

대단면 급속시공을 위한 최적의 곡면막장형상개발에 관한 모형실험 Model Test on the Optimization of Concave-Shaped Face Development for Rapid Tunnel-Whole-Face Excavation

유승일¹⁾, Seung-Il Ryu, 윤지선²⁾, Ji-Son Yoon

¹⁾ (주) 바우컨설탄트 지반/터널부 사원, Member, BAU Engineering Co., LTD

²⁾ 인하대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Inha University

SYNOPSIS : In this paper, there is intended to introduce the new tunnel face shape, that is concave shaped face, and discusses its effects on the tunnel stabilization. Therefore, a comparative analysis in which the stability of a concave face was compared to that of a conventional plane face on the basis of displacement patterns in the tunnel face was conducted using a model test. In order to check and confirm displacement patterns on the concave face according to the radius of curvature as well as those around the face according to lateral pressure coefficient(k), two experimental concave models, produced at a scale of 1:2 and 1:5(tunnel radius), of the forefront of the curved area extended from plane face was built and tested.

Key words : concave shaped face, plane face, lateral pressure coefficient(k), displacement pattern, 3D model test

1. 서 론

최근에 도로의 고속화 및 터널의 이용도가 증가하면서 점차 터널의 초장대화가 필요한 시점에서 터널 시공의 공사기간 단축 및 공사비 절감의 중요도가 크게 대두되고 있다. 기존의 NATM과 같은 터널공법에서는 굴착 직후 벽면은 슛크리트였으나, 막장은 통상 무지보 상태 또는 록볼트에 의하여 지지되기 때문에 재래공법과 비교하여 암반의 느슨함을 감소시킬 수 있으나, 막장은 통상 무지보 상태로 놓여있기 때문에 붕괴의 위험성을 항상 내포하고 있는 것이 현실이다. 특히, 연질하고, 또는 붕괴성 암반이나 팽창성 암반 등에서는 막장의 밀려나옴이나 붕괴가 발생하는 경우가 있어 막장의 안정을 위해 굴진길이의 단축, 중심부 남김, 굴착단면축소, face shotcrete, face rock bolts 등의 보조공법을 채택하는 것이 현실이다. 하지만, 이러한 보조공법은 공사기간 및 공사비를 증대시키는 원인이 되며, 또한 굴착단면축소의 방법인 단면분할공법은 막장주변의 암반에 대한 응력의 재분배 회수를 증가시켜 암반상태를 불량하게 하는 원인이 된다. 따라서 이러한 문제점들을 피하기 위해서는 전단면굴착공법이 유리하지만, 막장의 응력집중 및 자립성 등의 안정성에 문제로 제약받는 경우가 빈번하다. 따라서 막장을 곡면(반구형)으로 형성하여 양호한 응력상태로 유지함으로써 이러한 문제점을 해결하는 것이 시급한 과제이다.

또한 굴착공법은 암반조건, 터널의 단면형상, 연장, 공사기간, 등을 고려해서 안전하고 경제적인 공법을 선정할 필요가 있지만, 일반적으로는 막장이 자립하는 단면의 크기에 의해 결정되는 경우가 많다. 따라서 막장의 자립정도가 경제적 터널 굴착공법을 선정하는데 중요한 역할을 한다. 하지만 현재 국내 터널 시공시에는 막장이 굴진방향에 직립함으로써 응력의 집중이 발생하며 또한 막장의 안정성을 우려하

여 단면분할공법을 채택하는 것이 일반적 공법으로 되어왔다. 그러나 이러한 방법은 경제적으로 큰 부담이 되며 공사기간 연장의 한 원인이 된다. 특히 장대터널과 같은 경우에는 공사기간 및 공사비용이 더욱 중요하므로 곡면막장 굴착공법을 개발하여 적용한다면 보다 나은 응력상태를 유지할 수 있어 분할공법을 피함으로써 공사비절감 및 공사기간 단축에 매우 유리할 것이며 시공 후에도 관리측면에서 경비절감의 효과를 얻을 수 있을 것이다.

따라서, 본 연구는 3차원 모형실험을 통하여 곡면막장의 안정성을 막장면 및 막장후방의 응력분포양상에 의거 기존의 직립막장과 비교 검토하였고, 응력측정을 위해 스트레인게이지(CEA-06-032UW-120)와 Strain Smart Data system5100을 사용하였다. 모형실험에는 원심모형실험, 저면마찰 모형실험, 광탄성 모형실험, 등가재료 모형실험 등이 일반적으로 많이 사용되고 있으며, 본 연구에서는 지반을 등가재료 및 완전탄성체로 가정하여 가공이 용이한 아크릴로 막장형상공시체를 제작하여 실험을 수행하였다. 특히 본 연구에서는 측압계수에 따라 막장주변 지역의 응력분포양상과 더불어, 곡면막장면의 곡률반경에 따른 응력분포양상을 확인하기 위해 직립막장형상 및 막장 전방으로부터 최전방곡면지점을 터널반경의 0.5, 0.2배의 두 가지 곡면형상에 대해 실험을 수행하여 그 결과를 비교 분석함으로써 최적의 곡면막장면의 형상을 개발하는 데에 그 목적을 두었다.

2. 기본이론

2.1 초기응력

지하 암반은 상부지층의 자중에 의해 유발된 응력과 지각의 운동과 관련된 구조적 기원의 구속응력을 받는다. 지하 암반에 공동이 굴착되면 응력장은 국부적으로 교란되고 공동주위에 새로운 응력상태가 유도된다. 이러한 원위치 응력과 유도 응력의 크기와 방향을 알아내는 것은 지하 공동설계를 위해 필수적이다. 왜냐하면, 많은 경우 지압의 크기가 암반의 강도를 초과하기도 하며, 이에 다른 불안정성은 광산 공동의 거동에 심각한 결과를 초래할 수 있기 때문이다.

지표아래 1000m의 심도에 있는 단위는 면적의 암반요소를 고려할 때, 이 요소 위에 놓여 있는 수직 암주의 무게는 심도와 상부암반의 단위중량(0.027MN/m³)의 곱으로 얻어진다. 따라서 요소에 작용하는 연직방향 수직응력은 27MPa이다. 이 응력은 다음과 같은 간단한 관계식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\sigma_v = \gamma z \quad (1)$$

여기서 σ_v : 수직응력

γ : 암반의 단위중량

z : 지하심도

지하심도 z 에서 암반요소에 작용하는 수평응력의 크기를 추정하는 것은 수직응력의 경우보다 훨씬 어렵다. 일반적으로 수직응력에 대한 평균수평응력의 비를 다음과 같이 문자 k 로 표기한다.

$$\sigma_h = k\sigma_v = k\gamma z \quad (2)$$

Terzaghi & Richart(1952)에 의하면 상부지층의 형성과정에서 측방향 변형이 일어나지 않았고 자중에 의해서만 재하받은 암반의 k 값은 심도와 무관하게 $k = \nu / (1 - \nu)$ 로 주어진다. 여기서 ν 는 암반의 포아송비이다. 이 관계식은 초창기 암반역학 분야에서 널리 사용되었으나, 오늘날에는 부정확한 것으로 판명되어 거의 사용되지 않는다. 세계 도처 및 국내의 토목, 광산 현장에서 수평응력을 측정된 결과 k 는 천부에서 큰 값을 가지는 경향이 있으며, 심도가 깊어짐에 따라 감소함을 보여준다.

2.2 공동형상과 초기응력비의 영향

주어진 응력장에서의 최적의 공동 형상을 선택할 때에 설정해야 할 목표의 하나는 공동주변의 압축응력분포가 일정하도록 고려해야 한다. 이 문제에 대하여는 Richards 와 Bjorkman가 상세히 고찰한 바 있다. 그들은 주변의 응력이 똑같이 분포하는 공동형상을 “조화공동(harmonic hole)”이라고 하였다. 주어진 응력장에서의 최적한 공동의 개략형상을 신속히 구하는 방법은 아치와 측벽의 압축응력이 같은 공동형상이 그 응력장에서 가장 적합한 형상이다. 따라서 똑같은 압축응력분포를 주는 공동형상은 보통 초기주응력비와 같은 장단축비를 갖는 계란형 또는 타원형이다. 이러한 이론을 통하여 터널굴착중의 막장의 안정성 검토를 3차원적으로 고려할 때, 기존의 방식인 막장면이 직립의 형상일 경우에 막장면과 측벽부의 경계부에 많은 응력집중현상이 나타나고 있으나 이를 곡면으로 형성한다면 응력분포가 골고루 막장면 부근에 퍼져, 응력집중의 문제를 해결할 수 있다고 판단된다.

2.3 곡면막장(concave face)의 정의

그림에 나타나듯이 기존의 막장은 굴착방향에 직립으로 형성되고 있으나, 곡면막장이라 함은 직립막장으로 인한 모서리부분의 응력집중을 감소시키고 막장부근의 응력을 골고루 분포시킴으로써 자립성을 증가시키기 위하여 막장면을 그림과 같이 굴착방향으로 오목하게 들어가는 형상으로 유지시킨 막장면을 말한다. 여기서 0.1D라 함은 곡면막장의 최전방 굴진점의 거리가 직립막장면의 거리로부터 터널직경의 0.1배임을 의미한다.

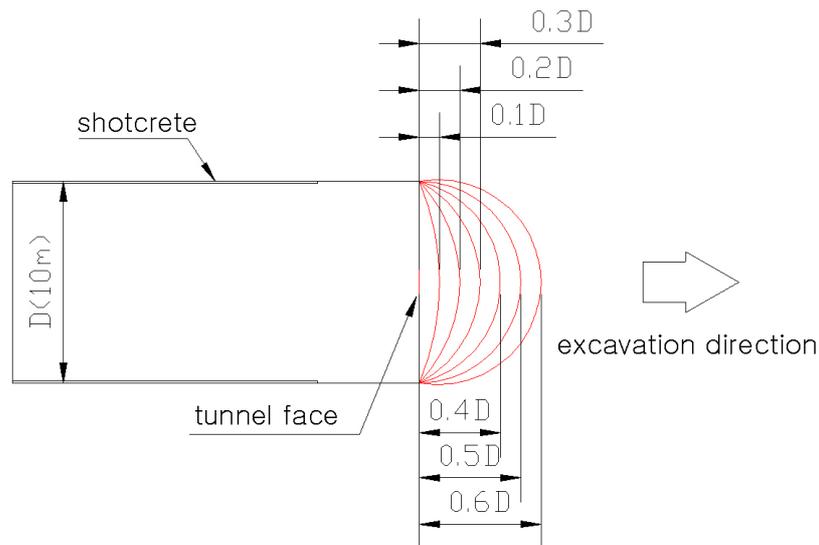


그림 1. Longitudinal view of a plane face and concave faces

2.4 터널의 지압과 파괴형상

2.4.1 소성압에 의한 변상 메커니즘

소성압이란, 터널 굴착에 의해 주변 지반이 소성화 하고 지보공으로 지반 변형을 억제 못하는 경우와 시간 경과와 함께 소성 영역의 확대에 따라 내공쪽에 지반이 밀어 나옴으로써 복공에 하중으로서 지압이 작용할 경우를 말한다.

소성압은 터널 주변 지반의 시간의존성(점성, 또는 점탄소성, 점토광물에 기인하는 팽창압)의 역학적

거동에 기인하는 것과 터널시공 후의 외적조건 변화(지하수의 변동, 근접 시공, 산사태 등)에 기인하는 것 두가지로 분류할 수 있다. 아래 그림은 소성압에 의한 대표적인 변상형태의 모식도를 나타낸 것이다.

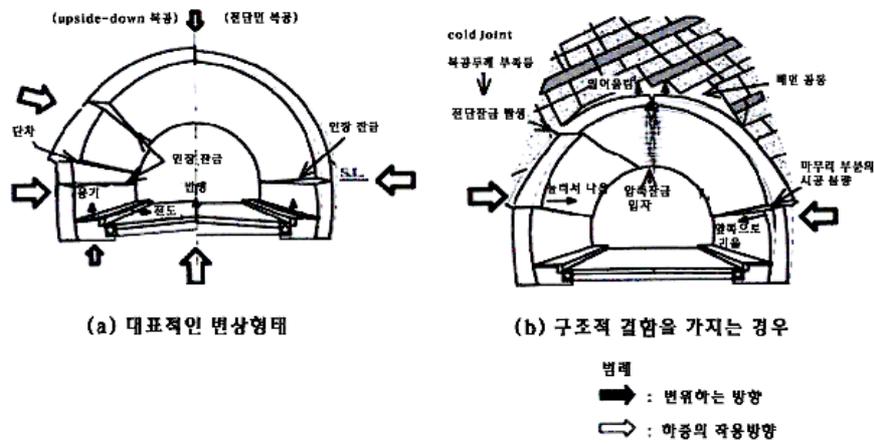


그림 2. Schematic diagram of the damage in the tunnel by the plastic pressure

2.4.2 이완지압에 의한 변상 메커니즘

이완지압이란, 터널의 굴착, 지보공의 침하, 복공 배면의 공동 등에 의해 터널 위쪽 지반이 이완해서 어느 높이 상당의 지반 중량이 터널 복공에 직접, 연직하중으로 작용하는 경우를 말한다.

이완지압의 작용패턴은 이완영역이 차차 확대해서 복공에 작용하는 하중이 점차 증가하며, 복공 배면에 공동이 잔존하는 상태에서 지진, 호우 등이 방아쇠가 되어 상반 지반이 순식간에 붕락해서 하중이 급증하여 돌발성 붕괴를 일으킨다.

여기서, 이완영역이란 강제지보공이나 복공의 설계에 있어서 필요로 하는 하중을 추정하기 위해 생각된 영역, 그리고 터널 안정성을 생각할 경우 주변 암반의 변형 거동이나 파괴현상을 고려해서 정의한 영역을 일컫는다. 아래 그림은 이완압에 의한 대표적인 변상형태의 모식도를 나타낸 것이다.

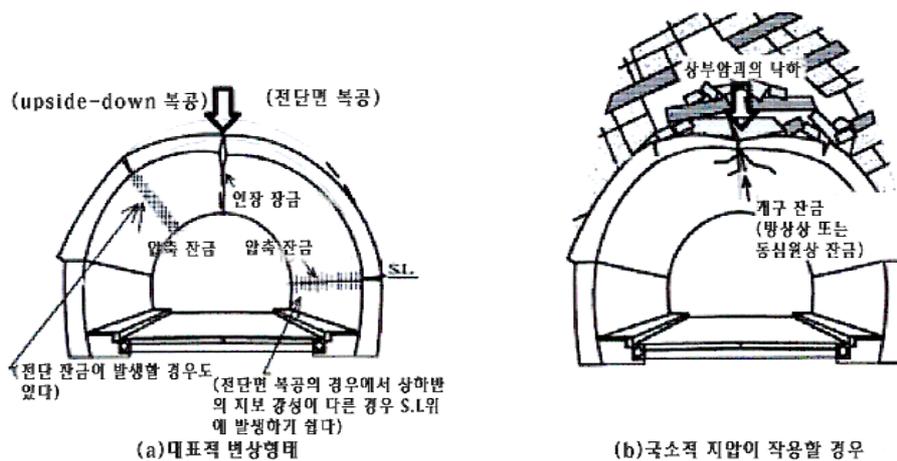


그림 3. Schematic diagram of the damage in the tunnel by the loosening pressure

2.4.3 편압지압에 의한 변상 메커니즘

편압이란, 터널 횡단면에 있어서 복공에 좌우 비대칭적으로 작용하는 지압의 총칭으로 지압의 방향을 설명하는 것이다. 아래 그림은 편압 발생 예와 편압에 의한 대표적인 변상형태의 모식도를 나타낸 것이다.

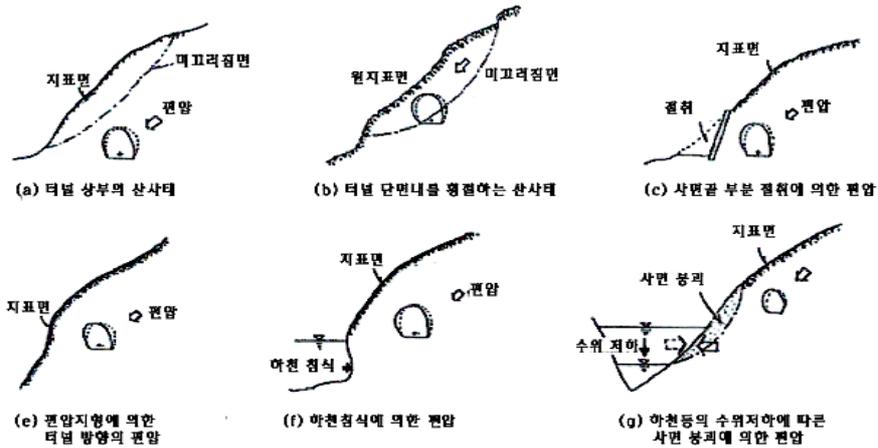
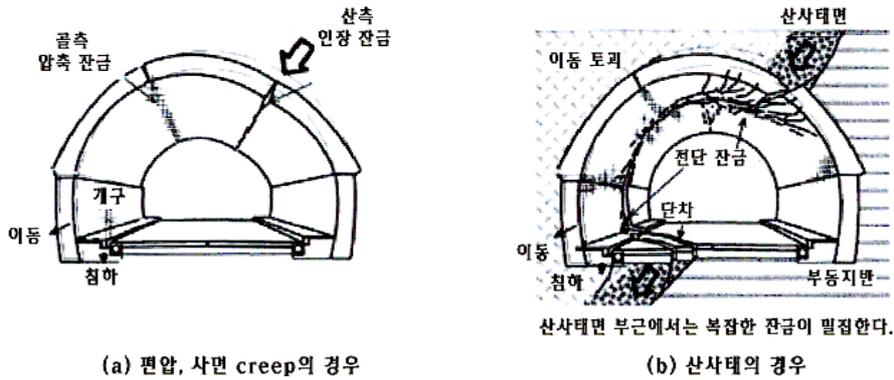


그림 4. Example of the declining pressure



범례 : ← 외력 방향 → 인장, 전단 잔금 + 압축잔금, 압축

그림 5. Schematic diagram of the damage in the tunnel by the declining pressure

3. 모형실험

3.1 실험장치 및 내용

실험은 3D삼축재하장치를 제작하여 실제 지하응력상태와 같이 터널 공시체에 전방향압축을 가하여 축압계수에 따른 각각의 막장별 변형률을 스트레인게이지를 통해 측정하는 방법으로 수행하였다. 모형 터널은 지반을 완전탄성체인 등가재료로 가정하여 직경 10cm의 원형터널을 경계조건 2D를 두어 막장 형태별 공시체를 제작하여 실험을 실시하였다.

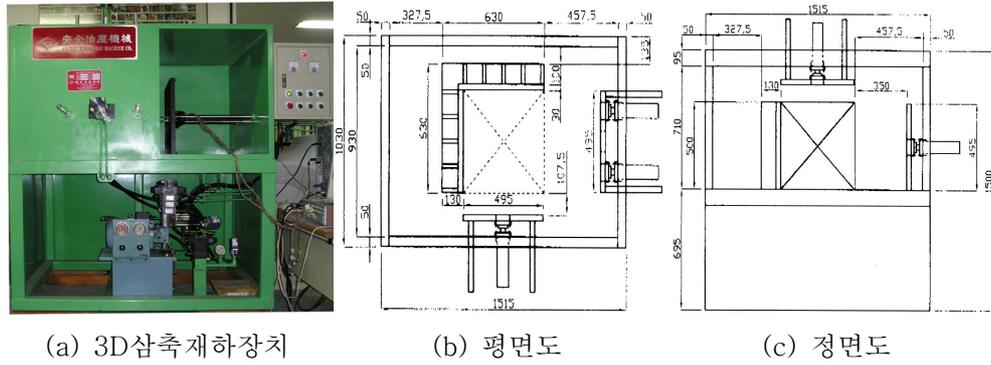


그림 6. Photograph and Schematic diagram of triaxial compression test apparatus

직립막장에 대한 곡면막장의 응력집중완화 효과 및 최적의 곡면막장형상 개발을 위한 모형실험 결과는 축압계수에 따라 Spring Line, Center Line, 45° Diagonal Line 그리고 막장후방 2D까지 0.5D의 간격으로 수평방향 및 접선방향의 응력분포양상을 구분하여 정리하였다.

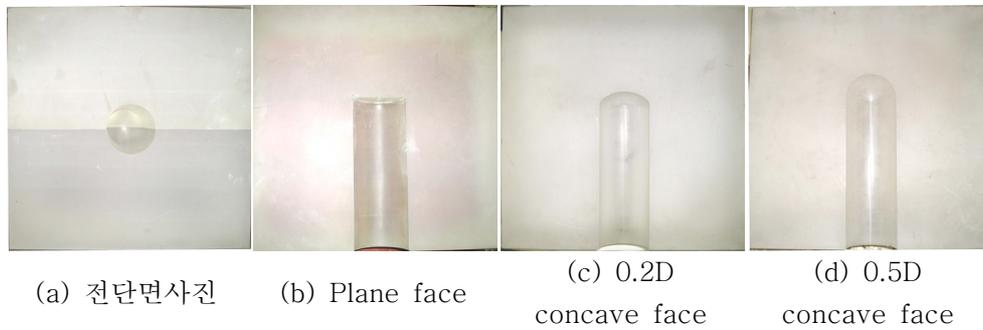


그림 7. Photograph of the model

3.2 실험결과 및 고찰

각각의 축압계수에 따른 곡면막장의 최대변위값과 천단침하의 값들을 직립막장의 값들에 대한 백분율로 나타낸 결과는 다음과 같다.

표 1. Max. face movement ratios of the concave faces to the plane face

	PLANE	CON-0.5D	CON-0.2D
K=0.5	100%	207%	117%
K=1.0	100%	104%	72%
K=1.5	100%	91%	76%
K=2.0	100%	96%	72%
K=2.5	100%	99%	74%

표 2. Roof settlements ratios of the concave faces to the plane face

	PLANE	CON-0.5D	CON-0.2D
K=0.5	100%	139%	122%
K=1.0	100%	124%	107%
K=1.5	100%	259%	142%
K=2.0	100%	195%	132%
K=2.5	100%	67%	90%

위 표에서 알 수 있듯이 0.2D의 곡면막장면에서는 측압계수 $K=1.0$ 이상의 경우에 직립막장면의 최대 변위값에 비해 최대 28%에서 24%까지의 적은 변위값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한, 각 조건별 천단침하량들을 검토한 결과 막장면에서의 최대변위값보다 적게 나타냄을 알 수 있으며, K 값이 0.5부터 2.0까지에서는 직립막장면에서 약간 작은 값을 나타내고 있으나 K 값이 2.5일 경우에는 오히려 반대의 양상을 나타내고 있다. 0.2D의 곡면막장의 경우 K 값이 0.5에서 2.0까지는 7~42%정도의 큰 값들을 나타내고 있으나 K 값이 2.5의 조건에서는 10% 적은 값을 나타내고 있다. 따라서 천단변위의 값은 $K=2.5$ 를 제외하고는 다소 크게 나타났으나, 그 크기가 막장면과 막장후방에서의 값보다 작은 수치로 나타나 막장 안정에 큰 영향을 못미치는 것으로 판단된다.

따라서, 수평응력이 수직응력보다 큰 경우, 0.2D의 곡면막장면을 유지하여 굴착할 경우 기존의 직립막장면에서의 최대변위보다 19~28%의 감소효과를 가져올 수 있으므로 굴진장의 증대효과를 가져올 수 있을것이라 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 기존의 직립막장면으로 인한 막장면 부근의 응력집중현상과 이로 인한 불안정성의 결과를 줄이기 위하여 막장면의 곡면형상화로 인한 응력 집중현상 완화를 유도하기 위하여 3차원 모형실험을 실시하였으며 결론은 다음과 같다.

1. k 값이 증가하면 할 수록 직립막장보다 0.2D, 0.5D의 곡면막장에서의 최대변위가 작아짐을 알 수 있으며, 특히 0.2D의 곡면막장면에서의 최대변위값은 각각 직립막장면에서의 최대값의 0.72($K=1.0$), 0.76($K=1.5$), 0.72($K=2.0$), 0.74($K=2.5$)배로 0.5D의 곡면막장면에 비하여 더 작은 값을 나타내고 있다.
2. k 값이 증가할 수록, 천단변위값은 감소하나 막장면에서의 최대변위값은 증가하는 경향을 알 수 있으며, 막장면의 최대변위값이 천단변위값보다 더 큰 값을 나타내고 있다. 따라서 수평응력이 증가함에 따라 천단부근보다 막장면에서의 안정성 확보가 중요함을 알 수 있다.
3. k 값이 증가할 수록 막장후방의 수직변위값은 감소하나 수평변위는 증가하는 경향을 알 수 있으며, 막장후방 1.5D거리 이후에서는 직립막장과 곡면막장의 변위가 거의 같아지며 수렴해감을 알 수 있다.
4. 위 결과를 검토한 결과 K 값이 0.5인 조건(즉, 수직응력이 수평응력보다 큰 경우)에서는 직립막장면이 곡면막장보다 효과적인 것으로 판단되나, K 값이 증가할수록(즉, 수평응력이 수직응력보다 큰 경우) 곡면

막장이 더 효과적인 것으로 나타나며, 특히 0.2D의 곡면을 형성하였을 때가 가장 효과적인 것으로 판단된다.

5. 특히, 국내 및 국외의 초기지압의 일반적인 경향을 고려할 때, K값은 심도 100m이하에서는 측압계 수가 1.0보다 큰 경우가 우세한 것을 알 수 있으며, 따라서 수평응력이 수직응력보다 큰 경우에 0.2D의 곡면막장면을 형성하여 굴착해 가는 것이 터널 막장면 부근의 응력집중현상을 완화시켜 변위를 가장 적게 발생시킬 수 있으며, 이로 인한 굴진장의 증대효과를 가져올 수 있을 것이라 판단된다.

6. 앞으로의 과제로는 분할굴착지반의 전단면곡면막장면으로의 굴착 가능성, 터널 단면이 원형이 아닌 마제형 등의 다른 단면에서의 곡면막장 형상의 효율성, 최대 1회 굴진가능길이 및 곡면굴착을 위한 최적의 발파패턴에 관한 연구가 필요하다고 판단된다.

참고 문헌

1. 신희순외 2명, 토목기술자를 위한 지질조사 및 암반분류, 구미서관, pp.471~476, 2000.
2. 윤지선, NATM공법의 조사·설계·시공, 구미서관, pp.216~217, 1991.
3. 윤지선, 대규모 지하공동의 정보화시공, 구미서관, pp.77~80, 2002.
4. 윤지선, 지하공간건설공학, pp.39~51, 1996.
5. 임영국, 알기쉬운 터널역학, 원기술, pp.37~41, 321, 1994.
6. 임한옥, 김치환, 터널공학, 구미서관, pp.126~133, 2003.
7. 신희순, 선우춘, 이두화, 토목기술자를 위한 지질조사 및 암반분류, pp.471~476, 2000.
8. 한응교, 스트레인게이지-이론과 응용-, 보성문화사, 1983.
9. 江守一郎, シコーリング, D.J., 模型實驗の理論と応用, 技報堂, pp.1~84, 1973.
10. A. L. Window, "Strain Gauge Technology", 2nd edition, Elsevier Applied Science, 1992.
11. E. Hoek and E.T.Brown, "Underground excavations in rock", pp.221~223, 1980.
12. F.Tonon and B. Amadei, "Effect of Elastic Anisotropy on Tunnel Wall Displacements Behind a Tunnel Face", Rock Mechanics and Rock Engineering, pp.141~146, 2002.
13. James W. Dally and William F. Riley, "Experimental Stress Analysis", 1978.