

등가소성힌지개념을 이용한 지하구조물 균열진전해석

Crack Propagation Analysis Using the Concept of an Equivalent Plastic Hinged Length

박 시 현*
Park, Si-Hyun

Abstract

In this study, a numerical analysis technique was newly developed to evaluate the damage propagation characteristics of concrete structures. To do this, numerical techniques are incorporated for the concrete members up to the compressive damage due to the bending compressive forces after the tensile crack based on the deformation mechanism. Especially, for the compressive damage stage after the tensile crack, the crack propagation process will be analyzed numerically using the concept of an equivalent plastic hinged length. Using this concept, it can be established that section forces, such as axial forces and the moment cracks takes place, can be related to the width of the crack making it possible to analyze the crack extension.

요 지

본 연구에서는 구조물에 발생하는 변상 진전 특성을 수치 해석적으로 평가할 수 있는 기법을 새롭게 개발하기 위한 연구를 수행한 것이다. 이를 위해서, 변상발생 메커니즘을 토대로 하여, 인장균열 발생 후, 휨압축에 의한 압축손상까지를 해석에 반영하였다. 특히 인장균열이 발생하고나서 압축손상이 발생하기까지의 해석 단계를 위해서는, 등가소성힌지길이 개념을 새롭게 도입하여, 균열의 진전을 해석하게 된다. 등가소성힌지길이개념을 도입함으로써, 균열발생단면에 대한 단면력, 즉, 축력과 모멘트를 균열폭과 관계지어 균열폭의 확장을 추적해 나가게 된다.

Keywords : Compressive damage, Damage propagation, Numerical analysis, Tensile crack

핵심 용어 : 압축손상, 변상진전, 수치해석, 인장균열

* 정희원, 한국시설안전공단 팀장

E-mail : parksh@kistec.or.kr 031-910-4085

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 2009년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

지하구조물의 변상발생은 구조물 자체 또는 주변지반에서 발생하는데, 특히 구조물 자체에 있어서 여러 형태의 변상이 발생한다. 따라서 유지관리 업무(한국시설안전기술공단, 2002)인 점검 및 진단시의 주요 조사대상은 구조체로서, 이에 대해 균열, 누수, 재료분리, 박리, 처짐, 변형 그리고 구조적인 결함 등이 상세히 조사되어진다. 이때 지반에 대한 조사도 동시에 이루어지는데, 시추조사 및 외관조사 등의 조사 결과를 반영하여 지하구조물의 기능과 성능 확보를 평가하게 된다. 본 연구에서는 지하구조물의 변상중에서 균열에 대한 진단해석에 착안한 연구로서, 먼저, 균열의 발생 메커니즘을 살펴본 다음에, 이러한 메커니즘을 반영할 수 있는 새로운 해석적 알고리즘 개발을 수행하였다.

일반적으로 구조물 시공시 아무리 주의를 기울이더라도 부재에는 미세한 형태의 균열이 존재하게 된다. 이러한 균열은, 공용기간중에 외부하중의 변화로 인해 점차적으로 성장하기도 한다. 따라서 이러한 균열은 구조물의 안정성과 사용수명을 감소시키는 중요한 인자로 지적된다. 구조물에 발생한 균열을 평가하기 위한 해석적 기법으로는 유한요소법을 이용한 연구가 가장 많다. 그 사례로 균열의 진전상태에 따라 변화하는 단면의 기하학적 형상을 요소망에 재구성하는 연구가 수행되기도 하였다(Bittencourt et al., 1996). 그러나 해석도중에 변화하는 균열을 반영하여 단면을 새롭게 재구성하는 방법은 해석상 제약이 많으며, 또한 실제상황을 반영하기도 용이하지 않다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 무요소해석기법(Park and Youn, 2001; Zhang et al., 2001; 이상호 등, 2003)에 대한 연구가 최근에 활발하게 진행되어 많은 학술적 연구성과를 발표하기도 하였다. 상용프로그램을 이용하여 균열진전해석을 수행하는 방법중에는, 균열의 진행이 확인될 수 있도록 일정한 크기의 요소로 세분한 후, 균열발생 후에 대해서는 재료의 구성모델이 변화되도록 하거나, 균열발생 예상지점에 미리 불연속적인 특징을 부여하기도 한다(Itasca Consulting Co., 2004). 그러나 이러한 연구들에서도 해석상의 복잡성과 실제 공학적 문제에 활용하기에는 계산에 소요되는

시간이나 간결성이 부족한 것을 지적할 수 있다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 2차원 평면요소 및 3차원 유한요소해석 기법보다 간편하면서도 간단한 입력정보만을 이용하여 비선형 해석이 가능한 실용적인 해석기법 개발을 수행한 것이다.

2. 지하구조체의 균열발생 메커니즘

시간의 경과와 더불어 발생 가능한 지하구조물의 변상은 해당 구조물의 구성재료 및 작용하는 외압의 형태 등에 의해 다르게 나타나게 되는데, 무근 콘크리트 라이닝의 실제 사례를 나타내면, Fig. 1과 같다(土木學會, 2002).

그림에 나타낸 바와 같이, 장기적인 지반외력의 변화에 의해 콘크리트 구조체의 천단부에 큰 휨압축응력과 인장응력이 생기는데, 외측에는 압축이 생기고 내측에는 인장균열이 발생한다. 또한 측벽이나 어깨부에서는 인장응력과 전단응력에 의한 균열이 발생하기도 한다. 한편, 콘크리트 라이닝의 배면에 과다의 여굴 등으로 인해 원지반과의 접촉상태가 불량하거나, 지반의 자립성이 극히 불량한 경우에는 지반반력 효과가 기대되지 않아 휨균열이 일정한 수준까지 진전되어 라이닝이 결국 파괴상태에 이르는 경우가 발생하기도 한다(土木學會, 2003). 따라서 콘크리트 라이닝의 대표적 변상으로는 인장균열, 휨파괴, 전단파괴, 압좌파괴 등으로 구분할 수 있다. 터널 라이닝의 파괴형태는 단순지지보의 재하시험시 나타나는 파괴양상과는 차이를

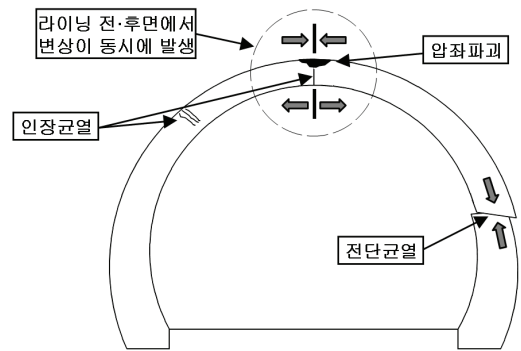


Fig. 1 지하구조체의 변상발생 형태

보이고 있으나, 국부 단면에 대한 파괴양상을 파악하기 위해서는 단순보와 같은 작은 부재에 대해 평가한 후, 이를 터널 라이닝에 적용하여 평가하기도 한다(신휴성 등, 2006).

따라서 본 연구에서는 구조체에 발생하는 대표적인 변상의 일종인 인장파괴(균열), 휨파괴, 전단파괴 및 압좌파괴 등을 해석적인 방법으로 평가할 수 있는 새로운 해석기법을 개발하기 위하여 먼저, 단순지지보를 활용하여 구조체의 변상 특성을 평가하기로 한다.

단순지지보의 균열진전 특성을 하중-변위 관계로 나타내면 Fig. 2와 같이 단순화시킬 수 있다. 이 그림에서는 하중이 점차적으로 증가하면서 부재에 발생하는 인장응력에 의해 먼저, 인장균열이 발생하고, 이어서 압좌에 의한 압축손상, 그리고 마지막으로 구조체가 완전히 파괴되는 압축파괴까지를 나타내고 있다. 또한 도시된 그림에는 변상이 진행될수록 구조체의 강성이 점차로 약화되어 가는 것도 표시되어 있다.

본 연구에서는 지하구조물에 발생하는 이러한 균열진전 특성을 수치 해석적으로 평가할 수 있는 새로운 기법을 개발하기 위하여, 상기에서 살펴본 균열진전 모식도를 토대로, 인장균열 이후 압좌에 의한 손상이나 압축손상까지만 반영코자 하였다.

실제 구조물은 압축손상 이후에도 구조물의 완전한 기능상실인 압축 파괴까지의 거동을 추가로 보이게 되지만, 이러한 압좌 후의 거동특성을 해석상에 반영하기 위해서는 전단파괴에 의해 소실되는 단면의 크기 등 해석시 필요한 제반 요인을 규정하기에 현실적으로

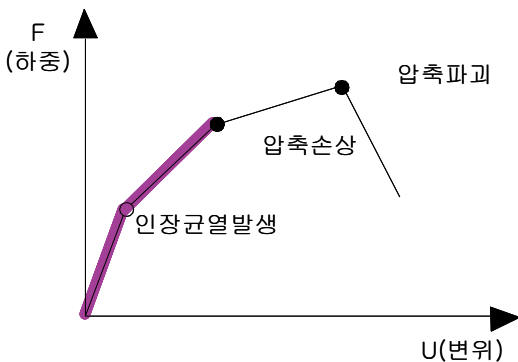


Fig. 2 단순지지보의 변상(균열)진전 모식도

불가능한 부분이 있다. 따라서 본 연구는 지하구조체 중에서 재래식 무근 콘크리트 라이닝 구조체에 대하여 균열에 대한 진전해석이 가능한 새로운 수치해석 기법 개발을 목적으로, 인장균열 발생 후 압축손상까지의 영역에 대해서 평가하는 것을 주된 목표로 삼고 있다. 한편, 압축손상에 대한 한계를 설정하는 방법 등에 대해서는 다음 장에서 보다 구체적으로 기술하기로 한다.

3. 균열진전 해석 알고리즘의 유도

본 연구에서는 지하 구조체에 발생하는 변상중에서 구조적인 안정성에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 균열에 대하여 진전 해석기법을 개발하고자 한다. 지하 구조체에 대한 균열의 발생 및 진전 메커니즘은 상기에서 설명하였으며, 본 장에서는 구체적인 해석 흐름 및 알고리즘에 대해 논하고자 한다.

본 연구에서는 2차원 보요소를 활용한 구조해석을 통해 균열에 대한 진전해석 기법을 개발하고 있다. 따라서 균열이 발생한 부위는 보요소의 절점으로 표현되며, 균열이 발생한 후에는 힌지(Hinge)로 구조계를 변경하여 추가해석을 실시하게 된다. 한편, 균열 발생은, 구조체의 재료특성인 인장응력을 기준으로 초기 균열을 판정하게 된다. 균열이 발생한 이후에는 압축손상(압좌)이 발생하는 시점까지 등가소성 힌지길이(equivalent plastic hinge length) 개념에 의해 초기균열발생후의 균열진전을 해석하게 된다. Riva and Cohn(1994)은 등가소성힌지 길이 개념을 철근 콘크

Table 1 해석기법의 특징

항 목	구 분 내 용
균열판단	콘크리트 재료의 인장강도 기준
균열발생시	균열발생지점을 힌지(Hinge)로 재모델링
균열진전 해석방법	등가소성힌지길이 개념 도입 (축력 ~ 휨모멘트 ~ 균열폭) 관계 규정
압축손상의 한계설정	최대압축변형률 0.003 또는 허용균열폭
하중재하 방법	중분하중 부여(기 계산된 단면력 중첩)
기타 특징	2차원 Beam 요소 구조해석 유지관리 개념을 고려한 균열폭의 진전해석 구조물의 내력 또는 허용변위 평가가능

리트 부재에 적용하는 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 무근 콘크리트 부재에 대해 등가소성힌지 길이 개념을 새롭게 개선하여 도입함으로써 구조물의 거동 특성을 평가하였다. 본 연구에서는 등가소성힌지길이 개념을 도입함으로써, 균열발생단면에 대해 축력·휨모멘트·균열폭을 서로 연관지을 수 있게 되었으며, 따라서 균열폭의 확장을 추적해 나갈 수 있게 된다. 또한, 압축손상(압좌)의 한계를 설정함에 있어서는 콘크리트 재료의 최대압축변형률을 0.003으로 설정(한국콘크리트학회, 2007)하였으며, 향후 구조물의 중요도를 고려하여 허용균열폭을 반영할 수도 있도록 하였다.

이러한 해석 특징을 토대로 외부하중을 증가시키면서 구조계 작용 단면력을 검토하여 균열 발생을 판단하고, 균열이 발생된 경우에는 구조계의 모델을 변경하여 계산을 계속하게 된다.

3.1 인장균열의 판정방법

구조물에 외력이 점차적으로 증가하게 되면 구조물의 단면력이 변화하게 된다. 본 연구에서는 외력증가에 따른 구조물의 균열발생 단면을 검토하기 위하여 Fig. 3과 같이 콘크리트 재료의 응력-변형률 곡선을 가정하기로 한다. 또한 균열이 발생한 부재단면의 응력 및 변형률 분포는 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

여기에 사용되는 각각의 변수들은 다음과 같다.

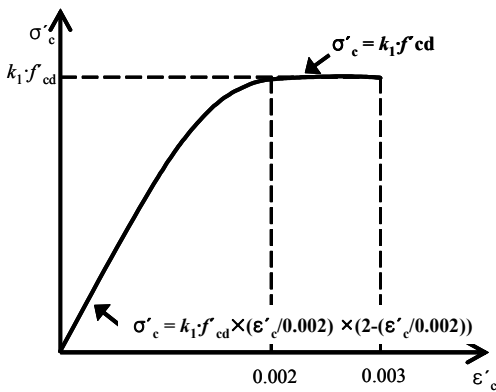


Fig. 3 콘크리트 재료의 압축응력-변형률 곡선

- f_t : 콘크리트 부재의 인장강도
- f'_{cd} : 콘크리트 부재의 설계기준 압축강도
- σ'_c : 부재의 압축응력
- y : 도심으로부터의 거리
- ϵ_t : 인장강도에서의 변형률
- ϵ'_{cm} : 압축단부에서의 변형률
- $\epsilon'_c(y)$: 도심으로부터의 거리 y 에서의 압축변형률
- $\sigma'_c(y)$: 도심으로부터의 거리 y 에서의 압축응력
- α : 부재높이에 대한 균열 깊이의 비율
- C : 인장응력이 작용하는 부재높이
- h : 부재높이
- k_1 : 강도감소 계수(0.85)
- N : 부재의 축방향 압축력
- M : 부재의 휨모멘트
- b : 부재 폭

단면에서의 변형률 분포는 Fig. 4를 이용하면, 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon'_c(y) = \frac{\epsilon'_{cm}}{h - \alpha h - C} \cdot \left[y - \left(-\frac{h}{2} + \alpha h + C \right) \right] \quad (1)$$

여기서, $y = \alpha h - \frac{h}{2}$ 일때 $\epsilon'_c(y) = -\epsilon_t$ 이므로 C 에 관하여 정리하면 다음과 같다.

$$C = \frac{\epsilon_t}{\epsilon'_{cm} + \epsilon_t} (-\alpha h + h) \quad (2)$$

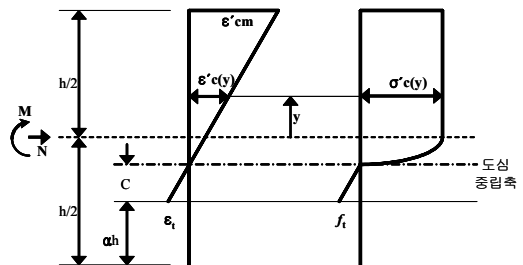


Fig. 4 균열발생 단면에서의 변형률 및 응력 분포도

한편, 압축축의 응력에 대해서도 Fig. 4의 응력분포도를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다. 이 때, 콘크리트 부재의 압축축에서의 변형률 한계값은 0.003을 설정하였다.

$$0 \leq \epsilon'_c(y) \leq 0.002 : \quad \sigma'_c(y) = \alpha_1 \cdot (y - \alpha_3) - \alpha_2 \cdot (y - \alpha_3)^2 \quad (3)$$

$$0.002 \leq \epsilon'_c(y) \leq 0.003 : \quad \sigma'_c(y) = k_1 \cdot f'_{cd} \quad (4)$$

이때의 단면력은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

축력

$$N = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma'_c(y) \cdot b \cdot dy = \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \sigma'_c(y) \cdot b \cdot dy - \alpha_4 \quad (5)$$

휨모멘트

$$M = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma'_c(y) \cdot y \cdot b \cdot dy = \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \sigma'_c(y) \cdot y \cdot b \cdot dy - \alpha_5 \quad (6)$$

인장축의 가장자리 응력이 허용인장강도에 도달하였을 때 균열이 발생된 것으로 하며, 균열발생시의 축력(N)과 휨모멘트(M)의 관계는 식(2)에서 $\alpha=0$ 로 하

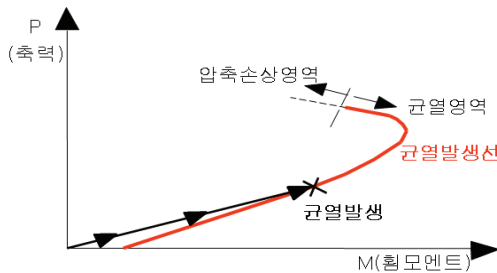


Fig. 5 균열발생을 판단하기 위한 축력-휨모멘트도

여, 식(5)와 식(6)에서 구한다. 이로써 부재 단면력을 균열의 영향을 고려하여 새롭게 계산 가능해졌다.

Fig. 5는 균열발생 여부를 판단하기 위한 축력-휨모멘트도를 나타낸 것이다. 균열 판정시에는 인장영역 뿐만이 아니라, 압축영역에 대해서도 함께 판정할 필요가 있다. 즉, 인장축의 단부응력이 인장강도에 도달하기 전에 압축축의 단부 변형률이 최대압축변형률에 도달하였는지를 검토하여야 한다.

3.2 압축손상의 판정방법

이어서 균열이 발생한 이후의 변형거동을 표현하기 위해서는, Fig. 6에서와 같이, 등가소성힌지길이 개념을 새롭게 도입하여, 균열 폭에 따른 회전각 변화를 반영하기로 한다. 즉, 본 연구에서는 균열의 진전을 표현하기 위해, 균열폭의 크기가 점차적으로 확장되는 것을 표현할 필요가 있다. 이때 균열 폭의 정도에 따라 부재가 영향받는 범위(길이)를 결정해 주어야 하는데, 이 범위(길이)를 결정하기 위해서는 아래 그림에서와 같이 부재의 변형각(k)은 균열의 개구에 의해 발생한 균열면의 회전각(λ)과 동일하다는 가정을 이용한다. 이렇게 균열 발생으로 인해 변형된 영역을 설정함에 있어서 등가소성힌지길이 개념을 활용하게 되는 것이다.

Fig. 6을 이용하게 되면, 균열의 폭(W)에 대한 균열면의 회전각(λ)은 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda \approx \frac{W}{\alpha \cdot h} \quad (8)$$

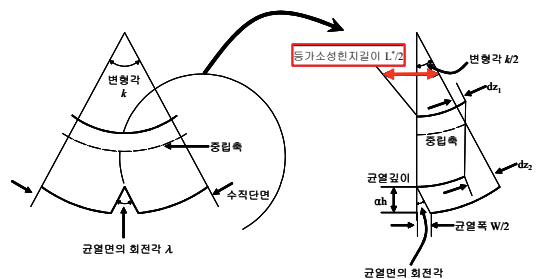


Fig. 6 등가소성힌지길이 개념의 모식도

한편, 등가소성힌지길이 사이의 변형각(k)는 다음 식과 같이 나타내어진다.

$$\frac{k}{2} = \frac{dz_1 + dz_2}{(1-\alpha)h} \quad (9)$$

여기서, dz_1 : 압축측의 가장자리 변형량

dz_2 : 인장측의 가장자리 변형량

이를 이용하면, 각 단부에서의 변형량은 다음과 같이 나타낼 수 있게 된다.

$$dz_1 = \epsilon'_{cm} \cdot \frac{L^*}{2}, \quad dz_2 = \epsilon_t \cdot \frac{L^*}{2} \quad (10)$$

여기서, L^* : 등가소성힌지 길이

식(9)를 식(8)에 대입하여 식(10)을 구한다.

$$\frac{k}{2} = \frac{\epsilon'_{cm} + \epsilon_t}{(1-\alpha)h} \cdot \frac{L^*}{2} \quad (11)$$

여기에서, 회전각 λ 와 변형각 k 가 같다는 가정 하에서 식(7)을 식(10)에 대입하면 등가소성힌지길이 (L^*)는 식(11)이 된다.

$$L^* = \frac{1-\alpha}{\alpha(\epsilon'_{cm} + \epsilon_t)} W \quad (12)$$

한편, 콘크리트 부재에서는 균열이 깊어질수록 등가소성힌지길이는 점차적으로 줄어들게 된다. 만약, 균열이 단면전체에 걸쳐 완전히 발생된 것으로 가정할 경우에 등가소성힌지길이는 0이 되어야 한다. 따라서 균열이 진행되어가면서 등가소성힌지길이는 균열의 깊이정도인 α 의 함수로 생각할 수 있기 때문에, 식(12)와 같이 나타내는 것으로 가정한다.

$$\frac{L^*}{2} = \frac{h-\alpha h}{2} \quad (12)$$

식(11), (12)에 의해 균열의 폭(W)은 식(13)와 같이 표현된다.

$$W = \alpha(\epsilon'_{cm} + \epsilon_t) \cdot h \quad (13)$$

상기의 이론적 배경을 활용하게 되면, 결과적으로 구조물 단면에서의 단면력(축력과 휨모멘트)과 균열폭을 서로 연관시킬 수 있게 된다. 이는 곧, 외부에 작용하는 외력의 변화에 대해 균열의 진전해석이 가능하게 되었음을 의미한다.

4. 예제 해석

상기의 해석기법을 토대로 개발된 해석모듈을 이용하여, 본 해석 기법의 타당성에 대한 검증을 실시하였다. 검증을 위해서는 단순지지 수평보구조에 대한 예제해석을 수행하였다.

Fig. 7은 단순지지 수평보의 개략도를 나타낸 것이다. 전체 연장 90cm의 단순보에 대하여 두 개의 지점 사이에서 집중 하중이 작용하고 있다. 단면의 크기는 15cm×15cm이며, 일반적으로 터널시공현장에서의 슛크리트에 대한 휨강성 시험(KSF 2566)을 나타내고

Table 2 단순지지 수평보구조에 대한 해석수행 사례

축력 (kN)	상용프로그램 (Pentagon-3D)	개발기법
200	CASE-1	CASE-2

Table 3 수치해석에 사용된 부재의 물성치

구분	단위 중량 γ (KN/m ³)	탄성계수 E (MPa)	포아손비 ν	압축강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	한계 변형률 (μ)
물성치	22.55	18,000	0.2	13.75	1.37	3000

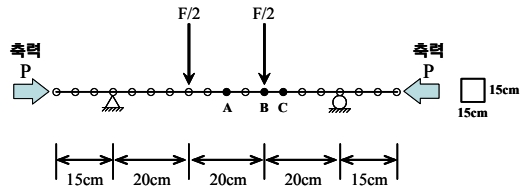


Fig. 7 단순지지 수평보 구조의 모식도

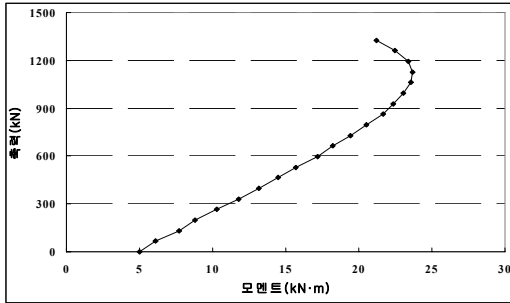
있다. 부재의 양쪽 단부에서는 축력항을 부여하여, 축력이 작용하는 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 단순지지 수평보구조에 대한 해석사례는 Table 2와 같이 정리할 수 있다. 표와 같이, 단순보 구조에 대하여

상용 FEM 프로그램과 본 연구에서 개발한 해석모듈을 각각 이용하였다. 상용 FEM 프로그램은, 본 연구에서 개발한 해석모듈의 타당성 및 탄성해석결과와 비교하기 위한 목적으로 사용하였으며, Pentagon-3D (에메랄드소프트사, 2004)를 사용하였다. 부재에 관련된 물성치는 Table 3에 정리하였다. 한편 단순지지 수평보구조에 대한 초기균열 경계선과 압축손상 한계선은 Fig. 8에 각각 나타내었다. 인장균열이 발생한 이후 부터는 Fig. 8(b)를 이용하여 균열의 진전해석이 수행되게 된다.

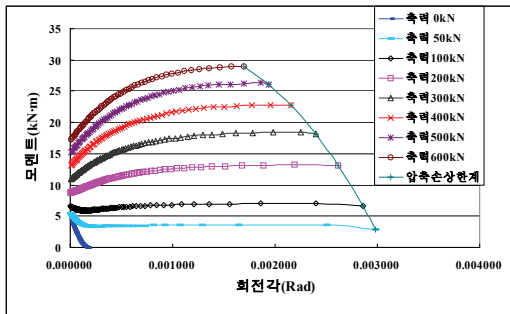
축력이 작용하는 경우에 대하여 해석을 수행한 결과는 Table 4에 정리되어 있다. Table 4의 CASE-1은 상용 FEM 프로그램에 의한 결과이며, CASE-2는 본 연구에서 개발한 해석모듈에 의한 결과이다. 작용하중(F)은 최대 39.2 kN를 부여하였다.

탄성해석결과인 CASE-1과 본 연구의 CASE-2의 연구결과를 비교하면, 초기균열 발생시까지의 동일하나, 그 이후의 거동이 큰 차이를 보인다.

Table 4의 CASE-2를 살펴보면, 작용하중이 증가하면서 균열의 발생도 점차적으로 늘어가는 것을 알 수 있다. 하중이 14.11kN이 되면, 먼저 A, B 점에서 거의 동시에 1차 균열이 발생한다. 이어서 하중이 18.82 kN이 되면, C점에서 2차 균열이 발생한다. 그 후 하중이 더욱더 증가하게 되면, 27.83kN에서 C점



(a) 초기균열 경계선



(b) 압축손상도

Fig. 8 단순지지 수평보구조에 대한 재료특성

Table 4 CASE-1, CASE-2의 해석 결과

구분	CASE-1						CASE-2											
	A점			B점			A점			B점			C점					
작용 하중 F (kN)	축력 (kN)	휨모멘트 (kN·m)	변위 (mm)	축력 (kN)	휨모멘트 (kN·m)	변위 (mm)	축력 (kN)	휨모멘트 (kN·m)	변위 (mm)	비고	축력 (kN)	휨모멘트 (kN·m)	변위 (mm)	비고	축력 (kN)	휨모멘트 (kN·m)	변위 (mm)	비고
0	200	0	0	200	0	0	200	0	0		200	0	0		200	0	0	
14.11	200	8.9	-0.068	200	8.9	-0.059	200	8.9	-0.068	1차 균열	200	8.9	-0.059	1차 균열	200	6.7	-0.048	
18.82	200	11.9	-0.090	200	11.9	-0.079	200	9.3	-0.890		200	11.9	-0.880		200	8.9	-0.66	2차 균열
27.83	200	17.6	-0.134	200	17.6	-0.116	200	9.2	-1.730		200	10.8	-1.730		200	13.0	-1.510	파괴
39.20	200	24.8	-0.188	200	24.8	-0.164	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

이 파괴에 이르게 된다.

작용하중 14.11kN에서 A, B점에서 동시에 균열이 발생하지만, 연직변위차가 발생하여 A점의 연직변위가 더 크다. 이후 작용하중을 더욱더 증가시키면, 18.82kN에서 2차균열이 발생하며, 27.83kN에서 3차균열로 이어진다. 3차 균열이 발생한 상태에서 C점에서 파괴가 발생하였다.

Fig. 8(b)의 압축손상도를 이용하여 인장응력을 초과하여 균열이 발생한 지점에 대해 균열강성을 반영하여야 한다. 앞에서 언급한 바와 같이, 일단 파괴시까지의 해석을 수행한 각각의 부재에 대하여 균열강성을 부여해 주어야 한다. 균열강성을 결정하는 방법은 Fig. 9에 나타난 바와 같으며 초기균열발생점과 해석 종료점과의 연결선에 의해 결정된다.

C점의 균열강성 :

$$K_{\phi} = \frac{13.0 - 8.9}{0.00262} = 1,564 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

이렇게 결정된 균열강성은 균열의 진전정도에 따라 달라지는 것이 당연하지만, 본 해석모듈에서는 최종시에 결정된 균열강성을 그대로 이용하여 해석을 수행하였다.

Table 4를 이용하여, 하중-변위관계 및 축력-휨모멘트관계를 나타내면 각각 Fig. 10, Fig. 11과 같다.

Fig. 10의 하중-변위관계를 살펴보면, 초기균열이 발생하기까지는 탄성해석 결과와 동일한 것을 알 수 있다. 또한, 초기균열 발생후 구조물의 강성이 감소하

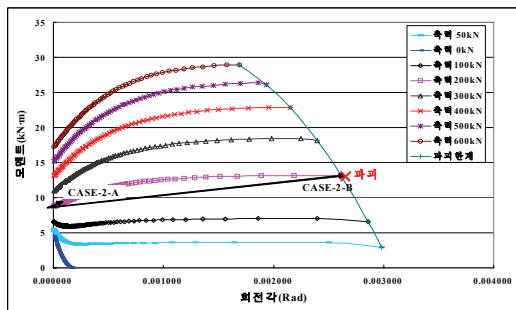


Fig. 9 균열발생 부재에 대한 균열강성 결정사례

여 변위가 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 하중이 더욱 더 증가하게 되면, 3차균열이 발생한 후 C점이 파괴된다. C점이 파괴된 시점에서도 A, B점은 아직 파괴되지 않은 상태이다.

Fig. 10에서는 1차균열 후의 구조물 강성이 2차균열 후의 강성보다 오히려 작은 것을 알 수 있다. 이러

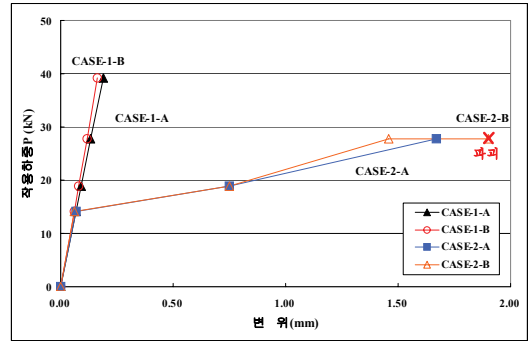
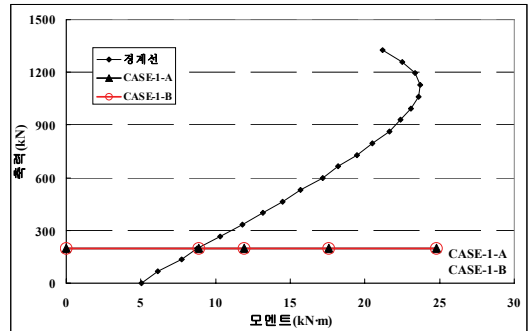
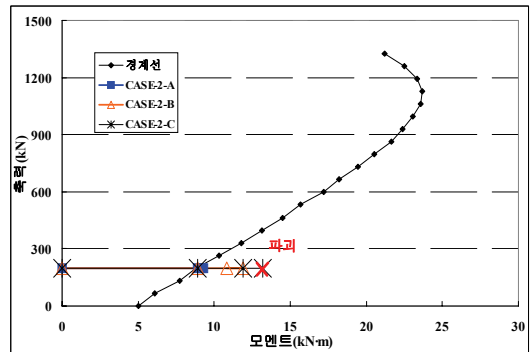


Fig. 10 하중-변위관계



(a) CASE-1



(b) CASE-2

Fig. 11 축력-휨모멘트 관계

한 결과가 발생한 이유는 균열강성을 결정함에 있어서 해석종료시점을 기준으로 결정된 균열강성을 이용한 점과 부재길이가 비교적 큰(5cm/90cm=5.6%)것에 기인하는 것으로 판단된다.

한편, Fig. 12는 본 연구에서 개발된 해석모듈을 활용하여 균열진전에 따른 휨모멘트도(BMD)의 변화를 나타낸 것이다. 작용하중이 증가되면서 부재에 발생하는 휨모멘트가 점차적으로 커지는 것을 알수있다. 그러나 균열이 발생한 부재 중심부에서는 휨모멘트가

더 이상 증가되지 않고 거의 일정한 상태로 유지되고 있다. 또한, 균열이 발생한 이후에 대해서도 휨모멘트도가 모든 지점에서 연속성적으로 변화하는 특성을 보이고 있으며, 이는 합리적인 결과를 제시하고 있는 것으로 판단된다.

5. 결론

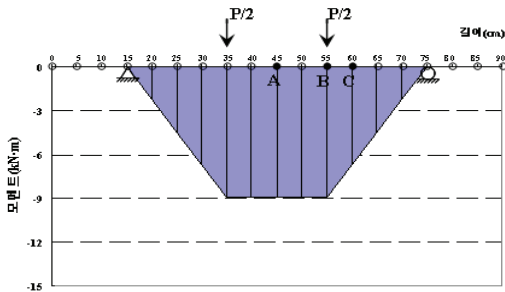
본 연구에서는 지하구조물중에서 채래식 무근 콘크리트라이닝 구조체에 발생하는 균열변상의 발생 메커니즘을 반영할 수 있는 새로운 해석적 기법 개발에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 본 연구에서는 구조물에 발생하는 변상중에서 균열에 대하여 균열의 진전해석이 가능한 새로운 해석 알고리즘을 개발하였으며, 이에 대한 검증은 위하여 단순지지 수평보 구조물에 대한 예제 해석을 수행하였다.
- 2) 균열변상에 대한 진전해석 기법을 개발함에 있어서, 먼저 인장균열에 대한 판정 후, 압축손상이 발생하기까지의 진전해석이 가능하도록 하였다. 이를 위해 등가소성형지 길이개념을 새롭게 도입하였다.
- 3) 개발한 균열진전 해석 알고리즘을 이용하여 예제 해석을 수행한 결과 구조물에 발생하는 균열의 진전 표현과 비선형 거동 표현이 가능한 것을 확인하였다. 또한 균열 발생 후에도 휨모멘트도에서 연속적인 분포를 보이고 있어 본 연구에서 개발한 해석 알고리즘이 해석적으로 타당한 것을 확인하였다.

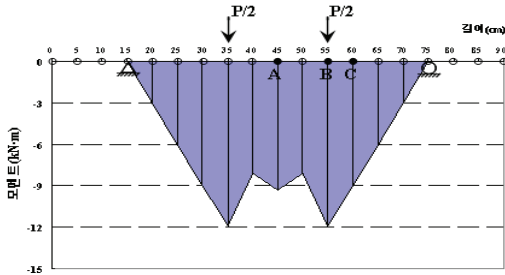
향후 개발기법을 보다 실제적인 터널구조물 등으로 확장하여 지하구조물의 다양한 변상특성에 대한 연구를 추진해 나갈 것이다.

감사의 글

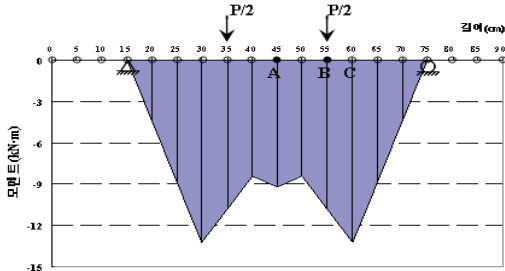
본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술 평가원에서 위탁시행한 2004년도 CTRM(04핵심 C01)의 지원으로 이루어졌습니다. 연구비 지원에 깊은 감사를 드립니다.



(a) 1차 균열발생시



(b) 2차 균열발생시



(c) 3차 균열발생시

Fig. 12 휨모멘트도

참고문헌

1. 신휴성, 김동규, 장수호, 배규진, "싱글셀 터널라이닝의 파괴 메카니즘 및 지보성능에 관한 연구", 한국터널공학회 논문집 제8권 3호, 2006, pp. 273-287.
2. 에메랄드소프트사, PENTAGON-3D 사용자 매뉴얼, 2004.
3. 이상호, 송정훈, 김명원, "확장 유한요소법을 이용한 요소망 제약조건이 없는 균열진전해석", 대한토목학회 논문집, 제23권 6A호, 2003, pp. 1077-1086.
4. 한국시설안전기술공단, "터널유지관리 매뉴얼", 2002.
5. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준 해설, 2007, p. 117.
6. 土木學會, トンネルライブラリー第12号 [山岳トンネル覆工の現状と對策], 2002, p. 66.
7. 土木學會, トンネル変状メカニズム, 2003, pp. 45-46.
8. Park, S.H. and Youn, S.K., "The Least-squares Meshfree Method, International Journal for Numerical Methods in Engineering", Vol. 52, 2001, pp. 997-1012.
9. Riva, P. and Cohn, M.Z. "Rotation capacity of structural concrete members", Magazine of Concrete Research, Issue 168(Sep), 1994.
10. Zhang, X., Liu, X.H., Song, K.Z. and Lu, M. W. "Least-squares Collocation Meshless Method", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 51, 2001, pp. 1089-1100.
11. Bittencourt, T.N., Wawrzynek, P.A. and Ingraffea, A.R. "Quasi-Automatic Simulation of Crack Propagation for 2D LEFM Problem", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 55, 1996, pp. 321-334.
12. Itasca Consulting Co. FLAC-2D, User's Manual, 2004.

(접수일자 : 2008년 4월 25일)

(심사완료일자 : 2008년 10월 15일)