

해저터널 시공중 문제구간의 수리적 특성이 막장의 안정성에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구

홍은수¹⁾, 박의섭^{1)*}, 신희순¹⁾, 김형목¹⁾, 류동우¹⁾

A Numerical Analysis: Effects of Hydraulic Characteristics of a Hazardous Zone on the Face Stability in Subsea Tunnelling

Eun-Soo Hong, Eui-Seob Park, Hee-Soon Shin, Hyung-Mok Kim, Dong-Woo Ryu

Abstract Tunnelling under water table induces many geotechnical problems because of groundwater. In subsea tunneling, reduction of face stability can induce flooding in the vicinity of a fracture zone characterized by high permeability and high water pressure. In this study, the effects of high water pressure on the stability of a tunnel face in a limited zone with high permeability (hazardous zone) are analyzed. On the basis of the 'advance core' concept, the seepage force acting on a hypothetical cylinder ahead of a tunnel face is modeled. This study focuses on the hydraulic behavior of the ground ahead of the tunnel face by three-dimensional steady-state seepage analyses. The impact of the hazardous zone on the seepage force and stability of the tunnel face are simulated and analyzed. In light of the analysis results, it is estimated that the distance from the tunnel face to the exterior boundary limit, which the seepage force significantly affects the stability of the tunnel face, of a hypothetical cylinder is approximately 5 times the tunnel radii. Despite the restrictive assumptions of this study, the results are highly indicative regarding the risks of hazardous zones.

Key words Face stability, Hazardous zone, Hydraulic gradient, Subsea tunnel, Water pressure

초 록 지하수면하의 터널 굴착은 물로 인한 많은 지반공학적 문제가 나타나며, 해저터널의 경우 높은 투수성과 고수압을 나타내는 파쇄대 근처에서의 안전율 감소로 인한 침수사고를 유발될 수 있다. 이 연구에서는 유한한 폭의 투수성이 높은 구간(문제구간)에서 터널 안전성에 대한 수압의 영향에 대하여 분석하였다. advance core 개념에 따라 막장전방의 가상 실린더에 작용하는 침투력을 모사 하였으며, 3차원 정상류 침투수 해석을 통하여 막장전방 지반의 수리적 거동에 주안점을 두고 침투력과 막장면의 안정성에 대한 문제구간의 영향을 분석하였다. 그 결과 막장면으로부터 터널의 막장면 안정성에 영향을 주는 가상 실린더의 경계면까지의 거리는 터널 반경의 약 5배 정도인 것으로 추정된다. 이 연구의 적용된 가정의 제한성에도 불구하고 문제구간의 위험성을 고려할 할 때 이 연구결과가 시사하는 바가 크다.

핵심어 막장 안정성, 동수경사, 수압, 위험구간, 해저터널

1. 서 론

최근 국내외를 불문하고 그 어느 때보다 해저 터널에 대한 관심이 고조되고 있으며, 실제로도 많은 해저터널이 시공 또는 계획되고 있다. 그러나 해저터널을 실현

하려면 많은 공학적 난제를 해결하여야 한다. 그 중 대표적인 문제는 터널 시공중에 고수압이 작용하는 조건에서 지반강도와 투수특성이 매우 불량한 파쇄대(문제구간: hazardous zone)를 조우할 가능성이 크다는 것이다. 문제구간의 매우 큰 고수압은 막장 붕괴의 요인이 될 수 있으며, 무한한 용출수 유입원은 터널의 침수를 유발할 수 있다. 대부분의 터널 시공중 침수피해 발생 사례에서는 막장 전방에 사전에 파악되지 못한 유한한 폭의 문제구간이 매우 중요한 원인으로 작용하는 것으

¹⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부

* 교신저자 : espark@kigam.re.kr

접수일 : 2008년 10월 9일

심사 완료일 : 2008년 10월 24일

계재 확정일 : 2008년 10월 24일

로 보인다(홍은수 등, 2008). 그러나 보고된 침수 사례는 사고의 전개 상황과 수습 기록만 보여줄 뿐이며, 막장 진행에 따라 변화하는 문제구간의 수리적 영향이 막장의 안정성에 미치는 영향에 대한 체계적인 연구 결과를 찾아보는 것은 어렵다.

터널 막장의 파괴 메카니즘은 그동안 많은 사람들이(Leca와 Pannet, 1988; Leca와 Dormineux, 1990; Anagnostou와 Kovári, 1996) 연구한 분야이다. 이러한 연구의 토대 위에 Leca와 Dormineux(1990), El Tani(2003), Schweiger 등(1991), Bobet(2001), Lee와 Nam(2001) 등은 지하수위 아래에서 굴착되는 터널의 안정성에 대한 수압 또는 침투압의 영향에 대하여 심도 있는 연구를 하였다. 또한 Schubert와 Steindorfer(1998), Jeon 등(2005), Baek 등(2006)은 단층 파쇄대와 같은 유한한 폭을 가진 연약대가 터널의 안정성과 거동에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 그러나 막장 전방의 파쇄대가 터널의 안정성에 미치는 영향에 대하여도 역학적, 수리적 관점에서 많은 심도 있는 연구가 이루어 졌지만, 파쇄대에 작용하는 고수압의 영향에 대하여 연구한 사례는 드물다.

최근 Lunardi(2000)는 'advance core' 개념에 의한 터널 막장의 파괴 메카니즘을 이론화하였다. advance core는 막장 전방 지반에 위치하며 그 직경이 터널의 직경과 같고, 터널의 중심축 방향 변형에 의하여 터널 막장의 거동(예, 막장의 터널 길이 방향 변위)에 직접적인 영향을 주는 것으로 생각되는 가상의 원통형 실린더로 정의된다(그림 1 참조). Lunardi(2000)는 실내 모형 시험을 통하여 advance core의 길이를 터널 직경, D의 2~3배로 추정하기도 하였지만, 막장전방 파쇄대의 역학적 특성이나 침투압과 같은 수리적 영향이 고려된 것이 아니었다. 해저 터널 또는 고수압이 작용하는 산악 터널과 같이 격리된 작업 환경에서는 침수사고로 인한 인적 물적 피해 규모와 사회적 영향이 매우 심각해질 수 있는 만큼 막장 안정성에 대한 문제구간의 수리적 특성에 대한 이해와 연구는 매우 중요하다. 이 연구에서는 advance core의 개념을 활용하여 해저터널의 막장 전방에 고수압이 작용하는 문제구간이 존재하는 경우를 개념화 하고 터널의 안정성에 관한 수리적 특성의 영향을 분석하였다. 수리 특성의 분석은 3차원 정상류 침투 해석을 통하여 수행하였다.

2. 해석 모델의 구성

막장 전방의 문제구간의 수리적 특성만을 고려한 advance core에 작용하는 침투압을 그림 2에서와 같이 모델링하였다. 그림에서 R은 터널 반경, d는 advance core의 터널

길이방향 거리, d_h 는 막장에서 지반과 문제구간(hazardous zone)의 경계(border plane)까지의 거리이다. u는 터널 막장면과 평행한 advance core의 표면에 작용하는 침투압, τ 는 advance core 실린더의 외주면에 작용하는 단위 마찰저항력으로 가정하였다.

이때 포함된 가정은 다음과 같다.

- 1) 지반은 균질하고 등방이며, 인장강도는 무시할 수 있다.
- 2) 지반의 투수계수는 모든 방향에서 같으며, 막장에서 침투압은 터널의 막장에 연직하게 작용하고 터널 반경방향 침투압은 무시할 수 있다.
- 3) 지반의 파괴 형상은 원통형이며, Mohr-Coulomb 파괴 기준을 따른다.
- 4) advance core는 강체와 같이 거동하며 자중은 무시한다.

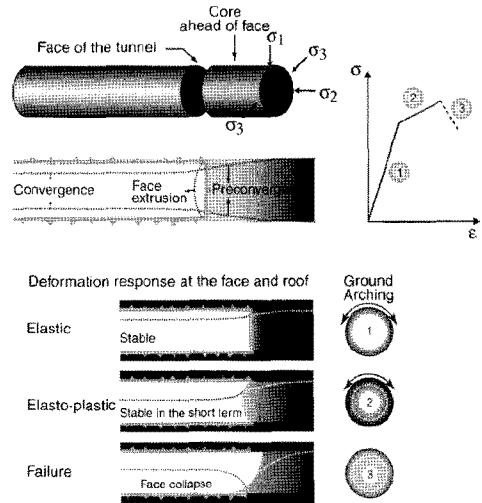


그림 1. Lunardi(2000)의 advance core 개념(Jeon et al., 2005)

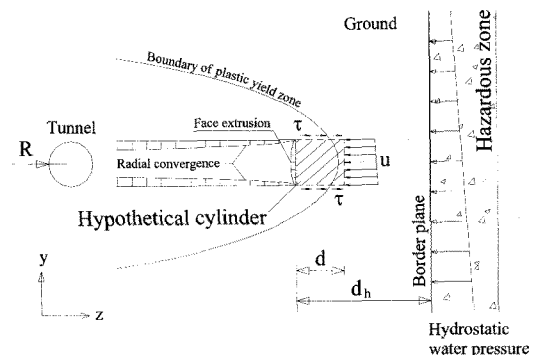


그림 2. 문제구간이 존재하는 경우 advance core 모델의 개념화

- 5) 터널은 원형이며 내부 막장면에는 대기압이 작용한다.
- 6) 문제구간은 터널 전방에 연직 방향으로 존재하며, 폭은 6 m이다.

Lunardi(2000)의 advance core는 역학적인 개념이며, 터널의 반경 방향 변형(radial convergence)으로 유발되는 막장의 변형(face extrusion)과 안정성이 advance core의 길이를 결정하는데 주요 요소가 될 수 있다. 그러나 이 연구의 advance core는 수리적 개념이며, 막장면에 직각으로 작용하는 침투력이 advance core의 길이를 결정하는데 주요 요소가 된다.

advance core에 작용하는 침투력, S와 마찰 저항력, T는 각각 식 (1), (2)와 같은 것으로 볼 수 있다.

$$S = u(\pi R^2) \tag{1}$$

$$T = \tau(2\pi Rd) \tag{2}$$

여기서, τ 는 $C + (\sigma - u)\tan\phi$ 이며 C는 지반의 점착력, ϕ 는 배수 마찰각, σ 는 지반의 연직방향 유효력이다. 터널에서 막장 전방에 문제구간이 존재하는 경우 수리적 영향에 대한 막장의 안정성, TSR은 다음과 같다.

$$TSR = T/S = 2 \frac{d}{R} \left(\frac{C + (\sigma - u)\tan\phi}{u} \right) \tag{3}$$

TSR 개념을 적용할때는 여러 가지 가정이 필요하고, 역학적 영향을 고려하지 않으므로 터널 막장 안전율의 참값으로는 볼 수 없지만 막장과 문제구간과의 거리에 따른 수리적 안전율의 변화 양상을 쉽게 파악할 수 있을 것으로 생각된다.

3. 수치해석 조건 및 방법

수치해석을 위한 모델의 개요는 그림 3과 같다. 경계 조건의 영향이 해석 결과에 영향을 주지 않도록 하기 위하여 충분한 모델 경계를 확보하였다(횡방향 범위: 25 D 이상, 터널 전방 종방향 범위: 35 D 이상, 터널 하부 방향 범위: 9 D 이상). 수심은 한반도 남부 근해의 평균 수심을 고려하여 60 m로 하였고, 토피고는 일본 세이칸 터널의 예를 근거로 100 m로 가정 하였다. 원형 터널의 직경, D는 1.5, 3, 6, 11.6 m를 가정 하였고 천정부의 위치는 모두 EL. 111.6 m로 동일하게 조정하였다.

모델의 전면, 후면, 좌측면과 하부 경계면에는 271.6 m의 전수두가 작용하며 굴착중에도 수위는 일정하게 유지되는 것으로 가정하였고, 터널의 중심축이 위치하는 우측면은 x 방향 흐름이 발생하지 않는 것으로 하였다.

터널 내부의 막장과 슛크리트 라이닝에는 대기압이 작용하며, 슛크리트의 투수계수는 지반과 같은 것으로 하였다.

지반과 라이닝의 상대강성(relative soil-lining stiffness), 지반과 라이닝의 상대 투수계수(relative soil-lining permeability), 수심, 불투수층과의 거리 등은 터널에 작용하는 수압으로 인한 하중의 크기에 대한 주요 인자이다(Bilfinger, 2005). 마찬가지로 문제구간과 지반의 상대 투수계수 비(k_h / k_g)와 문제구간과의 거리(d_h)는 막장에 작용하는 침투압의 크기에 대한 주요 인자가 될 수 있다. 이 연구에서 문제구간은 Wise 등(1984), Buergi 등(1999)이 언급한 단층각력대(fault breccia)로 가정하였다. 단층충진물(gouge)은 점토층과 같이 매우 작은 투수계수를 보이지만(Sausgruber와 Brandner, 2003; Uehara와 Shimamoto, 2006), 단층각력대는 사질토와 같이 강성이 크며 점성이 없고 자갈이나 모래와 같은 매우 큰 투수성을 나타낸다(Sausgruber와 Brandner, 2003). 여기서는 4 가지 문제구간의 투수계수(1.0×10^{-7} , 1.0×10^{-6} , 1.0×10^{-5} , 1.0×10^{-4} cm/sec) 즉, 상대 투수계수 비(relative permeability: k_h / k_g)가 1, 10, 100, 1000인 경우를 가정 하였고, 막장과 문제구간의 거리는 6 가지 경우($d_h = 15 D, 10 D, 5 D, 2 D, 1 D, 0.5 D$)로 가정하였다.

해저터널에 막대한 수압이 작용하는 경우 라이닝에 작용하는 수압을 줄이고 유입수량을 제어할 목적으로 그라우팅을 실시한다. 여기서는 터널의 외곽에 1 D 두께의 그라우팅이 적용되는 것으로 가정 하였다. 이상에서 해석에 적용된 각종 특성치는 표 1과 같다.

서로 다른 4 가지 터널 직경과 4 종의 상대 투수비를 가정하여 총 16 개 경우에 대하여 3 차원 정상류 침투 해석을 실시하였다. 해석 단계는 6 단계(step)이며, 막

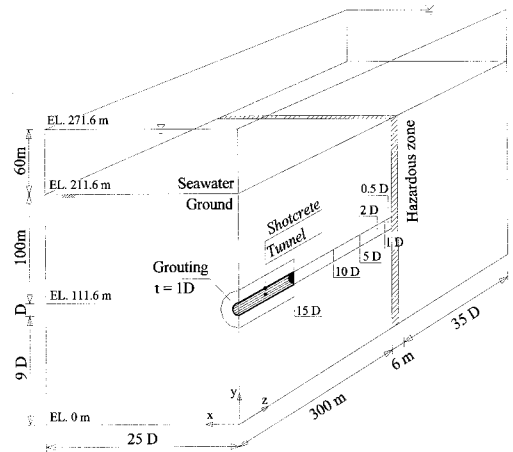


그림 3. 수치해석 모델

표 1. 수치해석에 적용된 특성치

구분	지반	그라우팅	문제구간	숏크리트
투수계수, $k(\text{cm}/\text{sec})$	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-10}	$1.0 \times 10^{-4} - 1.0 \times 10^{-7}$	1.0×10^{-7}
점착력, $C(\text{kPa})$	700	900	70	-
배수마찰각, $\Phi(^{\circ})$	40	40	40	-
단위중량, $\gamma(\text{kN}/\text{m}^3)$	23	24	23	25
두께	-	1 D	6 m	25 cm

장으로부터 6 개소($d = 0, 0.5 D, 1 D, 1.5 D, 2 D, 3 D, 4 D$)의 위치에 대한 간극수압 분포를 분석하였다. 분석된 간극수압을 근거로 동수경사, i 와 TSR 값을 산정하였다. 침투해석에 사용된 S/W는 MIDAS GTS(Ver. 2.5)이다.

4. 문제구간이 막장의 안정성에 미치는 영향

4.1 막장면의 수압 분포에 대한 문제구간의 영향

침투해석 결과에 경계조건의 영향은 나타나지 않았으며, 파쇄대의 영향에 의한 수리적 특성이 잘 반영된 것으로 평가된다. 그림 4와 같이 상대 투수계수 비가 큰

($k_h / k_g = 1000$) 문제구간이 터널 전방에 존재하는 경우 막장이 진행될수록 문제구간의 영향이 증가되어 터널 길이방향 동수경사의 분포가 바뀌는 것으로 나타났다.

문제구간에서는 막장의 위치와 무관하게 터널 길이방향 동수경사의 분포가 1 이하로 매우 작게 나타났다. 이러한 결과는 xyz 방향(3차원) 동수경사의 분포와도 매우 유사하다. 그림 5에서 터널굴착에 따른 xyz 방향 동수경사의 분포와 유속 분포는 전반적으로 대단히 유사하게 나타난다. 그러나 문제구간에서 동수경사의 분포가 1 이하로서 막장 부근과 비교하여 매우 작은 것에 반하여 유속분포는 $1.8 \times 10^{-5} \text{ m/hr} (5 \times 10^{-7} \text{ cm}/\text{sec})$ 로 막장 주변의 것과 같이 크게 나타났다. 이러한 현상은 문

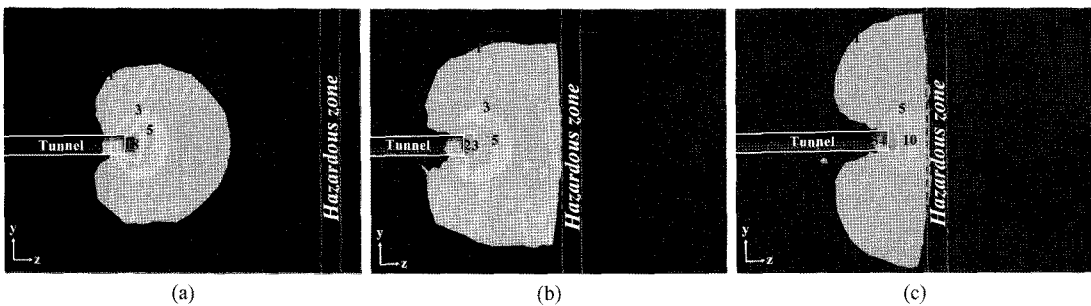


그림 4. 터널의 진행에 따른 z 방향(터널 길이방향) 동수경사의 분포에 대한 문제구간의 영향($R = 3 \text{ m}, k_h / k_g = 1000$): (a) Step 2($d_h = 10 D$); (b) Step 3($d_h = 5 D$); (c) Step 4($d_h = 2 D$)

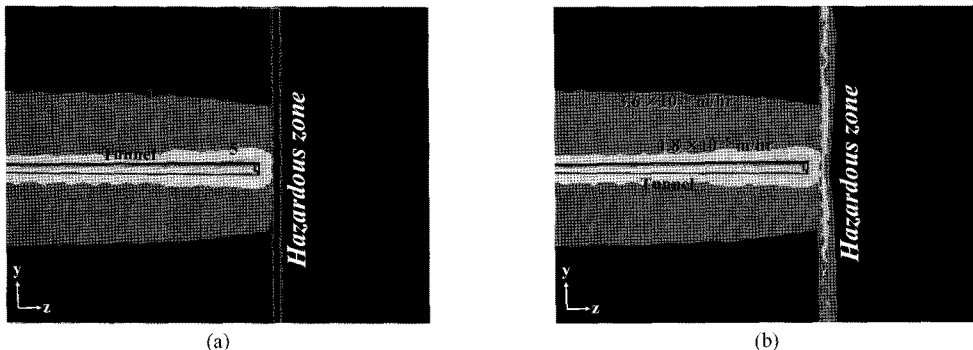


그림 5. 터널굴착에 따른 xyz 방향 동수경사의 분포와 유속 분포에 대한 문제구간의 영향($R = 3 \text{ m}, k_h / k_g = 1000$): (a) 동수경사 분포; (b) 유속분포

제구간의 투수계수가 주변지반과 비교하여 상대적으로 크기 때문에 동수경사가 크지 않아도 터널 굴착면으로 빠져나가는 만큼의 물을 빠른 속도로 보충하여 주기 때문으로 생각된다. 즉, 문제구간을 통하여 외부로부터의 무한한 지하수 공급이 있는 경우, 문제구간의 내부 압력은 터널의 굴착에 영향을 받지 않고 초기 상태인 정수압으로 유지될 수 있음을 나타낸다.

상대 투수계수 비의 크기에 따른 터널 전방 지반의 수두 분포의 변화는 그림 6에서 잘 나타난다. 문제구간이 존재하지 않는 경우($k_h / k_g = 1$) 터널 전방의 수두 분포는 막장의 위치와 무관하게 항상 일정하며, 터널의 천정부에서 정수압이 작용하는 위치(점 A)는 막장에서 상당히 멀리 이격되어 나타난다. 그러나 상대 투수계수 비가 증가하면 정수압이 작용하는 위치는 점점 문제구간에 근접하여 상대 투수계수 비가 1000인 경우는 문제구간에 정수압이 작용하는 것으로 나타났다(그림 6).

그림 7은 막장과 거리 d 에 따른 수압의 변화를 나타낸 것이다. 막장이 문제구간에 가깝게 위치하여 d_h 가 작을수록 임의 d 에서 작용하는 수압의 크기가 크며, 이러한 양상은 d_h 가 10 D보다 작을 때 훨씬 두드러져 보인다. 그림에서 'no hazardous zone'은 상대 투수계수

비가 1 일 때를 나타낸다. 문제구간이 존재하지 않기 때문에 d 와 상관없이 다른 경우에 비하여 수압이 가장 낮게 나타나며, 대략 d 가 10 R(5 D) 보다 작을 때 수압은 막장면 배수의 영향으로 급격하게 감소한다. 그러나 막장 전방에 문제구간이 존재하는 경우 문제구간의 영향 때문에 이러한 현상은 d_h 가 10 D보다 작은 경우 잘 나타나지 않았다. 그림 8은 터널 천정 높이의 문제구간(border plane에서 EL 111.6)에서 d_h 의 변화에 따른 압력수두의 변화를 나타낸 것이다. 'pressure head ratio'는 문제구간과 지반과의 경계면(border plane)에 위치하는 터널 천정부에서 터널의 굴진에 따라 감소하는 수두와 터널 굴착 개시 전 정수두에 대한 압력수두 비이다. 문제구간과의 거리가 가까워질 수록 압력수두는 배수효과 때문에 점차 감소하는 경향을 보인다. 상대 투수계수 비가 1000인 경우 막장의 위치와 상관없이 문제구간과 지반과의 경계면에 정수압이 작용하는 것으로 나타나며, 터널의 직경이 클수록 배수 면적이 넓어져 수압의 감소효과가 훨씬 더 크게 나타난다. 그러나 상대 투수계수 비가 50 이상이면 d_h 가 5 R(2.5 D) 이하인 경우 터널의 직경과 무관하게 정수압의 90%에 상당하는 침투압이 문제구간과 지반과의 경계면에 작용한다.

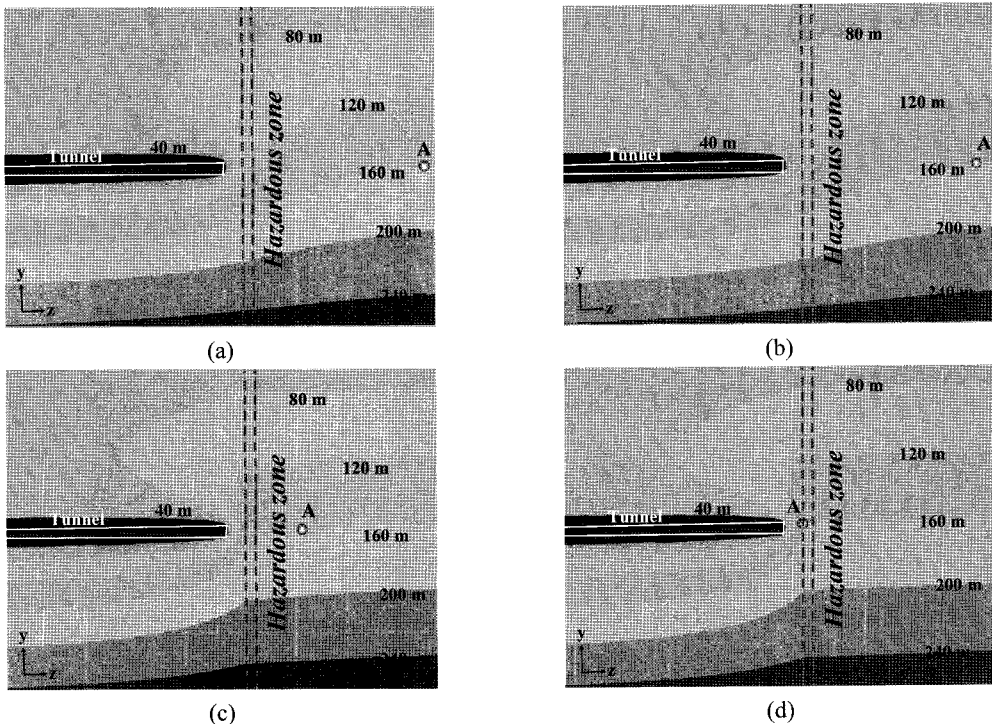


그림 6. 문제구간의 투수계수 변화에 따른 간극수압 분포의 변화, k_h / k_g (R = 3 m, $d_h = 2$ D): (a) $k_h / k_g = 1$; (b) $k_h / k_g = 10$; (c) $k_h / k_g = 100$; (d) $k_h / k_g = 1000$

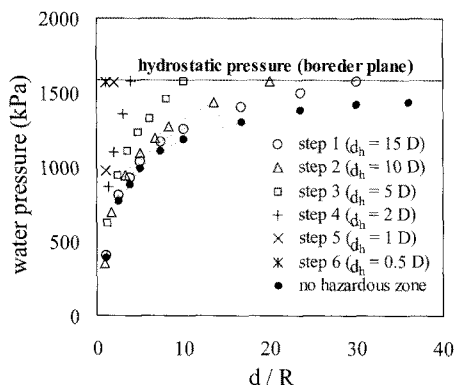


그림 7. 막장과 의 거리에 따른 수압의 변화($R = 1.5 \text{ m}$, $k_h / k_g = 1000$)

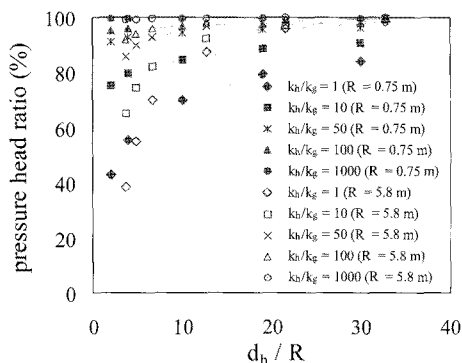


그림 8. d_h 의 변화에 따른 터널 천정 높이의 문제구간에서 압력수두의 변화

4.2 막장면의 안정성에 대한 문제구간의 영향

해저터널 막장면의 안정성에 미치는 문제구간 수압의 영향을 침투압의 주요 인자인 동수경사 (i)와 이 연구에서 제안된 TSR로서 추정 가능하다. 그림 9는 d 의 변화에 따른 동수경사와 TSR의 변화를 나타낸 것으로, 막장과 의 거리 d 가 멀어질수록 동수경사는 감소하고 TSR은 증가하는 경향을 보인다. 동수경사가 터널의 직경이 작을수록 오히려 큰 경향을 보이는 것은 막장면의 배수 효과가 직경이 큰 터널보다 작기 때문으로 보인다. 그러나 TSR에서는 터널 직경과의 상관성이 상대적으로 낮게 나타나며, 이것은 직경이 클수록 동수경사가 상대적으로 작아지고 advance core의 실린더 주면의 표면적도 증가하지만 침투압이 작용하는 실린더 원형 단면의 면적이 제품에 비례하여 증가하기 때문으로 추정된다.

막장에 작용하는 동수경사와 TSR에 미치는 문제구간

의 영향은 문제구간이 존재하지 않을 때($k_h / k_g = 1$)의 경우와 비교하면 비교적 명확하게 확인 가능하다. 그림 10, 11은 막장과 문제구간과의 거리 d_h 에 대하여 문제구간이 있을 때의 동수경사 (i), TSR과 문제구간이 없을 때의 동수경사와 TSR인 i_0 , TSR_0 에 대한 비의 변화를 나타낸 것이다. 상대 투수계수 비 또는 터널의 크기와 무관하게 d_h 가 5 R(2.5 D)일 때를 기준으로 이보다 터널과 문제구간과의 거리가 가까워지면 문제구간이 없을 때 보다 동수경사가 급격히 증가하고(그림 10), TSR은 급격히 감소하는 추세를 나타낸다(그림 11). 문제구간의 영향 범위는 10 - 15 D 정도 까지 미치는 것으로 보인다. 역학적 특성에 의한 advance core의 길이가 2 - 3 D(Lunardi, 2000)로 추정되고, 균질 암반에서 터널 전방에 단층대가 존재하는 경우 천단변위의 크기가 막장면으로부터 0.5 D 위치에서 급변하는(Back 등,

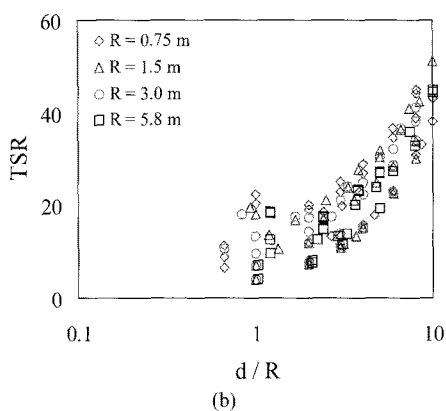
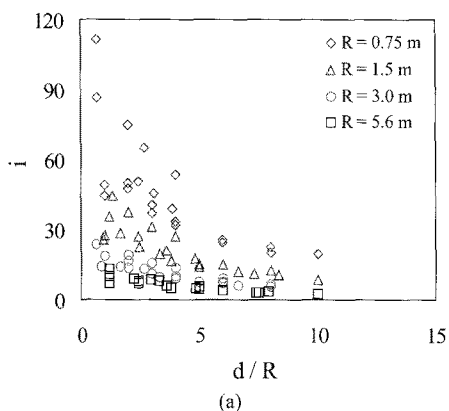


그림 9. d 의 변화에 따른 동수경사와 TSR의 변화($k_h / k_g = 1000$): (a) 동수경사; (b) TSR

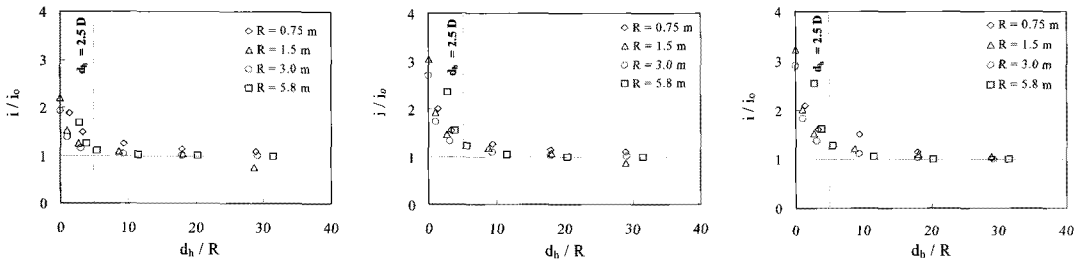


그림 10. i / i_0 와 d_h / R 의 관계($d = 0.5 D$): (a) $k_h / k_g = 10$; (b) $k_h / k_g = 100$; (c) $k_h / k_g = 1000$

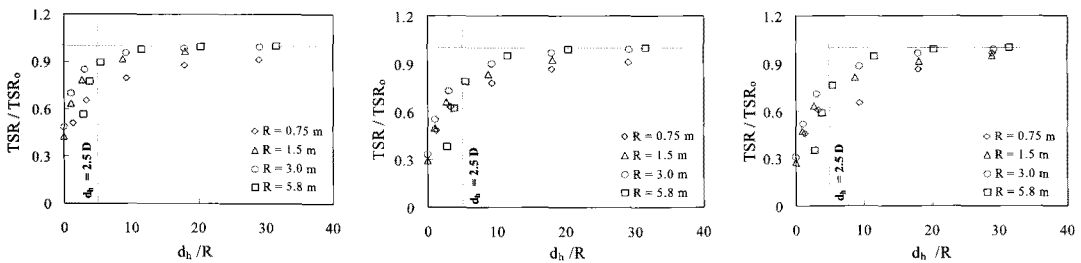


그림 11. TSR / TSR_0 과 d_h / R 의 관계($d = 0.5 D$): (a) $k_h / k_g = 10$; (b) $k_h / k_g = 100$; (c) $k_h / k_g = 1000$

2006) 것을 고려 할 때 문제구간의 영향에 의한 수리학적 안정성의 영향은 대체로 역학적 특성에 의한 것보다 범위가 더 넓은 것으로 추정 된다.

5. 결론 및 토의

이 연구에서는 고수압이 작용하며 투수계수가 매우 큰 파쇄대 지반을 문제구간으로 정의하고, 3차원 침투 해석을 통하여 해저터널의 막장 전방에 존재하는 문제구간의 수리적 특성이 막장의 안정성에 미치는 영향에 대하여 분석 하였다. 이 연구는 막장의 침투압에 영향을 주는 터널의 굴진율의 영향을 고려하지 않았고, 수리-역학적 연계해석이 아니므로 지반의 역학적 특성도 온전히 반영되지 않았다. 따라서 실제 현장에서의 침투압과 안정성은 검토된 것보다 상대적으로 다르게 나타날 가능성이 있지만 연구 결과는 문제구간의 수리적 영향을 매우 분명하게 나타내고 있다.

터널 주변의 수압분포는 지반과 문제구간의 상대 투수계수 비에 의존하는 것으로 나타났다. 상대투수비가 1000 이상이면 터널 막장의 위치, 터널의 직경과 무관하게 문제구간에는 정수압이 작용할 수 있으며, 상대 투수비가 50 이상이면 d_h 가 5 R(2.5 D) 이하인 경우 정수압의 90%에 해당하는 상당한 침투압이 작용하는 것으로 나타났다.

수리학적 특성이 지반 안정성에 미치는 영향의 범위

는 막장 전방 10 D 정도이며, 2.5 D 이내에서 영향력이 급격히 증가하는 것으로 보인다. 따라서 수리적 영향에 의한 advance core의 길이는 2.5 D 이내일 것으로 생각 된다. 문제구간이 막장의 안정성에 급격하게 영향을 미치는 범위는 수리학적 특성이 역학적 특성에 의한 것보다 범위가 넓은 것으로 보이며, 역학적 안정성이 문제가 되는 위치에서 수리적 영향이 크게 작용하게 될 가능성이 있다. 따라서 두 영향이 서로 중첩되는 경우, 막대한 수압이 작용하는 해저터널의 막장 안정성에 심각한 영향을 줄 가능성이 클 것으로 생각된다. 나아가 문제구간의 투수계수가 매우 크다면 문제구간은 무한한 유출수의 유동 경로가 되어 터널의 침수를 유발할 가능성이 크다.

이러한 문제점을 해결하려면 해저 지반조사 수행 여건상 불충분 할 수 있는 조사자료를 보완하기 위한 시공중 지반조사(probe-drilling 등)가 필수적일 것으로 생각되며, 그 범위는 연구결과를 미루어 볼 때 막장 전방 3 D 이상이 적당할 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2008년도 첨단도시개발사업(과제번호: 05-건설핵심 D10, 과제명: 해저시설물 차폐기술연구)에 의하여 연구비가 지원되었습니다.

참고문헌

1. 홍은수, 박익섭, 신희순, 박찬, 김형목, 2008, 수평시추 방식에 의한 해저터널 시공중의 막장 수압경감, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제18권 제1호, 10-19.
2. Anagnostou, G., Kovari, K., 1996, Face stability conditions with earth-pressure-balanced shields, *Tunneling and Underground Space Technology* 11.2, 165-173.
3. Baek, S.H., Kim, C.Y., Kim, K.Y., Hong, S.W., Moon, H.K., 2006, Numerical analysis on the effect of heterogeneous nature of rock masses on tunnel behavior, *Tunneling Technology* 8.2, 115-127.
4. Bilfinger, W., 2005, Design procedures for ground water loads on tunnel linings, <http://www.ita-aites.org/cms/ita-aites-home/publications/conferences-proceedings/conferences-proceeding-detail/datum/2008/07/06/sao-paulo-2005-waterproofing.html>.
5. Bobet, A., 2001, Analytical solutions for shallow tunnels in saturated ground, *ASCE J. Eng. Mech.* 12, 1258-1266.
6. Buergi, C., Parriaux, A., Franciosi, G., Rey, J.-Ph., 1999, Cataclastic rocks in underground structures - terminology and impact on the feasibility of projects (Initial Results), *Engineering Geology* 51, 225-235.
7. El Tani, M., 2003, Circular tunnel in a semi-infinite aquifer, *Tunneling and Underground Space Technology* 18, 49-55.
8. Jeon, J.S., Martin, C.D., Chan, D.H., Kim, J.S., 2005, Predicting ground conditions ahead of the tunnel face by vector orientation analysis, *Tunneling and Underground Space Technology* 20, 344-355.
9. Leca, E., Dormieux, L., 1990, Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material, *Geotechnique* 40, 581-606.
10. Leca, E. Panet, M., 1988, Application du calcul à la rupture à la stabilité du front de Taille Dün tunnel, *Revue Francaise de Geotechnique* 40, 581-606.
11. Lee, I.M., Nam, S.W., 2001, The study of seepage forces acting on the tunnel lining and tunnel face in shallow tunnels, *Tunneling and Underground Space Technology* 16, 31-40.
12. Lunardi, P., 2000, Design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils. *Tunnels Tunn. Int. Special Suppl.*, 3-30.
13. Sausgruber, T., Brandner, R., 2003, The relevance of brittle fault zone in tunnel construction-Lower inn vally feeder line north of Brenner Base tunnel, Tyrol, Austria, *Mitt. Osterr. Geol. Ges.* 94, 157-172.
14. Schubert, W., Steindorfer, A., 1998, Advanced monitoring data evaluation and display for tunnels, *Proc. Int. Symp. on Tunnels and Metropolises, São Paulo*, vol 2, 1205-1208.
15. Schweiger, H.F., Pottler, R.K., Steiner, H., 1991, Effect of seepage forces on the shotcrete lining of a large undersea cavern, *Computer Method and Advances in Geomechanics, Rotterdam*, 1503-1508.
16. Uehara, S., Shimamoto, T., 2006, Estimation of permeability structure of the median tectonic line fault zone in Ohshika-Mura, Nagano, Japan, by using laboratory test under high pressure, *4th Asian Rock Mechanics Symposium, Singapore*, 314.
17. Wise, D.U., Dunn, D.E., Engelder, J.T, Geiser, R.A., Hatcher, R.D., Kish, S.A., Odom, A.L., Schamel, S., 1984, Fault-related rocks: suggestions for terminology, *Geology* 12, 391-394.



홍 은 수

1986년 서울대학교 농과대학 농공학과
공학사
1993년 한국과학기술원 토목환경공학과
공학석사
2005년 고려대학교 사회환경시스템공학과
공학박사
Tel: 042-868-3224
E-mail: esooHong@kis.kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부
Post-Doc



박 의 섭

1989년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1991년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2000년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사
Tel: 042-868-3098
E-mail: espark@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부
선임연구원



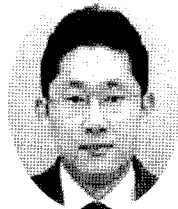
신 희 순

1976년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1978년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1986년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사
Tel: 042-868-3240
E-mail: shinhs@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부
책임연구원



류 동 우

1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2000년 서울대학교 대학원 지구환경시스템
공학부 공학박사
Tel: 042-868-3099
E-mail: dwryu@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 선임연구원



김 형 목

1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1999년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2002년 동경대학교 대학원 토목공학과
공학박사
Tel: 042-868-3265
E-mail: kimh@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부
선임연구원