

숏크리트 거동에 대한 갱도모형실험과 수치해석의 비교

유광호(수원대학교), 이민호(청석엔지니어링), 박연준(수원대학교)

지보재의 파괴가 고려된 터널의 안전율을 산정하기 위해 허용응력 설계법에 기초하여 숏크리트 내에 발생하는 응력이 허용응력을 초과하면 숏크리트가 파괴된다고 가정하고, 전단강도 감소기법을 이용하여 수치해석적(2차원)으로 구하는 방법이 유광호 등(2005)에 의해 제시되었다. 하지만 허용응력 설계법에 근거한 방법은 숏크리트의 허용 휨응력을 과소평가하여 터널의 안정성 및 안전율을 과소평가하는 경향이 있다.

따라서 본 논문에서는 숏크리트의 파괴거동을 갱도모형실험을 통해 확인하고 3차원 수치해석에 의해 검증하였다. 갱도모형실험에 사용된 터널은 실제 터널의 거동을 모사하기 위해 폭 3.3m, 높이 2.9m, 깊이 0.5m의 마제형으로 제작되었다. 지보재인 숏크리트는 거푸집을 이용하여 타설하고 28일간 양생하였고 7개의 실린더와 30cm의 모래 뒷채움을 이용하여 지보재에 최대한 등방하중이 가해질 수 있도록 하여 실험을 수행하였다.

1. 서론

근래에 국내에서는 국토가 좁고 산악지역이 70% 이상을 차지하고 있는 실정 때문에 지하시설물 특히, 터널구조물에 대한 건설수요와 관련된 연구가 활발하였다. 이에 따른 터널공사에 대한 경제적이고 합리적인 설계, 시공의 필요성이 더욱 중요하게 되었고 관련 기술들 또한 눈부신 발전을 이룩하였다.

터널구조물의 설계에 중요한 기술은 공사에 따른 지반의 응력, 거동을 정확히 파악하여 반영하는 것이다. 하지만 종래의 터널에 대한 설계 및 시공관리는 경험이 많은 기술자들에 의하여 판단되는 것이 많았다. 최근의 컴퓨터 및 수치해석법의 급속한 발달로 터널과 같은 지하구조물의 안정성 해석에는 파괴면의 형상을 사전에 가정하기 어렵기 때문에 사면에서와 같이 한계평형법에 기초한 해석법을 적용하여 안전율을 구하는 데에는 한계가 있으며 현재의 설계방법도 정량적인 기준이 없다. 이러한 이유에서 터널과 같은 지하구조물을 대상으로 한 수치해석은 안전율을 구하기보다는 안정성을 평가하는 데만 제한적으로 사용되어 왔다(유광호 등, 2000).

지반의 파괴뿐만 아니라 지보재의 파괴도 터널의 안정성에 큰 영향을 미치므로 터널의 내공변위를 억제하고 소성영역의 발생을 방지하는 지보재의 파괴도 고려되어야 한다.

특히, 굴착 후 즉시 타설되는 1차 지보재인 숏크리트의 정확한 설계를 위해서는 지반과 숏크리트의 상호거동이 고려되어야 한다. 이러한 지보재의 파괴가 고려된 터널의 안전율을 산정하는 방법으로 허용응력 설계법에 기초하여 숏크리트 내에 발생하는 응력이 허용응력을 초과하면 숏크리트가 파괴된다고 가정하고 전단강도 감소기법을 이용하여 지반과 숏크리트

의 파괴를 고려한 안전율을 구하는 방법이 유광호 등(2005)에 의해 제시되었다. 하지만 허용 응력 설계법에 근거한 방법은 숏크리트의 허용 휨응력을 과소평가하여 터널의 안전율을 과소평가하는 경향이 있다. 따라서 터널의 안정성 및 안전율을 보다 정확히 산정하기 위해서는 숏크리트의 파괴거동이 실험을 통해 확인되어야 하며, 수치 해석적으로 검증될 필요성이 있다.

본 논문에서는 갱도모형실험과 수치해석을 통하여 더욱 정확한 터널의 파괴거동을 규명하고, 수치해석 시 지보재의 파괴를 보다 정확하게 판단할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

2. 갱도모형실험

지반에 굴착된 터널의 주 지보재인 숏크리트의 파괴거동을 규명하기 위해 본 논문에서는 실제 터널과 유사한 크기(폭 3.3m, 높이 2.9m, 깊이 0.5m)의 마체형 터널을 제작하여 실험하였다. 또한, 가능하면 실제 터널의 하중전달 메카니즘과 유사하도록 갱도모형실험 장비를 제작하였다. 이를 위해 숏크리트 배면에 30cm 두께의 모래로 뒤채움을 하고 좌·우 대칭으로 배열된 7개의 가압장치를 통해 하중을 가하였다. 이 때, 지보재인 숏크리트의 거동을 파악하기 위해 균열의 발생 시기, 위치 및 작용하중을 측정하고 내공변위를 7개의 LVDT를 통해 측정하였다.

2.1 장비의 제작 및 제원

갱도모형실험의 하중재하 시스템은 표 1에 정리된 규격의 유압실린더 7개로 다양한 하중 전달 메카니즘을 재현할 수 있도록 설계, 제작되었다. 실린더 전면은 하중을 최대한 실제 터널과 같이 등분포하중으로 재하하기 위하여 $\phi 30\text{cm}$ 의 브라켓을 장착하였다. 또한, 숏크리트와 실린더 전면의 브라켓 사이에 뒤채움재인 모래를 30cm 두께로 타설하였다.

갱도모형실험을 구성하는 장비의 제원은 표 1과 같으며, 장비의 상세도는 그림 1과 같다. 그림 1 (a)는 갱도모형 시험장치 평면도, (b)는 측면도의 일부 유압 실린더를 나타낸 것이며, 갱도모형실험은 바닥면에서 수행되도록 설계되었으며, 바닥면의 마찰효과를 최대한 줄이기 위해 약 20cm 높이에 철판을 깔고 그 위에서 수행되도록 설계되었다.

표 1. 실험장비의 제원

장 비	제 원
유압실린더	$\phi 125\text{mm}$, 196.2KN (최대 245.3KN)의 용량
로드셀(load cell)	$\phi 200\text{mm}$, 196.2KN의 용량, 7EA
LVDT	30mm×3EA(가변저항식) 50mm×4EA(스트링게이지타입)

숏크리트 배면에 작용하는 응력을 측정하기 위해 7개의 로드셀이 유압실린더와 마주보도록 숏크리트 배면에 밀착되어 설치되었다. 숏크리트와 로드셀 사이에는 spacer를 이용하여 숏크리트의 곡면부에서 발생하는 응력을 일정하게 하였다. 또한 하중이 가해지는 동안 내공 변위를 측정하기 위해 로드셀 위치의 숏크리트 안쪽 면에 7개의 변위계(LVDT)를 방사방향

으로 설치하여 방사방향으로 발생한 변위만을 측정하였다. 한편, 하중재하, 로드셀 및 LVDT에 의한 측정 모두 숏크리트의 중앙 깊이(철판바닥으로부터 0.25m)에서 수행되었다.

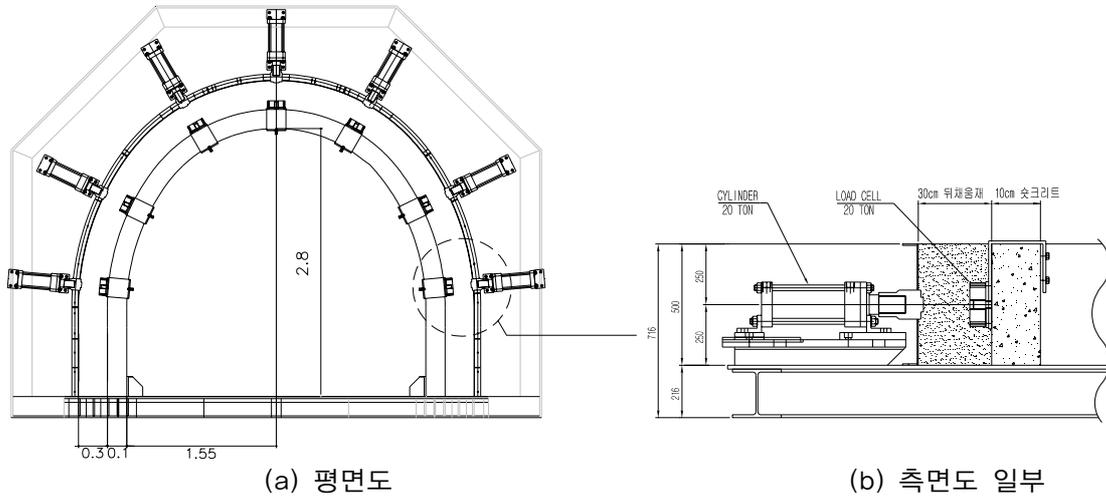


그림 1. 실험장비 상세도

그림 2는 갱도모형실험을 구성하는 하중재하를 위한 장비를 나타낸 것이다. 그림 2 (a)는 하중재하를 위한 유압실린더와 그림 2 (b)는 숏크리트 배면 응력 측정을 위한 로드셀, 그리고 그림 2 (c)는 터널 내공변위 측정을 위한 LVDT 장비를 보여주고 있다.



그림 2. 갱도모형실험장비

2.2 갱도모형실험 및 결과

숏크리트는 강섬유보강 숏크리트를 사용하였으며 배합비는 표 2에 나타난 바와 같이 시방 배합비를 사용하였고, 콘크리트 혼합기(concrete mixer)를 사용하여 기계 혼합하였다. 실험을 위해 숏크리트는 10cm의 두께로 타설하여 28일간 양생하였다.

유압실린더를 통해 하중이 가해지면서 숏크리트가 취성과파괴를 일으키는 것을 방지하기

위하여 하중 재하속도가 가능하면 아주 천천히 0.15mm/sec 정도로 유지되도록 수동으로 유압을 조절하였다.

표 2. 강섬유 보강 슛크리트 배합비

휨강도 (kg/cm^2)	45
굵은골재 최대치수 (mm)	13
슬럼프범위 (%)	12
공기량범위 (%)	2.5
단위수량 W (kg)	229
단위시멘트 C (kg)	477
물-시멘트비 W/C (%)	48
잔골재율 S/A (%)	66
단위잔골재량 S (kg)	1,001
단위굵은골재량 G (kg)	546
유동화재 (kg)	2,385
강섬유 (kg)	45

하중재하를 위해 그림 3에 나타낸 것처럼 7개의 유압실린더가 사용되었고, 본 논문에서는 그림 3과 같이 반시계방향으로 ①부터 ⑦까지의 실린더 번호를 부여하여 서술하였다. 하중재하는 천단부 3개(③, ④, ⑤), 좌·우 측벽부의 4개(①, ②, ⑥, ⑦)의 유압실린더를 각각 2셋트로 연결하여 유압조절을 쉽도록 하였고, 로드셀에서 측정되는 하중을 모니터링하면서 지반응력 상태를 수평-수직응력비(K_0)가 1.0이 되도록 하였다.

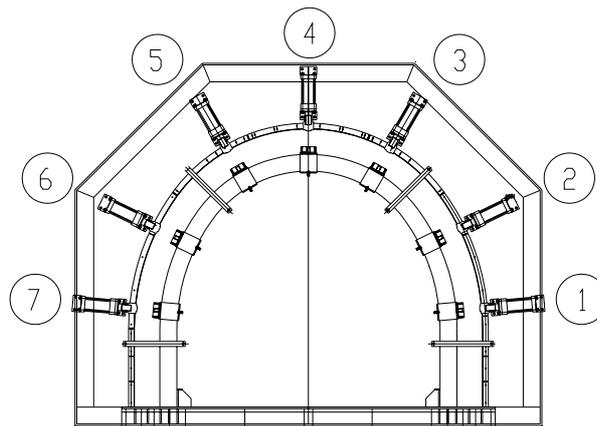


그림 3. 모형실험에서 실린더 위치

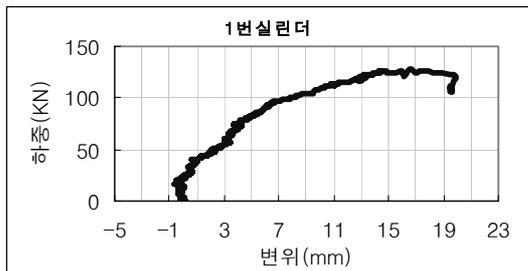
하중재하 후 ②번 유압실린더 위치에서 슛크리트에 크랙이 처음으로 생기기 시작했는데 이때 해당 위치의 로드셀에서 측정된 하중은 107.91KN 이었고, 추후에도 크랙이 발생했는데, 그 순서와 위치 및 해당 로드셀의 하중을 정리하면 표 3과 같다.

표 3. 균열순서와 균열 시 하중

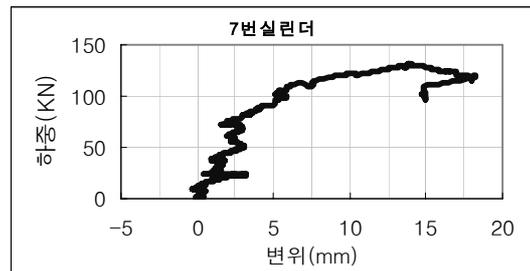
균열순서	균열위치 (해당 실린더)	균열시 하중 (KN)
1	③	90.25
2	②	107.91
3	⑥	107.91
4	⑦	120.66

균열 순서를 보면 스프링라인 쪽에서 천단부 쪽으로 균열 위치가 옮겨지는 것을 알 수 있다. 이 후 슛크리트의 완전한 파괴로 이어졌으며 이때의 파괴하중은 약 128KN 정도였다. 하지만 균열이 계속 진행될수록 균열 시 하중이 일률적으로 증가하지 못하는 경향을 보이고 있는데 이는 하중을 가하는 실린더를 수동으로 조작하였기 때문에 발생하는 오차라고 판단 된다. 실험을 통해 얻어진 대표적인 하중-변위 곡선과 실험 결과로부터 추정된 변위양상을 그림 4에 터널 위치별로 나타내었다.

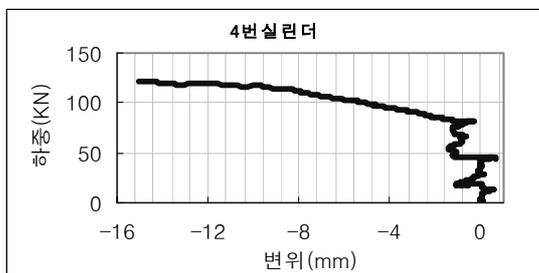
실험 결과를 종합하면, 좌·우 측벽부에서는 변위가 터널 내부로 발생하는 반면 천단부는 오히려 들리는 현상이 발생하였으며, 이 때 최대변위는 측벽부에서 약 15mm, 천단부에서 약 13mm 정도 발생했다.



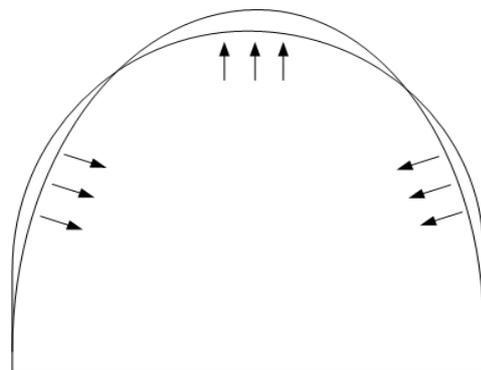
a) 오른쪽 측벽부



b) 왼쪽 측벽부



c) 천단부



d) 실제 모형실험에서 변위 경향

그림 4. 하중-변위 곡선과 변위 경향

3. 수치해석적 검증

본 논문에 사용된 프로그램은 Itasca Consulting Group Inc.에서 개발한 지반해석용 프로그램인 FLAC^{3D} ver. 3.10이다. FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)은 유한 차분법에 근간을 둔 프로그램으로 Structure 요소 및 Interface 요소를 사용하여 지반 및 지중구조물의 다양한 해석이 가능하도록 되어 있다(Itasca Consulting Group, 2006).

모형실험 결과를 동일한 조건으로 수행된 3차원 수치해석 결과와 슛크리트의 거동을 중심으로 비교 검증하였다.

3.1 해석 개요

해석 모델링은 실제 갱도모형실험과 같은 조건으로 수행하고 결과를 비교하고자 하였다. 해석모델링은 갱도모형실험이 좌·우 대칭인 점을 감안하여 해석시간을 줄이기 위해 그림 5와 같이 반단면으로 수행하였다. 참고로 3차원 해석을 위한 좌표계는 폭방향을 x, 높이 방향을 z, 깊이 방향을 y 축으로 설정하였다. 해석 경계조건은 천단부의 대칭면에서는 x 변위를 고정하고, 하중이 가해지는 부분을 제외한 외곽면은 수평(x, y)변위를 고정하였으며, 측벽 지지부 안쪽과 바깥쪽 하부경계는 모형실험과 조건이 일치하도록 x 및 z 변위를 구속하였고, 바닥면은 수직(y) 변위를 구속하였다. 슛크리트와 뒤채움재의 경계면은 일체로 거동하는 것으로 가정하였으며 지보재인 슛크리트는 그림 5 (a)와 같이 탄성체로 거동하는 shell 요소로 모델링하였다.

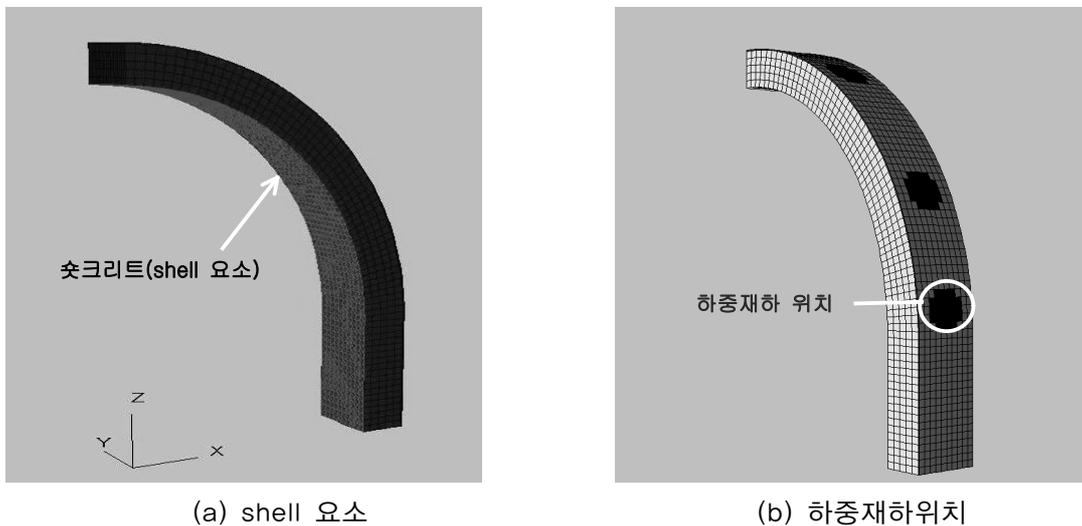


그림 5. 수치해석 모델링 개요

한편, 하중재하는 그림 5 (b)와 같이 모형실험과 동일한 위치와 면적으로 가압판(steel plate)을 통해 일정한 속도(1×10^{-3} mm/sec)를 가하는 것으로 모사하였다. 하중재하 시 슛크리트 배면의 로드셀에 가해지는 하중이 등방하중이 되도록 별도의 FISH routine을 작성하여 조절하였다.

3.2 수치해석 입력강도 정수

수치해석에 사용된 입력강도정수는 실내실험을 통해 얻은 값들을 기준으로 역해석을 실시하여 가능하면 실제 실험 결과와 일치하도록 조정하였다. 최종으로 해석에 사용된 입력강도정수들은 표 4와 표 5에 정리되었다.

표 4. 슛크리트 입력강도정수

탄성계수 (GPa)	포아송비	단위중량 (kg/m ³)
15.0	0.2	2,300

표 5. 뒤채움재 입력강도정수

탄성계수 (MPa)	포아송비	점착력 (Pa)	단위중량 (kg/m ³)	내부마찰각 (ϕ)	인장강도 (Pa)
24.6	0.3	8.27×10^4	2,000	35	4.12×10^4

3.3 수치해석 결과 정리 및 비교

그림 6은 3차원 수치해석 결과로 얻은 슛크리트의 변위경향을 나타내고 있다. 그림 6에서 알 수 있듯이 천단부는 변위가 상향으로 발생하였고 우측 측벽부는 터널 안쪽으로 변위가 발생하여 실제 모형실험과 유사한 경향을 보여주고 있다.

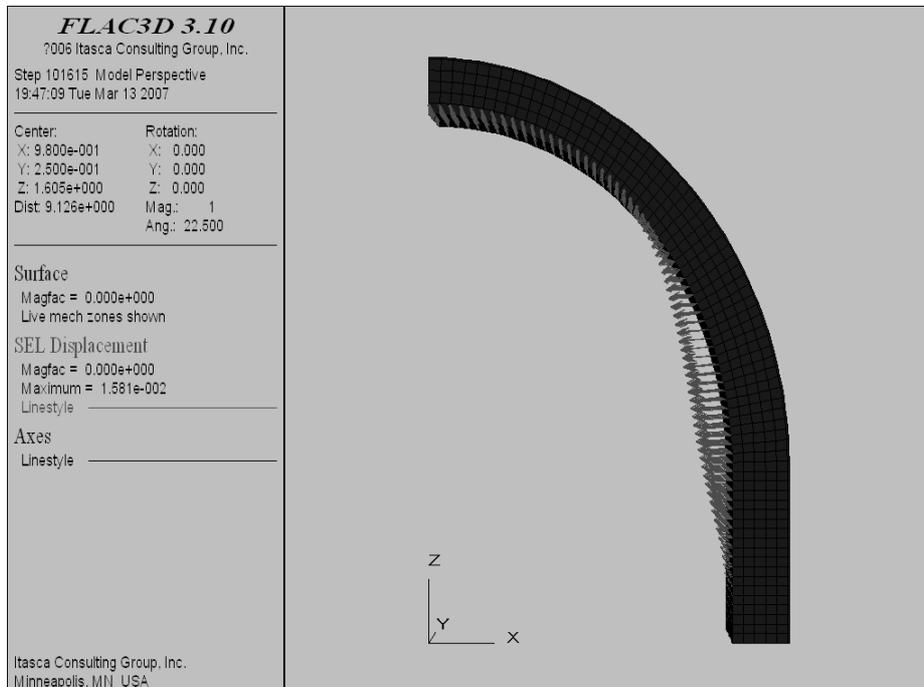


그림 6. 슛크리트의 변위벡터도

1번과 4번 실린더에서 얻은 하중-변위곡선은 그림 7 (a) 및 (b)와 같으며 실제 모형실험과 비교해보면 파괴 시의 변위가 1번 실린더에서는 유사하게 나타났지만, 4번 실린더에서는 다소 작게 발생한 것을 알 수 있다. 이는 모형실험 시 수동으로 제어되었던 하중재하 과정이 수치해석에서 완전히 동일하게 모사되지 못한 것에 기인하는 것으로 판단되며 또한 탄소성 거동을 하는 숯크리트가 해석에서 탄성체로 모델링되었기 때문인 것으로 판단된다.

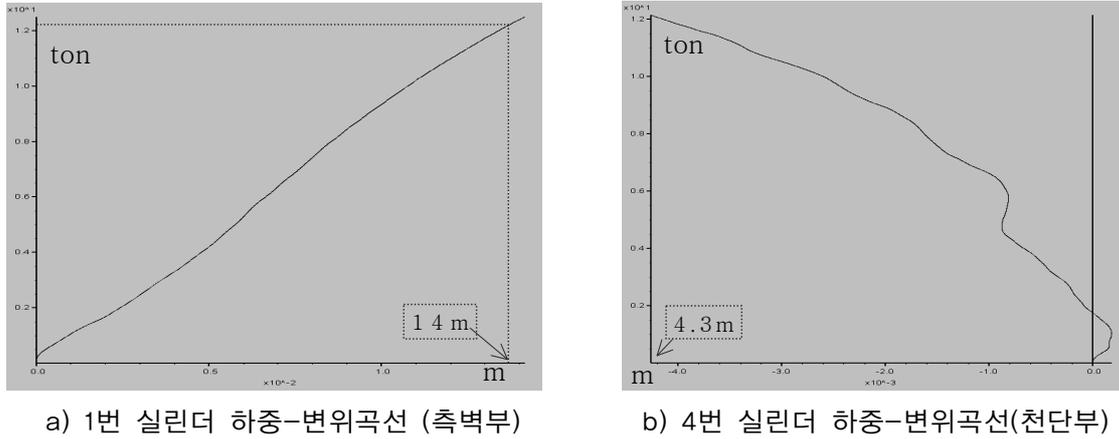


그림 7. 수치해석 시 하중-변위곡선

그림 8은 117.7KKN의 하중이 작용할 경우, 숯크리트에 발생하는 굴착면의 접선방향으로 발생하는 모멘트 분포를 나타내는데, 1번 실린더 위치에서는 양(+)의 모멘트가, 천단부와 측벽부 아래에서는 음(-)의 모멘트가 발생하는 것을 알 수 있다.

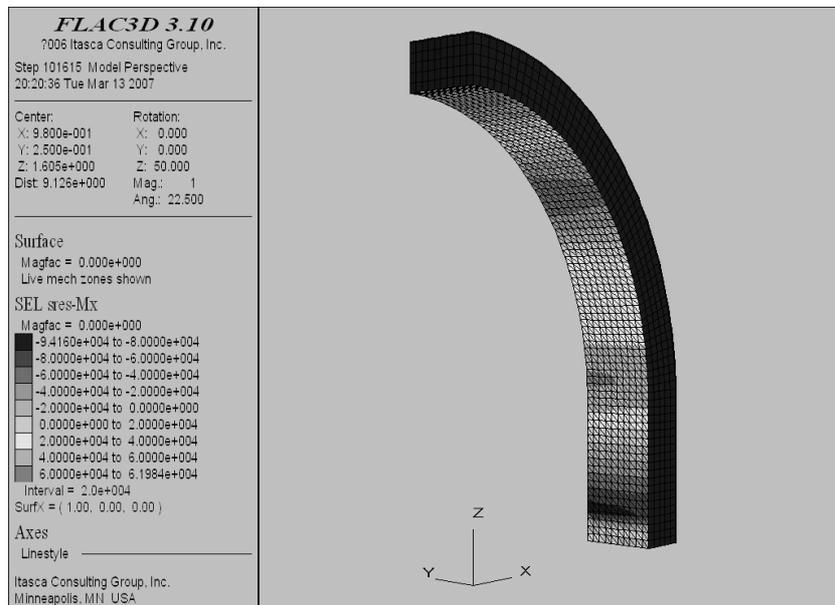


그림 8. 수치해석 시 지보재 발생응력

지보재인 숯크리트 내부에 발생하는 휨응력을 shell 요소에서 발생하는 축력과 모멘트를 사용하여 구하고 최대 압축응력, 인장응력 및 발생위치를 하중단계별로 구하여 표 6에 정리

했다. 또한, 허용응력 설계법을 적용하여 숏크리트의 파괴를 판단하였다. 즉, 설계기준강도 (f_{ck})를 21 MPa로 가정하면, 허용휨압축응력(f_{ca}) 허용휨인장응력(f_{ta})는 표 6과 같이 계산되며, 숏크리트 내부에서 산정된 최대압축 및 인장응력이 각각 계산된 허용응력을 초과하게 되면 파괴가 된다고 판단하였다(건설교통부, 1999). 모형실험 결과(표 3)에 의하면, 숏크리트에 처음 균열이 발생하는 하중 수준은 90.25KN이었는데 비해 수치해석 결과는 12.1KN 하중 작용 시에 인장파괴가 발생하는 것으로 나타나 큰 차이를 보이며 균열 위치도 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 허용응력 설계법에 의한 숏크리트의 파괴 기준이 매우 과소평가되었거나 숏크리트를 탄성체 요소인 shell 요소로 모델링하여 실제 숏크리트의 거동을 파악하는 데 무리가 있음에 기인한다고 판단된다. 따라서, 숏크리트의 파괴를 3차원 수치해석을 통해 판단하고자 할 경우 보다 정밀한 연구가 선행되어야 하며 또한 적용 시 세심한 주의가 요구된다.

표 6. 수치해석 시 발생응력

하중 (KN)	응력산정 위치 (숏크리트)	최대압축응력 (MPa)	최대인장응력 (MPa)	발생위치	$f_{ca} = 0.4f_{ck}$ (MPa)	$f_{ta} = 0.13\sqrt{f_{ck}}$ (MPa)
12.1	내면	6.00	2.11	1번 실린더	8.4	0.60
	배면	6.49	2.17			
24.5	내면	12.68	6.81	1번 실린더		
	배면	15.21	5.14			
37.5	내면	18.54	10.77	1번 실린더		
	배면	22.61	7.53			
49.1	내면	23.51	14.01	1번 실린더		
	배면	28.48	9.61			
59.1	내면	27.62	16.58	1번 실린더		
	배면	33.11	11.37			

4. 결론

본 연구를 통해 터널의 주 지보재인 숏크리트의 파괴거동을 규명하기 위해 실제 터널과 유사한 크기의 마제형 터널을 제작하여 갱도모형실험을 수행하고 3차원 수치해석에 의해 검증하였다. 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

3차원 수치해석을 통해 모형실험과 유사한 숏크리트의 거동을 모사할 수 있었으나, 숏크리트의 파괴를 허용응력 설계법에 기초하여 판단하는 방법은 숏크리트의 파괴 기준이 과소평가되어 숏크리트의 파괴를 수치해석에 의해 판단하는 기준으로 단순히 적용되기에는 많은 무리가 있음을 알았다.

따라서, 숏크리트의 파괴를 3차원 수치해석을 통해 판단하고자 할 경우 보다 정밀한 연구가 선행되어야 하며 또한 적용 시 세심한 주의가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 건설기술개발사업을 위한 연구지원(04핵심C01)에 의해 수행된 결과의 일부로서 관계기관에 깊은 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부 (1999) 콘크리트 구조 설계기준, 한국콘크리트학회, pp.276.
2. 유광호, 박연준, 배규진(2000) “연약 암반층에 굴착된 터널의 안전율 평가” , 대한터널협회 논문집, Vol. 2, No. 3, pp.47-57.
3. 유광호, 박연준, 홍근영, 이현구, 김재권(2005), “지보재 파괴를 고려한 터널 안전율의 수치해석적 산정 연구” , 한국터널공학회 논문집, Vol. 7, No. 1, pp.42.
4. Itasca Consulting Group, Inc.(2006), FLAC^{3D}, Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 3.10, Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, USA.