

# 토사터널굴진시 지반거동에 대한 이론적 접근에 대한 연구

## Theoretical approach for ground behaviour during tunnelling in soils

김상환\*<sup>1</sup>

Kim, Sang-Hwan

### Abstract

This paper considers the stresses and pore pressures induced in soft ground due to tunnelling and it presents and discusses the approach methods for estimating the stability of the tunnel and its heading during drained and undrained condition. In practical, the undrained analyses of the face stability of shield tunnelling in soft soil, are carried out based on the field data measured during tunnelling and the results are also evaluated.

**Keywords:** Tunnel stability, shield tunnelling, soft ground, drained and undrained analysis

### 요 지

이 논문은 토사지반 (연약지반)에서의 터널굴진시 터널주변에 야기되는 응력과 간극수압에 대한 거동의 이론적 고찰에 대한 연구로써 터널 굴진시 터널의 안정성 예측을 위한 접근방법에 대하여 연구, 제시되었다. 안정성에 대한 이론적인 접근방법을 이해하기 위하여 배수 및 비배수조건에서의 터널막장의 거동에 대하여서도 고찰하였으며, 실질적으로 현장에서 계측하여 얻어진 자료를 기초로 터널의 안정성에 대한 이론적 접근방법의 적용사례를 연구하고 그 결과에 대하여서도 또한 분석 평가하였다.

**주요어:** 터널의 안정성, 쉴드터널, 연약지반, 배수조건

## 1. 서론

지반거동은 지반의 유효응력 변화에 좌우된다. 따라서, 지반공학기술자들은 포화토 거동의 이해를 위하여 널리 이용하고 있는 유효응력개념을 도입하여 설계 및 검토에 널리 이용하고 있다. 이러한 유효응력개념의 적용을 위하여 우선적으로 배수상태와 비배수상태를 구

분하여 지반거동에 대하여 검토되어야 한다. 단기적 굴착에 의해 생성되는 사면과 자연사면의 안정성에 있어서는 근본적으로 다르다는 것과 같이, 기초의 안정성과 침하예측에 있어서는 세립 점성토 지반과 와 조립사질토 지반과는 상당히 다른 경향을 보이게 된다. 이와 같은 두 경우에 있어서 공통적으로 중요한 사항은 지반에 부가되는 하중의 변화속도라고 말 할 수 있다. 따라서, 굴착시 사면을

\*1 정희원, 호서대학교 기계건축토목공학부 토목전공교수 (kimsh@office.hoseo.ac.kr)

불안정하게 하는 굴착속도와 압밀에 의한 기초의 침하속도의 예측은 매우 중요하다. 근본적으로 이러한 거동들의 차이는 지반에 가해지는 하중이 배수상태에서 거동하는가 아니면, 비배수상태에서 거동하는가 라는 점에서 야기되는 것이라 볼 수 있다. 따라서, 이와 같은 배수조건은 지반의 종류와 하중의 제원에 따라 좌우된다.

이러한 점에서 최근 해저터널 및 연약지반에서의 터널굴착의 경우 굴착에 따른 하중변화는 배수조건에 따라 다른 지반공학적 거동 양상을 보일 것이다. 따라서 본 논문에서는 국내의 연약토사 터널기술의 기본적인 개념확립을 위하여 배수조건에 따른 터널의 안정성에 대한 이론적 고찰을 하고자 한다. 이에 따라 본 논문에서는 우선적으로 토질역학적 개념에 의한 지반거동에 대한 기본개념을 검토하고, 연약지반에서 터널굴진시 지반거동을 배수상태와 비배수상태로 구분하여 이론적 개념에 대하여 고찰해 보았다. 아울러, 실제적인 시공 사례를 분석하고 평가하였다. 특히, 실드터널의 막장의 안정성에 대한 이론적 예측하는 기법을 이용한 사례연구를 통하여 향후 국내의 토사터널기술을 향상시키는데 기초자료로서 활용될 수 있도록 제시하였다.

## 2. 배수와 비배수 개념에 대한 고찰

지반에 하중을 변화시키면 하중이 변화동안 간극 속의 물이 침투되기도 하고 그렇지 않을 수도 있다. 이러한 상태를 하중변화에 따른 배수와 비배수상태로 구분한다.

지반에 전응력을 천천히 변화시키게 되면, 간극수압의 변화가 없기 때문에 전응력의 변화량은 모두 유효응력의 변화량과 같게 된다 ( $\delta\sigma = \delta\sigma'$ ). 유효응력의 변화에 따라 체적은 변화가 발생하게 된다 (그림 1).

한편, 전응력을 매우 빠르게 변화시키게 되면, 체적의 변화는 없으며, 지반이 등방상태에서, 유효응력의 변화는 없기 때문에 ( $\delta\sigma = 0$ ) 간극수압은 전응력의 증가량과 동일하게 증가되는데 ( $\delta\sigma = \delta u = \bar{u}_0$ )이 증가되는 간극수압을 과잉간극수압이라 하고 시간이 지나면서 과잉간극수압은 소산되며, 이 과정(압밀)에서 체적변화가 발생된다(그림 2).

상기 언급내용에 따라, 배수와 비배수상태를 구분하는 중요한 수단은 하중변화의 속도(즉, 터널의 경우 굴착

속도)와 지반의 체적변화속도(압밀 및 침투속도)와의 비교하는 것이다.

비록 투수성이 큰 사질토의 경우라 하더라도 하중의 변화를 상당히 빠르게 하면 하중이 변하는 동안 비배수상태일 것이고, 점성토라 하더라도 천천히 하중을 변화시킨다면 배수상태로 간주하여야 할 것이다. 따라서, 배수조건인 개념은 지반의 종류와 이들 지반에 가해지는 하중조건(시공속도) 등에 대한 우선적인 분석이 요구되어 진다.

표 1은 대표적인 하중 종류별 재하시간을 요약 정리한 것이다. 이 표로부터 하중의 재하시간에 따른 지반에 가

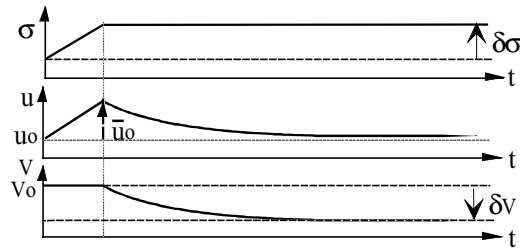


그림 1. 비배수상태의 기본개념

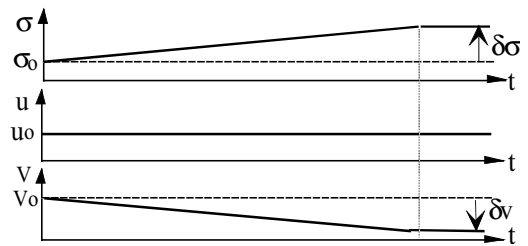


그림 2. 배수상태의 기본개념

표 1. 대표적인 하중 종류별 재하시간

지반공학적 하중종류	기간 (Duration)
Shock, Wave	1 ~ 10 초
지진하중	1분이하
트랜치 굴착	3시간이하
소형기초	여러일 이상 (10일)
절토 (Cutting)	수개월
대형기초	1년이상
성토 (Embankment)	수년 (3년)
Erosion	수십년 (30년)

해지는 하중의 변화속도와 지반거동과 종합적으로 분석하는 활용되어야 할 것이다.

### 3. 배수조건에 따른 토질공학적 기본 개념

지반의 배수조건에 따른 특성을 알아보기 위하여서는 복잡한 이론적 접근이 필요하나 본 절에서는 본 논문에서 다루고자하는 토질공학적 터널거동의 이해를 도모하기 위하여, 우선적으로 배수조건 (Drained 또는 Undrained)에 따른 기본적인 지반의 응력-변위 특성을 알아보고자 한다. 이를 위하여 약간과압밀된 점토의 실내삼축시험시 얻어질 수 있는 이상적인 응력-변위곡선 및 응력경로를 가지고 배수, 비배수상태의 거동에 대하여 고찰해 보고자 한다.

그림 3은 대표적인 배수와 비배수상태의 응력경로 및

응력-변위곡선을 나타낸 것이다.

이 그림에서 J점은 초기응력상태이고, HLNI 곡선은 항복포락선 (Yield envelope), 그리고 OHMQ 직선은 한계상태선 (Critical State Line)을 나타낸 것이다.

여기에서, 항복포락선 (Yield envelope)은 항복면 (Yield surface)이라고도 하고, 그 의미는 그림 4로 설명될 수 있다. 이 그림에서 보여 주는 것과 같이 초기유효응력 상태를 A라고 한다면, 초기항복면 (Initial yield surface)에 도달 할 때까지 지반은 탄성거동을 하게된다. 따라서, 응력경로 B점까지는 탄성거동을 하다가 항복면을 넘어서는 C점까지는 탄소성거동으로 바뀌게 된다. C점에서 하중의 변화로 A'점까지 Unloading으로 도달시킨 후 다시 하중을 증가시키면, 이 때의 지반의 항복면은 초기의 항복면이 아닌 그림에서 보여주는 것과 같이 C점을 지나는 점선으로 나타낸 새로운 항복면까지 탄성거동을 하게되는 잠재력을 갖게된다. 이러한 거동은

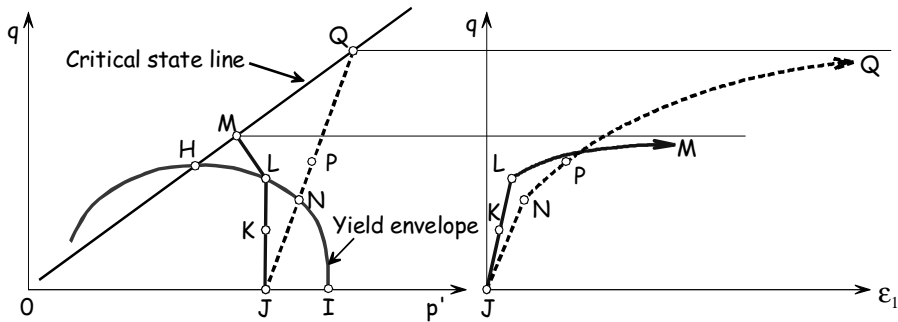


그림 3. 배수조건 (배수/비배수상태)에 따른 응력경로

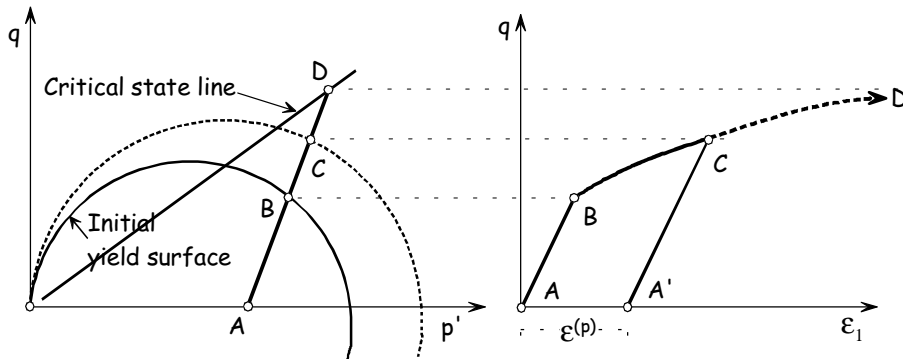


그림 4. Yield surface의 정의

지반의 응력이력에 따라 좌우되며, 지반을 보강 할 경우에 있어서도 유사하여, 보강후에는 초기보다 더 큰 영역의 항복면을 새롭게 갖게되고, 이에 따라 탄성거동영역도 크게되어 지반의 변형특성을 강화시키게 된다는 의미를 갖는다.

다시 그림 3으로 돌아와서, 초기응력 J로부터 비배수상태의 유효응력경로는 JKLM으로 응력-변형곡선에서 보여주듯이 항복포락선까지의 경로 JKL은 성형적 탄성거동을 하게되며, 항복점 L를 통과한후 유효응력경로 LM은 탄소성거동을 하게된다. 이러한 거동에 따라 비배수상태 ( $\nu_u=0.5$ )에서의 초기탄성계수는 JKL의 기울기로써, Hooke's Law를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\Delta q}{\Delta \epsilon_1} \equiv \frac{\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3}{\Delta \epsilon_1} = E_u \quad (1)$$

한편, 배수상태에서의 유효응력경로는 JNPQ로써  $\Delta \sigma_3' = 0$ 이므로, 기울기가 3인 직선경로가 된다. 상기에 서 언급한 비배수경우와 같이 탄성거동은 유효응력경로 JN에서 일어나며, N점에 도달하면 항복하게 되며, 그이후는 탄소성거동을 하다가 궁극적으로는 한계상태 Q에 도달하여 파괴된다. 이 경우, 초기탄성계수는 JN의 기울기로 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$\frac{\Delta q}{\Delta \epsilon_1} \equiv \frac{\Delta \sigma_1' - \Delta \sigma_3'}{\Delta \epsilon_1} = E' \quad (2)$$

상기 언급한 내용에 따라, 비배수와 배수상태의 초기탄성계수의 관계는 다음과 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{E_u}{2(1+\nu_u)} = G_u \equiv G' = \frac{E'}{2(1+\nu')} \quad (3)$$

$$\frac{E_u}{E'} = \frac{2(1+\nu_u)}{2(1+\nu')} = \frac{3}{2(1+\nu')} \quad (4)$$

상기 관계식으로부터, 점토의 경우, 배수상태의 포아송비,  $\nu'$  값은 일반적으로 0.12에서 0.35사이의 값을 보이므로, 결과적으로 배수와 비배수 상태에서의 초기탄성계수비  $E_u/E'$ 는 1.11에서 1.34 사이의 값으로 예측할 수 있다. 따라서, 비배수상태에서의 초기탄성계수 ( $E_u$ )

배수상태와 비교해 볼 때 10~34% 더 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 하중변화에 의한 지반의 초기변형에 있어서도 비배수상태가 배수상태보다는 적게 발생할 것이라는 것을 암시한다.

이상과 같이, 지반거동의 기본개념을 고찰하였다. 이러한 토질공학적 기본개념을 이용하여 토사터널 굴착시 지반의 거동에 대하여 고찰해 보면 다음과 같다.

#### 4. 터널굴착시 지반내의 전응력 거동

터널굴착으로 인한 지반내의 응력변화를 예측한다는 것은 쉬운 일이 아니며 보다 복잡한 해석 및 분석이 뒷받침되어야 할 것이다. 그러나, 터널굴착에 따른 지반내의 기본적인 거동에 대한 중요한 현상들에 대하여서는 필히 알아두어야 할 것이다. 이와 같이 터널 주변지반에서 야기되는 중요한 현상을 이해하기 위하여, 그림 5와 같이 시공 중의 원형터널 (실드터널로 가정)의 단면 및 주어진 조건을 단순화하여 나타낸 것이다.

그림에서 보여주듯이 지표면에는 건물, 차량등 복잡한 구조물에 대한 상재하중을  $\sigma_s$ 로 가정하여 등분포로 작용한다고 하였고, 터널은 공기 또는 벤토나이트 슬러리 압력, 실드에 의한 지지 및 라이닝 등에 의해 터널벽에 야기되는 압력,  $\sigma_T$ 가 가해지고 있다고 가정하였다. 여기서 실질적으로는 라이닝에 의한 압력이 가설 지보에 의한 압력보다는 크다고 할 수 있으나, 막장과 라이닝부분 등, 모든 터널내의 압력이  $\sigma_T$ 로 동일하다고 가정하였다. 또한 굴진을 위한 실드와 라이닝은 매끄러울 뿐만 아니라 연성거동을 한다고 가정하였다.

지반은 중간 과압밀 (Moderately overconsolidated) 된 상태의 점토로, 토압계수는  $K_o=1$ 로 단순화 시켰다.

이와 같은 주어진 조건에 따라, 터널 막장의 전방부를 모사한 그림 5의 (a)지점에서 임의 심도 z에서의 수직과 수평 전응력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_v = \sigma_h = \sigma_s + \gamma z \quad (5)$$

그림 5의 (b)지점에서 터널내 압력  $\sigma_T$ 는 터널의 막장에서는 수평전응력,  $\sigma_h$ 로, 터널의 천단지점에서는 수직

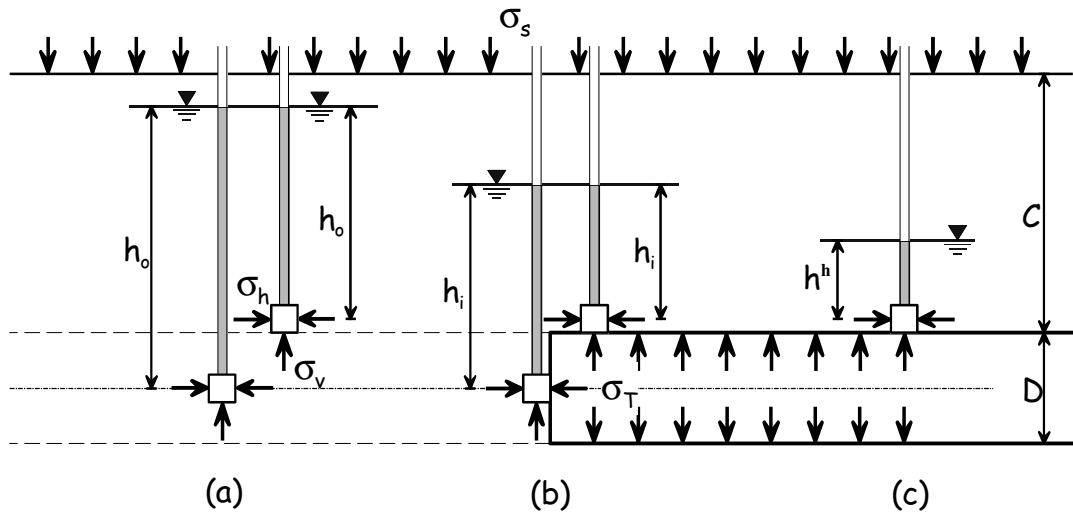


그림 5. Soft ground tunnelling (a) 굴진전, (b) 터널막장, (c) 완공 (라이닝)

전응력,  $\sigma_v$ 로 각각 작용하게 된다. 배수상태인 경우, 막장으로는 정상 침투수가 유입되겠지만, 비배수상태의 경우, 전응력의 변화에 따른 과잉간극수압이 발생하게 되며, 이 과잉간극수압이 소산되면서 지반은 변형하게 된다. 따라서, 이러한 거동과정에서 야기될 수 있는 터널의 안정성 상의 문제를 최소화 시키기 위하여 요구되는 터널내, 즉, 막장압력,  $\sigma_T$ 는 기본적으로 작을수록 경제적 이고 안정 측면에서 바람직하나, 일반적으로는 초기정수압보다는 약간 큰 값으로 적용한다. 특히 이 구간에서 실드의 막장압력,  $\sigma_T$ 에 영향을 주는 주요 요소들을 열거하면 다음과 같다.

- 1) Overcutting (여굴량),
- 2) 사용하는 Face plates 종류,
- 3) 지반의 강성 (Stiffness),
- 4) 실드의 추진압력

많은 경우, 시공시 적용되는  $\sigma_T$ 의 압력범위는 다음과 같다.

$$0 \leq \sigma_T \leq \frac{1}{2} \gamma \cdot \left( C + \frac{1}{2} D \right)$$

여기에서,  $\sigma_T$ 의 적용에 있어서는 과압밀비 (OCR)가 큰 지반일수록 작은 압력으로, 터널심도가 얇거나, 연약

지반 ( $OCR \leq 1$ )일수록 큰 값으로 선정한다. 따라서,  $\sigma_T$ 는 지반의 전응력 보다는 작은 값으로 실질적으로 적용되기 때문에 터널굴착시 지반내 평균전응력 (Mean total stress, s)은 감소 할 것이고, 전단응력 (Total shear stress, t)은 증가 할 것이다.

그림 5(c) 지점은 터널이 완공된 지점으로 실드 터널의 경우, 영구라이닝이 설치되고 안정화된 지하수위가 유지되는 상태이다. 따라서, 이 구간에서의  $\sigma_T$ 는 시공절차, 지반과 라이닝의 강성, 그리고 라이닝 확장을 위한 추가적으로 가해지는 응력 등에 좌우된다고 볼 수 있다. 특히, 가설지보나 영구라이닝에 의한  $\sigma_T$ 가 같다고 한다면, (b)와 (c)에서의 전응력은 같다고 볼 수 있다.

상기 언급한 내용에 대한 전응력경로를 나타내면 그림 6과 같다. 이 그림에서 보여주는 좌표축 s와 t의 정의는 다음과 같다.

$$t = t' = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2}$$

$$s = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, \quad s' = \frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2}, \quad s' = s - u$$

또한, 그림 6은 지반이 비탄성적이고 비등방 상태인 경우에 대하여 표현되었다고 볼 수 있으나, 만약, 지반이 탄성적이고, 등방상태라면, 전단응력의 변화, 즉  $\delta s = 0$

로써, 전응력개념의 경로 ABC는 수직될 것이다.

## 5. 터널굴착시 지반내의 간극수압 거동

일반적으로 지반내에서의 간극수압은 다음과 같이 계산되어 질 수 있다.

$$u = \gamma_w \cdot h$$

여기에서  $\gamma_w$ 는 물의 단위중량이며,  $h$ 는 그림 5에서 보여주는 것과 같이 지하수위계에 나타난 수두의 높이이다.

그림 5에서 (a)지점에서의 초기 간극수압은  $u_o$ 이며 이때의 수두높이는 지반의 자연수위에 해당되는  $h_o$ 이다. 따라서 지반전체의 초기간극수압은  $u_o$ 라고 할 수 있다.

반면 (c)지점의 최종간극수압은  $u_{\infty}$ 이며 이때의 수두높이를  $h_{\infty}$ 라고 하면, 이때의 최종간극수압은 터널로 향하는 침투상태에 대응하는 값이다. 그리고 이는 터널 라이닝 배면에 가해지고 있는 간극수압과 동일하다고 볼 수 있다. 또한 라이닝의 투수상태에 따라 그 값의 측정값은 달라진다.

(b)지점에서의 간극수압은  $u_i$ 이고, 수두높이를  $h_i$ 라고 한다면, 이들의 값은 실질적으로는 시공과정이 배수 또는 비배수상태에 따라 상이한 결과를 보여 줄 것이다.

만약, 시공과정이 배수상태라면, 막장으로 유출되는 정상 침투에 대응되는 간극수압,  $u_i$ 가 발생한다. 이때의 간극수압,  $u_i$ 는 3차원적 유선망으로 부터 얻어지며, 일반적으로 2차원 투수조건인 최종간극수압,  $u_{\infty}$ 과는 다르다.



그림 6. Tunnelling시 터널주변 지반내의 전응력경로

반면에, 시공과정이 비배수상태 라면, 굴진시 체적변화가 없으며,  $u_i$ 는 초기간극수압,  $u_o$ 와 터널굴진에 따른 전응력의 변화로부터 결정 할 수 있다. 이 조건에서 야기되는 과잉간극수압은 장기적으로 압밀을 유발시킨다.

특별히 유의할 사항으로는 정상침투의 경우, 터널의 안정성을 저하시키는 침투응력,  $\sigma'_s$ 가 발생하며 다음식으로부터 산정 할 수 있다.

$$\sigma'_s = \gamma_w \cdot i$$

여기에서,  $i$ 는 동수구배를 의미한다 (Atkinson & Bransby, 1978).

## 6. 터널굴착시 유효응력경로

일반적으로 간극수압변화에 따라 좌우되는 유효응력은 지반의 거동을 결정하는 매우 중요한 요소이다. 따라서, 간극수압의 변화에 영향을 주는 배수상태와 비배수상태를 구분하여 터널굴진시 지반의 유효응력경로에 대하여 분석해 보고자 한다.

우선, 터널굴진시 굴진속도가 해당지반의 압밀속도와 비교해볼 때 비교적 느린 경우를 배수상태로 간주할 수 있다. 이 경우 과잉간극수압은 발생하지 아니하며, 모두 유효응력으로 변하여 굴진중 모든 변형이 발생하게 된다. 그림 7은 배수상태에서 터널굴진시 터널주변 지반의 전응력및 유효응력 경로를 나타낸 것이다. 이 그림에서 전응력경로, ABC는 그림 6에서 보여준 것과 동일하며, 간극수압들에 대한 크기는 다음과 같은 조건이라고 가정

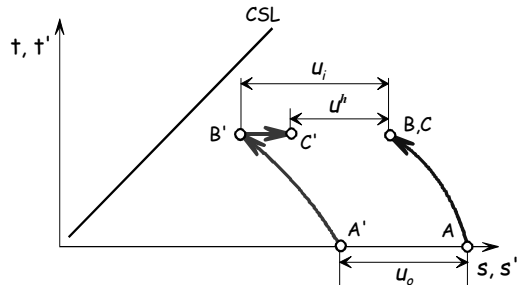


그림 7. 배수상태하의 굴착시 터널주변의 응력경로

한다.

$$u_o > u_i > u_\infty$$

여기에서,  $u_o$ 는 터널시공전의 간극수압이며,  $u_i$ 는 터널 막장 부근에서의 간극수압이며,  $u_\infty$ 는 라이닝이 설치된 터널완공구간에서의 간극수압을 말한다.

또한, 굴착시 유효응력상태인 B'는 한계상태로 접근하게 된다. 만약 유효응력경로 A'B'가 한계상태선에 도달된다면, 지반은 파괴하게 된다. 또한 간극수압에 있어서는 전응력이 일정한 상태에서  $u_i$ 에서  $u_\infty$ 로 감소하게 되며, 따라서 유효응력경로 B'C'는 한계상태에서 멀어지게 된다. 따라서, 안전율에 있어서는 (b)보다 (c)에서가 더 크다는 것을 알 수 있다.

유효응력경로 A'B'는 s'와 t' 모두 증가되지만 t'가 비교적 큰 변화로 증가되기 때문에 전단변형에 의한 침하가 발생될 것이다. 반면, 유효응력경로 B'C' 경우는 오로지 s'만이 증가되므로 체적압축변형에 따른 침하가 발생하게 된다. 따라서, 배수상태의 경우, 중요한 사항은 하중과 간극수압의 변화에 따라 즉시적으로 모든 변형과 침하가 발생되므로 터널의 안정성 검토에 있어서는 유효응력 개념하에서 검토되어야 할 것이다.

비배수상태에서는 굴진속도가 지반의 압밀속도와 비교해 볼 때 빠른 경우라고 말할 수 있다. 이 경우 굴착시 배수가 허용이 안되며, 체적변화도 없게 된다. 따라서 비배수상태하에서 굴진에 의하여 야기되는 침하는 오직 전단변형에 대한 것이라 말할 수 있다.

그림 5(b) 지점에서의 간극수압  $u_i$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_i = u_o + \delta u$$

여기에서  $\delta u$ 는 굴착중 전응력 변화에 따른 간극수압의 변화량이다.

대부분의 경우 간극수압은 비배수상태의 굴진시에는 감소되며, 따라서  $\delta u$ 는 음의 값으로 나타난다.

그림 5(c)에서 영구라이닝 배변에 발생하는 간극수압  $u_\infty$ 는 앞에서 언급하였듯이 배수조건이라 하더라도 비배수상태와 동일한 값으로 나타나게 된다. 이에 따라 굴

진 직후 야기되는 과잉간극수압  $\bar{u}_i$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{u}_i = u_i - u_\infty = u_i + \delta u - u_\infty$$

여기서  $\delta u$ 는 일반적으로 터널굴진시 음(Negative) 값으로 나타난다.

그림 8은 압밀이 일어나는 비배수상태에서 터널굴착시 터널주변의 대표적인 지반에 대한 전응력 및 유효응력경로를 나타낸 것이다.

이 그림에서 초기간극수압,  $u_o$ 는 최종간극수압,  $u_\infty$ 보다 큰 경우를 나타낸 것이다( $u_o > u_\infty$ ). 이 그림에서 보여주듯이 전응력경로는 그림 6과 동일하며, 유효응력경로 A'B'는 전단변형에 의한 침하를 유발시키는 오직 t'만 크게 증가되기 때문에 체적변형은 일어나지 않는다.

한편, 유효응력경로 B'C'에서는 압밀거동이 일어나며 간극수압은  $u_i$ 에서  $u_\infty$ 로 변화하게 된다. 이 경우 s'만이 증가 됨에 따라 체적변형에 의한 압밀침하가 발생하게 된다.

또한, 그림 8에서 유효응력경로 A'B'가 한계상태까지 접근하여 B'가 한계상태선에 도달하게 되면 지반은 파괴되는 것을 의미한다. 아울러 경로 B'C'는 압밀거동이 발생되면서 한계상태를 향하여 이동되는 과정에 놓이게되므로, 실질적으로는 그림 5(c)경우가 (b)경우보다 불안정한 상태가 됨을 알 수 있다. 특히, B'의 유효응력 상태에서 C'를 지나고 한계상태 D'까지, 즉 B'D'를 터널의 자립시간(Stand-up time)이라고 말할 수 있고, 이는 지반의 압밀속도에 영향을 받는다고 볼 수 있다. 일반적으로 압밀속도는 지반의 투수계수에 의하여 좌우되기 때문에 점성토에서의 압밀은 보다 장기적이 된다. 이와 같이 비배수상태의 경우 터널의 안정성 및 침하예측에 있어서는 전응력개념의 해석이 수행되어야 한다.

## 7. 터널안정을 위한 막장압력

연약지반에서의 터널은 일반적으로 터널심도가 얕기 때문에 지반의 전응력 및 간극수압도 작다. 따라서, 실질

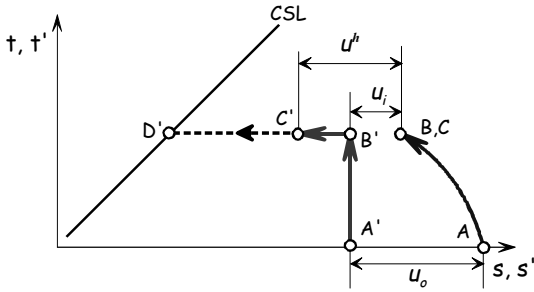


그림 8. 비배수상태하의 굴착시 터널주변의 응력경로

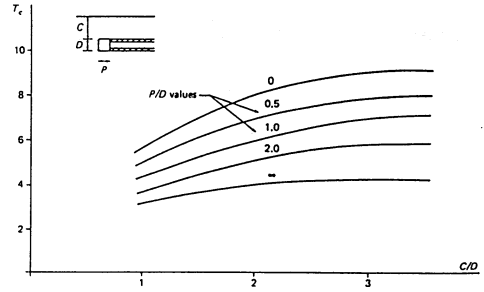


그림 9. 터널안정상수  $T_c$

적으로는 실드자체 및 설치된 라이닝의 안정성에 있어서도 큰 문제는 없다. 이러한 점에서 연약지반의 터널굴진에 있어서는 터널 선단부분인 막장의 안정성이 더욱 중요한 검토사항이라 할 수 있다. 따라서, 실드터널의 경우 라이닝을 설치하기전 요구되는 압축공기압, 슬러리압력 또는 가설지보 등의 검토와 분석이 요구된다. 또한 이에 따른 지반공학적 문제점의 예측과 검토 그리고 대책이 수립되어야 한다.

세립점성토의 경우, 터널굴착은 비배수상태이기 때문에 비배수전단강도 ( $c_u$ )를 이용한 전응력개념으로 터널의 안정성에 대하여 검토되어야 할 것이다. 비배수상태에서 안전율을  $F_s$ 로 안전을 유지하기 위하여 요구되는 터널막장압력,  $\sigma_T$ 는 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$\sigma_T = \sigma_s - \frac{c_u}{F_s} T_c + \gamma \cdot \left( C + \frac{D}{2} \right)$$

여기에서  $T_c$ 는 터널안정 상수 (Tunnel stability number)이다.

조립사질토내의 터널굴착은 반대로 배수상태라고 간주할 수 있다. 따라서 터널의 안정성 해석은 유효응력개념으로 수행되어야 하며, 논리적으로 보수적인 설계를 위해서는 지반의 강도정수는 한계상태강도 ( $\phi_{cs}', c' = 0$ )를 사용하는 것이 타당하다. 건조한 지반의 지표면 상재하중,  $\sigma_s = 0$  일 때, 터널 안정을 위하여 요구되는 터널막장압력은 다음과 같이 추정 할 수 있다.

$$\sigma_T = \gamma D \cdot T_\gamma$$

만약, 지표면에 가해지는 상재하중이 상당히 클 경우, 지반의 자중은 무시할 수 있으며, 이때에 터널 안정성을 위하여 요구되는 막장압력은 다음의 식으로부터 예측 할 수 있다.

$$\sigma_T = \sigma_s \cdot T_s$$

여기에서  $T_\gamma$ 와  $T_s$ 도 터널의 안정상수들이다.

아울러, 터널 붕괴시 터널압력은 지반강도를  $\phi_{cs}'$ 라고 한다면 안전율을 고려한 허용 전단저항각도,  $\phi_a'$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\tan \phi_a' = \frac{1}{F_s} \tan \phi_{cs}'$$

상기에서 언급한  $T_c$ ,  $T_\gamma$ , 그리고  $T_s$ 는 터널의 형상, 지반의 강도 등에 따라 좌우되는 값으로, 기초의 지지력 계수  $N_c$ ,  $N_\gamma$  및  $N_q$ 와 매우 유사하다. 이들 값들은 소성 한계론 (Limit theorems of plasticity theory)과 Model tests를 통하여 얻어진 값들이다.

$T_c$  값의 경우 Davis (1980)에 의하여 원형터널에 대한 이론적 해석을 근거로 하였으며, 이 결과는 Kimura 및 Mair (1981)에 의하여 Centrifugal model tests를 통하여 검증되었다. 이 결과로 부터,  $T_c$  값은 점성토의 경우 무시보된 터널 선단부 길이, P, 토피고, C, 그리고 터널직경, D에 의하여 크게 영향을 받는다. 그림 9는 Centrifugal model tests로부터 얻어진 P/D와 C/D의 관계곡선을 나타낸 것이다.

이 그림에서 보여주는 값은 비배수 전단강도,  $c_u$ 가 일



정한 경우이므로 심도에 따라  $c_u$  값이 변할 때에는 평균 값 적용과 같이  $c_u$  값을 하나로 사용하는 것이 타당할 것이다.

$T_\gamma$ 와  $T_s$  값은 Atkinson과 Potts (1977)에 의하여 이론적 고찰과 Model 시험 등을 통하여 제시하였다. 그림 10과 11은 이들 값을 나타낸 것으로  $T_\gamma$  값은 단지 지반의 강도에 의존되는 값이지만,  $T_s$ 는 지반의 강도 뿐만 아니라 터널의 심도에 있어서도 영향을 받는다.

### 8. 터널막장 안전성 분석 사례연구

본 사례연구는 OO지역 해저 실드터널공사에서 공사중 측정된 막장의 압력을 이용하여 막장의 안정성에 대하여 정량적으로 계산하고, 이에 따라 터널공사중 막장의 안전성에 대하여 평가하였다. 그림 12는 현장의 지반상태와 굴진에 따른 막장의 압력을 나타낸 것이다.

본 검토를 위하여 전체 구간중 중앙부인 그림에서 점선 원형으로 표시한 A지점에 대하여 검토과정을 고찰해 보면 다음과 같다. 검토과정을 단순화시키기 위하여 대상 지점, A의 지반은 정규압밀점토이고, 비배수전단강도,

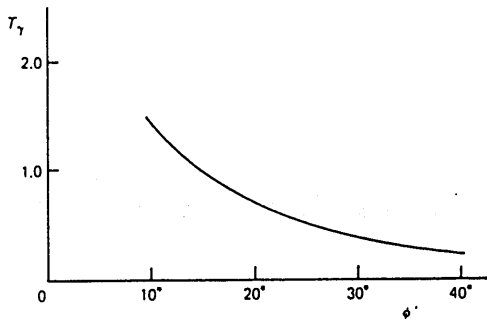


그림 10. 터널안정상수  $T_\gamma$

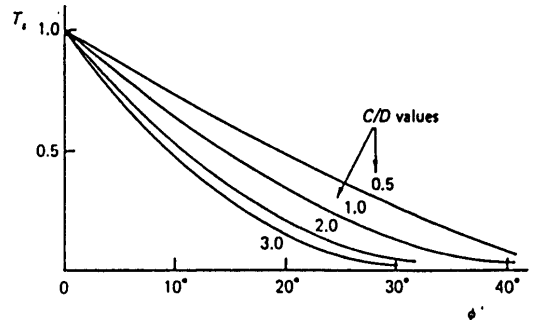


그림 11. 터널안정상수  $T_s$

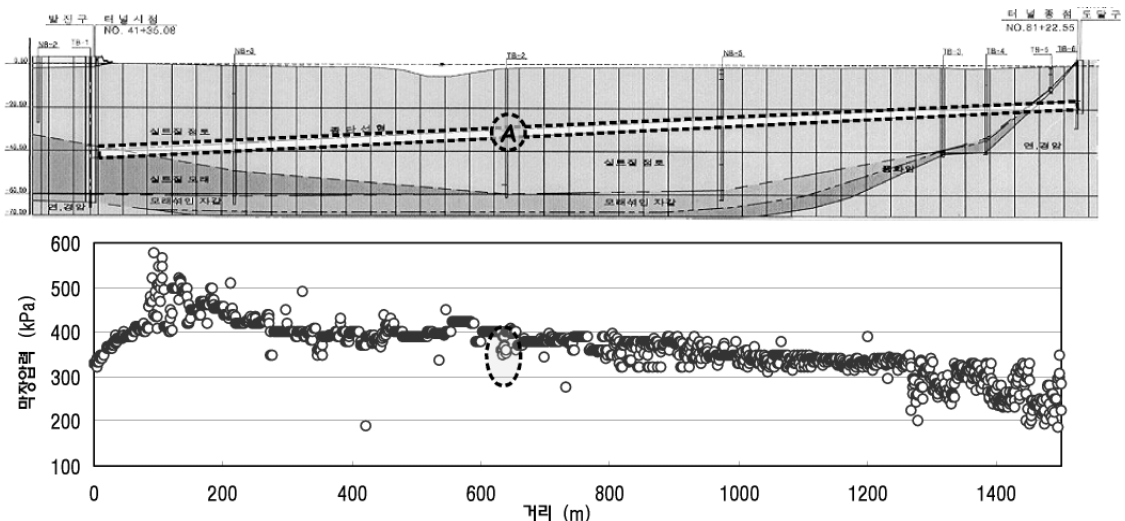


그림 12. 지반조건 및 굴진에 따른 막장압력

$c_u$ 는 60kPa라고 가정하였다. 또한 굴진중 터널 선단부 까지 라이닝이 설치되었다고 가정하였다. 이상과 같은 가정조건과 터널심도 및 형상을 기초로 주어진 조건들을 도식하면 그림 13과 같다.

그림 13에서 나타낸 조건으로부터 터널굴진지 지반은 비배수조건이라고 간주 할 수 있고,  $C/D=8.6$ ,  $P/D=0$ 으로 계산되어 진다. 이 값들을 이용하여 그림 9로부터 터널안전상수,  $T_c \approx 10$ 라고 할 수 있다.

따라서, 앞에서 언급한 터널압력 예측식을 이용하여 본 현장의 막장의 안전율은 다음식으로 예측할 수 있을 것이다.

$$F_s = \frac{c_u \cdot T_c}{\sigma_s + \gamma \cdot \left( C + \frac{D}{2} \right) - \sigma_T}$$

상기 식으로부터 안전율을 계산 하면 다음과 같다.

$$F_s = \frac{60 \times 10}{0 + 18 \times \left( 30 + \frac{3.5}{2} \right) - 400} \approx 3.5$$

따라서, 본 실드굴착에 있어서는 노선 중앙부에 안전율은 3.5로써 터널굴진시 막장의 안정성이 확보되었다고 추측할 수 있다. 상기와 같은 과정에 따라 굴진에 따른 막장의 안전율을 계산하여 그 결과를 나타내면 그림

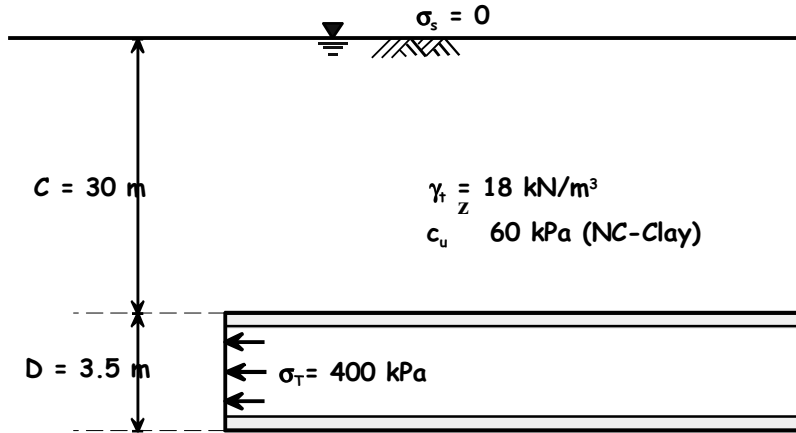


그림 13. 가정조건 및 터널제원의 도식화

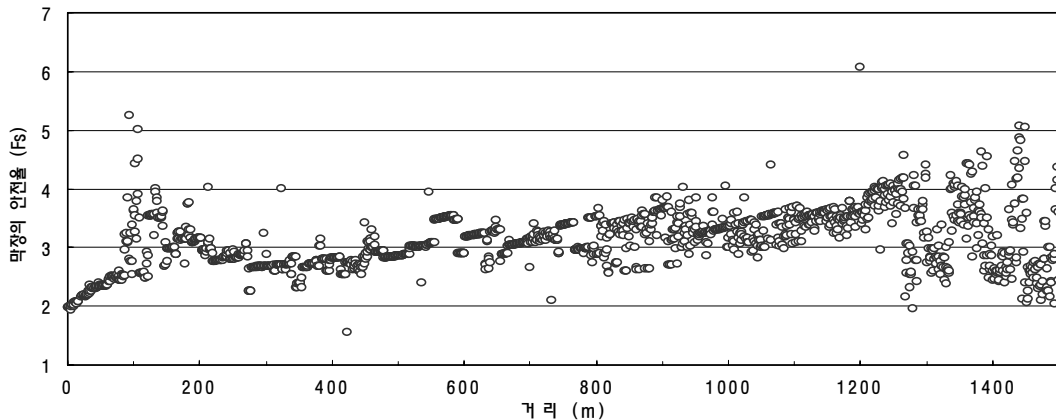


그림 14. 실드터널 굴진시 터널막장의 안전율

14와 같다.

그림 14에서 보여주는 것과 같이 본 현장에서 실드굴진시 터널막장의 안정성은 초입부와 끝부분을 제외하고는 안전율 3을 유지하면서 굴진을 수행하였다는 것을 알 수 있다. 초입부의 경우는 실드의 설치 및 안정화 과정이라 다소 막장의 안전성을 다른 구간에 비해 작았던 것으로 판단된다. 끝으로 이 분석결과는 현재 완공된 실드터널에 대하여 현장측정자료를 통하여 굴진단시의 상황을 상기에 언급된 이론적 접근 방법에 의하여 정성적으로 분석된 사례연구라 할 수 있다. 따라서, 굴진시 현장여건을 무시하고 오직 측정된 막장의 압력을 이용한 연구 사례인 만큼, 보다 상세한 현장작업조건 및 지반거동측정자료를 종합적으로 분석이 추가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

## 9. 결론 및 제언

본 논문에서는 토질역학적 개념에 의한 지반거동에 대한 기본개념을 검토하고, 연약지반에서 터널굴진시 지반거동을 배수상태와 비배수상태로 구분하여 이론적 개념에 대하여 고찰해 보았다. 또한, 본 논문에서는 실제적인 시공사례를 분석하고 평가하였다. 특히, 실드터널의 막장의 안정성에 대한 이론적 예측하는 기법을 이용한 사례연구를 통하여 향후 국내의 토사터널기술을 향상시키는데 기초자료로써 활용될 수 있도록 제시하였다.

상기와 같이 토질공학적 개념을 이용한 토사터널 굴진시 지반거동에 대한 종합적인 고찰과 사례분석을 통하여 얻어진 결론 및 제언을 요약 정리하면 다음과 같다.

1. 연약 토사지반에서의 지반거동해석은 배수조건에 따라 구분하여 해석방법을 선정하여야 할 것이다. 특히, 하중과 지반의 종류를 종합적으로 검토하여 지반의 배수조건을 우선적으로 규명하여야 할 것이다.
2. 지반의 초기거동은 탄성거동으로 비배수상태는 배수상태보다 더 큰 강성을 보이므로 초기변형은 비배수상태의 경우가 더 작게 된다.
3. 토사지반의 거동은 전반적으로 비선형적 탄소성 거동

을 하므로 이에 따른 지반의 강도정수에 대하여서도 고려하여야 할 것이다.

4. 터널막장부의 안정성을 유지시키기 위한 막장압력은 여굴량, 실드제원, 지반의 강성, 실드의추진압력에 의하여 영향을 받는다.
5. 배수상태에서 터널굴착시 굴진선단, 즉, 막장부의 안정성에 더 많은 관리가 요구된다.
6. 비배수상태의 터널굴진인 경우는 막장보다는 라이닝 타설구간의 주변지반거동에 대한 보다 상세한 검토가 요구된다.
7. 터널막장의 안정성검토는 기초의 지지력계수와 유사한 터널안정상수를 이용하여 추정 할 수 있으며, 이들 터널안정상수들은 보다 추가적인 모델시험 및 현장자료를 이용하여 보다 현실적인 값으로 수정이 요구된다.
8. 사례연구에 있어서, 현장에서 측정된 막장의 압력을 이용한 막장의 안전율을 분석한 결과 굴진과정에서 막장의 문제점은 없었을 것으로 판단된다.

끝으로, 본논문은 국내의 토사터널설계 및 검토에 있어 토질공학적 개념을 이용하여 이론적인 접근을 유도하는데 그 목적이 있다. 따라서, 본논문의 고찰 및 분석결과를 통하여 향후 토사터널기술 향상을 위하여 활용되기를 기대 한다.

## 참고문헌

1. Craig, R. N. and Muir Wood, A. M. (1978), A review of tunnel lining practice in the United Kingdom, TRRL Sup. Rept. 335.
2. Megaw, T. M. and Bartlett, J. V. (1982), Tunnels: Planning, Design and Construction (2 Vols.) E. Horwood.
3. Muir Wood, A. M. (1975), Tunnelling: in Civil Engineers Reference Book, ed. L. S. Blake, Butterworths.
4. Peck, R. B. (1969), Deep excavations and tunnelling in soft ground, 7th Int. Conf. S.M.F.E. Mexico City, State of the Art Volume.
5. Szechy, K. (1967), Art of Tunnelling (2nd Ed.) Akademiai Kiado, Budapest.

- 
6. Ward, W. J. and Pender, M. J. (1981), Tunnelling in Soft Ground. General Rept, 10th Int. Conf. S. M. F. E. Stockholm.
7. Kim, S. H, Burd, H, J, and Milligan, G. W. E (1998), Model testing of closely spaced tunnels in clay. Geotechnique 48, No. 3, pp. 375–288.
8. 김상환, 이인기, 김택곤, 김영준 (2001), 매립지 통과구간에서의 실드터널설계 및 시공고찰, KTA 2001 Symposium / Seoul, Korea.



**김상환**

호서대학교 기계건축토목공학부 토목  
전공교수  
kimsh@office.hoseo.ac.kr