

# 터널구조물에 대한 균열변상의 진전해석이 가능한 유지관리 해석기법

## A Development of Analysis Technique for Defects Which Were Incorporated a Propagation Process of Cracks in Tunnel Structures

박 시 현\* · 박 성 근\*\*  
Si-Hyun Park · Sung-Kun Park

### 요 약

본 논문에서는 등가소성힌지길이 개념을 새롭게 개선하여 도입함하여 구조물의 거동특성을 평가하는 프로그램을 개발하였다. 시간의 경과 및 외부환경 변화와 더불어 발생 가능한 지하구조물의 변상은 해당 구조물의 구성재료 및 작용하는 외압의 형태 등에 의해 다르게 나타나게 된다. 즉, 장기적인 지반외력의 변화에 의해 콘크리트 구조체의 천단부에 큰 휨압축응력과 인장응력이 생기는데, 내측에는 압축이 생기고 외측에는 인장균열이 발생한다. 또한 측벽이나 어깨부에서는 인장응력과 전단응력에 의한 균열이 발생하기도 한다. 따라서 개발된 프로그램으로 균열발생단면에 대하여 축력, 휨모멘트, 균열폭을 서로 연관 지을 수 있게 될 뿐만 아니라 균열폭의 확장을 추적해 나갈 수 있다. 해석기법을 토대로 개발된 해석모듈을 이용하여, 본 해석 기법의 타당성에 대한 검증을 실시하였다. 검증을 위해서는 수평보구조와 터널구조에 대해 각각 해석을 수행하였다. 그 결과, 구조물 내에서의 균열의 진전이 점차적으로 확장되어 가는 것이 표현 가능한 것을 확인하였으며, 해석결과의 타당성을 확인하였다.

**keywords** : 균열, 변상진전 해석모듈, 등가소성힌지길이

## 1. 서 론

지하구조물의 변상발생은 구조물 자체 또는 주변지반에서 발생하는데, 특히 구조물 자체에 있어서 여러 형태의 변상이 발생한다. 따라서 유지관리 업무(한국시설안전공단, 2007)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 변상발생의 메커니즘을 살펴본 다음에, 이러한 변상 메커니즘을 반영할 수 있는 새로운 해석적 기법개발에 대하여 연구하였다.

## 2. 지하 구조체의 변상발생 메커니즘

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

\* 한국시설안전공단 일반도로팀 지반파트장 parksh@kistec.or.kr

\*\* 한국시설안전공단 일반도로팀 직 원 psk3475413@naver.com

파괴상태에 이르는 경우가 발생한다(土木學會, 2002). 따라서 콘크리트 라이닝의 대표적 변상으로는 인장균열, 휨파괴, 전단파괴, 압좌파괴 등으로 구분할 수 있다. 터널 라이닝의 파괴형태는 단순보의 재하시험시 나타나는 파괴양상과는 차이를 보이고 있으나, 국부 단면에 대한 파괴양상을 파악하기 위해서는 단순보와 같은 작은 부재에 대해 평가한 후, 이를 터널 라이닝에 적용하여 평가하기도 한다(한국터널공학회, 2007). 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, 단순보를 활용하여 구조체의 변상 특성을 평가하기로 한다.

### 3. 변상진전 해석기법

무근 콘크리트 부재에 대해 등가소성힌지길이 개념을 새롭게 개선하여 도입함으로써 구조물의 거동특성을 평가하였다. 균열발생단면에 대해 축력·휨모멘트·균열폭을 서로 연관 지을 수 있게 되며, 균열폭의 확장을 추적해 나갈 수 있게 된다. 또한, 압축손상(압좌)의 한계를 설정함에 있어서는 콘크리트 재료의 최대압축변형률을 0.003(한국콘크리트학회, 2007)으로 설정하였으며, 향후 구조물의 중요도를 고려하여 허용균열폭을 반영할 수도 있도록 하였다.

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
하중제하방법	증분하중 부여(기 계산된 단면력 중첩)
기타 특징	2차원 Beam 요소 구조해석 유지관리 개념을 고려한 균열폭의 진전해석 구조물의 내력 또는 허용변위 평가가능

이러한 해석 특징을 반영하여 작용하중을 증가시켜가면서 구조계 작용 단면력을 검토하여 균열 발생을 검토하고, 균열이 발생된 경우에는 구조계의 모델을 변경하여 계산을 계속하게 된다. 따라서 개발된 해석기법을 활용함으로써, 구조물에 대한 장기적인 관점에서의 안전성 해석이 가능하며, 부재 위치별 손상정도 파악 및 변상원인이 되는 외력을 추정하여 지하구조체의 파괴형태에 따른 구조물의 내력 파악 및 대책공법의 보강효과에 대한 검토가 가능할 것으로 기대된다.

### 4. 해석기법의 검증

#### 4.1 수평보 구조에 대한 검증

본 연구에서 개발한 해석모델의 타당성 및 타성해석결과와 비교하기 위한 목적으로 상용 FEM프로그램(Pentagon-3D)를 사용하였다. 부재에 관련된 물성치는 Table 2에 정리하였다. 인장균열이 발생한 이후부터는 균열의 진전해석이 수행되게 된다.

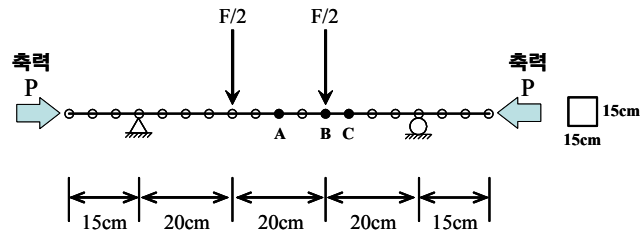


Fig 1. 수평보 구조의 모식도

Table 2. 수치해석에 사용된 지반의 물성치

구 분	단위중량 $\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	탄성계수 E(MPa)	포아송비 $\nu$	압축강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	한계변형률 ( $\mu$ )
물성치	22.55	18,000	0.2	13.75	1.37	3000

개발한 해석모듈을 이용한 결과, 작용하중이 증가하면서 균열의 발생도 점차적으로 늘어가는 것을 알 수 있었다. 하중이 14.11kN이 되면, 먼저 A, B 점에서 동시에 1차균열이 발생한다. 이어서 하중이 18.82kN이 되면, C점에서 2차균열이 발생한다. 그 후 하중이 더욱더 증가하게 되면, 27.83kN에서 C점이 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.

또한, 하중-변위관계를 살펴보면, 초기균열이 발생하기까지는 탄성해석 결과와 동일한 것을 알 수 있다. 초기균열 발생후 구조물의 강성이 감소하여 변위가 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 하중이 더욱 더 증가하게 되면, 3차균열이 발생한 후 C점이 파괴된다. C점이 파괴된 시점에서도 A, B점은 아직 파괴되지 않은 상태이다.

#### 4.2 터널구조에 대한 검증

터널 폭 10.2m, 높이 7.25m에 대하여 터널 천장부지점에 집중하중이 작용하고 있으며, 단면의 크기는 100cm×60cm이다. 터널구조물의 양쪽 단부는 고정절점을 부여하였으며, 터널구조물 배면에는 탄성스프링을 설치하여 배면지반을 모사하였다. 탄성스프링은 압축력에만 반응하도록 하였으며, 인장력 작용시는 지반반력을 무시한 해석을 수행하였다. 터널구조에 대해서도 상용 FEM 프로그램과 본 연구에서 개발한 해석모듈을 각각 이용하였다.

Table 3. 수치해석에 사용된 지반의 물성치

구 분	단위중량 $\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	탄성계수 E(MPa)	포아송비 $\nu$	압축강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	한계변형률 ( $\mu$ )
물성치	18.5	14,100	0.21	26.1	2.26	3500

상용 FEM 프로그램에 의한 해석결과, 작용하중이 증가하면서 단면력 및 변위도 증가하고 있는데 비하여, 본 연구에서 개발한 해석기법의 결과는 다른 경향을 보였다. 개발한 해석모듈에 의하면, 작용하중 100kN에서 천장부 부근(A점)에서 초기(1차) 균열이 발생하고 있다. 이때의 해석결과는 상용 FEM 해석결과와 거의 동

일하다. 작용하중이 더욱 증가하여 180kN에 이르면, SL부근(C점)에서 2차 균열이 발생한다. 그 후 작용하중이 더욱 증가하여 540kN에서 아치부(B점)에서 3차균열이 발생하고, 이어서 최종적으로는 B점에서 파괴가 발생하는 것으로 나타났다. 이상에서와 같이, 개발된 해석모델에서는 균열의 발생이 순차적으로 진전되어 가는 과정을 표현하는 것이 가능함을 확인하였다.

또한, 하중-변위관계를 살펴보면, 초기균열이 발생하기까지는 탄성해석 결과와 동일한 것을 알 수 있다. 초기균열 발생후 구조물의 강성이 감소하여 변위가 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 하중이 더욱 더 증가하면, 파괴 직전상태에서는 구조물 강성이 오히려 증가하였다가 파괴되는 것으로 나타났다. 파괴직전에 구조물 강성이 증가되는 것은 하중 580kN까지는 휨모멘트 증가가 없다가 그 후에 휨모멘트가 증가하는 영향이 반영된 것이다. 즉, 휨모멘트가 증가하기 전에는 균열강성  $K_{\phi} = 0 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 이었으나, 휨모멘트의 증가로 인해 강성이 새롭게 반영된 것에 기인한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 지하구조물의 변상발생의 메커니즘을 반영할 수 있는 새로운 해석적 기법 개발에 대하여 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 본 연구에서는 구조물에 발생하는 변상중에서 균열에 대하여 균열의 진전해석이 가능한 새로운 해석적 기법을 개발하였으며, 이에 대한 검증을 실시하였다.
- 2) 균열변상에 대한 진전해석 기법을 개발함에 있어서, 먼저 인장균열에 대한 판정 후, 압축손상이 발생하기까지의 진전해석이 가능하도록 하였다. 이를 위해 등가소성인자 길이개념을 새롭게 도입하였다.
- 3) 개발한 변상진전 해석모델을 이용하여 수평보구조와 터널구조에 대한 검증을 각각 실시하였다. 초기균열 발생전까지는 상용프로그램 해석결과와 동일한 결과를 얻었다. 또한 균열발생후의 거동에 대해서는 소성거동이 명확히 표현되는 것을 확인하였다.
- 4) 개발된 해석기법에서는 구조물 내에서의 균열의 진전이 점차적으로 확장되어 가는 것이 표현 가능한 것을 확인하였다. 또한 균열 발생 후에도 휨모멘트도에서 연속적인 분포를 보이고 있으며, 해석결과의 타당성을 확인하였다.

## 참고문헌

- (사)한국터널공학회(2007), 역해석을 이용한 터널주변 이완하중의 추정기법의 개발.
- (사)한국콘크리트학회(2007), 콘크리트구조설계기준 해설, pp. 117.
- 한국시설안전기술공단(2002), 터널유지관리 매뉴얼.
- (社)土木學會(2002), 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], pp.66.
- (社)土木學會(2003), トンネル変状メカニズム.
- Emerald soft Co.(2004), PENTAGON-3D User's Manual.(in Korean).
- Riva, P. and Cohn, M. Z. : Rotation capacity of structural concrete members, Magazine of Concrete Research, 46, No.168.
- Paz M.(1997), Structural Dynamics: Theory and Computation(4th edition), Springer, pp.400-405