

# 해저터널 시공중 막장 전방 파쇄대의 수리적 특성이 막장의 안정성에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구

홍은수, 박의섭, 신희순, 김형목, 류동우(한국지질자원연구원)

## 1. 서론

해저터널 시공중에는 고수압이 작용하는 조건에서 지반강도와 투수특성이 매우 불량한 파쇄대를 조우할 가능성이 크다. 이러한 문제구간 (hazardous zone) 에서 무한한 용출수 유입원이 존재할 경우 종종 터널 침수사고를 유발한다 (홍은수 등, 2008). 해저터널과 같이 격리된 작업환경에서 침수사고의 인적 물적 피해 규모와 사회적 영향은 매우 심각해질 수 있지만 침수 사례에서 사고의 전개 상황과 수습 기록만 존재할 뿐 터널 굴착에 따른 문제구간의 거동 특성에 대해 체계적인 연구를 한 결과는 찾아보기 어렵다. 또한 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. 그러나 해저 터널 또는 고수압이 작용하는 산악 터널에서 유사한 사고를 방지하고 시공중 안정성을 확보하기 위하여 막장 안정성에 대한 위험구간의 수리적 특성 영향에 대한 연구가 필요하다.

이 연구에서는 Lunardi (2000) 가 제시한 'advance core'의 개념을 활용하여 해저터널의 막장 전방에 고수압이 작용하는 문제구간의 존재하는 경우 터널의 안정성에 관한 수리적 특성의 영향을 분석하였다. 수리 특성의 분석은 3차원 정상류 침투 해석을 통하여 수행하였으며, 적용 S/W는 MIDAS GTS (Ver. 2.5) 이다.

## 2. 해석 모델의 구성

advance core는 막장 전방 지반에 위치하며 그 직경이 터널의 직경과 같은 것으로 생각되는 가상의 실린더로서 터널 막장의 거동에 직접적인 영향을 주는 것으로 생각된다 (그림 1 참조). Lunardi (2000) 는 advance core 의 길이를 터널 직경,  $D$ 의 2 ~ 3배로 추정하기도 하였다. 그러나 이것은 막장전방 파쇄대의 침투압과 같은 수리적 영향이 고려된 것이 아니었다. 이 연구에서는 막장 전방의 문제구간의 수리적 특성만을 고려한 advance core 에 작용하는 침투압을 그림 1과 같이 모델 하였다.

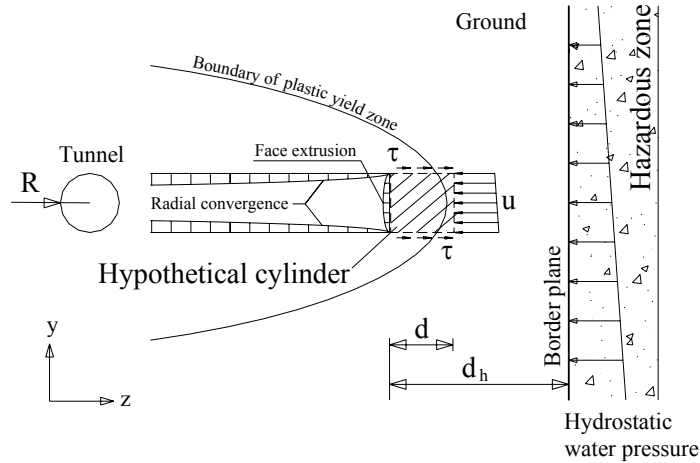


그림 1. 문제구간이 존재하는 경우 advance core 모델의 개념화

그림에서 R 은 터널 직경, d 는 advance core 의 종방향 길이,  $d_h$  는 막장과 지반과 문제구간의 경계 (border plane) 까지의 거리이다. u 는 터널 막장과 평행한 advance core 의 표면에 작용하는 침투압,  $\tau$  는 advance core 실린더의 외주면에 작용하는 단위 마찰저항력으로 가정 하였다. 또한 지반은 균질하고 모든 방향의 투수계수가 같은 것으로, 침투압은 터널의 막장에 평행하게 작용하며 advance core 는 강체와 같이 거동하는 것으로 가정 하였다.

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

$$S = u(\pi R^2) \quad (1)$$

$$T = \tau(2\pi R d) \quad (2)$$

여기서,  $\tau$  는  $C + (\sigma - u) \tan \Phi$  이며 C는 지반의 점착력,  $\Phi$ 는 배수 마찰각,  $\sigma$ 는 지반의 연직방향 응력이다.

깊은 터널에서 막장 전방에 문제구간이 존재하는 경우 수리적 영향에 대한 막장의 안정성, TSR은 다음과 같다.

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

### 3. 수치해석 조건 및 방법

#### 2.1 해석 조건

해석 모델의 개요는 그림 2와 같다. 경계조건의 영향이 해석 결과에 영향을 주

지 않도록 하기 위하여 충분한 모델 경계를 확보 하였다 (횡방향 범위: 25 D 이상, 터널 전방 종방향 범위: 35 D 이상, 터널 하부 방향 범위: 9 D 이상).

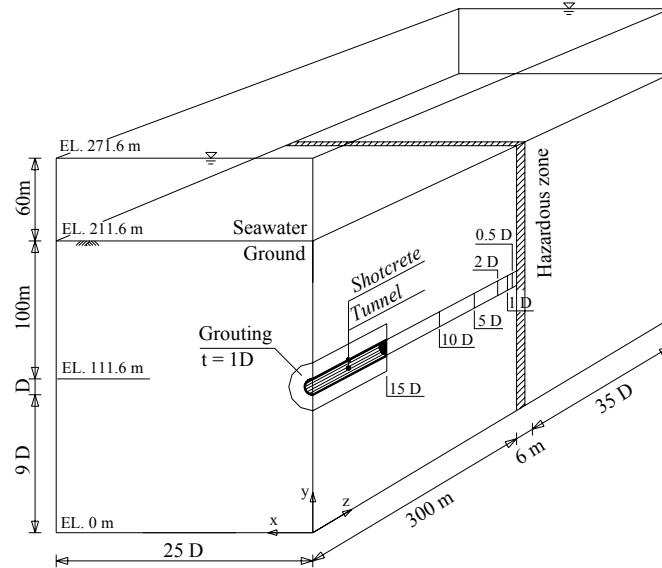


그림 2. 수치해석 모델

수심은 한반도 남부 근해의 평균 수심을 고려하여 60 m 로 하였고, 토피고는 일본 세이칸 터널의 예를 근거로 100 m 로 가정 하였다. 모델의 전면, 후면, 좌측면과 하부 경계면에는 271.6 m 의 전수두가 작용하며 굴착중에도 수면은 일정하게 유지되는 것으로 가정 하였다. 터널의 중심축이 위치하는 우측면은 x 방향 흐름이 발생하지 않는 것으로 하였다. 터널의 외곽에는 1 D 두께의 그라우팅이 적용되는 것으로 가정 하였으며, 해석에 적용된 특성치는 표 1과 같다. 침수 사고가 발생한 문제구간은 사질토와 같이 점성이 없고 매우 큰 투수성을 가졌다는 점에서 Sausgruber 와 Brandner (2003) 가 언급한 단층각력대일 가능성이 크다. 여기에서는 문제구간 투수계수를 최대  $1.0 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$  로 가정 하였다.

표 1. 수치해석에 적용된 특성치

구분	지반	그라우팅	문제구간	숏크리트
k (cm/sec)	$1.0 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-10}$	$1.0 \times 10^{-4}$ - $1.0 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-7}$
C (kPa)	700	900	70	-
$\Phi$ (°)	40	40	40	-
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	23	24	23	25
두께	-	1 D	6 m	25 cm

서로 다른 4 가지 터널의 직경 (D = 1.5, 3, 6, 11.6 m) 과 4 가지 문제구간의 투수계수 ( $1.0 \times 10^{-7}$ ,  $1.0 \times 10^{-6}$ ,  $1.0 \times 10^{-5}$ ,  $1.0 \times 10^{-4}$  cm/sec, 즉, 상대 투수계수 비 (relative permeability)  $k_h / k_g = 1, 10, 100, 1000$ )를 가지는 경우를 가정하여 총 16 가

지 경우에 대하여 수치해석을 실시 하였다. 해석 단계는 7 단계 ( $d_h = 15 D, 10 D, 5 D, 2 D, 1.5 D, 1 D, 0.5 D$ ) 이며, 막장으로부터 6 개소 ( $d = 0.5 D, 1 D, 1.5 D, 2 D, 3 D, 4 D$ ) 의 위치에 대한 간극수압 분포를 분석 하였다. 분석된 간극수압을 근거로 동수경사,  $i$ 와 TSR 값을 산정 하였다.

#### 4. 문제구간이 막장의 정성에 미치는 영향

해석 결과 전반적으로 그림 3과 같이 막장 전방 파쇄대의 영향에 의한 수리적 거동이 잘 반영된 것으로 생각되며, 경계조건에 의한 영향도 나타나지 않았다.

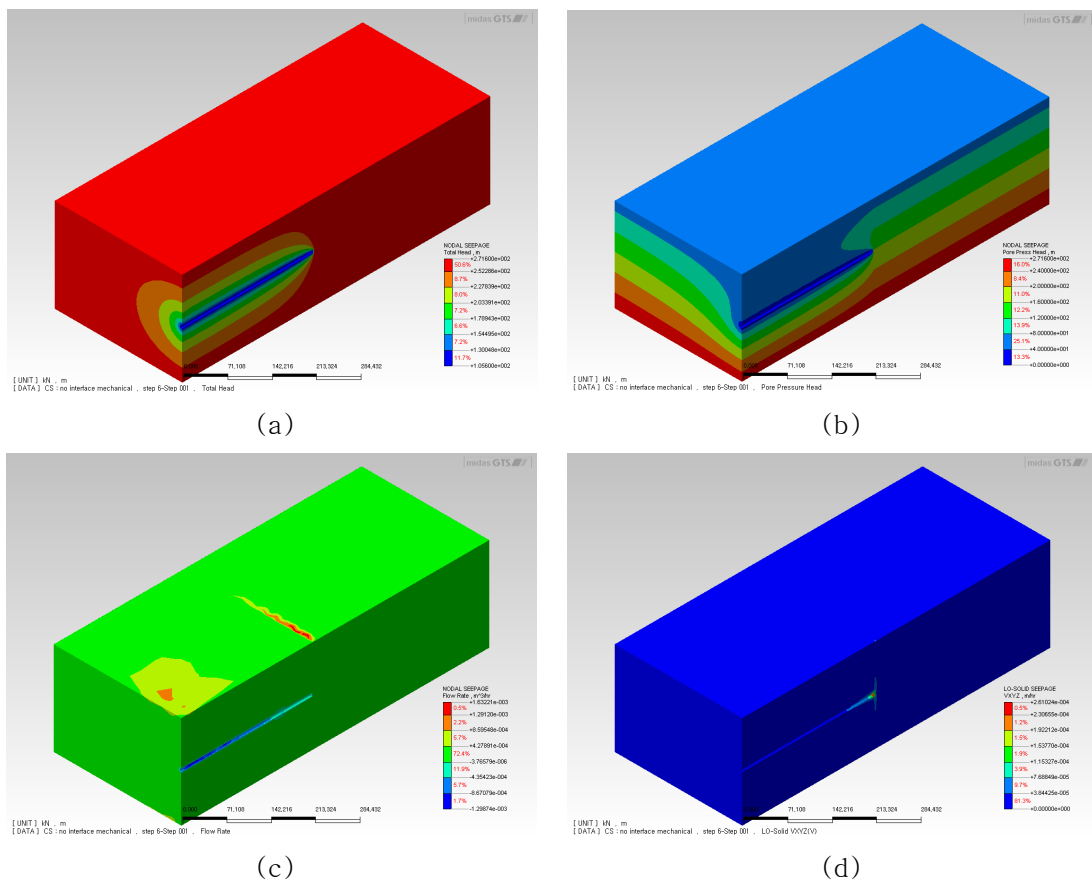


그림 3. 해석 결과 (예),  $k_h / k_g = 1000$ : (a) 전수두 분포; (b) 압력수두 분포; (c) 흐름 분포; (d) 유속 분포

터널 전방에 문제구간이 존재하는 경우 막장의 수압분포는 문제구간의 투수계수에 의하여 직접적으로 영향을 받는 것으로 나타났다 (그림 4). 문제구간이 존재하지 않는 경우 ( $k_h / k_g = 1$ ) 터널 전방의 수두 분포는 막장의 위치와 무관하며 터널 중심선에서 정수압이 작용하는 위치 (점 A) 는 막장에서 상당히 멀리 (약 20 D 이상) 이격

되어 있으며 상대 투수계수 비가 10 인 경우도 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 상대 투수계수 비가 증가하는 경우 정수압이 작용하는 위치는 점점 근접하여 1000 인 경우는 매우 근접하여 문제구간에 직접 정수압이 작용하는 것으로 나타났다 (그림 4 (b)). 그림 5는  $d_h$ 의 변화에 따른 터널 천정 높이의 문제구간 (border plane 에서 EL 111.6) 에서 압력수두의 변화를 나타낸 것이다. pressure head ratio 는 터널 천정부 높이의 문제구간에서 정수압에 대한 압력수두의 비이다. 문제구간과의 거리가 가까와 질 수록 압력수두는 배수효과 때문에 점차 감소하는 경향을 보인다. 그러나 상대 투수계수 비가 50 이상이면  $d_h$  가 5 R (2.5 D) 일 때 터널의 직경과 무관하게 정수압의 90 %에 상당하는 침투압이 문제구간에 작용하며, 상대 투수계수 비가 1000 인 경우 막장의 위치와 상관 없이 정수압이 작용하는 것으로 나타났다.

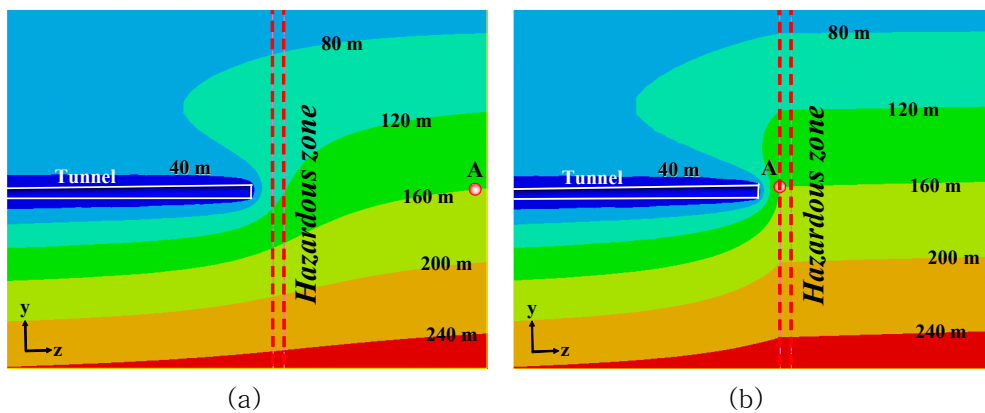


그림 4. 문제구간의 투수계수 변화에 따른 간극수압 분포의 변화,  $k_h / k_g$  ( $R = 3$  m,  $d_h = 2 D$ ): (a)  $k_h / k_g = 1$ ; (b)  $k_h / k_g = 1000$

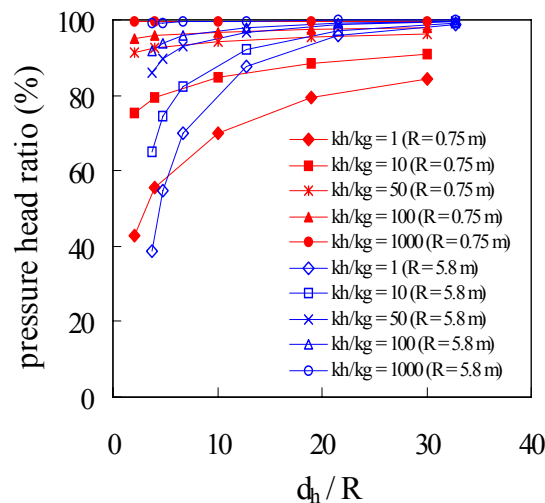


그림 5.  $d_h$ 의 변화에 따른 터널 천정 높이의 문제구간에서 압력수두의 변화

동수경사 ( $i$ ) 와 TSR 이 문제구간이 없을 때 ( $k_h / k_g = 1$ ) 와 비교하여 어떻게 변화하는지에 대하여 검토 하였다. 그림 6, 7은 막장과 문제구간과의 거리와 터널의 크기에 따른 문제구간이 있을 때의 동수경사 ( $i$ ) 와 TSR 과 문제구간이 없을 때의 동수경사와 TSR 인  $i_0$  와  $TSR_0$  에 대한 비를 나타낸 것이다. 투수계수비 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, TSR은 급격히 감소하는 추세를 나타낸다. 터널과 문제구간과의 거리가 매우 가까우면 문제구간이 있을 때의 수리적 영향에 의한 TSR 은 문제구간이 없을 때의 30 % 정도로 감소한다.

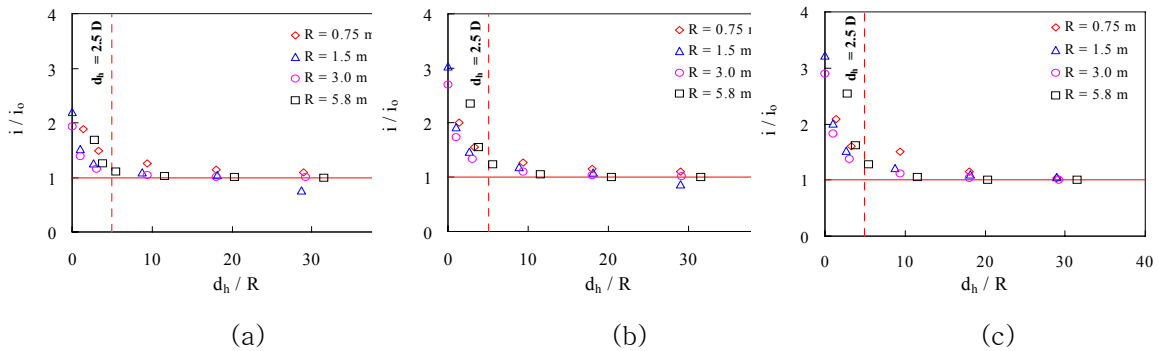


그림 6.  $i / i_0$  와  $d_h / R$  의 관계 ( $d = 0.5 D$  일 때): (a)  $k_h / k_g = 10$ ; (b)  $k_h / k_g = 100$ ; (c)  $k_h / k_g = 1000$

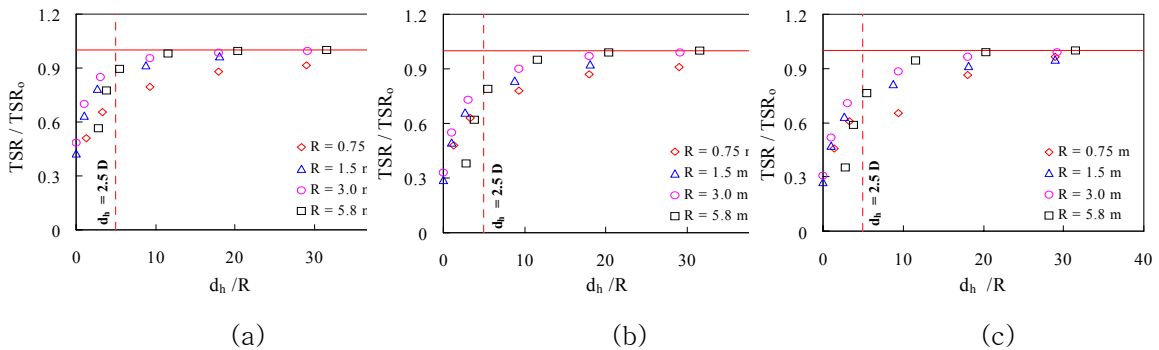


그림 7.  $TSR / TSR_0$  과  $d_h / R$  의 관계 ( $d = 0.5 D$  일 때): (a)  $k_h / k_g = 10$ ; (b)  $k_h / k_g = 100$ ; (c)  $k_h / k_g = 1000$

## 5. 결론 및 토의

해저터널의 막장 전방에 존재 할 수 있는 과쇄대의 수리적 특성이 막장의 안정성에 미치는 영향에 대하여 수치해석을 통하여 분석 하였다. 그 결과 터널 주변의 수압분포가 지반과 문제구간의 상대 투수계수 비에 의존함을 알 수 있었다. 문제구간이 없을 때 막장전방 2.5

D 에서의 수압은 정수압의 50 % 정도이지만 상대 투수비가 50 이상이면 터널의 직경과 무관하게 정수압에 근접하는 상당한 침투압이 문제구간에 작용하는 것으로 나타났다. 또한, 막장 전방 2.5 D 이내에서 동수경사는 급격히 증가하고 TSR은 급격히 감소하는 경향을 나타내었다.

Lunardi (2000) 가 역학적 특성만으로 정의한 advance core 의 길이, 2 ~ 3 D 와 수리적 영향이 급격히 커지는 영역의 범위는 매우 유사한 만큼 터널 굴착으로 인한 역학적 거동 특성과 수리적 특성의 영향이 중첩되는 경우 막대한 수압이 작용하는 해저의 문제지반은 해저터널 막장 안정성에 심각한 영향을 줄 가능성이 클 것으로 생각된다. 또한, 단층각력대로 추정되는 문제지반의 경우 투수계수가 매우 클 수 있어 무한한 유출수의 유동 경로가 되어 침수사고를 유발할 가능성이 크다. 이러한 문제점을 해결하려면 해저지반조사 수행 여건상 불충분 할 수 있는 조사자료를 보완하기 위한 시공중 지반조사가 필수적일 것으로 생각되며, 그 범위는 연구결과를 미루어 볼 때 막장 전방 3 D 이상이 적당할 것으로 보인다.

## 감사의 글

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

## 참고문헌

1. 홍은수, 박의섭, 신희순, 박찬, 김형목, 2008, 수평시추 방식에 의한 해저터널 시공중의 막장 수압경감, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제18권 제1호, 10-19.
2. 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.
3. 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.