

변상진전기법을 이용한 토목구조물 피해평가

Disaster Assessment for the Civil Infrastructure through a Technique of Crack Propagation

박시현¹⁾, Si-Hyun Park

¹⁾ 한국시설안전공단 일반도로팀 과장, Manager, Inspection Div. KISTEC

SYNOPSIS : This study has developed a numerical analysis technique newly which can evaluate the damage propagation characteristics of civil infrastructures. 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, we investigate the reasonability of the developed module by comparing commercial program for the tunnel structure. It can be established from this study 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.

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

1. 서론

본 연구에서는 국내 토목구조물에 발생한 변상중에서 균열변상에 대한 해석 기법 개발을 수행한 것이다. 이를 위해 토목구조물에 발생한 변상에 대해서는 구조물 외면 및 재료시험 등의 자료조사를 통해 그 특성을 파악하였다. 이를 토대로 구조물에 발생한 변상메커니즘을 추정하여 해석기법에 반영하기 위한 방안을 수립하였다. 구조물의 변상중에서 균열의 발생현황을 토대로 외부 하중의 증가에 따른 균열의 진전상황을 해석적으로 표현할 수 있는 해석기법 개발에 주력하였으며, 이를 활용하여 구조물 재해 발생시의 구조물 평가에 대한 새로운 해석적 시도를 수행한 것이다.

본 연구에서는 구조물에 발생하는 변상 진전 특성을 수치 해석적으로 평가할 수 있는 기법을 새롭게 개발하였다. 본 해석기법에서는 변상발생 메커니즘을 토대로 하여, 인장균열 발생 후, 휨압축에 의한 압축손상까지를 해석에 반영하였다. 특히 인장균열이 발생하고 나서 압축손상이 발생하기까지의 해석단계를 위해서는, 등가소성힌지길이 개념을 도입하여, 균열의 진전을 해석하게 된다. 등가소성힌지 길이개념을 도입함으로써, 균열발생단면에 대한 단면력, 즉, 축력과 모멘트를 균열폭과 관계지어 균열폭의 확장을 추적해 나가게 된다.

2. 지하구조물의 변상 발생 메커니즘

시간의 경과 및 외부환경 변화와 더불어 발생 가능한 지하구조물의 변상은 해당 구조물의 구성재료 및 작용하는 외압의 형태 등에 의해 다르게 나타나게 되는데, 콘크리트 라이닝의 실제 사례를 나타내면, 그림 1과 같다.

그림에 나타난 바와 같이, 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. 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 발생한다. 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. 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.

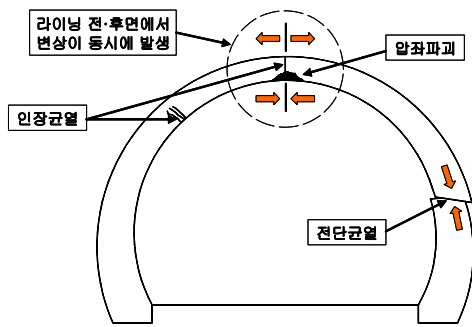


그림 1. 지하구조체의 변상발생 형태

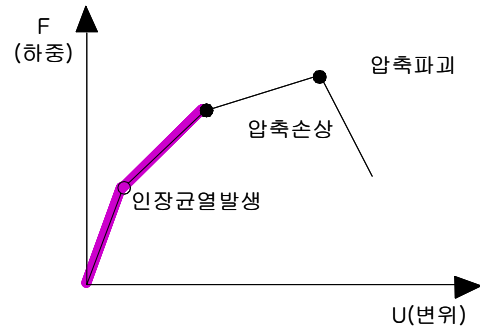


그림 2. 구조물의 변상진전 특성

구조체의 변상진전 특성을 하중-변위 관계로 간략화해 보면 그림 2와 같이 나타낼 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 구조물에 발생하는 이러한 변상 진전 특성을 수치 해석적으로 평가할 수 있는 새로운 기법을 개발하고자 한다. 구조물의 변상 진전 해석기법을 개발함에 있어서는, 상기에서 살펴본 변상발생 메커니즘을 토대로 하여, 인장균열 이후 압좌에 의한 손상인 압축손상까지만 반영코자 한다.

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 불가능한 부분이 있다. 따라서 본 연구에서는 시간의 경과와 더불어 발생하는 구조체의 다양한 변상들 중에서 균열에 대한 진전해석을 실시하며, 인장균열 발생 후 압축손상까지의 영역에 대해서 변상을 진전시켜 나가도록 하고자 한다.

3. 균열진전 해석기법의 개발

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 개념에 의해 초기균열발생후의 균열진전을 해석하게 된다. Riva 등은 등가소성힌지 길이(equivalent plastic hinge length) 개념을 철근 콘크리트 부재에 적용하는 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 무근 콘크리트 부재에 대해 등가소성힌지 길이 개념을 새롭게 개선하여 도입함으로써 구조물의 거

동특성을 평가하였다. 등가소성힌지길이 개념을 도입함으로써, 균열발생단면에 대해 축력·휨모멘트·균열폭을 서로 연관지을 수 있게 되며, 균열폭의 확장을 추적해 나갈 수 있게 된다. 또한, 압축손상(압좌)의 한계를 설정함에 있어서는 콘크리트 재료의 최대압축변형률을 0.003으로 설정하였으며, 향후 구조물의 중요도를 고려하여 허용균열폭을 반영할 수도 있도록 하였다. 표 1에는 개발 기법의 특징을 요약하였다.

표 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
압축손상의한계설정	최대압축변형률 0.003 또는 허용균열폭
하중재하방법	증분하중 부여(기 계산된 단면력 중첩)
기타 특징	2차원 Beam 요소 구조해석유지관리 개념을 고려한 균열폭의 진전해석 구조물의 내력 또는 허용변위 평가가능

4. 터널구조물에 대한 적용성 평가

그림 3은 본 연구에서 검토하기 위한 터널구조체의 개략도를 나타낸 것이다. 터널 폭 10.2m, 높이 7.25m에 대하여 터널 천장부 A 지점에 집중하중이 작용하고 있다. 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 대한 해석은 상용프로그램을 사용한 case1과 본 연구에서 개발한 기법의 case2로 구분하였다.

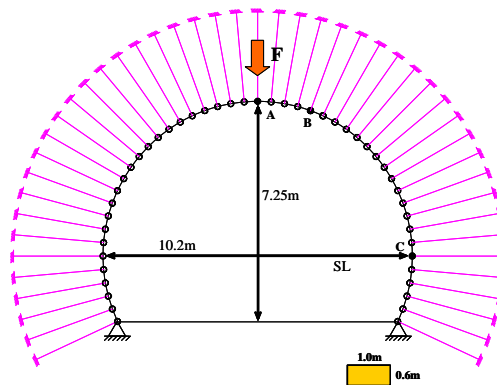
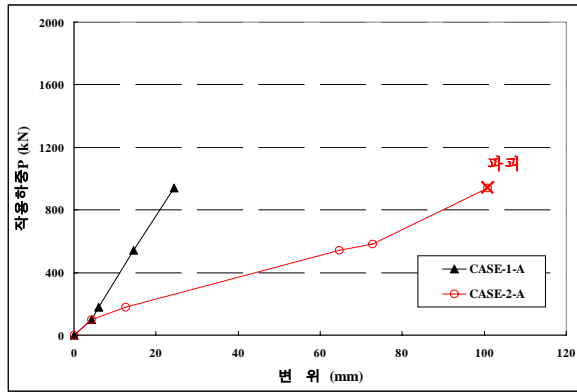


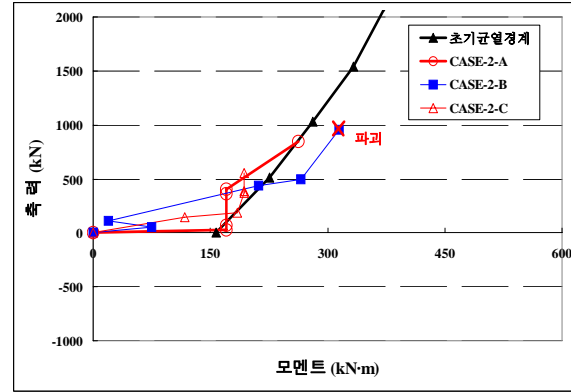
그림 3. 터널구조의 모식도

그림 4(a)의 하중-변위관계를 살펴보면, 초기균열이 발생하기까지는 탄성해석 결과와 동일한 것을 알 수 있다. 또한, 초기균열 발생(작용하중 100kN) 후 구조물의 강성(기울기)이 감소하여 변위가 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 하중이 더욱 더 증가하면, 파괴 직전상태에서는 구조물 강성이 오히려 증가하였다가 파괴되는 것으로 나타났다. 파괴직전에 구조물 강성이 증가되는 것은 단면력을 검토한 결과, 작용하중 580kN까지는 휨모멘트 증가가 없다가 그 후에 휨모멘트가 증가하는 영향이 반영된 것이다. 이는 곧, 휨모멘트가 증가하기 전에는 균열강성 $K_{\phi} = 0 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 이었으나, 휨모멘트의 증가로 인해 강성이

새롭게 반영된 것에 기인한다. 그림 4(b)의 축력-휨모멘트 관계를 살펴보면, CASE-2의 각 지점들은 초기균열 경계선을 정확히 반영하고 있다. 3개의 지점은 균열발생후의 거동특성이 서로 다르다. 먼저 천장부에 위치한 A점은, 초기균열 발생후 휨모멘트가 일정한 상태를 유지하다가 점차적으로 휨모멘트와 축력이 증가하는 양상을 보이고 있다. 아치천장부에 위치한 B점은 균열발생 이전에도 휨모멘트의 증가와 감소를 보이고 있다. 그 후 균열발생 후에는 휨모멘트가 점차적으로 증가하다가 파괴에 이르고 있다. 한편, SL에 위치한 C점은 균열발생후 휨모멘트가 거의 일정한 상태를 유지하는 것으로 나타났다.



(a) 하중-변위관계



(b) case2의 축력-휨모멘트관계

그림 4. 해석결과

참고문헌

1. (사)한국터널공학회(2007), 역해석을 이용한 터널주변 이완하중의 추정기법의 개발.
2. (사) 한국콘크리트학회(2007), 콘크리트구조설계기준 해설, pp. 117.
3. 한국시설안전기술공단(2002), 터널유지관리 매뉴얼.
4. Emerald soft Co.(2004), PENTAGON-3D User's Manual.(in Korean).
5. Riva, P. and Cohn, M. Z. : Rotation capacity of structural concrete members, Magazine of Concrete Research, 46, No.168.
6. Paz M.(1997), Structural Dynamics: Theory and Computation(4th edition), Springer, pp.400-405
7. (社)土木學會(2002), 톤넬라이브러리第12号 [山岳톤넬覆工의現狀と對策], pp.66.
8. (社)土木學會(2003), 톤넬變狀メカニズ