

# 정상류 조건하의 토사터널의 해석 및 설계

Analysis and Design of Soft - Ground Tunnels  
Subject to Steady - State Groundwater Flow

이 인 모\*1

Lee, In - Mo

남 석 우\*2

Nam, Seok - Woo

이 명 재\*3

Lee, Myung - Jae

---

## Abstract

Under the groundwater level, the tunnel face is affected by the seepage force and the groundwater flow may cause a trouble to the tunnel support systems. The appropriate methods of analysis and design in the tunnel face and the lining, considering groundwater flow according to tunnel drainage condition, are presented in this thesis.

First, the effect of seepage on the stability of tunnel face was studied. Seepage force was estimated by the 3-D finite element analysis and the stability of tunnel face was checked by analytical method. Furthermore, using the finite difference method the stress and displacement on the face were computed for either case, where the seepage force is or is not considered, and the effect of seepage on the tunnel face stability was evaluated.

Second, the effect of seepage force on the tunnel lining when construction is finished and steady state seepage flow occurs was studied and a design methodology considering seepage effect was made.

Consequently, in case where the groundwater level remains almost unchanged and the steady state groundwater flow occurs, the proper countermeasures for face stability are required according to the condition of groundwater flow. Moreover, the tunnel lining should be designed and constructed considering the seepage force occurring by the groundwater flow toward the tunnel linings.

---

\*1 정회원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 부교수

\*2 정회원, 고려대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정

\*3 정회원, 고려대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정

## 요 지

지하수위 하에서 터널이 시공될 경우, 터널막장은 시공 중 용수에 의한 영향을 받게 되며 지보 System은 시공 후 지하수 흐름이 문제시 될 수 있다. 본 연구는 터널막장 및 라이닝에 대해 배수조건에 따른 지하수 흐름을 고려한 적절한 해석 및 설계방법을 제시하고 있다.

첫째, 시공 완료 후 터널 라이닝이 배수조건에 따라 받게 되는 지하수의 영향을 라이닝에 작용하는 응력 및 변위로써 검토하고 각 배수조건별로 적절한 해석 및 설계방법을 제안하였다.

둘째, 시공 중 굴착에 의한 지하수의 흐름이 문제가 되는 터널막장에 대해서 지하수 흐름의 3차원 모델링을 수행하였으며, 그 결과를 막장의 안정성에 대한 이론적 검토에 반영하여 침투력이 막장의 안정성 미치는 영향에 대하여 검토하였다. 또한 막장을 평면변형률 조건(plane strain condition)으로 모델링 하여 침투 고려시와 지하수의 미고려시에 막장면에 작용하는 응력 및 변위를 산출하여 침투력이 막장면에 미치는 영향을 검토하였다.

연구 결과, 터널 시공시 지하굴착 및 배수에 의한 지하수위 저하가 크지 않은 구간에서 터널막장은 정상류 흐름에 의한 침투력을 고려한 적절한 안정대책이 요구되며, 터널 라이닝 또한 침투를 고려한 배수개념이나 내부 라이닝이 정수압을 견뎌야 하는 비배수 개념에 의해 설계 및 시공이 이루어져야 함을 보여준다.

## 1. 서 론

지하수가 상존하는 지반에서의 터널 설계시 「배수공법」이란 터널 라이닝이 정수압을 견뎌야 하는 「방수공법(비배수공법)」에 비해 라이닝 배면에 지하수를 유도하는 배수공을 매설하여 터널 내부로 유입된 지하수를 집수하여 배수시설에 의해 처리하는 공법으로서 이 경우, 라이닝은 전혀 수압이 고려되지 않고 설계되는 것이 일반적이다. 그러나 하천 인접구간과 같이 지하수의 공급이 충분하여 배수에 의한 지하수위의 저하가 크지 않는 경우에는 배수층 및 배수시설의 기능이 정상적인 상태라 할지라도 지중응력 상태는 「유효응력+침투수압」이 되어 기존의 배수개념인 「전응력(=유효응력)」 상태와는 상당히 다르다.

한편 터널 시공중 안정성에 가장 문제가 되는 부분은 터널 막장이며, 굴착에 따른 응력이 완 및 용수에 의한 침투수압은 막장의 안정성을 좌우하는 중요한 요인이 된다. 본 연구에서는 상기 언급한 이러한 문제들을 정성 및 정량

적으로 분석하여 터널 설계에 이용하는 데 기본적인 지침을 제시하고자 한다.

## 2. 지하수를 고려한 터널 거동의 이론적 고찰

### 2.1 터널 설계시 지하수의 고려방안

#### 2.1.1 배수조건에 따른 터널의 설계개념

지하수위 아래에 축조된 터널의 내부라이닝 배면부에 지하수가 체류하면 라이닝에 수압이 작용하게 되고, 지하수가 터널내부로 침투하게 되면 내부설비의 기능저하, 라이닝의 재질약화 및 유지관리 상의 문제 등을 초래할 수 있으므로, 터널 설계시 지하수의 영향은 합리적으로 고려되어야 한다. 일반적으로 터널 설계시 지하수에 대한 고려방법은 크게 두가지로 분류되고 있다. 즉, 라이닝 배면에 유도배수층을 설치하여 터널내로 유입된 지하수를 처리하는 배수공법과 터널 굴착 후 라이닝 주변을 완전방수 처리하여 라이닝 내부로의 지하수의 유입을 완전히 차단하는 비배수공법(완전방수공법)이

표 1. 배수조건에 따른 터널의 설계개념

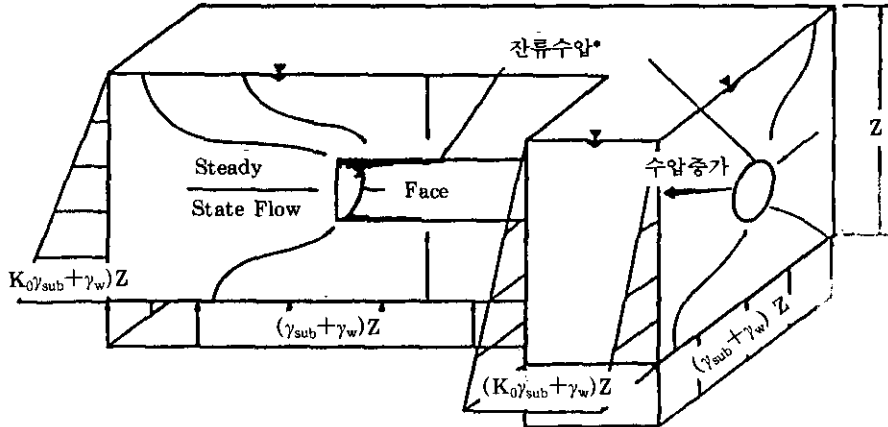
	배수 개념	비배수 개념 (완전방수개념)
지중 응력		
라이닝에 작용하는 수압		

있다. 배수조건에 따른 터널의 설계개념은 표 1에 보인 바와 같이 배수개념에서는 지중응력을 전응력으로 고려하고 라이닝에 수압이 작용하지 않는 것으로 설계한다. 반면 비배수개념은 지중응력을 유효응력과 정수압으로 고려하므로 라이닝이 수압에 견딜 수 있도록 라이닝의 단면을 보강하여야 한다.

### 2.1.2 지하수의 침투력을 고려한 터널설계

배수터널의 설계개념은 배수시설이 정상적으로 가동되어 완전배수가 된다는 가정 하에서 수압의 영향을 고려하지 않는 것이 일반적이다. 그러나 이 가정은 지하수위가 터널 하단부 아래로 저하되는 경우에는 합당하지만, 하천인 접구간에서와 같이 지하수의 공급원이 충분하여 지하수위 저하가 크지 않은 곳에서는 침투력(seepage force)이 터널 외벽에 작용하므로

1차지보 또는 내부라이닝이 이 하중에 견딜 수 있도록 설계하지 않으면 터널의 안정성에 문제가 발생할 수 있다. 또한 국내의 지하철 터널에서는 배수재(부직포)를 Shotcrete와 내부 라이닝 사이에 설치함으로써 투수계수가 낮은 Shotcrete층에 상당한 수압이 작용하게 될 가능성도 존재한다. 따라서 그림 1에 보인 바와 같이 침투가 발생하는 터널의 지중응력은 유효응력과 침투수압이며, 침투경계에서는 정수압이 작용하다가 유도 배수층에서 통수능력이 충분하면 수압은 0이 된다. 이와 같이 통수능력이 충분한 경우에는 라이닝 배면에 작용하는 수압이 0이나, 지하수가 터널의 하단부 이하로 하강한 배수터널과 비교해 보면 지중의 응력상태는 현저하게 다르다.



주) 찬류수압은 배수층의 통수능력이 충분한 경우 0.

그림 1. 침투를 고려한 터널의 해석

상기에서 언급한 바와 같이 실제 침투가 발생하는 터널의 라이닝 설계는 해석 경계부는 유효응력과 정수압이 작용하는 방수개념을 적용하고, 라이닝에는 찬류수압을 적용하는데 그 크기는 배수층의 통수능력이 충분한 경우는 0 이고 통수능력이 감소함에 따라 증가한다. 또한 지중에는 해석경계부와 라이닝과의 수두차(터널 중심에서의 지하수위)로 인한 정상류(steady state)의 흐름에 따른 유효응력과 침투수압을 적용해야 한다.

## 2.2 지하수를 고려한 터널 막장의 안정성 검토

### 2.2.1 배수개념에 의한 막장의 안정성 검토

터널 시공시 안정성에 가장 문제가 되는 부분이 터널 막장이며, 굴착에 따른 응력이완 및 막장에서의 용수에 의한 침투수압은 막장의 안정성을 좌우하는 중요한 요인이 된다. 지하수위가 터널 하부에 존재하거나 터널 상부에 존재하더라도 배수시설이 정상적으로 가동되는 경우에는 기존의 배수개념에 의한 터널 막장에 대한 안정성을 그림 2와 같이 지하수위를 고려하지 않은 유효응력 개념에 의해 검토하게 된다. 그림 2에 보인 바와 같이 사면(slope)의 경우 안정성 해석에 사용되고 있는 절편법(slice method)을 사용하면 막장의 안정에 필요한 막

장 전면에 대한 외부지지력은 식(1)에 의하여 산출할 수 있다.

$$P = \frac{1}{l_p} \left\{ \sum_{i=1}^n W_i \cdot l_w + Q \left( l_a + \frac{B}{2} \right) - \sum_{i=1}^n (T_i \cdot \cos \phi - N_i \cdot \sin \phi) \cdot l_u \right\} \quad (1)$$

그리고 전단저항력( $T_i$ )과 연직력( $N_i$ )는 다음의 식 (2) 및 (3)에서와 같이 구할 수 있다.

$$T_i = (C_i + \sigma_v \cdot \tan \phi) \cdot l_i \quad (2)$$

$$N_i = W_i \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

여기서

$P$ : 막장에 작용하는 수평력

$l_p$ : 0점에서  $P$ 성분까지의 연직거리(모멘트 팔길이)

$W_i$ :  $i$  절편의 유효중량

$l_w$ : 0점에서  $W_i$ 까지의 연직거리

$Q$ : 이완영역의 유효중량

$l_a$ : 0점에서 막장면까지의 연직거리

$B$ : Wedge 상부의 폭

$T_i$ :  $i$  절편의 활동면에 작용하는 전단력

$N_i$ :  $i$  절편의 활동면에 작용하는 연직력

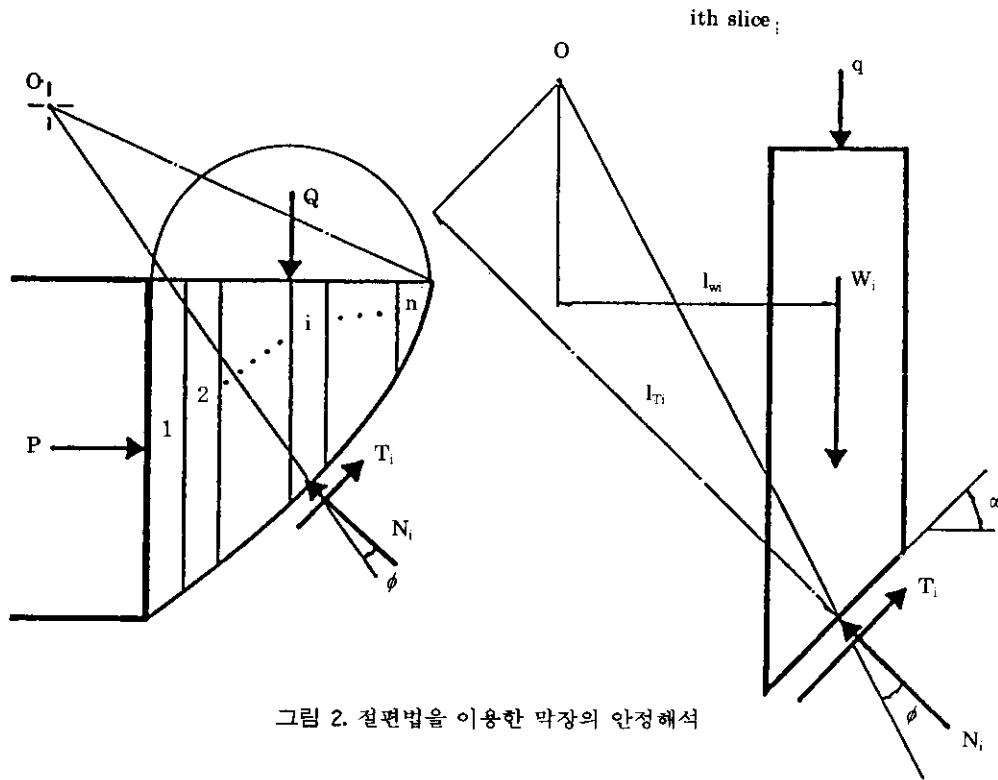


그림 2. 절편법을 이용한 막장의 안정해석

$l_{Ti}$  : 0점에서  $i$  절편의 연직력 성분까지의 연직거리

### 2.2.2 침투력을 고려한 막장의 안정성 검토

앞 절에서 언급한 바와 같이 배수공법에 의한 터널의 설계시 일반적으로 지하수위가 터널 상부에 존재하더라도 터널 경계부는 수압이 0이라는 전제하에 터널 막장의 안정성 검토가 실시된다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 지하수의 공급이 풍부하고 지하수위가 높게 위치한 경우 터널경계부와 지하수위까지의 수두차에 의한 지하수의 침투력이 발생하며 터널 라이닝은 물론 막장의 안정성 검토시에도 정상류 흐름에 의한 침투수압을 고려하여야 한다. 그러므로 안정성 검토에서 고려되는 힘들은 그림 2에서 나타난 성분 이외에 그림 3에서 보인 바와 같이 경계면의 수압이 고려된다.

막장 전면에 대한 외부지지력은 식 (4)에 의하여 산출할 수 있다.

$$P = \frac{1}{l_p} \left\{ \sum_{i=1}^n W_i \cdot l_{wi} + Q \left( l_a + \frac{B}{2} \right) + \sum_{i=1}^n U_i \cdot l_i \cdot l_{in} - \sum_{i=1}^n (T_i \cdot \cos\phi - N_i \cdot \sin\phi) \cdot l_{Ti} \right\} \quad (4)$$

전단저항력,  $T_i$ 는 다음의 식 (5)에서와 같이 구할 수 있다.

$$T_i = C_i \cdot l_i + \{ (\sigma_i - u_i) \cdot l_i \} \cdot \tan\phi \quad (5)$$

여기서

$l_i$  :  $i$  절편의 활동면의 길이

$u_i$  : 활동경계면에서의 수압

$\sigma_i$  :  $i$  절편의 활동경계면에서의 전응력(배수 개념에서는 「전응력=유효응력」)

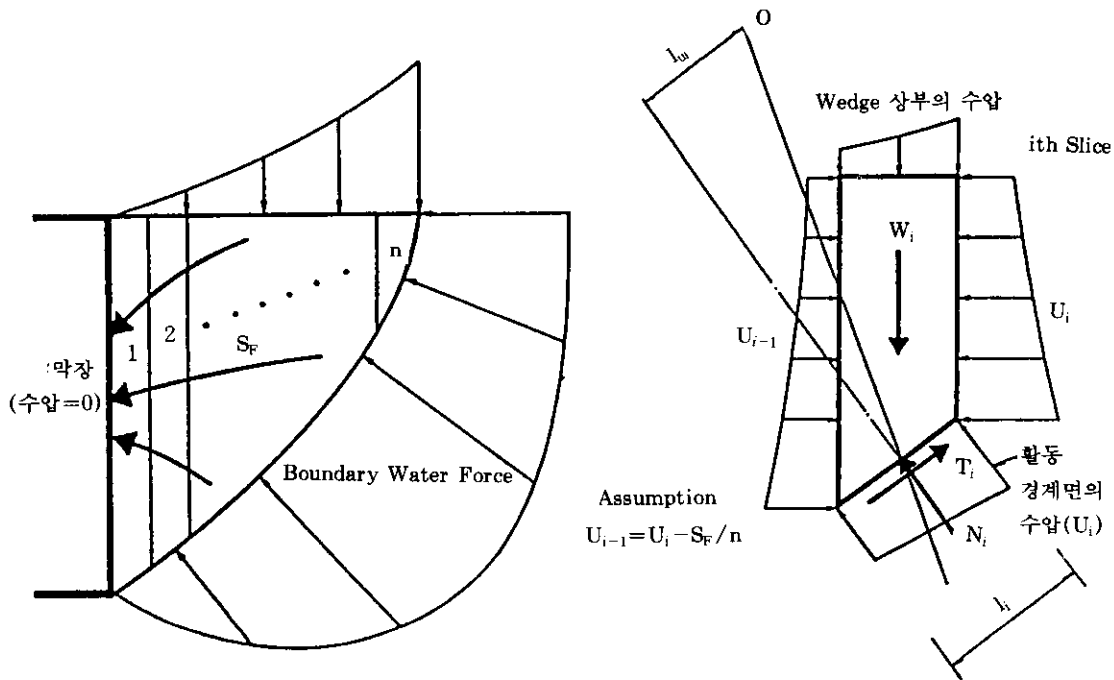


그림 3. 침투를 고려한 막장의 안정해석

### 3. 배수조건별 터널의 해석사례

#### 3.1 해석조건

터널 설계시 타당한 지하수의 고려방안을 연구하기 위하여 기존에 적용되고 있는 수압을 고려하지 않은 배수개념, 정수압을 작용시키는 비배수개념(완전방수개념), 그리고 침투(seepage)를 고려한 배수개념으로 원형단면에 대해서 예제해석을 수행하였다. 배수터널에서 침투에 영향을 미치는 영향인자는 지반조건, 지하수위, 지반 및 지보재의 투수성과 배수 및 침투 조건 등이며, 본 예제에서는 지하수위와 지반 조건을 변화시키면서 상기 3가지 개념의 해석 방법을 비교 분석하였다. 해석조건은 수압을 고려하지 않은 배수개념 해석에서는 지중응력 상태가 「전응력(=유효응력)」이며 수압은 무시하였다. 방수개념 해석에서는 지중응력 상태가 「유효응력+정수압」으로 구성되며 결국 라

이닝에 정수압이 작용한다. 침투를 고려한 배수개념 해석에서는 해석 경계부에는 「유효응력+정수압」이 작용하고, 라이닝 배면에 작용하는 수압이 0이며, 지중응력은 터널 중심부에서 지하수위까지의 수두차에 의한 정상류 흐름으로 인한 「유효응력+침투수압」의 상태이다. 또한 지반 및 지하수위의 영향을 검토하기 위하여 터널 Crown에서 지표면까지의 거리( $H_1$ )를  $2D$ ,  $3D$ ,  $4D$  ( $D$ 는 터널직경)인 경우와 각 경우에 지하수위를 변경하면서 해석을 실시하였다. 지반은 층적으로 구성된 사질토로써, 지반상수는 그림 4에 나타내었다. 토사구간에 NATM 개념으로 시공하기 위하여 터널주변  $0.5D$ 를 Grouting으로 보강하였으며, 투수계수는 주변지반과 동일한 값을 사용하여 균일(homogeneous)한 흐름조건이 되도록 하였다. 해석에 적용된 하중분담률은 지반물성치를 변화시켜 굴착시 30%, Soft Shotcrete 타설시 70%, Hard Shotcrete 타설 및 Concrete Lining설치 전에 100%를 적용하였다.

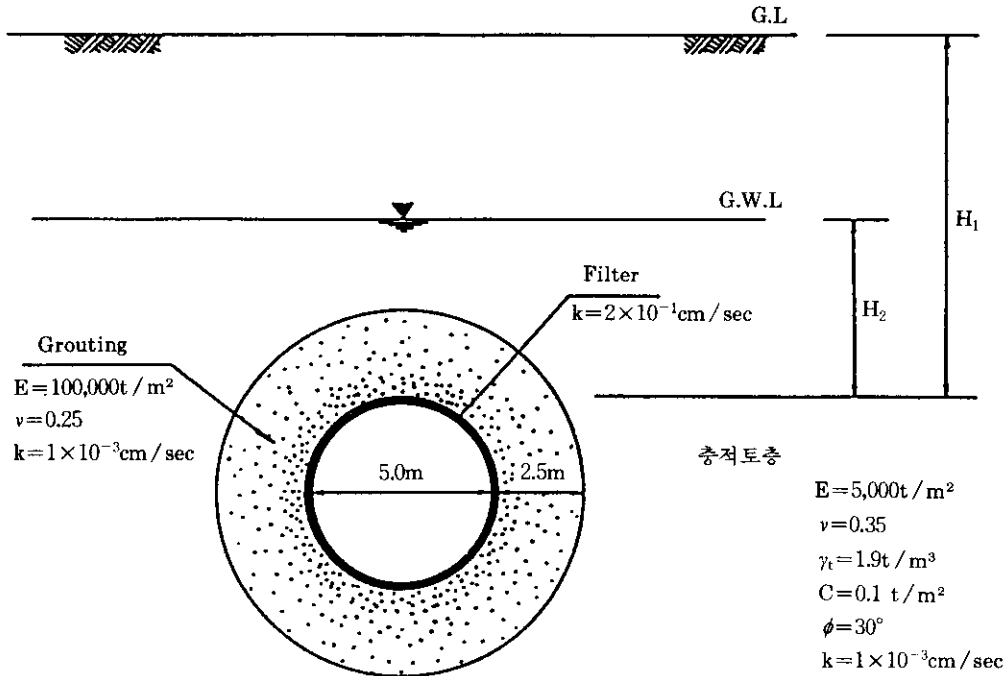


그림 4. 지반조건

### 3.2 결과분석

원형단면의 해석에서 지반고 및 지하수위의 조건에 따라 각각 배수조건을 다르게하여 라이닝에 작용하는 하중을 비교 검토하였다.

그림 5는 지하수의 정상류 흐름시 수압의 분포를 나타낸 것으로 터널굴착 및 배수에 의해 지하수위가 터널 하단부로 저하하지 않는 경우, 굴착경계면과 지하수위까지의 수두차에 의한 침투수압이 발생하게 된다. 그러므로 지중 응력상태는 「유효응력+침투수압」이 되며, 침투를 고려한 배수조건에서는 이러한 지중응력 상태에서 라이닝에 작용하는 응력 및 변위를 검토하였다. 결과를 도시화하면 그림 6~7에 나타낸 바와 같으며 결과에서 알 수 있듯이 배수조건에 따라 라이닝에 작용하는 하중 및 변위는 큰 차이를 보인다. 수압을 고려하지 않고 지중응력을 「전응력(=유효응력)」으로 고려한 배수개념 해석에서는 라이닝에 거의 하중이 작용하지 않으며, 지중응력을 「유효응력+정수

압」으로 고려한 비배수 개념의 해석에서는 라이닝에 상당히 큰 하중이 작용한다. 정상류 상태의 지하수 흐름을 고려한 배수개념 해석에서 라이닝에 작용하는 축응력은 동일한 비배수 조건의 10~50% 정도의 크기가 작용한다. 또한 배수조건에 따라 터널 천정부의 변위도 큰 차이를 보이며 결과는 그림 7에 도시한 것과 같다.

상기 결과에서 보인 바와 같이 지하수위의 저하가 크지 않은 지하수가 풍부한 배수터널에서 수압의 영향을 고려하지 않고 라이닝을 설계하는 해석방법은 상당한 위험측의 설계임을 알 수 있다. 지하수를 고려한 터널의 합리적인 설계를 위해서는 터널의 배수조건에 따른 타당한 지중응력상태를 해석에 반영하여야 한다.

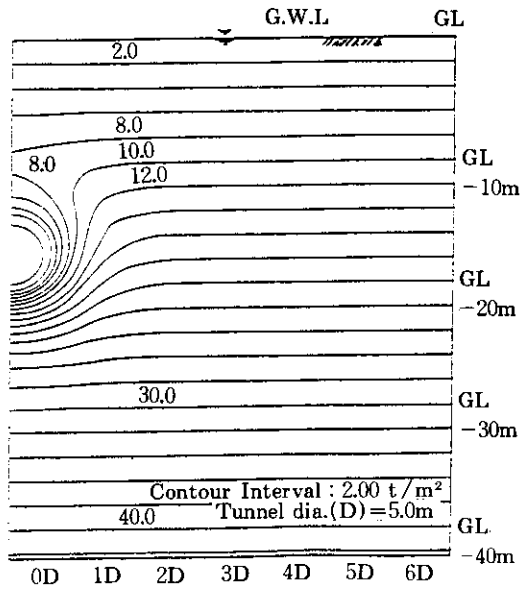


그림 5. 지하수의 정상류 흐름시 수압분포

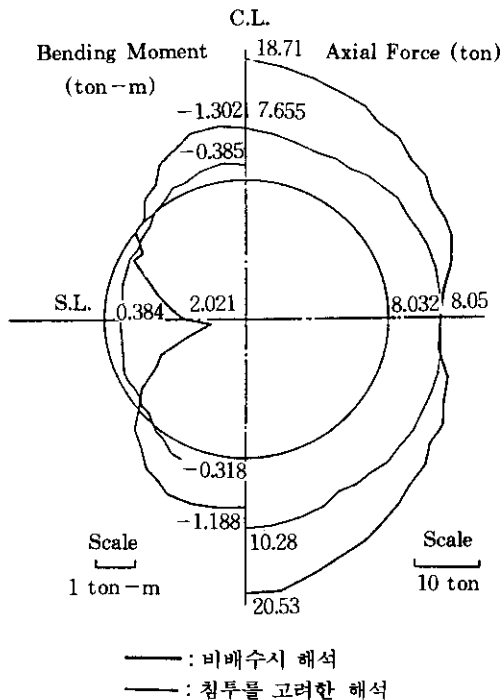


그림 6. 배수조건에 따른 라이닝의 축력 및 휨모멘트( $H_1=3D$ ,  $H_2=H_1$ 의 경우)

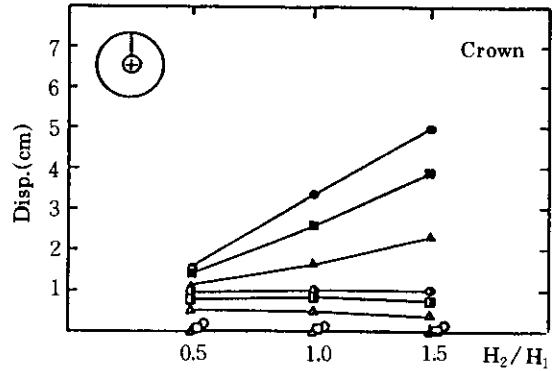


그림 7. 터널 천정부의 수직변위

#### 4. 지하수를 고려한 막장의 해석사례

터널 시공시 안정성에 가장 문제가 되는 부분은 터널 막장이며, 굴착에 따른 응력이완 및 막장에서의 용수에 의한 침투수압이 막장의 안정성을 좌우하는 중요한 요인이 된다. 본 장에서는 터널 주변의 3차원 지하수 흐름 상태를 수치해석을 통하여 예측하고 해석의 결과를 토대로 수압을 고려하지 않은 유효 응력개념 및 지하수의 침투를 고려한 경우에 대하여 막장의 안정성을 검토하고자 한다. 아울러 침투수압에 의한 막장에서의 응력 및 변위의 변화를 평면 변형률 조건(plane strain condition)으로 재현하여 검토하여 본다.

##### 4.1 지하수 흐름의 3차원 모델

###### 4.1.1 해석조건

지하수의 공급이 풍부한 하천 인접구간 등에서 배수공법에 의한 터널의 굴착이 이루어질 때, 터널은 거대한 수평배수구의 역할을 하게 되며 따라서 터널 주변은 정상류의 흐름이 발생하게 된다. 그림 1에 보인 바와 같이 터널 막장으로도 상당한 양의 지하수가 유입되며 터널 지보재와 마찬가지로 지하수의 흐름에 의한 침투력(seepage force)을 받는다. 본 절에서는 예



제단면을 통한 지하수 흐름의 3차원 해석을 수행하고, 터널 막장에 작용하는 침투압을 산출한다. 본 해석을 수행하기 위하여 포화상태의 정상류 흐름(saturated, steady state flow) 해석을 위한 유한요소해석 프로그램인 GW1 (Istok, 1989)을 사용하였으며 해석에 사용된 지하수 흐름의 3차원 해석요소망은 그림 8에 보인 바와 같다.

지반은 충적토로서 투수계수  $k=5 \times 10^{-3}$  cm/sec을 사용하였으며, 지하수위는 터널 Crown 으로부터 직경의 2배만큼 상부에 위치한 것으로 모델링하였다. 수치해석상 경계조건은 해석 경계부에서는 전수두(total head)를 적용하였

고, 굴착 경계면에서는 「전수두=위치수두(elevation head)」를 적용하였다.

#### 4.1.2 결과분석

앞 절에서 제시한 해석조건에 의한 해석결과는 그림 9에 보인 바와 같다. 해석결과 막장의 하단부에  $5 \text{ ton/m}^2$  정도로 가장 큰 침투력이 작용하는 것으로 나타났으며, 이로부터 막장의 하단부가 안정성에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 침투력의 계산시 막장으로부터 터널 직경의 1배정도를 고려하였으며 막장으로부터의 거리가 멀어질수록 동수경사는 급격한 감소를 보였다.

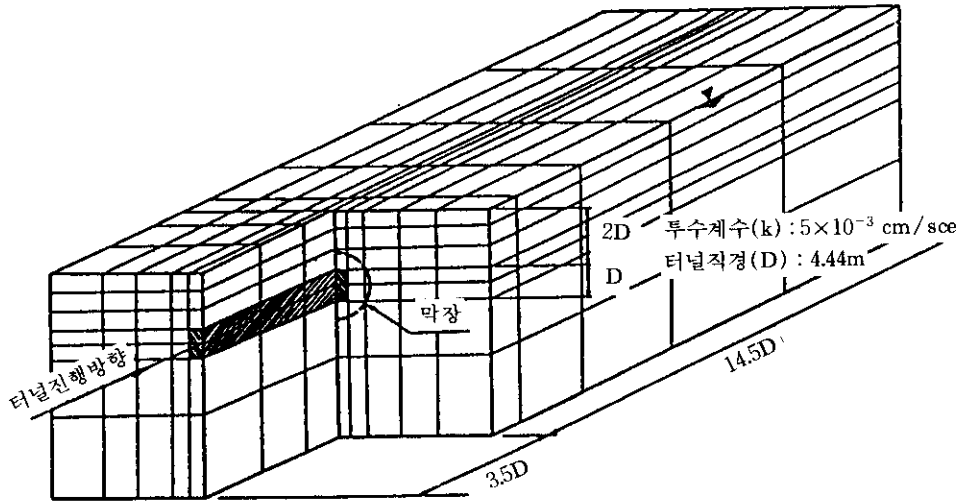


그림 8. 지하수 흐름의 3차원 해석요소망

## 4.2 배수조건별 막장의 안정성 검토

본 장에서는 상기 지하수 흐름의 3차원 해석 결과를 토대로 배수조건별 막장의 안정성을 검토하여 본다. 즉 지하수를 고려하지 않은 유효응력개념에 의한 검토와 지하수의 정상류 흐름시에 발생하는 침투를 고려한 검토를 수행한다. 해석단면은 4.1절에서 언급한 지하수 흐름의 3차원 모델에서 사용한 단면과 동일한 것으

로 하였으며 대상지반은 그림 10에 나타낸 바와 같다.

### 4.2.1 완전배수시 막장의 안정성 검토

지하수위가 터널 하부에 존재하거나 터널 상부에 존재하더라도 배수시설이 정상적으로 가동된다는 가정하에서 배수공법에 의한 터널 막장에 대한 안정성은 그림 2와 같이 지하수위를 고려하지 않은 유효응력 개념에 의해 검토하게 된다.

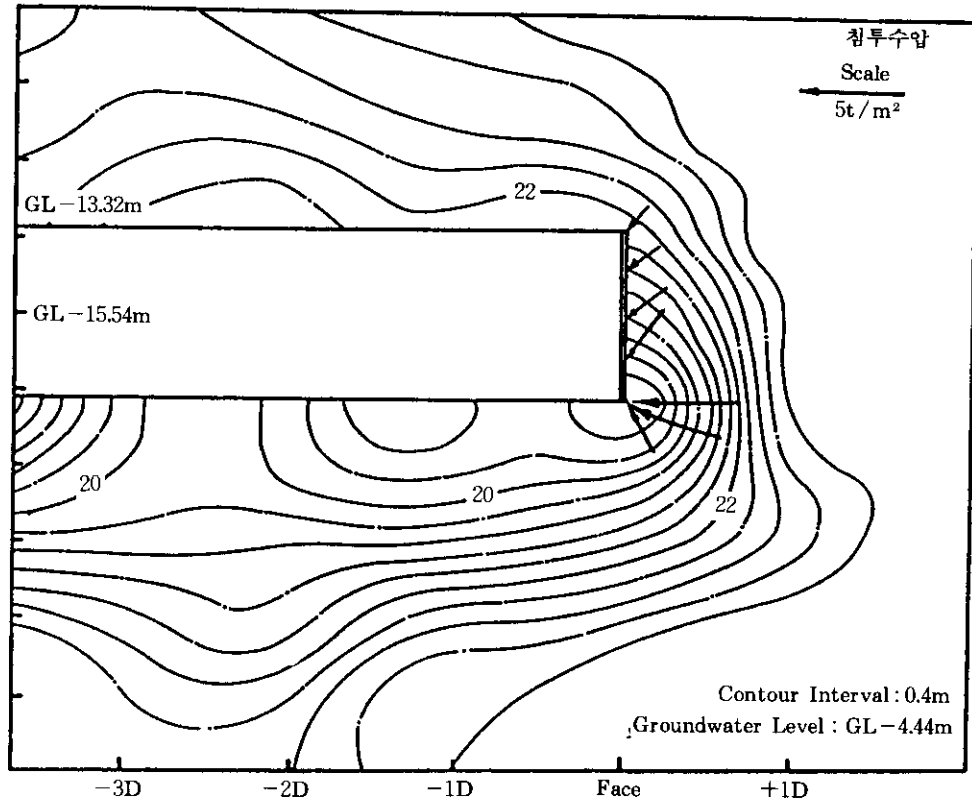


그림 9. 터널주변의 전수두 「=위치수두+압력수두」 분포

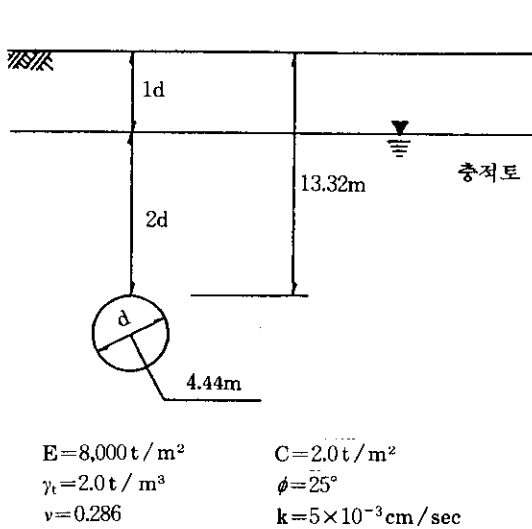


그림 10. 대상지반 단면

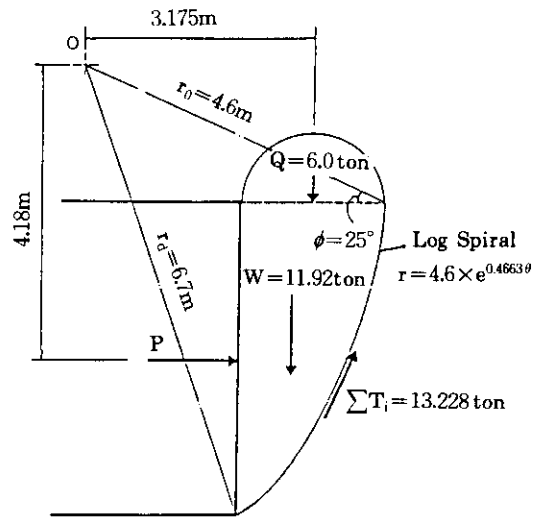


그림 11. 예제단면 해석결과(지하수 미고려시)

그림 11은 검토결과를 도시한 것이며, 여기서 Wedge 상부의 연직이완도압, Q는 이완영역의 높이를 Wedge 상부 쪽의 1.5배로 가정하여 계산하였다. 식 (1)~식 (3)을 이용하여 막장의 안정에 필요한 막장 전면에 대한 외부지지력은 다음과 같이 계산할 수 있다.

① 활동모멘트(driving moment)

- Wedge 상부의 이완영역 :  $6.0\text{ton} \times 3.175\text{m} = 19.05(\text{ton} \cdot \text{m})$
- Wedge 중량에 대해서 :  $11.92\text{ton} \times 2.9854\text{m} = 35.586(\text{ton} \cdot \text{m})$

② 저항모멘트(resisting moment)

- 전단저항력 :  $\sum_{i=1}^n T_i l_i = 52.325(\text{ton} \cdot \text{m})$

O점에 대하여 모멘트의 평형조건을 적용시키면,

$$(P \times 4.18) + 52.325 - 19.05 - 35.586 = 0$$

$$\therefore P = 0.55(\text{ton})$$

상기 결과에서 알 수 있듯이 막장의 안정을 위한 막장 전면의 외부지지력은 약  $0.12\text{ton}/\text{m}^2$  정도가 필요함을 알 수 있다.

4.2.2 침투를 고려한 막장의 안정성 검토

지하수의 공급이 풍부하고 지하수위가 높게 위치한 경우 터널 경계부와 지하수위까지의 수두차에 의한 지하수의 침투력이 발생하며 본 절에서는 정상류 흐름에 의한 침투수압을 고려하여 막장의 안정성을 검토하였다. 계산에 적용한 침투수압은 4.1절에서 수행한 3차원 침투 해석의 결과치를 사용하였다. 그림 12는 예제 단면의 해석결과를 나타내고 있다.

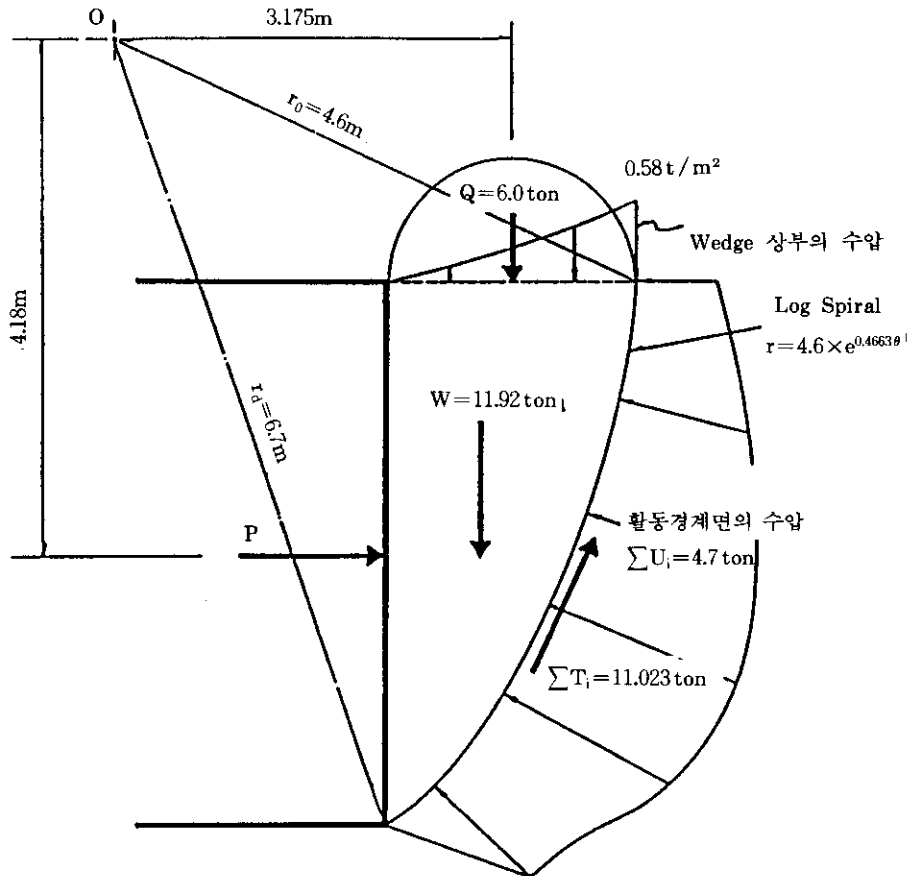


그림 12. 예제단면 해석결과(침투 고려시)

앞 절의 지하수를 고려하지 않은 해석의 경우와 달리 Wedge의 활동은 침투력의 발생과 전단저항의 감소에 의해 더욱 위험측이 된다. 막장의 안정에 필요한 막장 전면에 대한 외부 지지력은 식(4) 및 식(5)를 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

① 활동모멘트(driving moment)

- Wedge 상부의 이완영역 :  $6.0\text{ton} \times 3.175\text{m} = 19.05(\text{ton} \cdot \text{m})$
- Wedge 중량 :  $11.92\text{ton} \times 2.9854\text{m} = 35.586(\text{ton} \cdot \text{m})$
- 경계면의 수압 :  $4.7\text{ton} \times 2.391\text{m} = 11.24(\text{ton} \cdot \text{m})$

② 저항모멘트(resisting moment)

· 전단저항력 :  $\sum_{i=1}^n T_i l_i = 41.083(\text{ton} \cdot \text{m})$

0점에 대하여 모멘트의 평형조건을 적용시키면,

$$(P \times 4.18) + 41.083 - 19.05 - 35.586 - 11.24 = 0$$

$$\therefore P = 5.93(\text{ton})$$

상기 결과에서 알 수 있듯이 약 1.34 ton/m<sup>2</sup> 정도의 외부지지력이 필요하므로 막장은 별도의 외부지지 없이는 자립이 불가능함을 알 수 있으며, 앞절에서 수행한 지하수를 고려하지 않은 해석의 결과와 비교하여 보면 실제 지하수의 침투가 발생하는 경우 막장의 안정성은 상당히 위험측이 됨을 알 수 있다.

4.3 수치해석을 통한 막장의 안정성 검토

4.3.1 해석조건

앞에서 살펴본 바와 같이 지하수 조건에 따라 터널 막장은 그 안정성에 있어서 상당히 다른 결과를 보인다. 그러므로 터널 시공에 따른 막장의 안정대책을 결정함에 있어서 지하수의 신중한 고려가 있어야 한다. 본 절에서는 터널 막장의 2차원 모델링을 이용한 수치해석을 통하여 상기 결과를 확인하여 본다.

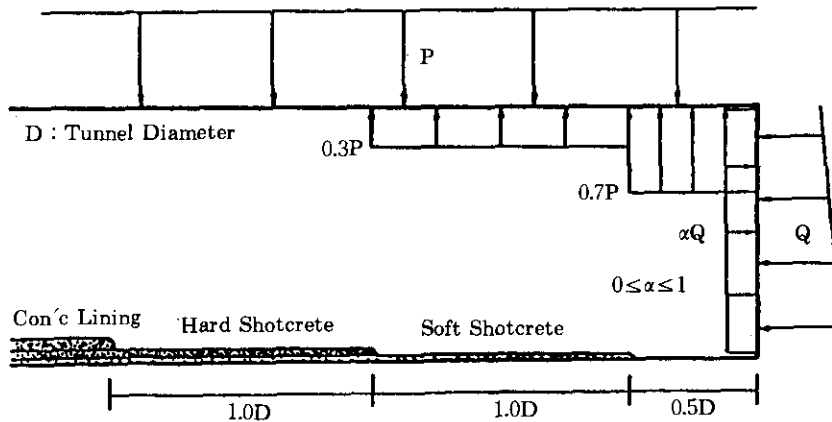


그림 13. 지보패턴 및 하중분담률의 모델링

본 해석의 수행을 위하여 두가지 가정이 수반되었다. 첫째, 지보 패턴은 그림 13에서와 같이 가정하였으며 둘째, 하중분담률은 굴착구간에서 30%, Soft Shotcrete 구간에서 70%, Hard Shotcrete 구간에서 100%로 가정하였

다. 침투를 고려한 해석조건은 해석경계부에서는 「유효응력+정수압」을 적용하고 터널굴착면에서는 수압이 0이며, 지중응력은 굴착면에서 지하수위까지의 수두차로 인한 「침투수압+유효응력」의 상태이다. 그러므로 해석 수행

시 해석경계부에는 정수압을 적용하였으며, 터널의 굴착경계면에는 경계조건으로 수압을 0으로 적용하여 해석경계부와 굴착경계면 사이의 수두차에 의한 침투를 발생시켰다. 본 해석에서는 앞서 사용한 바 있는 유한차분법을 이

용한 흙-구조물 해석프로그램인 'FLAC(ver. 3.22)'을 사용하였으며, 해석에 사용된 대상단면 및 지반상수는 4.2절과 동일한 것을 사용하였다. 그림14는 대상지반의 해석요소망 및 지반조건을 나타낸 것이다.

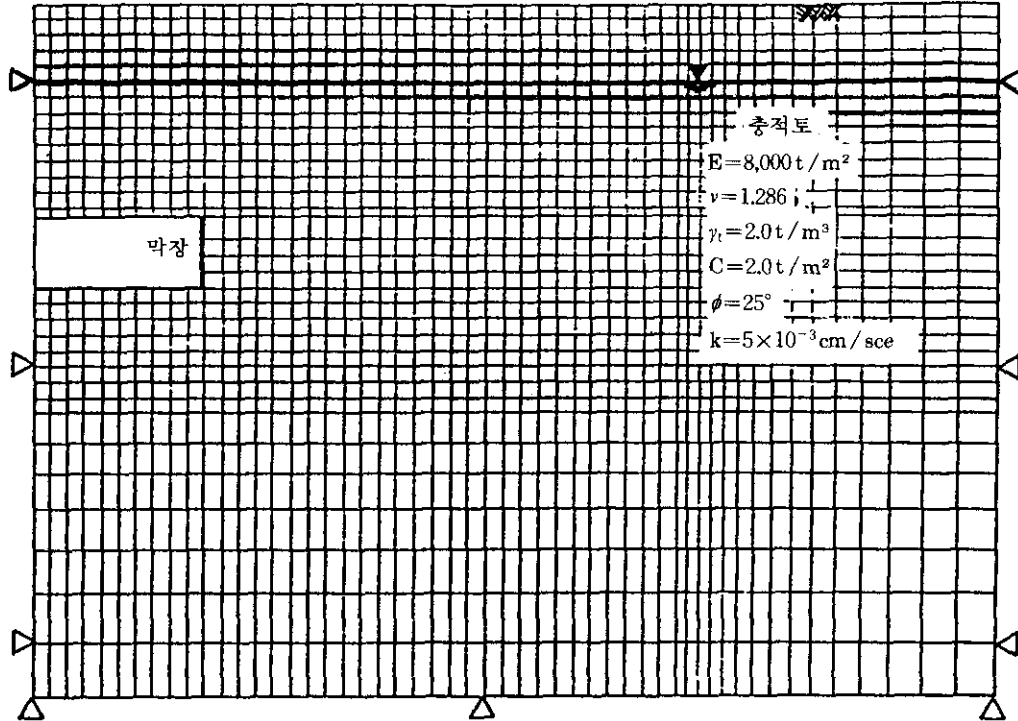


그림 14. 대상지반의 해석요소망

#### 4.3.2 결과분석

터널 막장에서 완전배수개념에 의한 유효응력해석 및 침투를 고려한 해석을 실시하였으며 터널 막장에 설치한 지보재 전면에 작용하는 평균응력과 변위를 검토하고 아울러 소성영역을 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의하여 검토하였다. 막장면에 설치한 Beam요소가 받는 평균응력을 Supporting Pressure,  $S_p$ 로 표시하며, 그때의 막장면의 최대변위를 검토한 결과를 그림 15에 나타내었다. 변위는 터널 내로의 변위를 (+)로 규정하였다.

상기 결과에서 알 수 있듯이 지하수 조건에

따라 막장에 작용하는 응력 및 변위는 큰 차이를 보인다. 막장면에 작용하는 횡방향 응력의 100%가 Mobilize될 경우, 침투력을 고려한 해석시의 막장면에 대한 Supporting Pressure 및 변위는 침투를 고려하지 않은 해석결과에 비해 2배 정도 큰 값을 보였다. 수압을 전혀 고려하지 않은 유효응력 해석에서는 막장의 파괴양상은 보이지 않았으며, 침투를 고려한 해석에 있어서 막장으로의 횡방향 응력의 30%가 Mobilize되었을 때, 최초로 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의한 파괴가 발생하였다.

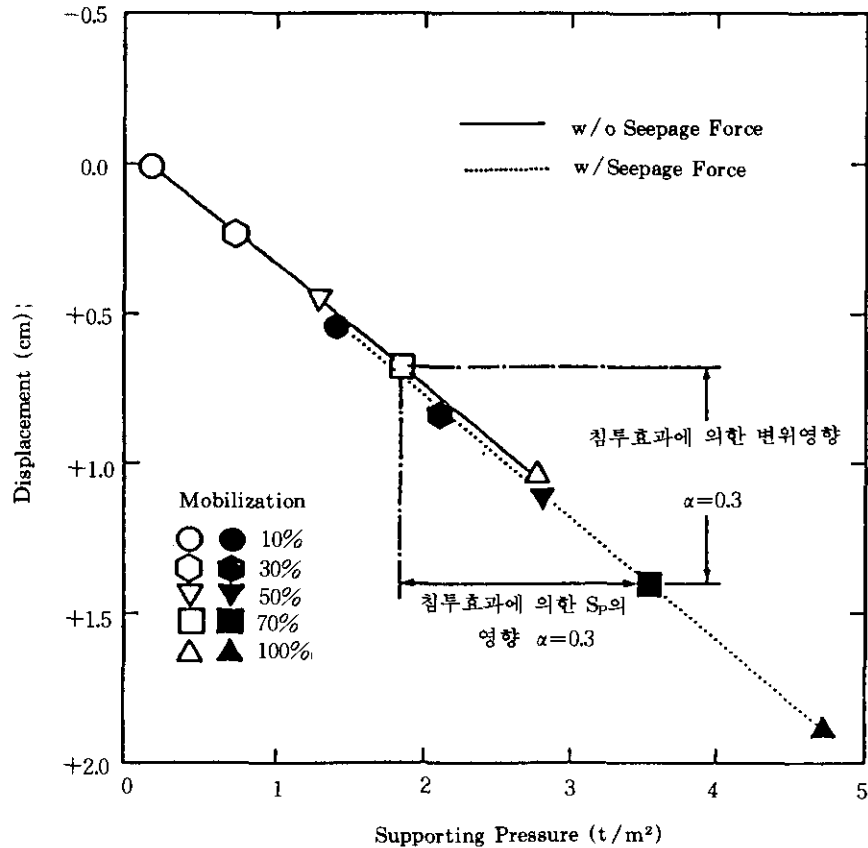


그림 15.  $S_p$ -Disp. 관계곡선

그림 16은 침투를 고려한 해석시의 Mohr - Coulomb 파괴규준에 의한 소성영역 및 등수두선을 나타내고 있다. 결과에서 알 수 있듯이 막장의 하단부에서 등수경사가 최대값을 보이며, 아울러 소성영역 또한 동일한 지점에서 발생하였다. 본 해석의 결과는 4.1절에서 수행한 지하수 흐름의 3차원 해석의 결과와도 일치하고 있다. 상기 결과에서 보인 바와 같이 터널 굴착에 따른 지하수위의 저하가 크지 않은 지하수가 풍부한 구간에서 터널 막장은 안정성 문제에 있어서 상당한 위험이 따를 수 있으며, 따라서 상기 조건에서 배수터널 시공시 침투력을 고려한 막장의 안정대책이 뒤따라야 할 것이다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 터널 라이닝의 설계시 지하수의 고려방안 및 지하수를 고려한 막장의 안정성 문제를 검토하였다. 이상에서 수행한 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 배수공법에 의한 터널의 설계시 하천 인접구간에서와 같이 지하수의 공급원이 충분하여 지하수위 저하가 크지 않은 곳에서는 침투력(seepage force)이 터널 외벽에 작용하므로 1차지보 System 또는 내부라이닝이 이 하중에 견딜 수 있도록 설계하여야 한다. 즉 지하수를 고려한 터널의 합리적인 설계를 위해서는 터널

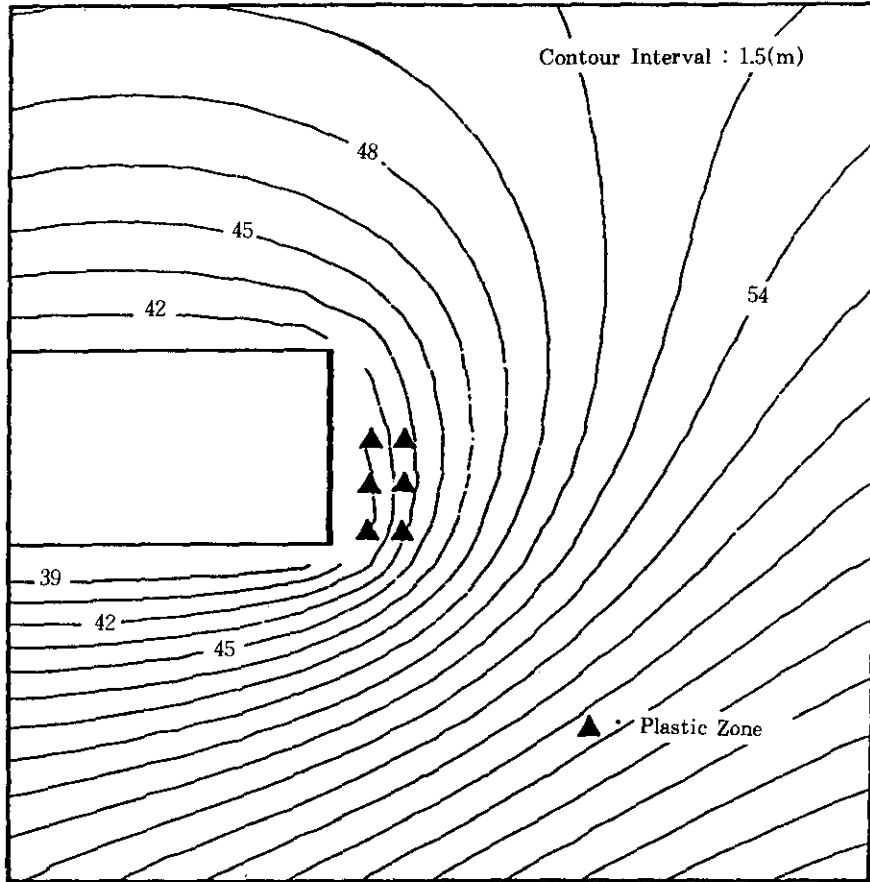


그림 16. 소성영역 및 등수두선(침투고려 해석시)

의 배수조건에 따라 타당한 지중응력상태를 해석에 반영하여야 한다.

2) 배수조건별 터널 라이닝에 작용하는 하중 및 변위를 검토하기 위한 유한요소해석의 결과, 침투를 고려한 해석에서 라이닝에 작용하는 축응력은 비배수조건에서의 결과에 비해 10~50% 정도가 작용하였으며, 수압을 고려하지 않은 기존의 배수개념에 비해 상당한 차이가 있음을 알 수 있다.

3) 터널 시공중 막장은 안정성에 있어서 가장 문제가 되는 부분이며 지하수의 정상류 흐름시 발생하는 침투수압이 막장의 안정성을 좌

우하는 중요한 원인이 된다. 막장에 대한 유한요소해석의 결과, 막장면에 침투수압이 발생하는 경우 막장면의 하단부에 가장 큰 침투력이 발생하였으며 소성영역도 동일한 부근에서 발생하였다. 그러므로 침투를 고려한 막장의 안정대책으로서 지지 Core 등에 의해 막장의 하단부를 보강하는 방법이 요구된다.

4) 예제단면을 통해 막장에 대한 안정성을 이론적으로 검토하여 본 결과, 지하수의 침투효과를 고려한 경우 막장면의 안정에 필요한 외부지지력은 지하수를 고려하지 않은 경우에 비해 10배 정도 크게 요구되었다. 즉 지하수를

고려하지 않은 경우 막장은 별도의 외부지지가 없어도 자립이 가능하지만 침투를 고려한 경우 막장의 안정에 대한 적절한 대책이 필요하게 된다. 막장면에 작용하는 응력 및 변위를 검토하기 위하여 수행한 유한요소해석의 결과, 지하수를 고려하지 않은 경우 막장면에 대한 횡방향 응력 및 변위는 지하수의 침투효과를 고려한 경우에 비해 50%정도로써 상기 막장의 안정성에 대한 이론적 검토의 결과와도 일치한다. 따라서 터널 시공시 지하수 조건을 충분히 고려한 합리적인 안정대책이 요구된다.

### 참 고 문 헌

1. 권인환(1991), NATM 터널공법, 원기술
2. 서울지하철 터널시공감리단(1992), 지하철 터널 설계와 시공자료집, 서울시 지하철 건설본부
3. 이인보 외(1993), '터널설계시 지하수의 고려방안 연구', 지반공학과 터널기술, 93년도 봄 학술 발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.1~8.
4. 임병조 외(1986), '최신토질역학상론', 학연사
5. Broms, B. B. et al.(1980), 'Stability of Clay at Vertical Openings', Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Div., ASCE, Vol.93, No.SM1, pp.71~95
6. Hoek, E. and Brown, E. T.(1980), 'Underground Excavations in Rock', Institution of Mining and Metallurgy, London
7. Itasca Consulting Group, Inc.(1991), FLAC Manual, Minnesota, U.S.A.
8. Pellet, F. et al.(1993), 'The Effect of Water Seepage Forces on the Face Stability of an Experimental Microtunnel', Canadian Geotechnical Journal, Vol.30, Number 2, pp.363~369.
9. Istok, J. D.(1989), 'Groundwater Modeling by the Finite Element Method', Water Resources Monograph : 13, U.S.A.

(접수일자 1993. 12. 15)