

# 침투력이 터널의 지반반응곡선에 미치는 영향

## The Effect of Seepage Forces on the Ground Reaction Curve of Tunnel

이 석 원<sup>1</sup> Lee, Seok-Won

정 종 원<sup>2</sup> Jung, Jong-Won

남 석 우<sup>3</sup> Nam, Seok-Woo

이 인 모<sup>4</sup> Lee, In-Mo

### Abstract

When a tunnel is excavated below groundwater table, the groundwater flows into the excavated wall of tunnel and seepage forces are acting on the tunnel wall. The ground reaction curve is defined as the relationship between internal pressure and radial displacement of tunnel wall. Therefore, the ground reaction curve is significantly affected by seepage forces. In this study, the theoretical solutions of ground reaction curves were derived for both the dry condition and the seepage forces. The theoretical solutions derived were validated by numerical analysis. The ground reaction curves with the support characteristic curve were also analyzed in various conditions of groundwater table. Finally, the theoretical solutions of the ground reaction curve derived in this study can be utilized easily to determine the appropriate time of support systems, the stiffness of support system and so forth for the reasonable design.

### 요 지

지하수위 아래에 터널이 굴착되면, 지하수가 터널내로 유입되면서 터널 단면에 침투력이 작용하게 된다. 지반반응곡선은 내압과 터널 내공단면의 변위 관계로 정의되기 때문에 이러한 침투력의 영향을 크게 받게 된다. 본 연구에서는 건조상태 및 침투력을 고려할 경우의 지반반응곡선의 이론식을 각각 유도하였다. 또한, 유도된 이론식은 수치해석을 통하여 검증되었다. 다양한 지하수위 조건에서의 지보재 설치를 고려하여 지보재특성곡선과 함께 지반반응곡선을 연구하였다. 결국, 본 연구에서 유도된 지반반응곡선의 이론식은 합리적인 설계를 위한 적절한 지보재 설치시기 및 지보재 강성 등을 결정하는데 이용될 수 있다.

**Keywords :** Convergence-confinement, Ground reaction curve, Internal pressure, Seepage forces

### 1. 서 론

내공변위-제어방법은 터널막장 부근에서 지보재 설치 후 발생하는 변위를 제어함으로써 터널의 안정을 도모하는 기본원리로 터널지보재의 작용원리이다. 내공변위-제어방법은 종단변형곡선, 지반반응곡선 및 지보재특성곡선의 3대 요소로 이루어진다. 종단변형곡선이

란 지보재가 전혀 없다고 가정하고 터널막장을 중심으로 터널종단방향으로 전후방에 대한 내공변위를 그린 것이고, 지보재특성곡선은 터널의 내공변위가 증가함에 따라 지보재에 작용하는 지보압의 증가양상을 보여주는 곡선이다. 마지막으로 지반반응곡선은 터널의 내압을 감소시켜갈 때 내공변위의 증가양상을 보여주는 곡선으로서, 터널 설계 시 지보재 설치시기 및 지보재

1 정희원, 건국대학교 사회환경시스템공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil and Envi. System Engrg., Konkuk Univ., swlee@konkuk.ac.kr)  
2 고려대학교 사회환경시스템공학부 (Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Univ.)  
3 정희원, Purdue University 박사후 과정 (Member, Post-doc., Purdue Univ.)  
4 정희원, 고려대학교 사회환경시스템공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Univ.)

의 강성 등을 결정하는데 중요하게 사용된다. Brown등(1983), Carranza-Torres와 Fairhurst(2000)의 연구들과 최근에는 Sharan(2003) 및 Oreste(2003)에 이르기까지 지반반응곡선에 대해 많은 이론적 연구가 이루어지고 있으나, 모두 건조상태의 지반에 터널이 굴착되는 경우에 대한 연구로서, 지하수가 존재하는 경우에 작용되는 침투력에 대해서는 고려되지 않았다. 실제로 터널 설계 및 시공 시 가장 어려운 부분 중의 하나가 바로 지하수 관련문제이며 지금까지 터널막장이나 지보재에 작용하는 침투력의 효과는 Schweiger등(1991)과 Lee와 Nam(2001)에 의하여 연구되었다.

본 연구에서는 상기 연구결과들에서 산출된 지반반응곡선의 이론식에 추가로 정상류 상태의 지하수 흐름에 대해 터널에 작용하게 되는 침투력(seepage force)을 고려하여 지반반응곡선의 이론식을 산출하고, 수치해석을 통하여 유도된 이론식의 유효함을 검증하였다. 또한 다양한 지반과 지하수 조건 그리고 지보재가 설치될 때의 지보재특성곡선을 고려한 지반반응곡선에 대하여 연구함으로써 침투력의 영향을 제시하였다.

## 2. 지하수가 없는 경우의 지반반응곡선 이론식

### 2.1 응력이론

본 연구에서는 지반반응곡선의 이론식을 구하기 위해 식 (1)과 같이 Mohr-Coulomb의 파괴기준을 사용하였다. 여기에서,  $\sigma_1$ 과  $\sigma_3$ 는 각각 최대 및 최소주응력,  $\sigma_c$ 는 일축압축강도, 그리고  $k$ 는 계수이다.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_c + k\sigma_3 \\ k &= \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \end{aligned} \quad (1)$$

터널을 굴착하면, 그림 1과 같이 굴착단면 주위에 소성 영역이 발생하고 소성 영역의 외부에 탄성영역이 존재한다. 소성영역 내에서의 반경방향 및 접선방향 응력은 소성평형 이론으로 구할 수 있는데, 축대칭 조건에서의 평형 방정식은 식 (2)와 같다. 또한, 탄성영역에서는 Kirsh의 해를 이용하여 식 (3) 및 (4)를 유도할 수 있다. 단, 본 연구에서는 초기수평응력계수,  $K_0=1$ 인 원형터널의 경우에 국한된 지반조건을 가정으로 탄소성이론을 전개하였다.

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{(1-k)\sigma_r - \sigma_c}{r} = 0 \quad (2)$$

$$\sigma_r = \sigma_{vo} - \left(\frac{a^2}{r^2}\right) [\sigma_{vo} - \sigma_{r(r=b)}] \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_{vo} + \left(\frac{a^2}{r^2}\right) [\sigma_{vo} - \sigma_{r(r=b)}] \quad (4)$$

여기에서,  $a$ 는 터널 반경,  $b$ 는 소성영역의 반경,  $\sigma_r$ 은 반경방향응력,  $\sigma_\theta$ 는 접선방향응력,  $\sigma_{vo}$ 는 연직방향의 초기 지중응력, 그리고  $\sigma_c$ 는 일축압축강도를 나타낸다.

그림 1에서  $r=b$ 는 탄성영역과 소성영역의 경계점으로, 탄성이론과 소성이론이 모두 만족해야 한다. 따라서 위 탄성 및 소성 영역에서의 식들을 정리하면, 소성영역까지의 반경  $b$ 를 구할 수 있는 평형 방정식 (5)를 구할 수 있다. 여기에서, 아래첨자  $res$ 는 잔류강도를 의미한다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{b}{a}\right)^\alpha &= \frac{\sigma_{vo}(1 - \sin\phi) - c \cot\phi + c_{res} \cot\phi_{res}}{p_i + c_{res} \cot\phi_{res}} \\ \alpha &= \left[ \frac{2\sin\phi_{res}}{1 - \sin\phi_{res}} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

### 2.2 변형이론

터널의 내공변위는 탄소성론에 입각하여 구할 수 있다. 소성영역에서의 변형율은 탄성변형율과 소성변형율을

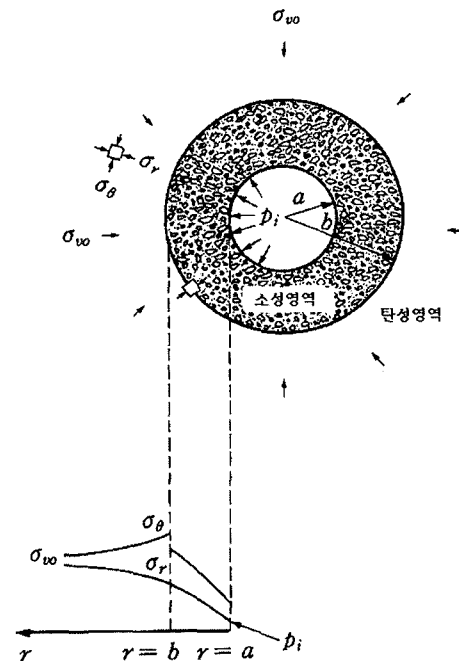


그림 1. 탄소성지반에서 터널주변의 응력분포

의 합으로써 식 (6)과 (7)처럼 표현되고, 축대칭조건에서 변형율과 반경방향 변위 사이에는 식 (8)과 (9)의 관계가 성립한다. 여기에서,  $\varepsilon_r$ 은 반경방향변형율,  $\varepsilon_\theta$ 는 접선방향변형율,  $u_r$ 은 반경방향변위 그리고 윗첨자  $e, p$ 는 각각 탄성과 소성을 의미한다.

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r^e + \varepsilon_r^p \quad (6)$$

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_\theta^e + \varepsilon_\theta^p \quad (7)$$

$$\varepsilon_r = \frac{du_r}{dr} \quad (8)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r} \quad (9)$$

### 2.2.1 비연합유동법칙

소성영역에서의 변형율은 소성유동법칙을 사용하여 표시하며, 소성변형율에서 체적 팽창 효과가 중요한 경우에는 비연합유동법칙을 사용하고, 그렇지 않은 경우는 연합유동법칙을 사용한다. 이 중, 비연합유동법칙을 이용한 소성포텐셜함수,  $Q$ 는 식 (10)과 같다. 식 (10)을 위의 변형률에 관한 식들을 사용하여 정리하면, 내공단면의 변위를 종속 변수로 하는 1차 상미분 방정식 (11)을 구할 수 있다. 여기에서,  $\psi$ 는 체적팽창각으로서  $\psi$ 가 커지면 파괴시에 체적팽창이 커지며,  $\psi=0$ 는 체적팽창이 발생하지 않는 즉, 전단변형만이 발생하는 경우를 의미한다.

$$Q = f(\sigma_r, \sigma_\theta) = \sigma_\theta - K_\psi \sigma_r - 2c\sqrt{K_\psi} = 0$$

$$K_\psi = \frac{1 + \sin\psi}{1 - \sin\psi} \quad (10)$$

$$\frac{du_r}{dr} + K_\psi \frac{u_r}{r} = \varepsilon_r^e + K_\psi \varepsilon_\theta^e = f(r) \quad (11)$$

식 (11)을 탄소성 경계영역( $r=b$ )에서의 경계조건인 식 (12)와 탄성론에 의한 변형률을 이용해 풀면, 터널 내공단면( $r=a$ )에서의 변위에 관한 식 (13)을 구할 수 있다. 여기에서,  $G$ 는 전단계수,  $p_i$ 는 터널 안쪽에서의 내압 그리고  $\mu$ 는 포아송비를 의미한다.

$$u_{r(r=b)} = \frac{b}{2G}(\sigma_{v0} - \sigma_{r(r=b)}) \quad (12)$$

$$u_{r(r=a)} = \frac{-1}{2G} a^{-K_\psi} [C(1-2\mu)(b^{K_\psi+1} - a^{K_\psi+1}) - D(b^{K_\psi-1} - a^{K_\psi-1})] + u_{r(r=b)} \left(\frac{b}{a}\right)^{K_\psi} \quad (13)$$

$$C = \frac{(\sigma_{r(r=b)} - \sigma_{v0})b^2 - (p_i - \sigma_{v0})a^2}{b^2 - a^2} \quad (14)$$

$$D = \frac{a^2 b^2 (p_i - \sigma_{r(r=b)})}{b^2 - a^2} \quad (15)$$

### 2.2.2 연합유동법칙

체적 팽창 효과가 중요하지 않은 경우에는 연합유동법칙을 사용한다. 연합유동법칙을 이용한 소성포텐셜함수,  $Q$ 는 식 (16)과 같다. 식 (16)을 위의 변형률에 관한 식들을 사용하여 정리하면, 내공단면의 변위를 종속 변수로 하는 1차 상미분 방정식 (17)을 구할 수 있다. 여기에서,  $\phi$ 는 내부마찰각을 의미한다.

$$Q = f(\sigma_r, \sigma_\theta) = \sigma_\theta - K_\phi \sigma_r - 2c\sqrt{K_\phi} = 0$$

$$K_\phi = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \quad (16)$$

$$\frac{du_r}{dr} + K_\phi \frac{u_r}{r} = \varepsilon_r^e + K_\phi \varepsilon_\theta^e = f(r) \quad (17)$$

식 (17)을 탄소성 경계영역( $r=b$ )에서의 경계조건인 식 (18)과 탄성론에 의한 변형률을 이용해 풀면, 터널 내공단면( $r=a$ )에서의 변위에 관한 식 (19)를 구할 수 있다.

$$u_{r(r=b)} = \frac{b}{2G}(\sigma_{v0} - \sigma_{r(r=b)}) \quad (18)$$

$$u_{r(r=a)} = \frac{-1}{2G} a^{-K_\phi} [C(1-2\mu)(b^{K_\phi+1} - a^{K_\phi+1}) - D(b^{K_\phi-1} - a^{K_\phi-1})] + u_{r(r=b)} \left(\frac{b}{a}\right)^{K_\phi} \quad (19)$$

$$C = \frac{(\sigma_{r(r=b)} - \sigma_{v0})b^2 - (p_i - \sigma_{v0})a^2}{b^2 - a^2} \quad (20)$$

$$D = \frac{a^2 b^2 (p_i - \sigma_{r(r=b)})}{b^2 - a^2} \quad (21)$$

지금까지 2장에서 제시된 응력이론 및 변형이론은 본 논문에서 새롭게 유도한 것이 아니고 기존에 이미 여러 문헌에서 탄소성이론을 이용하여 소개된 일반적인 관계식이다. 본 논문에서 새롭게 유도한 관계식은 다음 3장에 소개되듯이 2장의 이론을 기초로 하여 침투력을 고려한 관계식을 유도하기 때문에 2장의 이론을 우선 서술하였다.

## 3. 지하수가 있는 경우의 지반반응곡선 이론식

### 3.1 응력이론

침투력을 고려할 경우에 지반반응곡선의 이론식을 구

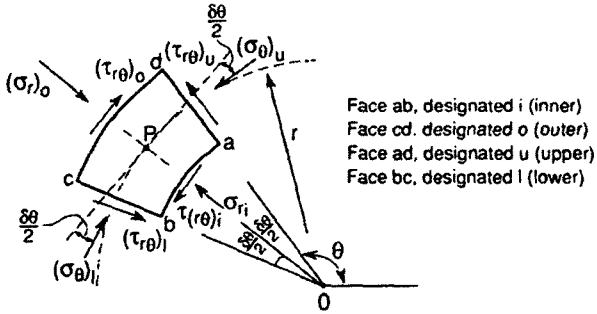


그림 2. 원형터널 주위의 입자에 작용하는 응력

하기 위해서 전술한 건조상태와 동일하게 Mohr-Coulomb의 파괴기준을 사용하였다. 지하수가 존재하는 경우에도, 터널을 굴착하면 그림 1과 같이 굴착 단면 주위에 소성 영역이 발생하고, 소성 영역의 외부에 탄성영역이 존재한다. 터널 굴착 시 소성영역내의 작은 입자에 작용하는 모든 응력들은 그림 2와 같이 나타나는데, 여기에 터널단면 방향으로 침투력을 고려하여 이를 정리하면 소성영역 내에서 축대칭 조건의 평형방정식인 식 (22)가 된다. 또한, 탄성영역과 소성영역의 경계점에서 Kirsh의 해에 터널 반경방향으로의 침투력을 고려하여 정리하면 식 (23)이 된다. 여기에서,  $i$ 는 동수경사,  $\sigma_c$ 는 암석의 일축압축강도를 나타낸다.

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{(1-k)\sigma_r - \sigma_c}{r} + izr_w = 0 \quad (22)$$

$$\sigma_{r(r=b)} = \sigma_{vo}(1 - \sin\phi) - c\cos\phi + izr_w \quad (23)$$

그림 1에서  $r=b$ 는 탄성영역과 소성영역의 경계점으로써, 이 점들에서는 탄성이론과 소성이론이 모두 만족해야 한다. 따라서 식 (22)와 (23)을 정리하여 소성영역까지의 반경  $b$ 를 구할 수 있는 식 (24)를 유도하였다.

$$\left(\frac{b}{a}\right)^\alpha = \frac{\sigma_{vo}(1 - \sin\phi) - c\cot\phi + c_{res}\cot\phi_{res} - izr_w b \left(\frac{1 - \sin\phi_{res}}{1 - 3\sin\phi_{res}}\right) + izr_w}{p_i + c_{res}\cot\phi_{res} - izr_w a \left(\frac{1 - \sin\phi_{res}}{1 - 3\sin\phi_{res}}\right)} \quad (24)$$

$$\alpha = \left[ \frac{2\sin\phi_{res}}{1 - \sin\phi_{res}} \right]$$

### 3.2 변형이론

전술한 건조상태의 터널과 마찬가지로 소성영역에서의 변형율은 탄성변형율과 소성변형율의 합으로써 식 (25)와 (26)처럼 표시되고, 축대칭조건에서 변형율과 반경방향 변위 사이에는 식 (27)과 (28)의 관계가 성

립한다.

$$\epsilon_r = \epsilon_r^e + \epsilon_r^p \quad (25)$$

$$\epsilon_\theta = \epsilon_\theta^e + \epsilon_\theta^p \quad (26)$$

$$\epsilon_r = \frac{du_r}{dr} \quad (27)$$

$$\epsilon_\theta = \frac{u_r}{r} \quad (28)$$

#### 3.2.1 비연합유동법칙

비연합유동법칙을 이용한 소성포텐셜함수,  $Q$ 는 식 (29)와 같다. 식 (29)를 변형률에 관한 식들을 사용하여 정리하면, 내공단면의 변위를 종속 변수로 하는 1차 상미분 방정식 (30)을 구할 수 있다.

$$Q = f(\sigma_r, \sigma_\theta) = \sigma_\theta - K_\psi \sigma_r - 2c\sqrt{K_\psi} = 0 \quad (29)$$

$$K_\psi = \frac{1 + \sin\psi}{1 - \sin\psi}$$

$$\frac{du_r}{dr} + K_\psi \frac{u_r}{r} = \epsilon_r^e + K_\psi \epsilon_\theta^e = f(r) \quad (30)$$

식 (30)을 탄소성 경계영역( $r=b$ )에서의 경계조건인 식 (31)과 탄성론에 의한 변형률을 이용해 풀면, 터널 내공단면( $r=a$ )에서의 변위에 관한 식 (32)를 구할 수 있다.

$$u_{r(r=b)} = \frac{b}{2G}(\sigma_{vo} - \sigma_{r(r=b)} + izr_w) \quad (31)$$

$$u_{r(r=a)} = \frac{-1}{2G} a^{-K_\psi} [C(1 - 2\mu)(b^{K_\psi+1} - a^{K_\psi+1}) - D(b^{K_\psi-1} - a^{K_\psi-1})] + u_{r(r=b)} \left(\frac{b}{a}\right)^{K_\psi} \quad (32)$$

식 (32)는 지하수가 없는 경우에 해당하는 식 (13)과 형태상 동일하나, 식 (32)의 마지막 항에 속한  $U_{r(r=b)}$ 를 식 (31)과 같이 침투력에 해당하는  $izr_w$ 가 고려된 값으로 산정하여야 하는데 그 차이점이 있다.

#### 3.2.2 연합유동법칙

연합유동법칙을 이용한 소성포텐셜함수는 식 (33)과 같다. 식 (33)을 변형률에 관한 식들을 가지고 정리하면 내공단면의 변위를 종속 변수로 하는 1차 상미분 방정식 (34)를 구할 수 있다.

$$Q = f(\sigma_r, \sigma_\theta) = \sigma_\theta - K_\phi \sigma_r - \sigma_c = 0 \quad (33)$$

$$K_\phi = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}$$

$$\frac{du_r}{dr} + K_\phi \frac{u_r}{r} = \varepsilon_r^e + K_\phi \varepsilon_\theta^e = f(r) \quad (34)$$

식 (34)를 탄소성 경계영역에서의 경계조건인 식 (35)와 탄성론에 의한 변형률을 이용해 풀면, 터널 내공단면 ( $r=a$ )에서의 변위에 관한 식 (36)을 구할 수 있다.

$$u_{r(r=b)} = \frac{b}{2G}(\sigma_{r0} - \sigma_{r(r=b)} + izr_w) \quad (35)$$

$$u_{r(r=a)} = \frac{-1}{2G} a^{-K_\phi} [C(1-2\mu)(b^{K_\phi+1} - a^{K_\phi+1}) - D(b^{K_\phi-1} - a^{K_\phi-1})] + u_{r(r=b)} \left(\frac{b}{a}\right)^{K_\phi} \quad (36)$$

앞의 서술과 같이 식 (36)은 지하수가 없는 경우에 해당하는 식 (19)와 형태상 동일하나, 식 (32)의 마지막 항에 속한  $U_{r(r=b)}$ 를 식 (35)와 같이 침투력에 해당하는  $izr_w$ 가 고려된 값으로 산정하여야 하는데 그 차이점이 있다.

#### 4. 지반반응곡선 산정

##### 4.1 수치해석에 의한 지반반응곡선 산정

본 절에서는 앞 절에서 언급한 지반반응곡선의 이론식과 수치해석에 의해 지반반응곡선을 각각 구하여, 이를

상호 비교 검토함으로써 유도된 이론식의 타당함을 검증하였다. 본 해석에 사용한 프로그램은 'PENTAGON 2D'로서 2차원 연속체로 이루어진 구조물이나 지반의 거동을 유한요소법에 의하여 해석하는 프로그램이며, 지하수 해석 및 이를 역학적 계산과 병행할 수 있는 연계 해석이 가능하다. 역학적 계산 시 지반의 구성모델은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였으며, 소성영역 내에서의 소성변형율을 구하기 위하여 이론식 및 수치해석에 동일한 연합유동법칙을 사용하였다. 해석대상지반은 풍화토 지반으로서 다음의 표 1에서 보인 바와 같은 물성을 갖는다.

해석대상 터널은 직경(D) 5.0m의 원형터널로 하고, 표 2 및 3과 같이 터널 천단부에서 지표면까지의 거리

표 1. 해석대상지반의 물성치

지반종류	단위중량 (tf/m <sup>3</sup> )	점착력 (tf/m <sup>2</sup> )	마찰각 (degree)	탄성계수 (tf/m <sup>2</sup> )	포아송비
풍화토	1.550	1.0	35.0	5,000	0.30

표 2. 건조상태에서의 해석 조건

지반종류	C/D		
	2.0	3.0	4.0
건조상태	Case 1	Case 2	Case 3

표 3. 침투력을 고려할 경우의 해석 조건

지반종류		H/D					
		1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
C/D	2.0	Case 11	Case 12	Case 13	Case 14	Case 15	Case 16
	3.0	Case 21	Case 22	Case 23	Case 24	Case 25	Case 26
	4.0	Case 31	Case 32	Case 33	Case 34	Case 35	Case 36

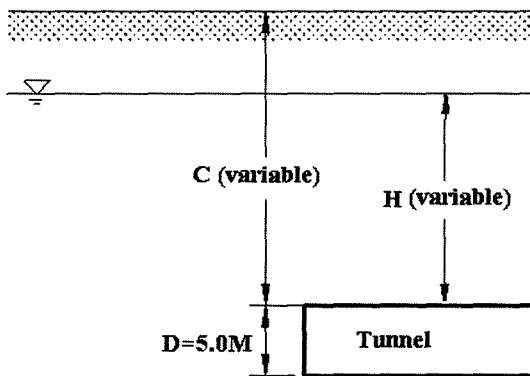


그림 3. 지반반응곡선 산정을 위한 해석대상지반

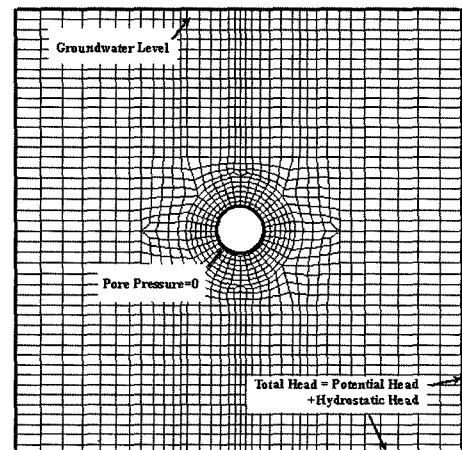


그림 4. 수치해석을 위한 유한요소망

(C)와 지하수위(H)를 변화시키면서 지반반응곡선을 구하였다. 해석대상지반은 그림 3에서 보인 바와 같고, 그림 4는 본 연구에서 적용시킨 경계조건을 나타낸다. 침투류 해석을 수행하기 위하여 외부경계영역에 굴착 전 초기상태에서의 전수두를 적용시켰고, 굴착 후 터널 단면에 압력수두를 영으로 하여 위치수두만을 적용시켰다. 또한, 터널 굴착 시 작용하는 내압을 하중분배율을 적용시켜 10단계로 조절하여 각 단계에서의 변위를 구한 뒤, 이 값을 이용하여 지반반응곡선을 산정하였다.

## 4.2 이론식에 의한 지반반응곡선 산정

### 4.2.1 이론식에 의한 지반반응곡선 산정 절차

이론식에 의한 지반반응곡선은 3절에서 유도한 식들을 이용해서 구할 수 있는데 일반적인 절차는 다음과 같다.

- i) 내압을 가정한다.
- ii) 터널 단면에 작용하는 침투력을 산정한다.
- iii) 굴착 시 발생하는 소성영역을 계산한다.
- iv) 터널 단면에서의 내공변위를 계산한다.
- v) 내압-내공변위 그래프 상에 이점을 표시한다.
- vi) 새로운 내압에 대하여 위 과정을 반복한다.

### 4.2.2 침투력의 계산

3절에서 유도한 이론식을 사용하여 침투력을 고려한 지반반응곡선을 구하기 위해서는 침투력의 계산이 먼저 이루어져야 한다. 일반적으로 터널을 굴착하면 소성영역이 발생하나, 침투력이 작용함에도 불구하고 소성영역이 발생하지 않는 경우, 소성영역에 의한 침투력의 계산은 불가능하다. 따라서 침투력을 구하기 위해서는 응력 및 터널막장의 예상과괴면과 같은 침투력 산정을 위한 영역을 별도로 결정해야 한다. 다음의 식 (37)은 Darcy의 법칙이다.

$$v = ki \quad (37)$$

여기에서,  $v$ 는 유속,  $k$ 는 투수계수,  $i$ 는 동수경사를 의미한다. 위 식에서 유속과 동수경사는 비례관계를 나타내고 있는데, 동수경사가 '1'보다 작은 경우는 유속이 투수계수보다 작아 지하수의 흐름이 큰 저항없이 흐를 수 있음을 의미하고, 반대의 경우는 유속이 투수계수보다 크기 때문에 흙의 저항력이 크게 작용하여 누적된 힘이 유효응력으로 전이되어 터널에 작용하게 된다. 따라서 본 영역내의 추가응력을 터널 구조체에 영향을 미

치는 침투력으로 보는 것이 바람직하다.

유한요소 해석을 통하여 수압분포를 산출하면, 터널 굴착면 방향으로 수압이 증가하다가 급격히 감소하는 영역이 생기는데, 이 영역은 터널로 흐르는 유속이 크게 증가하는 영역임을 의미한다. 또한 이 경우 동수경사를 확인해 본 결과 유속이 급격히 증가하는 부분, 즉 수압이 급격히 감소하는 부분이 동수경사가 '1'보다 커지는 영역임을 확인하였다. 즉, 위에서 구한 영역이 지하수의 흐름이 급격히 증가하여 유속이 투수계수보다 크기 때문에 터널 구조물에 영향을 미치는 침투력으로 작용하게 됨을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 위의 영역을 침투력 산정을 위한 영역으로 설정하여, 전수두 분포를 이용하여 터널에 작용하는 침투력을 산정하였다.

본 연구에서 사용된 프로그램은 'SEEP/W(1999)'로서 포화 및 불포화된 지반에 대한 정상류 및 부정류 흐름방정식을 유한요소법에 의하여 계산하는 프로그램이다. 해석의 경계조건은 앞의 해석조건과 동일하게 적용시켰다. 해석결과에 의한 그림 5, 6, 7 및 8은 각각 터널 주변에서의 유속, 동수경사, 수압 그리고 전수두 분포를

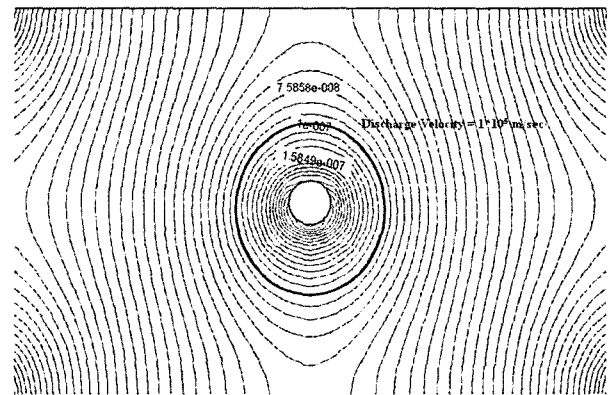


그림 5. 터널에서의 유속 분포(C/D=4, H/D=4)

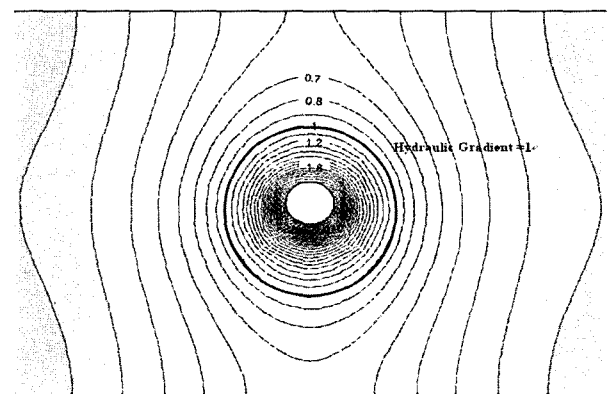


그림 6. 터널에서의 동수경사 분포(C/D=4, H/D=4)

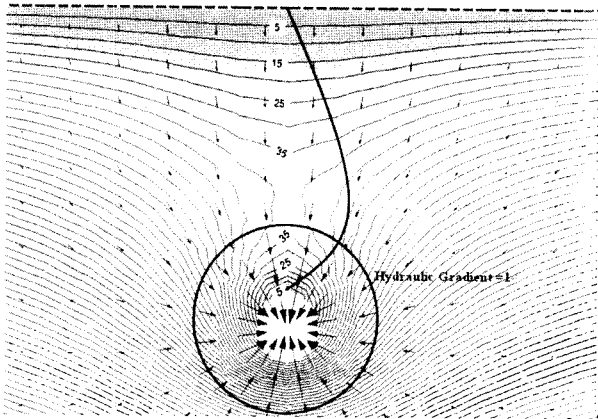


그림 7. 터널에서의 수압 분포(C/D=4, H/D=4)

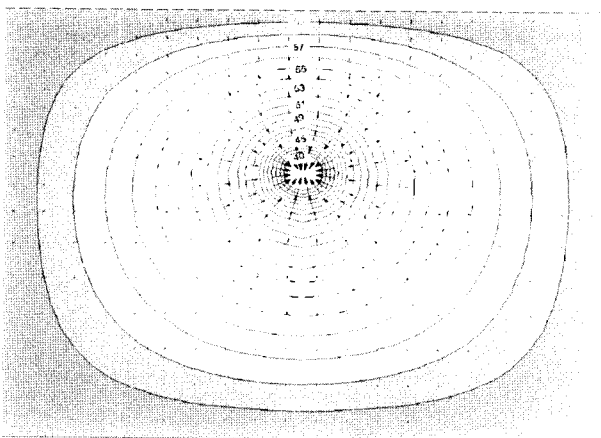


그림 8. 터널에서의 전수두 분포(C/D=4, H/D=4)

나타낸다. 그림 5, 6 및 7로부터 유속이 투수계수보다 커지는 영역과 동수경사가 '1'보다 커지는 영역이 일치하고, 수압이 증가하다가 급격히 저하되는 영역이 지하수 흐름이 급격히 커지는 영역임을 확인할 수 있다. 따라서 그림 5, 6 및 7로부터 침투력 산정을 위한 영역을 구한 뒤, 그림 8의 전수두 분포를 이용하여 침투력을 산정하였다.

그림 9와 그림 10은 지하수위를 변화시켜가면서 구한 침투력 산정을 위한 영역 및 터널에 작용하는 침투력을 각각 나타낸다. 그림 9는 C/D=4인 경우에 H/D(터널 천단에서 지하수위까지의 비)의 변화에 따른 터널 천단으로부터 수압분포의 변화를 나타내고 있다. 전술한 방법과 같이 이러한 수압분포곡선이 같이 도시된 동수경사가 '1'인 직선과 만나는 점들이 각각의 H/D에서의 침투력 산정을 위한 경계선임을 알 수 있다. 그림 9와 그림 10으로부터 지하수위가 증가할수록 침투력 산정을 위한 영역 및 침투력이 커지고 있음을 확인할 수 있다.

그림 11은 터널에 작용하는 침투력을 굴착 전 초기

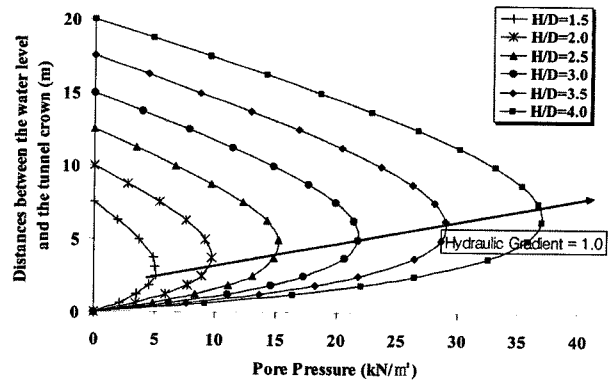


그림 9. 침투력 산정을 위한 영역(C/D=4)

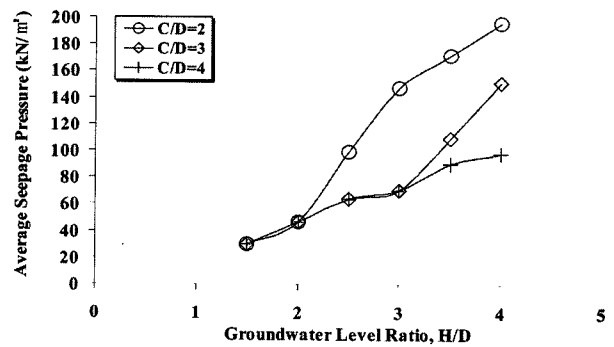


그림 10. 터널에 작용하는 침투력

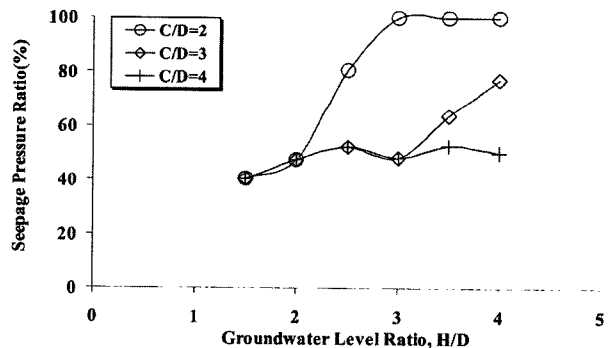


그림 11. 터널에 작용하는 침투압비

조건에서 터널천단의 수압으로 나누어서 규준화 시킨 침투압비를 나타내고 있다. 그 결과 지하수위가 지표면 이하에 존재할 경우 침투압비는 약 40-50%이내에서 유지되나, 그렇지 않은 경우 즉, 지하수위가 지표면보다 높이는 경우(예를 들어, C/D=2인 경우 H/D>2)는 지하수위 증가와 함께 침투압비(seepage pressure ratio)도 증가함을 알 수 있다.

#### 4.3 지반반응곡선 산정 결과

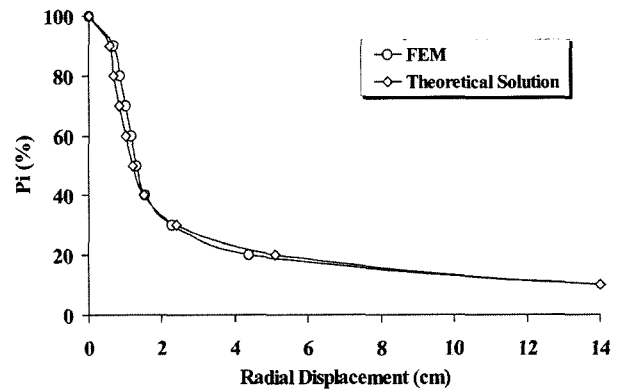
그림 12는 건조상태의 경우, 이론식과 수치해석에 의

한 지반반응곡선을 나타내고 있는데, 각각의 방법에 의하여 구해진 지반반응곡선이 서로 잘 일치하고 있다. 결국, 건조상태의 경우 Sharan(2003)이 제시한 지반반응곡선 이론식이 유효함을 확인할 수 있었으며, 따라서 본 연구에서 수행한 수치해석 모델링이 적절함을 알 수 있다. 그림 13은 연합유동법칙과 비연합유동법칙을 각각 사용하여 구한 지반반응곡선이며, 비연합유동법칙의 경우는 체적팽창각을 변화시켜가면서 구하였다. 그림 12와 그림 13은 터널의 천단부에서 산정된 지반반응곡선이다. 또한 그림 12의 이론식으로 구한 결과와 그림 13의 결과는 본 논문 2장에서 서술된 관계식들을 사용하여 산정되었다.

그 결과, 동일한 내압에서 체적팽창각이 커질수록 터널 단면에서의 내공 변위가 크게 발생함을 알 수 있다. 따라서 지반조건에 따라 연합 또는 비연합유동법칙의 사용 여부 및 비연합유동법칙의 경우 적절한 체적팽창각의 결정이 중요함을 확인하였다.

그림 14는 침투력을 고려한 경우의 이론식과 수치해석에 의한 지반반응곡선을 나타내고 있는데, 각 방법에

의한 지반반응곡선이 일치하고 있다. 따라서, 본 연구에서 유도된 침투력을 고려한 이론식이 유효함을 확인하였다. 그림 15는 지하수위 및 내압의 변화에 따른 소성영역의 변화로서, 동일한 내압에서 지하수위가 증가할수록 소성영역이 크게 발생하고 있다. 그림 16은 건조상태 및 지하수위를 변화시켜 가면서 구한 지반반응곡선을 나타낸다. 동일한 내압 조건에서 지하수가 존재하면 건조상태에 비해 변위가 크게 발생하고, 지하수위가 높



(a) C/D=4, H/D=1.5인 경우

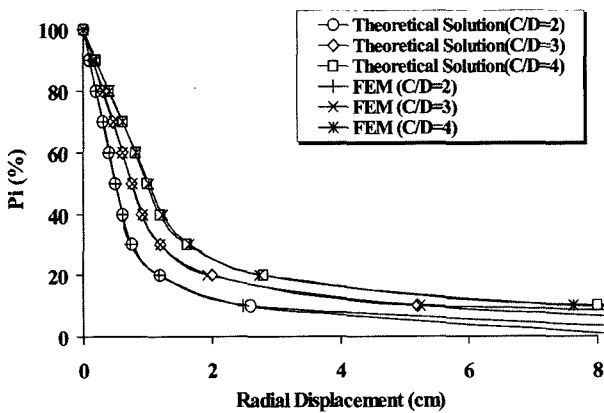
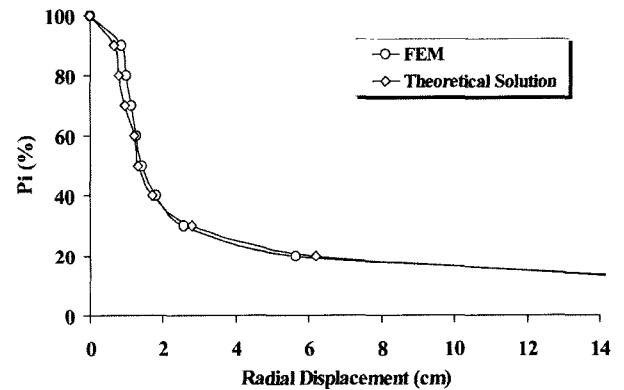


그림 12. 건조상태의 지반반응곡선 산정



(b) C/D=4, H/D=2인 경우

그림 14. 침투력을 고려한 지반반응곡선 산정

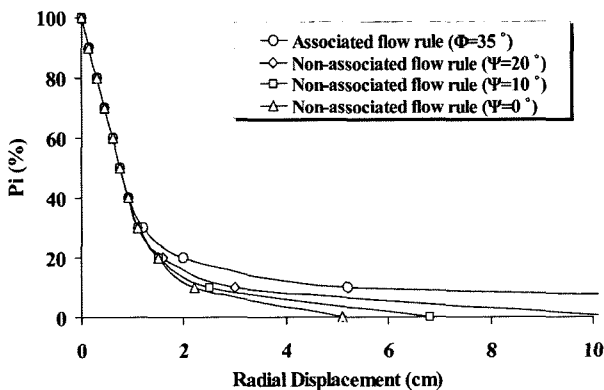


그림 13. 체적 팽창각 변화에 따른 지반반응곡선(C/D=3)

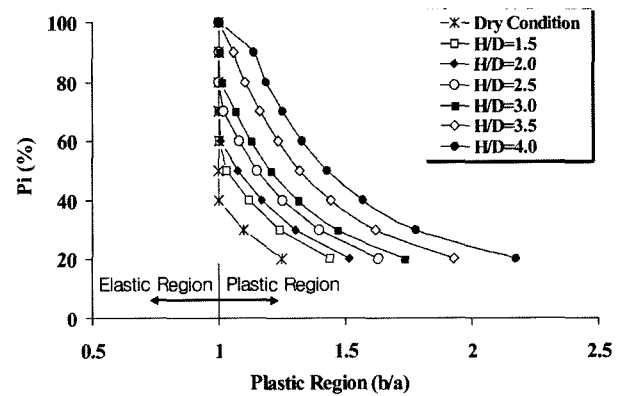


그림 15. 지하수위 변화에 따른 소성영역 변화(C/D=4)



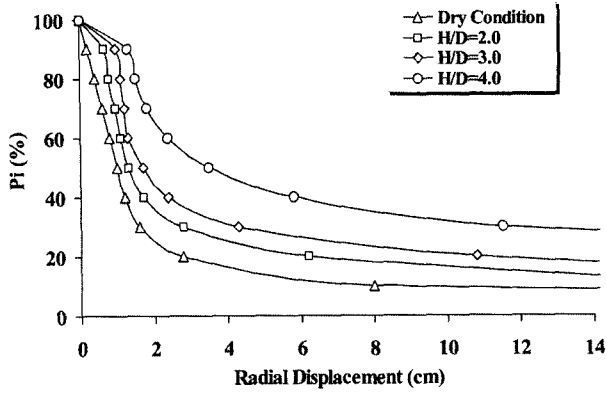


그림 16. 건조 및 침투력을 고려한 지반반응곡선(C/D=4)

을수록 그 정도는 더욱 커지고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 침투력이 소성파괴 및 터널의 내공단면 변위에 크게 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다.

## 5. 지보재가 설치된 경우의 지반반응곡선

### 5.1 종단변형곡선

지보재특성곡선을 산정하기 위해서는 지보재의 설치시기를 결정해야 하며, 이를 위해 먼저 종단변형곡선을 구해야 한다. 본 연구에서 사용한 프로그램은 'PENTAGON 3D'로서 본 프로그램은 3차원 연속체로 이루어진 구조물이나 지반의 거동을 유한요소법에 의하여 해석하는 프로그램이며, 지하수 해석 및 이를 역학적 계산과 병행할 수 있는 연계해석이 가능하다. 해석 결과, 지하수가 없는 경우 및 침투력을 고려할 경우의 종단변형곡선이 각각 그림 17 및 그림 18과 같다. 그림으로부터 침투력을 고려할 경우, 최종 변위뿐만 아니라 굴착 시 터널 단면에 발생된 변위가 건조상태에 비해 크게 발생 함을 알 수 있다. 각각의 최종변위 및 굴착 시 변위를 이용하여 지보재 설치시기를 결정한 뒤, 지반반응곡선에 지보재 설치 곡선을 그릴 수 있다.

본 논문의 주된 관심사는 3장에서 서술한 침투력을 고려한 지반반응곡선의 산정이며 이를 기존에 유도된 지하수가 없는 이론해와 비교하는데 있다. 그러나 터널이란 대상구조물에 본 연구에서 유도된 이론이 어떻게 적용되는지를 알아보려고 조건을 단순화하여 지보재가 설치된 경우의 지반반응곡선을 소개하고자 본 5장을 서술하였다. 또한, 시공중 지하수위 변화가 없는 경우는 숏크리트만을 모델링하였으며, 시공 중 지하수위 변화

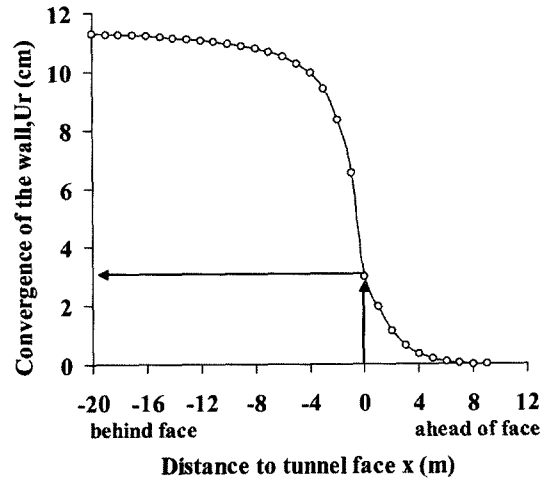


그림 17. 건조상태에서의 종단변형곡선(C/D=2)

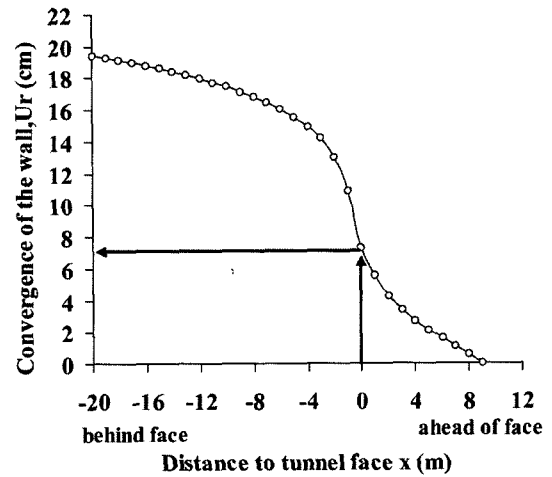


그림 18. 침투력을 고려한 종단변형곡선(C/D=2, H/D=2)

가 있는 경우 숏크리트와 콘크리트라이닝을 서술한 바와 같이 각각 다른 설치시기에 모델링하여 침투압으로 인한 콘크리트라이닝의 필요성을 알아보았다. 단, 숏크리트와 콘크리트라이닝의 물성치는 편의상 동일하게 하였다.

### 5.2 지보재의 특성

본 연구에서는 1차 지보재로서 숏크리트 라이닝을 사용하였고, 2차 지보재로서 터널의 굴착이 완료된 후 시공하는 콘크리트 라이닝을 사용하였다. 숏크리트와 콘크리트 라이닝은 동일한 물성치를 사용하였으며, 그 값은 표 4와 같다. 이때, 지보재의 강성( $k_s$ ) 및 최대지보압( $p_s^{max}$ )은 각각 식 (38)과 (39)를 사용하여 구하였다 (Carranza-Torres와 Fairhurst, 2000). 여기에서 지보재 강

표 4. 지보재의 물성치

종류	탄성계수( $E$ ) (tf/m <sup>2</sup> )	포아송비( $\mu$ )	두께( $t$ ) (m)	일축압축강도( $\sigma_c$ ) (tf/m <sup>2</sup> )
숏크리트 및 콘크리트 라이닝	1,500,000	0.2	0.15	2,030

성은 링(지보재)의 외부에  $p_s$ 의 압력이 작용할 때, 링이 안쪽으로 오그라드는 변위 즉, 내공변위를 탄성론으로 구한 것이다.  $E$ 는 탄성계수,  $\mu$ 는 포아송비,  $t$ 는 두께,  $a$ 는 터널의 반경 그리고  $\sigma_c$ 는 일축압축강도를 의미한다.

$$k_s = \frac{E}{a(1+\mu)} \frac{[a^2 - (a-t)^2]}{[(1-2\mu)a^2 + (a-t)^2]} \quad (38)$$

$$p_s^{\max} = \frac{1}{2} \sigma_c \left[ 1 - \frac{(a-t)^2}{a^2} \right] \quad (39)$$

### 5.3 해석 결과

#### 5.3.1 시공 중 지하수위 변화가 없는 경우

터널의 시공 중 지하수위가 일정하게 유지되는 경우, 터널내로의 정상류 흐름을 가정하면 시공 중 일정한 침투력이 터널에 지속적으로 작용하게 된다. 따라서 지반반응곡선은 침투력을 고려해서 구해야 한다. 이 경우 지보재를 설치하면, 그림 18의 종단변형곡선을 적용하여 지보재 설치 시기를 결정한 뒤 본 논문 3장에서 서술한 방법을 사용하여 그림 19와 같은 지반반응곡선을 그릴 수 있다. 동일한 지반의 건조상태에 지보재를 설치할 경우 그림 17의 종단변형곡선을 적용하여 그림 20과 같은 지반반응곡선을 그릴 수 있다. 본 연구는 터널심도가

10m인 천층 터널이므로, 초기지압에 비해 사용된 숏크리트의 강도가 매우 크기 때문에, 숏크리트의 강성 기울기는 급격하게 나타나고, 숏크리트를 시공하는 순간에 변위는 바로 수렴하게 된다. 건조상태의 경우, 숏크리트의 수렴 범위가 소성파괴가 일어나기 전이므로 터널의 안정성을 확인할 수 있으나, 침투력을 고려할 경우 터널 주변에 이미 소성 파괴가 크게 발생한 뒤이므로, 터널이 매우 불안한 상태이다. 따라서 이러한 경우는 굴착 전에 Grouting, Forepoling 또는 Pipe Roof 등의 보강공법이 필요하다.

#### 5.3.2 시공 중 지하수위 변화가 있는 경우

터널의 시공 중 터널내로의 지하수 유입량이 클 경우, 지하수위가 터널 바닥면 이하로 저하되었다가, 시공이 완료된 후 다시 원래의 지하수위로 복원될 수도 있다. 이 경우 시공 중에는 침투력을 고려할 필요가 없으나, 시공이 완료된 후에는 침투력을 고려해야 한다. 이와 같은 경우의 지반반응곡선은 그림 21과 같이 나타난다. 그림 21은 시공 중과 시공 완료 후의 단계로서 Phase 1과 Phase 2로 나뉘게 된다. Phase 1은 지하수위가 저하된 상태로 이때에 1차 지보재인 숏크리트는 그림 15의 건조상태의 종단변형곡선에 의해 설치시기가 결정된다.

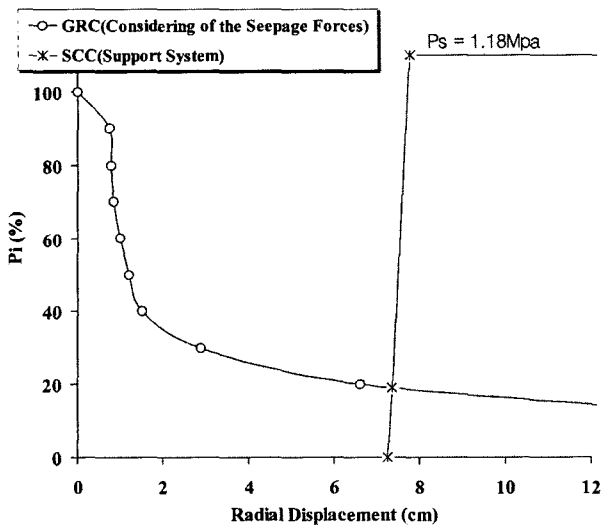


그림 19. 침투력이 작용할 때 지보재를 설치한 지반반응곡선(C/D=2, H/D=2)

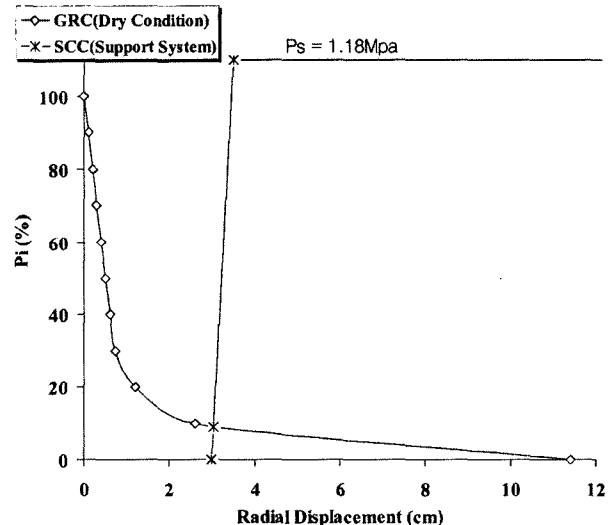


그림 20. 건조상태의 지보재를 설치한 지반반응곡선(C/D=2)

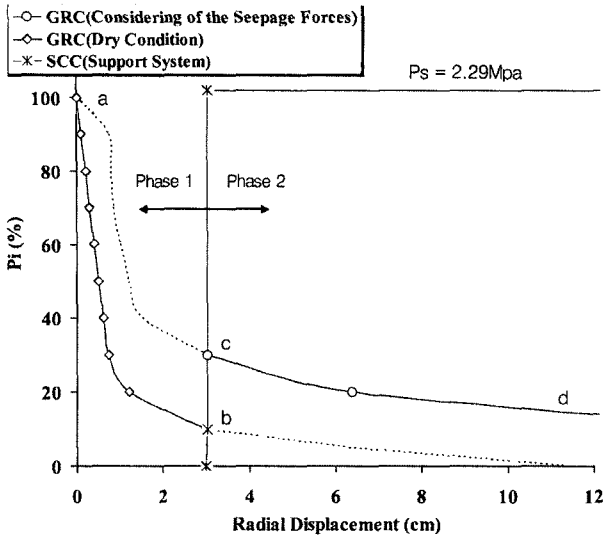


그림 21. 지하수위가 변화할 때의 지반반응곡선(C/D=2, H/D=2)

이 경우 지반반응곡선은 침투력을 고려하지 않은 상태로 곡선 ab를 나타내며, 변위는 슛크리트에 의해 b점에서 수렴하게 된다.

Phase 2는 시공이 완료된 후의 지반반응곡선으로 지하수위가 복원되었기 때문에 터널에는 침투력이 고려되어 그려져야 하며, 변위는 슛크리트 및 콘크리트의 합성 강성에 의해 c점에서 수렴하게 된다. 여기에서, 선분 bc는 슛크리트 뿐만 아니라 콘크리트 라이닝이 함께 거동하는 지보재 특성곡선이다. 따라서 전체적인 지반반응곡선은 abcd를 따르게 되며, 최종변위는 c점에서 수렴한다. 이 그림으로부터 콘크리트 라이닝이 슛크리트와 함께 침투력에 대해 거동하고 있음을 확인할 수 있다.

## 6. 결론

지하수위는 터널의 내공변위 및 소성영역의 발생에 큰 영향을 미칠 수 있다. 유효상재하중은 터널 굴착 시 아칭에 의해 저하되지만 침투력은 여전히 남아 있기 때문이다. 본 연구에서 얻어진 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 지반조건이 건조상태인 경우, 이론식과 유한요소 해석으로 구한 지반반응곡선이 잘 일치하였다. 따라서 이론식이 지반반응곡선을 산출하는데 있어 유효하며, 본 연구에서 제시한 수치해석 모델이 타당함을 알 수 있다.

(2) 침투력을 고려할 경우, 이론식과 유한요소 해석으로 구한 지반반응곡선이 잘 일치하였다. 따라서 본 연구에서 유도한 침투력을 고려한 이론식이 타당하여 지반반응곡선을 산출하는데 있어 유효함을 알 수 있다.

(3) 지하수 흐름은 터널의 내공변위 발생에 크게 영향을 준다. 유효상재압력은 터널 굴착 시 아칭에 의해 크게 감소하지만, 침투력은 여전히 남아있기 때문이다. 따라서 내압이 동일하고 침투력을 고려할 경우, 터널의 내공변위는 건조 상태의 지반조건보다 크게 발생한다.

(4) 침투력의 산정영역은 동수경사가 '1'보다 커서, 유속이 투수계수보다 큰 영역으로 정의할 수 있는데, 이는 터널 굴착 시 수압분포를 통해 수압이 급격히 저하하는 점과 일치한다. 이 영역에서 침투력을 구한 결과 지하수위가 지표면 이하에 존재할 경우 규준화된 침투압비는 약 40-50%정도이며, 지하수위가 지표면 이상일 경우는 급격히 침투압비가 증가한다.

(5) 터널 굴착 시 소성영역은 변위와 마찬가지로 내압이 감소함에 따라 일반적으로 증가한다. 또한 지하수위가 높을수록 침투력의 작용이 커서 소성영역도 크게 발생한다. 따라서 지하수의 존재는 터널의 안정성에 큰 영향을 준다는 것을 확인할 수 있다.

(6) 연합유동법칙을 사용할 경우 비연합유동법칙에 비해 터널의 내공변위가 크게 발생한다. 또한 체적팽창각이 커질수록 동일한 내압조건에서 터널의 내공변위가 크게 발생한다. 따라서 지반의 종류에 따라 어느 법칙을 사용할 지 그리고 체적팽창각의 값을 어떻게 산정할 지에 대한 결정은 중요함을 알 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 하는 2004년도 건설핵심기술연구개발사업, “공사핵심 기술 C 01”에 의하여 연구비가 지원된 연구로 이에 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Brown, E. T., Bray, J. W., Ladanyi, B., and Hoek, E. (1983), "Ground Response Curve for Rock Tunnels", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.109, No.1, pp.15-39.
2. Carranza-Torres, C., and Fairhurst, C. (2000), "Application of the Convergence-Confinement Method of Tunnel Design to Rock Masses That Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.15, No.2, pp.187-213.
3. Lee, I. M. and Nam, S. W. (2001), "The Study of Seepage Forces Acting on the Tunnel Lining and Tunnel Face in Shallow Tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.16, pp.31-40.
4. Oreste, P. P. (2003), "Analysis of Structural Interaction in Tunnels Using the Convergence-Confinement Approach", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.18, pp.347-363.
5. Schweiger, H. F., Pottler, R. K., and Steiner, H. (1991), "Effect of Seepage Forces on the Shotcrete Lining of a Large Undersea Cavern", *Computer Method and Advances in Geomechanics*, Beer, Booker and Carter(eds), pp.1503-1508.
6. Sharan, S. K. (2003), "Elastic-brittle-plastic Analysis of Circular Openings in Hoek-Brown Media", *International journal of Rock Mechanics and Mining Science*, Vol.40, pp.817-824.

(접수일자 2004. 10. 12, 심사완료일 2005. 4. 7)