

연암터널의 막장 및 무지보 구간의 거동형태에 관한 연구

이영주^{1)*}, 김창용²⁾, 김광염³⁾, Wulf Schubert⁴⁾

A Study on the Behaviour Modes of the Face and Unsupported Span for Weak Rock Tunnel

Lee Young-Zoo, Kim Chang-Yong, Kim Kwang-Yeom and Wulf Schubert

Abstract The influence of round length on the tunnel stability and construction cost is well acknowledged by many researchers and engineers but the coherent procedure is not available for its determination. In this study, the behaviour modes of the face and unsupported span was investigated for weak rock tunnel by a small scale model test, PFC3D and FDM analyses in consideration of the round length. Total five types of behaviour modes are defined and quantitative estimation of the behaviour modes was established in terms of the safety factor for the face stability and the conditional chart. Although the proposed method has some restrictions, this method can provide useful information for the optimization of the round length and excavation, especially in design stage.

Key words Round length, Behaviour mode, Safety factor, Weak rock tunnel

초 록 굴진장이 터널의 안정성 및 시공비에 미치는 영향에 대해서는 많은 연구자와 기술자들이 잘 알고 있지만, 아직 굴진장 결정에 대해서 일관된 절차가 수립되지는 못한 실정이다. 본 연구에서는 굴진장을 고려한 연암터널의 막장과 무지보 구간의 거동형태를 실내모형실험, PFC3D 및 FDM 해석을 통하여 조사하였다. 총 다섯 개의 거동형태를 정의하였고, 막장 안전율과 설계 도표를 통해 거동형태를 정량적으로 판단할 수 있도록 하였다. 비록 본 연구에서 제안한 방법이 몇몇 제한을 갖지만, 굴진장과 굴착의 최적화를 위한 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

핵심어 굴진장, 거동형태, 안전율, 연암터널

1. 서 론

연암터널의 굴진장 결정은 그 기술적, 경제적 중요성에도 불구하고 아직까지 관련 기술자의 경험과 직관에 의존하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 연암터널의 막장과 무지보 구간의 거동형태를 파악하고 정량화할 수 있는 방안을 개발하였다.

굴진장 결정에 있어서 경암 터널의 경우엔 불안정한 키블록이 발생하지 않도록 한다면 최대 굴진장은 주로

발파기술과 관련된다. 그러나 연암터널의 경우에는 발파보다는 기계굴착으로 시공되며, 붕괴나 여굴 발생이 주로 과도한 응력에 의해 발생하고, 지반과 지보의 상호작용 또한 고려해야 하므로 더 복잡한 양상을 띤다. 본 연구에서는 연암터널을 대상으로 하므로 불연속면에 의한 거동은 고려하지 않는다. 또한 터널심도 역시 저심도 터널을 대상으로 하므로 과지압에 따른 squeezing 현상이나 rock burst는 고려하지 않는다.

대부분의 기존 연구는 막장 안정성에만 국한되어 터널 굴착시 무지보 구간에서 발생할 수 있는 붕괴, 봉락에 대해선 고려하지 못하며, 따라서 실제 현장에서 시행되는 굴진장에 따른 굴착과 그에 따른 거동형태를 반영할 수가 없다(Chambon, 1994). 또한 식 (1)에서 보는 바와 같이 굴진장을 고려한다 해도 이를 막장 안전율과 통합하여 판단하기 때문에 막장과 무지보 구간의 안정성의 관계에 대해 파악할 수가 없다(Vermeer, 2002).

¹⁾ SK 건설 주식회사 과장

²⁾ 한국건설기술연구원 수석연구원

³⁾ 한국건설기술연구원 연구원

⁴⁾ Graz University of Technology, Austria

* 교신저자 : im20zoo@skec.co.kr

접수일 : 2006년 8월 21일

심사 완료일 : 2006년 12월 15일

$$FoS = \frac{0.9 \tan \phi + 18C/\gamma D}{2 + 3(RL/D)^{6 \tan \phi / FoS}} \quad (\text{after Vermeer, 2002}) \quad (1)$$

FoS = safety factor,
 ϕ = friction angle,
 C = cohesion,
 γ = unit weight,
 D = tunnel diameter,
 RL = round length

이는 일반적으로 터널을 굴착할 때에 발생할 수 있는 막장과 무지보 구간에 대한 거동형태를 적절히 분류하지 못하였기 때문이다. 본 연구에서는 막장과 무지보 구간의 거동형태를 규명하기 위하여 실내모형실험과 PFC3D 해석을 실시하였다. 또한 거동형태를 정량적으로 분석하기 위하여 상대전단응력 개념을 사용한 탄성 해석을 실시하여 그 결과를 설계도표로 표시하였다.

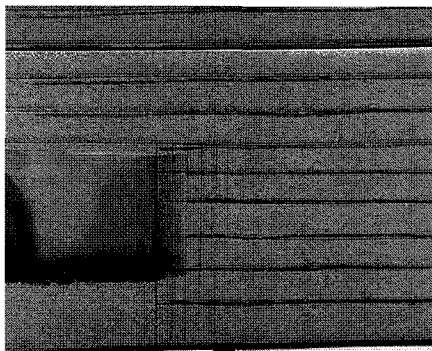
2. 막장과 무지보 구간의 거동형태

2.1 실내모형실험

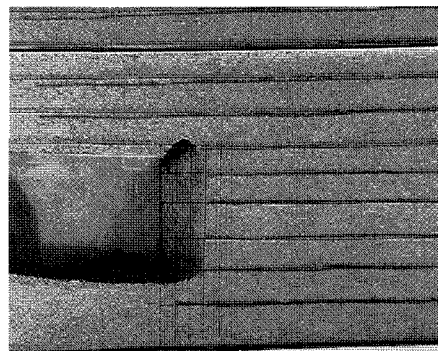
실내모형실험은 굴진장에 따른 거동형태의 변화를 개

략적으로 살피기 위해 수행하였다. 따라서 차원해석을 통해 모델을 구성하는 대신 몇 차례 시행착오를 거치며 막장이 자립하는 재료의 물성을 결정하였다. 1:40의 스케일로 반단면 모형을 제작하였으며, 지반은 모래로 모사하였다. 모래의 함수비(1.6-2.0%)로 지반의 겉보기 접착력을 조절하였다. 터널의 직경은 10 m(25 cm)이며 심도는 10 m와 20 m 두 가지 경우를 고려하였으며, 록볼트는 모델에서 고려하지 않았다. 터널 라이닝의 재질은 2 mm 두께의 플라스틱판(강성 라이닝)과 철사 및 비닐을 조합(연성 라이닝)한 두 가지 경우를 사용하였다. 연성 라이닝의 경우보다 강성 라이닝을 사용했을 때, 더 큰 굴진장에서 여굴 및 붕괴가 발생하였다. 따라서 무지보 구간의 안정성을 위해선 설치하는 라이닝의 초기 강성이 중요함을 알 수 있다.

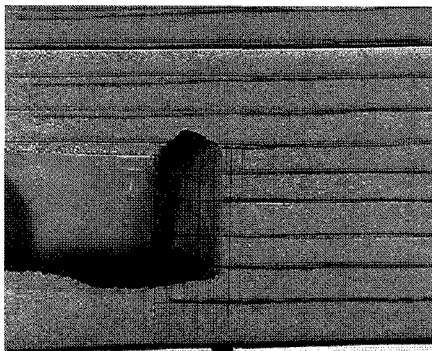
Fig. 1은 20 m 심도의 플라스틱 라이닝의 경우 굴진장에 따른 거동형태 변화를 보여준다. Fig. 1의 결과에서 보는 바와 같이 초기 터널막장이 안정할 경우 여굴은 무지보 구간에서만 발생하며, 만일 적용한 굴진장이 과도할 경우 지표함몰과 같은 붕락이 발생하고 이 과정에서 부분적으로 막장이 붕괴된다. 이는 초기에 막장이 안



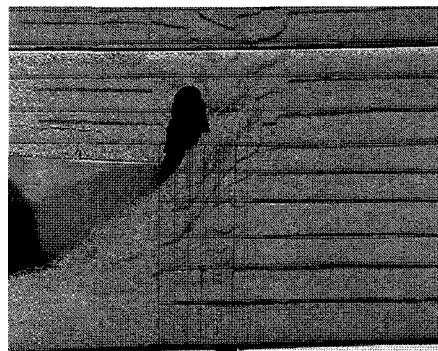
(a) 'stable' at 2 m round length



(b) 'overbreak' at 3 m round length



(c) 'maximum' at 4 m round length



(d) 'collapse' at 5 m round length

Fig. 1. Behaviour modes in small scale model tests

정하고 적용한 굴진장이 붕락을 초래하지 않은 한 굴진장은 막장의 안정성에 영향을 미치지 않음을 의미한다.

2.2 PFC3D 해석

모형실험에서 관찰된 거동형태는 정성적인 것으로 어떠한 지반 조건하에 개개의 거동형태가 발생하는지를 알 수는 없다. 이를 위해 동일한 조건하에서 유사한 거동형태를 보이도록 입력변수를 조절하여 PFC3D 해석을 실시하였다. PFC3D의 입력변수는 코드 제조사에서

제공한 삼축압축시험 모델을 통해 Mohr-Coulomb 파괴정수로 표현할 수 있다(Itasca, 1999). Fig. 2는 10 m 직경의 터널이 10 m 심도하에 존재하고 마찰각은 32도, 점착력은 15.5 kPa일 경우의 거동형태이다. 반단면 상반굴착을 고려하였고, 모델의 폭은 터널 직경의 1.5배이다. 모형 실험과 같이 록볼트는 고려하지 않았으며, 터널 라이닝은 wall element로 묘사하여 변위를 허용하지 않는다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 굴진장이 증가함에 따라

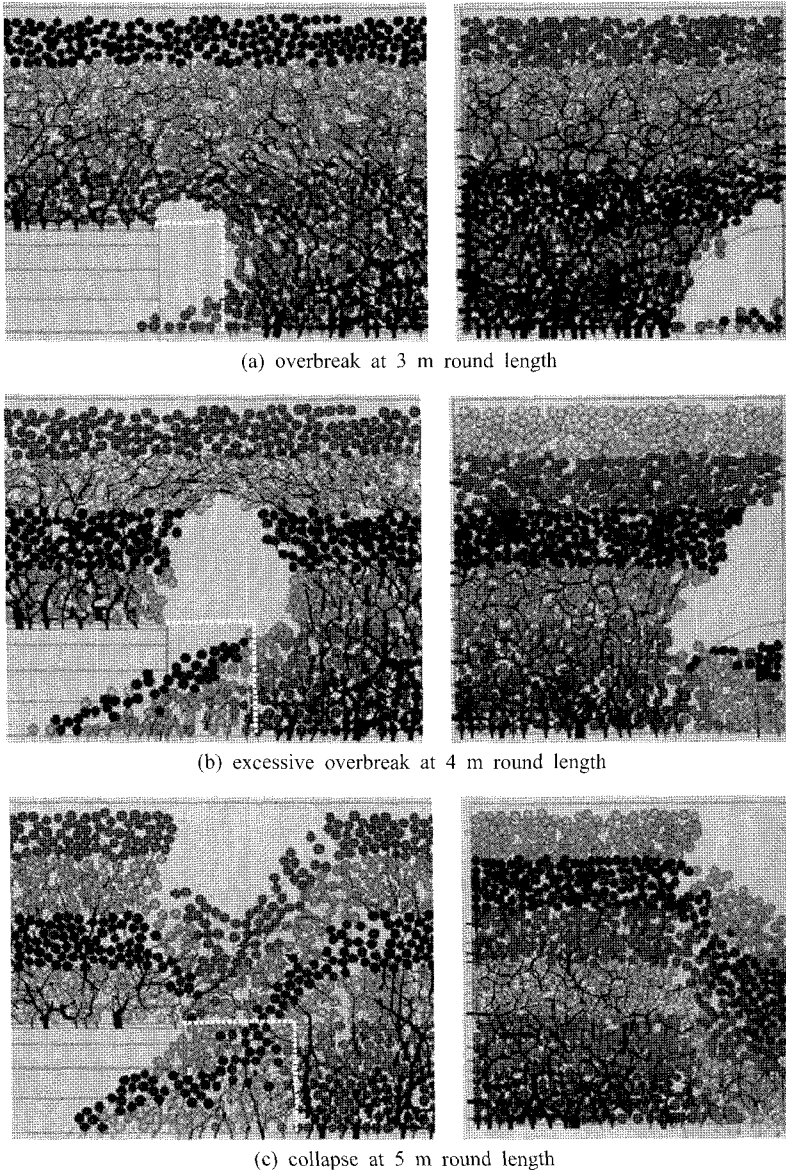


Fig. 2. Behaviour modes in PFC3D analysis

모형실험에서 관찰된 거동형태를 보여준다. 4 m 굴진장의 경우 모형실험에서는 관찰하지 못한 과도한 여굴이 발생하는데, 이는 PFC3D에서 라이닝을 완전강성체로 가정하였기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 이 경우 거동형태는 ‘여굴’보다는 ‘붕락’으로 판단하는 것이 타당할 것이다.

2.3 막장과 무지보 구간의 거동형태

모형실험과 PFC3D 해석에서 관찰된 거동형태를 정리하면 Table 1과 같다. 실제 파괴양상을 더 상세히 분류할 수도 있지만, 굴착과 지보설계를 위한 분류는 Table 1에서와 같이 5가지로 충분하다고 판단된다. 거동형태 4와 5의 경우는 막장이 불안정한 경우로 굴진장에 따른 거동형태를 고려하는 것이 무의미하며, 거동형태 1, 2, 3의 경우 막장이 안정하여 굴착이 가능하므로 결정된 굴진장에 따른 거동형태가 나타난다.

3. 막장 안전율과 설계도표

3.1 막장 안전율

10 m 심도에 있는 10 m 직경의 터널에 대해 지반강도를 변화시켜가면서 PFC3D 해석을 실시하였다. 그 결과 식 (1)의 Vermeer의 막장 안전율이 PFC3D 해석 결과와 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 Vermeer의 안전율은 터널의 심도가 막장 안정성에 미치는 영향을 고려하지 못한다. 따라서 본 연구에서는 최대상대전단응력(MRSS, maximum relative shear stress) 개념을 이용하여 탄성모델의 FDM 해석을 실시하였고, 이를 통해 터널심도를 고려할 수 있도록 막장 안전율을 정의하였다.

상대전단응력은 최대탄성전단응력과 지반의 전단강도 비로서 여러 연구에서 사용하였으나, 이를 파괴현상

과 비교 분석한 예는 없었다(Trckova 2003, Brinkgreve 2001). 본 연구에서는 Vermeer의 안전율이 1.0이 되는 지반강도를 이용하여 막장에서의 최대상대전단응력을 구하였다. 이때 고려한 터널의 심도는 10 m, 직경 10 m 이다. 모형 실험 및 PFC3D 해석과 마찬가지로 록볼트는 고려하지 않았으며, 측압 계수(Ko)는 0.5로 가정하였다.

계산의 한 예로 10 m 직경의 터널이 10 m 심도 하에 있고 지반의 마찰각이 20 도일 경우, Vermeer의 안전율이 1.0이 되는 점착력은 9.3 kPa이다. 이 경우에 FDM 해석을 통해 MRSS를 구하면 2.35이다. 동일 조건 하에서 터널의 심도가 50 m로 증가할 경우에 Vermeer의 안전율은 여전히 1.0이나 MRSS는 증가하게 된다. 만일 MRSS를 2.35로 유지하고자 한다면 점착력은 46.8 kPa 이 되어야 한다. 이 점착력을 본 연구에서는 임계점착력(critical cohesion)으로 정의한다. 여러 터널 직경과 심도, 전단강도에 대해 FDM 해석을 실시하고, 그 결과를 일련의 fitting 절차를 거쳐 수식화하면 임계점착력은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$C_{critical} = \frac{\sigma_1}{\cos\varphi} \left[\frac{\alpha_2}{\alpha_1 \cot\varphi + \beta_1} - \beta_2 \sin\varphi \right] \quad (2)$$

여기서, $\sigma_1 = m\gamma \left(H + \frac{D}{4} \right)$: MRSS 발생 위치에서의 최대주응력(kPa)

H = 터널 심도(m),

D = 터널 직경(m),

γ = 지반의 단위중량(kN/m³)

m = 1.14(D=5 m)

1.23(D=10 m)

1.19(D=15 m)

Table 1. Behaviour modes of the face and unsupported span

No.	거동 형태	적용 가능한 굴착방법
1	안정 (stable): 막장은 안정하며 여굴도 발생하지 않는다.	굴진장을 늘릴 수 있는 가능성이 있음.
2	여굴 (overbreak): 막장은 안정하며 무지보 구간에서 소규모 여굴이 발생한다.	붕락이 발생하지 않도록 굴진장을 줄여야 하나 경우에 따라선 제한된 부피의 여굴을 허용하면서 굴착을 설계할 수도 있음.
3	붕락 (collapse): 무지보 구간에서 과도한 여굴이 발생하거나 때론 지표함몰도 발생한다. 이 과정에서 막장도 부분적으로 붕괴된다.	과도한 굴진장으로 인하여 붕락이 발생하므로 굴진장은 반드시 줄여야 하며 때에 따라선 선지보공도 필요함.
4	막장여굴 (overbreak with unstable face): 막장에서 여굴 또는 소규모의 붕괴가 발생한다.	막장에서의 소규모 여굴 발생으로 적절한 막장보강으로 굴착 개시가 가능함.
5	막장붕락 (collapse with unstable face): 막장에서 대규모 붕괴가 발생하며 때론 지표함몰도 발생한다.	선지보공과 막장지보공 없이는 실질적으로 굴착 개시가 불가능함.

$$\alpha_1 = 0.009D + 0.522$$

$$\beta_1 = 0.013D + 0.539$$

$$\alpha_2 = 0.445 + 0.0045D$$

$$\beta_2 = 0.555 - 0.0045D$$

(m, $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ 는 fitting 상수들임)

본 연구에서는 터널의 막장 안전율을 식 (3)에서 보는 바와 같이 지반의 점착력과 임계점착력의 비로 정의하였다.

$$FoS = \frac{C}{C_{critical}} \quad (3)$$

3.2 무지보 구간의 안정성

무지보 구간의 거동형태를 정량적으로 파악하기 위하여 일련의 PFC3D 해석과 FDM 해석을 실시하였다. PFC3D 해석의 경우 우선 막장이 안정해야 하므로 점착력은 임계점착력보다 크고 이를 점차적으로 증가시켜가면서 굴진장에 따른 거동형태를 살펴보았다. 개개의 경우에 대해 FDM 해석을 통해 무지보 구간의 최대 상대전단응력을 계산하였다.

예를 들어 10 m 심도, 10 m 직경의 터널에서 마찰

각이 32 도일 경우, 3 m를 굴진하면 여굴이 발생하는 점착력은 26 kPa 이고, 붕락이 발생하는 점착력은 14.5 kPa이다. 이 경우 임계 점착력은 식 (2)에 의하여 8 kPa이다. 따라서 막장 안전율이 1.8(=14.5/8) 이하일 경우 3 m를 굴진하면 붕락이 발생한다. 또한 막장 안전율이 3.3(=26/8) 이상일 경우에는 3 m를 굴진하여도 여굴이 발생하지 않는다. 이러한 개개의 경우에 대해 최대상대 전단응력을 계산하여 이를 굴진장과 점착력, 최대상대 전단응력에 따라 도시하면 Fig. 3과 같다.

3.3 설계도표에 의한 굴진장 결정

3.2절에서 본 바와 같이 막장 안전율과 굴진장에 따라 터널의 거동 형태를 결정할 수 있다. 또한 아래와 같은 가정하에 Fig. 3의 결과를 다른 터널 직경, 심도 및 지반 강도에 대해 적용할 수 있다.

‘동일한 막장 안전율과 동일한 상대 굴진장 하에서는 동일한 거동형태가 발생한다’

Fig. 3의 결과를 상대 굴진장과 막장 안전율에 따른 거동형태로 도시하면 Fig. 4와 같은 설계도표를 작성할 수 있다. 본 연구에서 채택한 가정과 민감도 분석 결과,

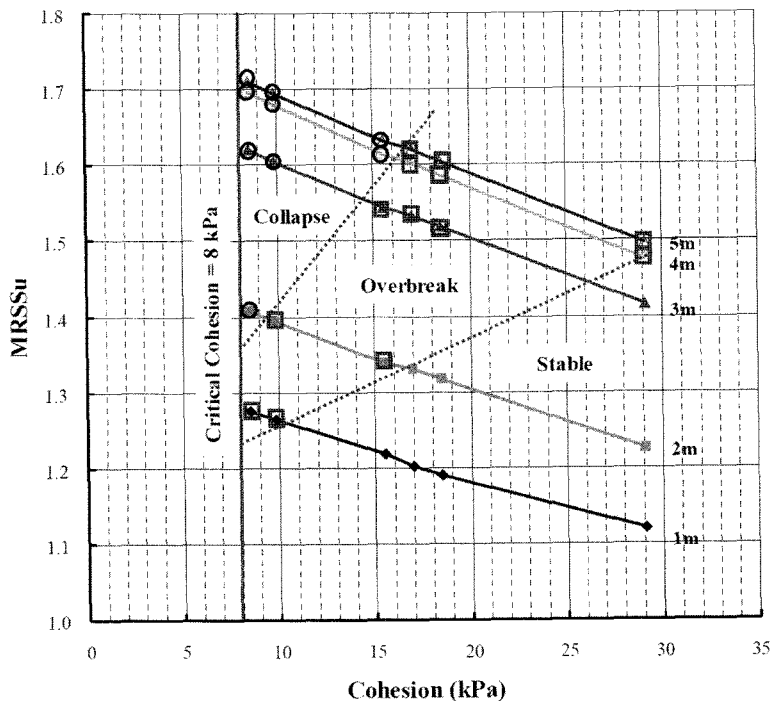


Fig. 3. Stability analysis of the unsupported span

실제 현장적용이 가능한 범위를 고려하여 설계도표를 적용할 수 있는 조건은 아래와 같다.

- 터널 심도(H) < 150 m
- 터널 직경(D) = 5-15 m
- $1 < H/D < 15$
- 측압계수(Ko) = 0.5-1.0
- 지반의 마찰각 = 20-40°
- 지반의 점착력 > 10 kPa
- 굴진장 < 5 m
- 반단면 굴착(터널의 높이는 터널직경의 1/2).

Fig. 4의 설계도표를 이용하면 굴진장에 따른 터널의 거동형태를 결정할 수 있으며, 개별 현장의 여건에 따라

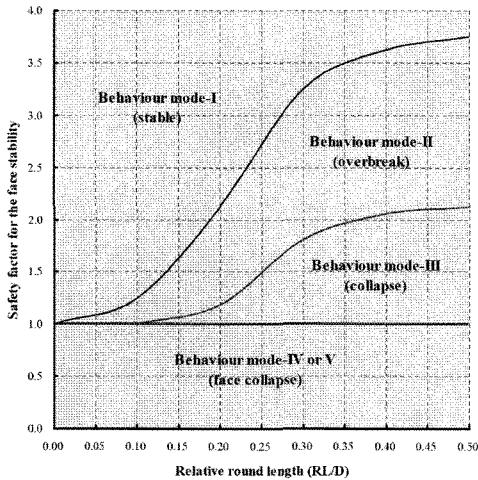
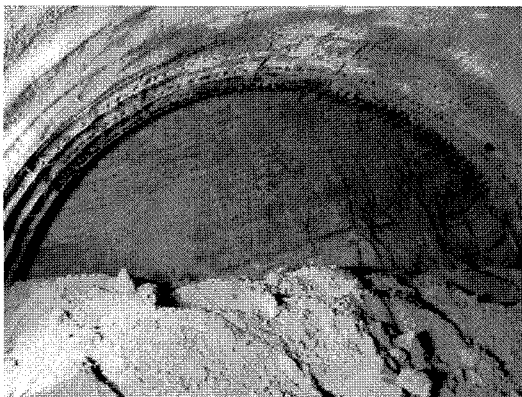
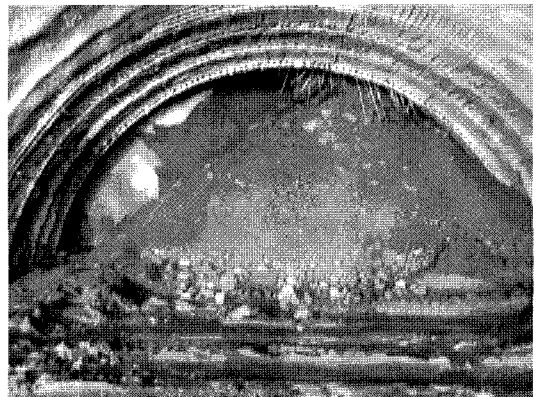


Fig. 4. Conditional chart for excavation plan in weak rock tunnelling



(a) stable face with low overburden



(b) face collapse with high overburden

Fig. 5. Example showing the influence of overburden on the face stability

최적의 굴진장을 결정할 수 있다. 예를 들어 직경이 10 m인 터널의 막장 안전율이 식 (2)와 (3)에 의해 1.5로 계산될 경우 약 1.3 m 이하의 굴진장에서는 여굴이 발생하지 않는다. 그러나 2.5 m 이상의 굴진장에서는 붕락이 발생한다. 따라서 1.3-2.5 m의 굴진장 사이에서는 여굴이 발생한다. 만일 현장 여건이 추가 공사비를 투입하 고서라도 공기단축을 위해 여굴을 허용하려 한다면 1.3-2.0 m 사이의 굴진장을 택할 수 있다. 사이클 타임 과 시공단가를 고려하여 각각의 굴진장에 대한 시공비, 시공기간을 분석하면 최적의 굴진장을 결정할 수 있다.

4. 막장 안정성 평가에 대한 현장적용 사례

Fig. 5는 심도가 터널 막장의 안정성에 미치는 영향을 잘 보여주는 사례이다. 지반은 미고결 사암이며, 마찰각은 28도, 점착력은 71.4 kPa이다. 직경 15 m의 터널로서 Fig. 5(a)는 49 m 심도에 위치한 막장이며, 안전율이 1.4로 계산되었다. 사진에서 보는 바와 같이 막장은 안정하며, 포어폴링만 설치한 상태에서 굴착이 무사히 이루어졌다. 굴착이 진행됨에 따라 심도가 깊어져 72.3 m 심도 부근에서는 포어폴링과 막장 슛크리트를 시공하였지만 막장붕괴가 발생하였다. 이 경우 막장 안전율은 0.97로 계산되었다. 이러한 붕락은 현장에서 막장 안정성을 평가할 때 막장에 드러난 지질조건만 고려하고 터널심도를 무시하였을 경우 흔히 발생한다.

또 다른 사례는 본 연구가 균질등방성 암반을 가정하였지만 다층지반에의 적용 가능성을 보여준다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 막장에 드러난 지반은 사암층, 사암-이암 혼합층, 이암층이며, 각 층의 압축강도는 0.3, 1.0,

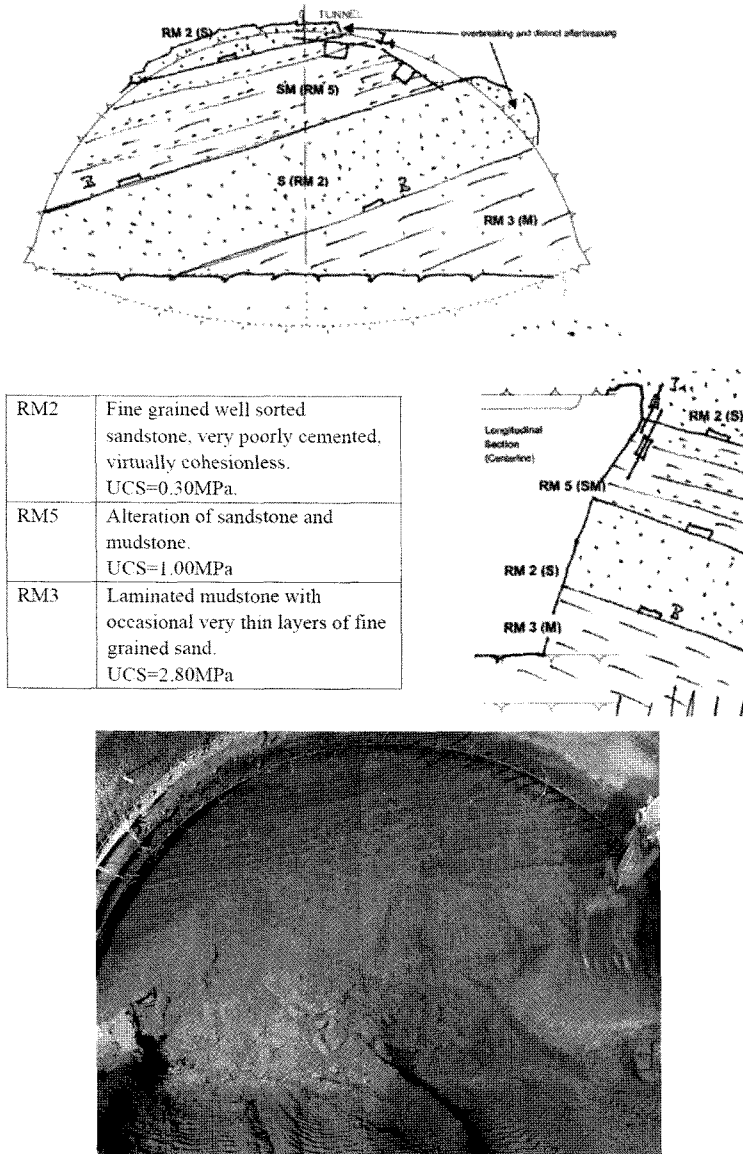


Fig. 6. Example showing the estimation of the face stability in multi-layered ground

2.8 MPa이다. 각 층에 대한 개별 막장 안전율을 계산하면 0.9, 3.1, 8.5이며, 각 층의 면적비를 고려해 합산하면 약 3.0이 된다. 막장 지질도에 나타난 것과 같이 안전율이 1.0 이하인 사암층에서만 여굴이 발생하며 막장은 안정하다. 특히 지층의 경사가 막장 안정성에 유리한 방향으로 기울어져 있으며, 이러한 경우 적절한 위치에 포어폴링만 설치하여도 굴착이 무사히 이루어질 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 연암터널에서 막장과 무지보 구간의 거동형태에 대해 실내모형 실험과 PFC3D, FDM 해석을 통해 조사하였다. 연구를 통해 막장과 무지보 구간의 거동형태를 5 가지로 분류하였으며, 초기 막장이 안정하고 적용된 굴진장이 봉락을 초래하지 않은 이상 굴진장은 막장 안정성에 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났다. PFC3D 해석과 최대상대전단응력개념을 이용한 탄성

모델 해석을 이용하여 막장안전율을 정의하였다. 본 연구에서 정의된 막장 안전율은 Vermeer의 안전율과는 달리 터널의 심도가 막장 안정성에 미치는 영향을 고려할 수 있으며, 또한 무지보 구간의 거동형태를 나타낼 수 있는 지표로 이용할 수 있다. 따라서 막장과 무지보 구간의 거동형태를 막장 안전율을 이용해 정량적으로 판단할 수 있다. 막장 안전율과 굴진장에 따른 거동형태를 설계도표에 도시하여 적절한 굴진장을 결정할 수 있도록 하였다. 사이클 타임과 시공단가 등의 시공정보를 이용하여 각각의 굴진장에 따른 공사비와 공기를 조사하면 개별 현장에 적용 가능한 최적의 굴진장을 결정할 수 있다.

시공시 보다 정확한 굴진장 결정을 위해서는 암반의 시간의존성 거동이나 굴진장에 따른 라이닝 안정성 평가에 대한 연구가 이루어져야 한다. 그러나 본 연구가 지닌 몇몇 한계와 가정을 고려하더라도, 설계시 연암터

널에서 최적의 굴진장을 결정할 수 있는 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. P. Chambon and J. F. Corte, 1994, Shallow tunnels in cohesionless soil : stability of tunnel face, J. of Geotech. Engng. Vol. 120, No. 7, pp. 1148-1165.
2. P. A. Vermeer, N. Ruse & T. Marcher, 2002, Tunnel heading stability in drained ground, Felsbau 20, No. 6, pp. 8-18.
3. Itasca, 1999, PFC3D User's guide, Minneapolis, USA.
4. J. Trckova and P. Prochazka, 2003, Experimental and numerical modeling of the tunnel face stability, Proc. ISRM 2003 congress, Johannesburg, South Africa, pp. 1247-1250.
5. R. B. J. Brinkgreve and P. A. Vermeer, 2001, Manual of Plaxis 3D tunnel, Rotterdam, Balkema.

이 영 주



1993년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1995년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학석사
2006년 Graz University of Technology, Austria 공학박사
Tel: 02-3700-7069
E-mail: im20zoo@skec.co.kr
현재 SK 건설주식회사 GSUC팀 과장

김 창 용



1990년 한양대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1992년 한양대학교 공과대학 자원공학과 공학석사
1999년 한양대학교 공과대학 자원공학과 공학박사
Tel: 031-910-0224
E-mail: cykim@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 국토지반연구부 수석연구원

김 광 영



1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1999년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학석사
2005년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사수료
Tel: 031-910-0225
E-mail: kimky@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 국토지반연구부 연구원

Wulf Schubert



1977 오스트리아 Graz대학교 토목공학 공학사
1980 오스트리아 Leoben대학교 공학박사
Tel: +43-316-873-8614
E-mail: schubert@tugraz.at
현재 Graz대학교 교수