인자이다. 인장연화 모델의 내부면적은 파괴 에너지로 정의되므로 3개의 직선으로 구성된 인장연화 모델은 식 (12) 및 (13)으로 공식화된다.

여기서, Fig. 9는 시편 3종류, 6종류의 a/d , a/d 별 3개의 시편, 극한하중 이후 실험으로 부터

구한 하중-균열개구변위 곡선을 10등분하여 normalize시켜 얻은 총 480개의 점을 도시한 것이다.

$$G_F = \frac{1}{2}(\sigma_{rp} w_1 + \sigma_{r1} w_1 + \sigma_{r2} w_c) \quad (12)$$

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

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

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

(13)

여기서 w_i 는 임의 균열폭(cm), σ_{ri} 는 w_i 에 대응되는 균열 결합응력(kg/cm²), σ_{r1} 과 σ_{r2} 는 3개 직선의 절곡점에 대응하는 균열 결합응력(kg/cm²), w_1 과 w_2 는 σ_{r1} 과 σ_{r2} 에 대응하는 균열폭(cm)이다. 본 연구에서 적용한 3개의 직선으로 구성된 인장연화 모델의 공식화 과정은 다음과 같다.

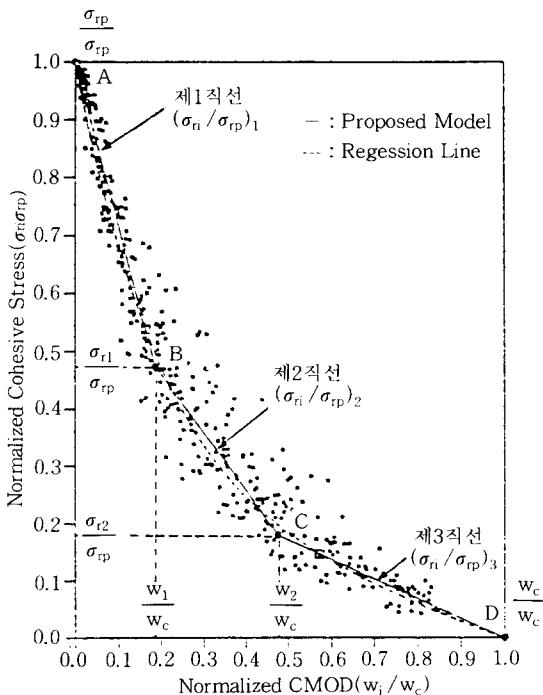


Fig. 9 Generalized tension softening relation of MMA PIC

1) 식 (11)의 회귀곡선식을 적분구간 $[0, 1]$ 에 대하여 적분한 결과와 3개의 직선으로 구성되는 인장연화 모델의 내부면적이 동일하도록 절곡점의 좌표를 결정한다.

2) 이 때 Fig. 9의 전반부 제1직선 $(\sigma_{ri}/\sigma_{rp})_1$ 은 도시된 자료 중 불안정 균열 전과구간($P_{max} \sim 0.45P_{max}$)에 대하여, 후반부 제3직선 $(\sigma_{ri}/\sigma_{rp})_3$ 은 느린 균열 전과구간($0.2P_{max} \sim 0$)에 대하여 각각 선형 회귀분석을 실시한다. 제2직선 $(\sigma_{ri}/\sigma_{rp})_2$ 의 기울기를 제1직선 및 제3직선이 식 (11)과 만나는 점의 좌표로부터 산정한다.

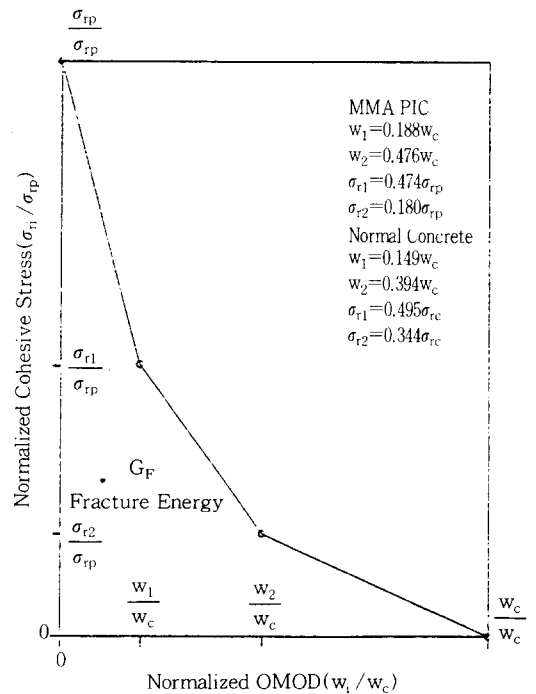


Fig. 10 Proposed three-line tension softening model of MMA PIC

3) 다음 3개의 직선이 이루는 폐합 다각형의 면적이 식 (11)의 적분값과 일치하도록 제2직선의 절곡점을 결정한다. 이러한 과정을 통하여 최종적으로 도출된 폴리머 침투콘크리트 및 보통 콘크리트의 인장연화 모델은 Fig. 10에 제시된 바와 같다.

5. 휨부재의 비선형 파괴해석

5.1 균열전파 모델

콘크리트구조의 파괴거동을 해석하기 위해서는 주 균열의 발생, 성장, 전파과정을 모델화하여야 하며, 비선형 파괴역학 이론에 근거하는 균열모델로는 가상균열 모델(FCM)⁽⁸⁾과 균열대상 모델(CBM)⁽⁹⁾이 있으나 본 연구에서는 가상균열 모델을 적용하기로 한다.

5.2 가상균열 전파의 해석

5.2.1 가상균열의 균열방정식

가상균열 모델을 이용한 균열 전파과정을 추적하기 위해서는 가상균열이 성장해 나감에 따라 절점을 분리하여야 한다. 본 연구에서는 균열경로가 기지인 것으로 가정하여 분리절점의 경계와 균열경로가 일치되도록 분리절점을 미리 배열해 놓은 후, 해석 단계별로 균열경로를 1절점씩 진전시키므로써 새로운 요소경계를 부가시켰다. 따라서 초기 인공균열이 없는 휨부재의 경우에는 부재 하연이 휨인장강도에 도달하면 균열이 전파되기 시작하며, 초기 인공균열이 있는 경우에는 식 (7)의 임계응력 확대계수에 도달하면 균열이 전파되기 시작한다.

균열전파가 시작되면 균열전파 단계별로 분리절점의 변위에 대한 적합조건, 균열선단에 작용하는 힘의 평형조건 및 3개의 직선으로 구성되는 인장연화 구성관계로부터 균열 결합력과 분리절점에 관한 체계방정식이 형성되며, 이를 균열방정식이라고 정의한다.⁽¹⁰⁾ 형성된 체계방정식의 해를 구하면 작용하중과 분리절점의 균열 결합력을 의뢰으로 하는 i 단계에서의 탄성해가 산정된다.

5.2.2 균열전파의 해석과정

초기 인공균열을 갖고 있거나 또는 초기 인공균열이 없는 경우라도 부재의 인장부에서 균열이 진전된 상태를 분리절점을 이용하여 도시하면 Fig. 11과 같다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 균열선단의 파괴진행영역 내에 있는 임의 절점 i 에 3개 직

선으로 구성되는 인장연화 모델을 적용하여 산정된 균열 결합력 Q_i 가 작용할때, 분리절점에서 발생한 절점변위(균열폭)를 w_i 로 정의한다. 이때 분리절점 1~ n 까지의 균열폭 $w_1 \sim w_n$ 는 식 (14)와 같이 n 개의 방정식으로 표현된다.

$$w_i = \sum_{j=1}^n K_{ij} Q_j + C_i P \quad (14)$$

여기서, w_i 는 절점 i 에서의 균열폭, Q_j 는 절점 j 에서의 균열 결합력, K_{ij} 는 절점 j 에 단위하중이 작용할 때 절점 i 에서 발생하는 균열폭, C_i 는 작용하중으로 단위하중이 작용할 때 절점 i 에서의 균열폭, P 는 작용하중이다.

휨부재에서 균열전파가 시작되면 균열선단의 절점이 분리된다. 이때 분리절점에 작용하는 등가 균열 결합력은 인장연화모델에 따르며, 분리절점의 등가균열 결합력을 균열 결합응력의 함수로 표현하면 식 (15)와 같다.^(9, 10)

$$Q_i = a_i b \sigma_{ri} \quad (15)$$

여기서 Q_i 는 등가 균열 결합력, a_i 는 분리절점의 지배면적, b 는 부재폭, σ_{ri} 는 3개 직선으로 구성되는 인장연화 모델에 대응되는 균열 결합응력이다.

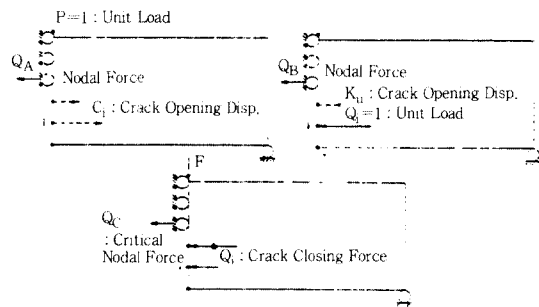


Fig. 11 Crack propagation analysis of initial notched beam specimen

5.3 비선형 파괴해석 과정

본 연구에서 개발한 비선형 파괴해석 과정은 크 게 탄성거동의 해석과 인장연화 거동의 해석으로

구분된다. 탄성거동의 해석에서는 하중중분법과 접선강도법을 이용한 반복계산법을 조합하여 재하단계별로 작용하중에 대응하는 절점변위, 요소의 응력과 변형률을 산정하였다. 인장연화 거동의 해석에서는 가상균열 모델을 적용하였으며, 균열진파는 절점분리로 표현하였다. 본 연구에서 폴리머 침투콘크리트 휨부재의 비선형 파괴해석을 위하여 적용한 해석과정은 다음과 같다.

- 1) 단계 1 : 입력자료
- 2) 단계 2 : 강성행렬의 구성
- 3) 단계 3 : 극한하중의 산정
- 4) 단계 4 : 휨부재의 탄성거동 해석
- 5) 단계 5 : 휨부재의 인장연화 거동 해석

6. 폴리머 침투콘크리트 휨부재의 파괴해석

6.1 대상구조

본 연구에서 도출한 일반화된 응력-변형률 관계, 3개의 직선으로 구성된 인장연화 모델 및 해석 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 휨부재의 파괴해석을 수행한다. 해석 대상구조는 Fig. 12와 같은 MMA PIC 휨부재이다.

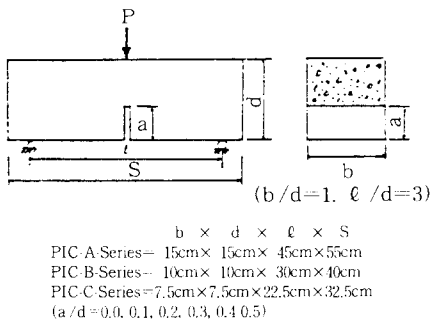


Fig. 12 Analysis structure of MMA PIC

6.2 파괴해석 결과분석

개발된 파괴해석 프로그램의 실행을 위해서는 폴리머 침투 전 보통 콘크리트 압축강도, 초기 인공균열비와 폴리머 함유율 등 재료특성과 부재 기하형상에 관련자료가 필요하며, 폴리머 침투콘크리트의 압축강도, 휨인장강도, 탄성계수, 임계응력 확대계수 및 파괴 에너지는 해석 프로그램 내에서 자동적으로 계산된다. 입력자료는 폴리머 함유율(P) 4.9wt%, 보통 콘크리트의 압축강도(σ_{ck}) 257kg/cm²이며, 프로그램 내에서 산정된 폴리머 침투콘크리트의 압축강도(σ_{cp})는 654kg/cm², 탄성계수(E_{cp})는 424,046.6kg/cm², 임계응력 확대계수(K_{Ic})는 214.48kg/cm^{3/2}, 파괴 에너지(G_F)는 0.528kg/cm이다.

폴리머 침투콘크리트 휨부재를 대상으로 a/d를 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 및 0.5로 변화시키면서 재하단계별 처짐과 균열폭에 대한 해석결과를 실험결과와 비교한 결과는 Fig. 13 및 14와 같다. 분석결과에서 보는 바와 같이 본 연구의 해석결과는 탄성구간, 극한하중 상태 및 인장연화 상태에 대하여 모두 실측결과를 비교적 잘 따르는 것으로 평가되며, 특히 초기 균열진단이 임계응력 확대계수에 도달한 후 균열이 조금만 진전하여도 휨부재의 하중 저항능력이 크게 감소하는 것으로 분석되었는데 이는 폴리머 침투콘크리트가 초기균열에 민감한 재료임을 의미하는 것이다.

폴리머 침투콘크리트 휨부재를 대상으로 a/d를 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 및 0.5로 변화시키면서 재하단계별 처짐과 균열폭에 대한 해석결과를 실험결과와 비교한 결과는 Fig. 13 및 14와 같다. 분석결과에서 보는 바와 같이 본 연구의 해석결과는 탄성구간, 극한하중 상태 및 인장연화 상태에 대하여 모두 실측결과를 비교적 잘 따르는 것으로 평가되며, 특히 초기 균열진단이 임계응력 확대계수에 도달한 후 균열이 조금만 진전하여도 휨부재의 하중 저항능력이 크게 감소하는 것으로 분석되었는데 이는 폴리머 침투콘크리트가 초기균열에 민감한 재료임을 의미하는 것이다.

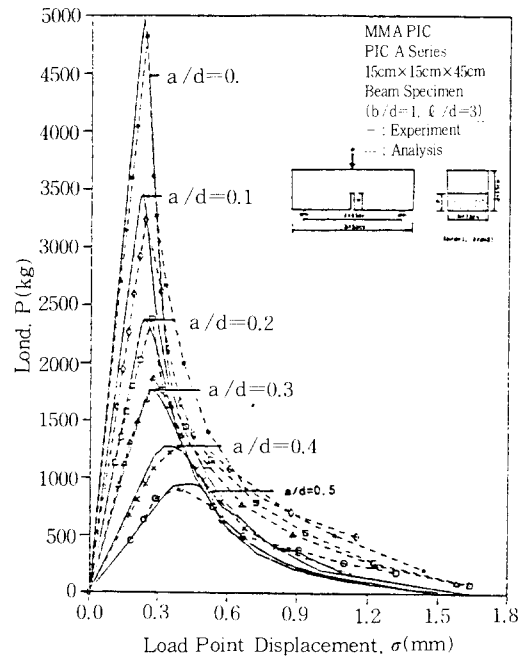


Fig. 13 Analytical results (P-LPD Relation)

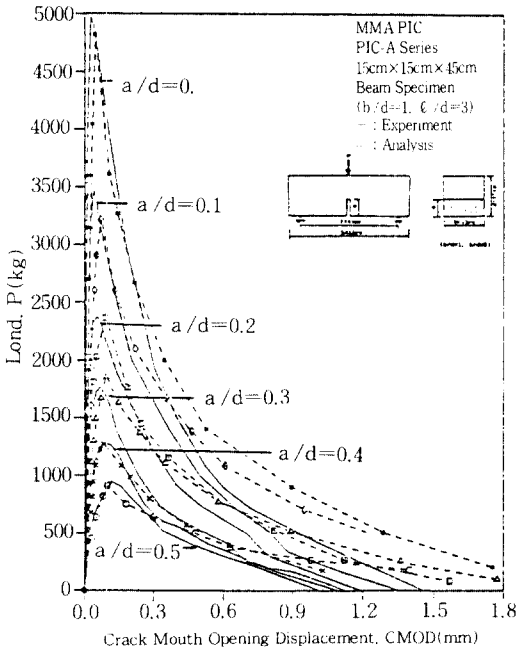


Fig. 14 Analytical results (P-CMOD Relation)

7. 결 론

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 폴리머 침투콘크리트의 강도 및 역학적 특성은 폴리머 함유율이 증가할수록 크게 증가한다. 본 연구에서는 실험결과와 분석에 의하여 폴리머 침투콘크리트의 재료 모델, 즉 압축강도, 탄성계수, 극한변형률, 포아송비를 보통 콘크리트의 압축강도와 폴리머 함유율의 함수로 공식화하였으므로 MMA계 폴리머 침투제가 부분 또는 완전 침투된 폴리머 침투콘크리트에 적용 가능한 것으로 사료된다.

2) 본 연구에서는 폴리머 침투콘크리트 보시편의 파괴실험 자료를 이용하여 부재의 크기효과 및 초기 인공균열깊이의 영향을 고려한 임계응력 확대계수, 파괴 에너지 및 유효 균열깊이의 평가공식을 도출하였으며, 이들을 변수로 하여 극한강도 이후의 거동을 해석하기 위한 3개의 직선으로 구성된 인장연화 모델을 개발하였다.

3) 본 연구에서 개발한 MMA계 폴리머 침투콘크리트 휨부재의 비선형 파괴해석 과정과 구조해

석 프로그램은 초기균열의 크기에 구애받지 않고 휨부재의 하중-처짐 거동과 하중-균열 개구변위 거동을 잘 반영하고 있는 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Dikeou, J., et al, Concrete-Polymer Materials, *Third Topical Report*, REC-ERC 71-6 and BNL 50275, 1971, pp.1-107
2. 大濱嘉彦, "콘크리트·폴리머 복합체의 이용과 연구 開發動向", *콘크리트工學*, Vol. 28, No. 4, 1990, pp.5-17
3. Byun, K. J., Choi, H. S., and Lee, S. M., "Development of Surface Impregants and Polymer-Impregnation Techniques for Highway Concrete", *Proceedings of 6th International Congress on Polymers in Concrete*, China, 1990, pp.765-772
4. ACI Committee 548, "Guide for the Use of Polymers in Concrete", *ACI Journal*, Vol. 83, No. 5, 1986, pp.798-829
5. 邊根周, 李相旻, "폴리머 침투제의 개발과 폴리머 침투콘크리트의 특성에 관한 연구", *大韓土木學會論文集*, 第12卷, 第1號, 1992, pp.71-84
6. 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
7. 吳炳煥, "應力-變形度關係를 이용한 콘크리트構造의 非線型破壞解析", *大韓土木學會論文集*, 第4卷, 第4號, 1984, pp.1-11
8. Modeer, M., A Fracture Mechanics Approach to Failure Analysis of Concrete Materials, *Report TVBM-1001*, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Sweden, 1979, pp.1-102
9. Bazant, Z. P. and Oh, B. H., "Concrete Fracture via Stress-Strain Relations", *Technological Institute*, Northwestern University, Evanston, Illinois, 1983, pp.1-38
10. Petersson, P. E., Crack Growth and Development of Fracture Zones in Plain Concrete and Similar Materials, *Report TVBM-1006*, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Sweden, 1981, pp.1-169

(접수일자 : 1993. 12. 16)