

침투력을 고려한 터널의 지반반응곡선

신영진¹, 김병민², 신종호³, 이인모^{4*}

The ground reaction curve of underwater tunnels considering seepage forces

Young-Jin Shin, Byoung-Min Kim, Jong-Ho Shin, In-Mo Lee

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. Such seepage forces significantly affect the ground reaction curve which is defined as the relationship between internal pressure and radial displacement of tunnel wall. In this paper, seepage forces arising from the ground water flow into a tunnel were estimated quantitatively. Magnitude of seepage forces was decided based on hydraulic gradient distribution around tunnel. Using these results, the theoretical solutions of ground reaction curve with consideration of seepage forces under steady-state flow were derived. A no-support condition and a supported condition with grouted bolts and shotcrete lining were considered, respectively. The theoretical solution derived in this study was validated by numerical analysis. The changes in the ground reaction curve according to various cover depths and groundwater table conditions were investigated. Based on the results, the application limit of theoretical solutions was suggested.

Keywords: Seepage forces, ground reaction curve, theoretical solution

요 지 지하수위 아래에 터널이 굴착되면, 지하수가 터널내로 유입되면서 터널 단면에 침투력이 작용하게 된다. 이 침투력은 내압과 터널 내공단면의 변위 관계로 정의되는 지반반응곡선에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 터널내로의 지하수 흐름으로 발생하는 침투력을 정량적으로 평가하였다. 침투력은 터널 주위의 동수경사의 분포를 바탕으로 계산되었으며, 이 결과를 바탕으로, 정상류 흐름일 때 침투력을 고려한 지반반응곡선의 이론해를 유도하였다. 보강이 없는 경우와 전면 접착형 록볼트와 슛크리트 라이닝으로 보강된 경우의 변화가 고려되었다. 본 연구에서 유도된 이론해는 수치해석을 통해 검증되었으며, 다양한 토피고와 지하수위 조건에 따른 지반반응곡선의 변화가 연구되었다. 이를 바탕으로 이론해의 적용한계가 제시되었다.

주요어: 침투력, 지반반응곡선, 이론해

1. 서 론

지하수위 아래 터널이 굴착되면, 지하수는 터널 내로 유입되고, 침투력이 발생한다. 이러한 침투력은 터널의 거동에 큰 영향을 미치게 된다. 일반적으로 터널굴착으로 인한 지반의 거동은 이론적으로 내공변위-제어법을 통해 이해된다. 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. 종단변

형곡선이란 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 지보재의 강성등을 결정하는데 중요하게 사용된다. 지하수위 아래 터널 굴착으로 발생하는 침투력은 지반반응곡선에 큰 영향을 미칠 것으로 사료된다. Stille 등(1989), Wang(1994), Carranza-Torres와 Fairhurst(1999, 2000), Carranza-Torres(2002)의 연구들과 최근에는 Sharan(2003) 및 Oreste(2003)에 이르기까지 지반반응곡선에 대해 많은 이론적 연구가 이루어지고 있으나, 모두 건조상태의 지반에 터널이 굴착될 경우에 대한 연구로서, 지하수가 존재하는 경

¹Purdue 대학교 박사후 과정

²고려대학교 지하공간 건설기술 연구단 선임연구원

³건국대학교 토목공학과 교수

⁴고려대학교 건축사회환경공학과 교수

*교신저자: 이인모 (inmolee@korea.ac.kr)

우에 작용되는 침투력에 대해서는 고려되지 않았다. Muir Wood(1975), Curtis 등(1976), Atkinson & Mair(1983), Schweiger 등(1991), Fernandez와 Alveradez(1994), Fernandez(1994), Lee와 Nam(2001), Bobet(2003), Shin 등(2005)은 터널 막장과 지보재에 작용하는 침투력에 대한 연구를 수행하였으며, Lee 등(2007)은 침투력을 고려한 지반반응곡선에 대한 간략식을 제안하였으나, 수학적 정해를 제시하지는 못하였다.

본 연구에서는 선행 연구들을 기반으로 하여, 침투력에 대한 정량적인 평가가 이루어졌다. 또한, 정상류 조건 아래에서 침투력을 고려한 지반반응곡선의 이론해를 유도하였다. 이론해는 보강이 되지 않은 경우와 슛크리트와 전면 접착형 록볼트로 보강된 경우에 대해 유도되었다. 산출된 이론해는 수치해석을 통하여 유효함을 검증하였다. 또한 다양한 지반과 지하수 조건에 대한 지반반응곡선에 대하여 연구함으로써, 이론식의 적용한계를 제시하였다.

2. 침투력의 계산

2.1 침투력 산정 범위

지하수위 아래에서 터널내로 지하수가 유입될 때, 지반의 응력은 “유효응력 + 침투력”의 상태가 된다. 이런 경우 침투력(S.F., seepage force)은 지반 거동을 좌우하는 중요한 요소로서, 침투력의 정량적 평가가 터널 거동

에 큰 영향을 미치게 된다. 단위 부피당 침투력은 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$S.F./volume = \frac{iZ\gamma_w A}{ZA} = i\gamma_w \quad (1)$$

여기서 동수경사 i 는 전수두 차이 Δh 를 두 점간의 거리로 나눈 것이며, γ_w 는 지하수의 단위중량, A 는 면적, 그리고 Z 는 깊이를 뜻한다. 따라서 침투력은 두점간의 전수두 차이를 알고 있으면 쉽게 계산될 수 있다.

그림 1의 옹벽 구조물과 그림 2와 같은 터널 막장면의 경우에는, 파괴예상면으로부터 전수두 차이를 명확하게 구할 수 있으므로 침투력이 쉽게 계산 될 수 있다. 그러나, 터널의 경우는 조금 다르다. 지하수위 아래 터널 굴착으로 침투력이 생성되어도, 소성 영역이 발생하지 않거나 발생하더라도 일반적으로 크지 않기 때문에 앞서 제시된 방법으로 침투력을 정량적으로 평가하는 것은 무리가 있다. 그러므로 터널의 경우 침투력을 구하기 위해서는 합리적인 침투력 산정 범위를 결정하는 것이 중요하다.

정상류 조건아래에서 터널을 굴착하면, 지하수가 터널내로 유입되면서 그림 3과 같은 유선도를 형성한다. 모든 유선의 각 점에서는 접선 방향으로 지하수 흐름에 의해 발생하는 동수경사를 구할 수 있으며, 이 동수경사는 그림 4와 같이 터널의 반경 방향과 동수경사 사이의 사잇각, α 에 의해 반경 방향 동수경사, i_r 과 접선 방향 동수경사, i_θ 로 나눌 수 있다. 두 개의 성분중에 터널 내 공변위의 발생에 주로 영향을 미치는 것은 반경 방향

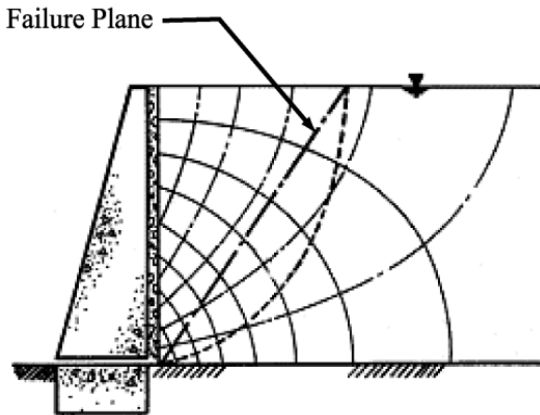


그림 1. 옹벽구조물의 파괴예상면

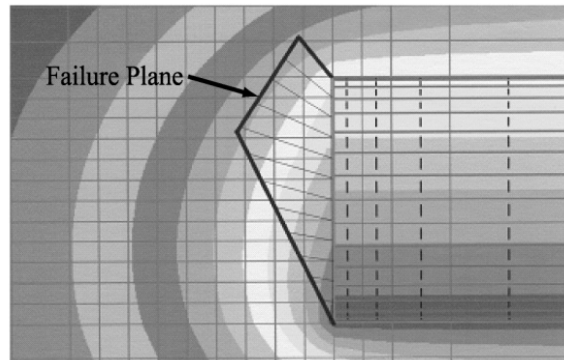


그림 2. 터널 막장면의 파괴예상면

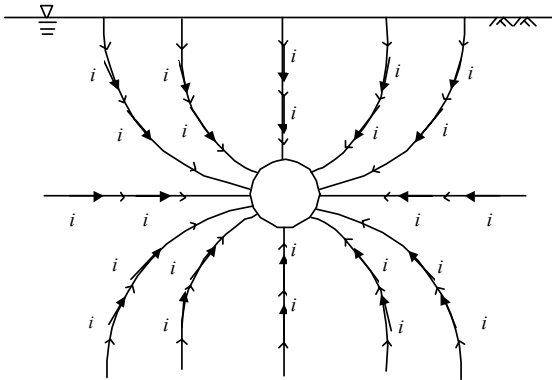


그림 3. 정상류 조건 아래에서 터널굴착에 의한 유선도

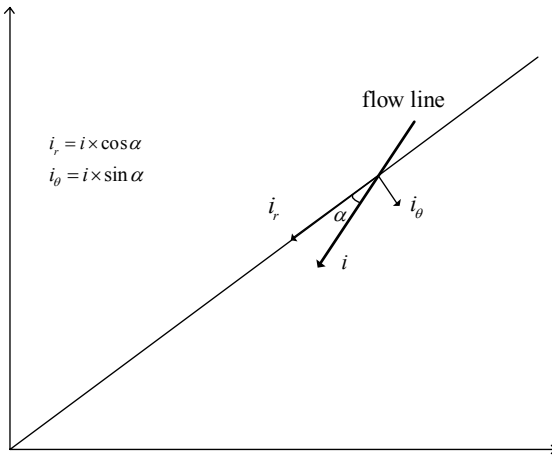


그림 4. 동수경사의 접선방향, 반경방향 성분

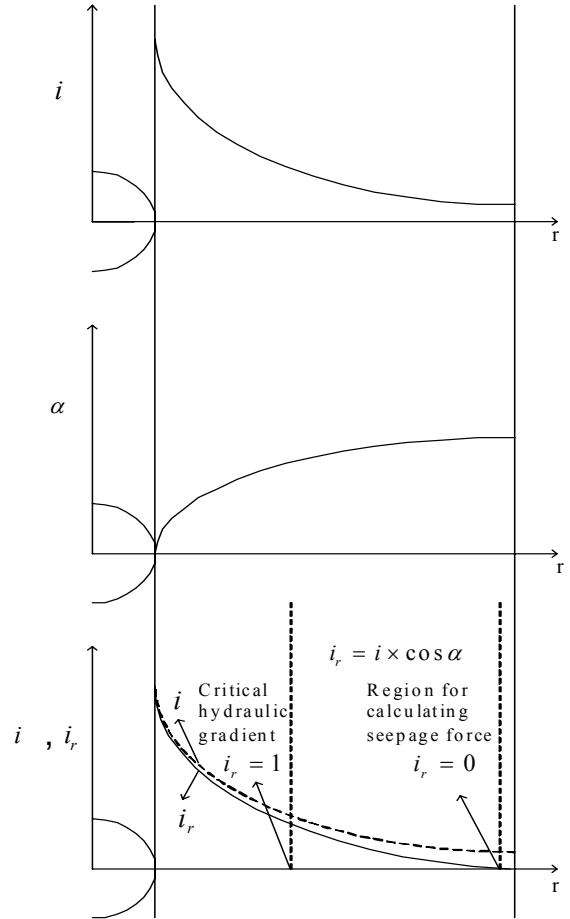


그림 5. 침투력 산정 범위

성분이다. 이런 이유로, 본 연구에서는 터널에 작용하는 지하수의 영향을 고려할 때, 동수경사의 반경 방향 성분 i_r 을 이용한다. 명확한 소성 파괴면이 존재하지 않는 터널의 경우, 터널 굴착으로 발생하는 모든 흐름이 지반 입자에 가해지는 침투력에 영향을 미친다고 판단하여 본 연구에서는 그림 5와 같이 동수경사의 반경 방향 성분이 0이 되는 지점을 침투력 산정 범위로 정의하였다. Lee 등(2007)은 한계동수경사, $i_r = 1$ 까지를 침투력 산정범위로 본 것에 반해, 본 연구에서는 $i_r = 0$ 까지 발생하는 모든 동수경사를 침투력 산정범위로 고려하였다.

2.2 침투력의 계산

Atkinson & Mair(1983)은 배수 조건에서 터널내로

유입되는 지하수 흐름에 의한 침투력 σ'_i 을 지하수 흐름에 의해 흡입자에 작용되는 견인작용에 의한 것으로 보고 식 (2)와 같이 나타내었다.

$$\frac{d\sigma'_i}{dS} = \gamma_w i \tag{2}$$

여기서, σ'_i 는 단위 체적당 침투력, i 는 동수경사, 그리고 S 는 거리를 나타낸다.

지하수가 방사방향으로만 흐르고 수위가 일정하다면 식 (2)는 다음과 같이 변할 수 있다. 물론, 적분 범위는 터널 단면부터 침투력 산정 범위까지이다.

$$\sigma'_i = \gamma_w \int i_r dr \tag{3}$$

여기서, i_r 은 반경 방향 동수경사이고 r 은 반경 방향 거리를 뜻한다.

지하수위와 지표고의 변화에 따른 침투력의 변화를 알아보기 위해 그림 6과 같이 터널 천단부터 지표까지의 거리, C 가 터널 직경, D 의 2.5배, 5배, 7.5배, 10배로 변하고 터널 천단부터 지하수위까지의 거리, H 가 또한 직경의 2.5배부터 10배까지 변하는 경우에 대해 매개 변수 해석을 실시하였다.

표 1에서 볼 수 있듯이, 침투력 산정 범위는 토피코고와 지하수위 조건에 따라 변하며, 이를 이용한 침투압은 표

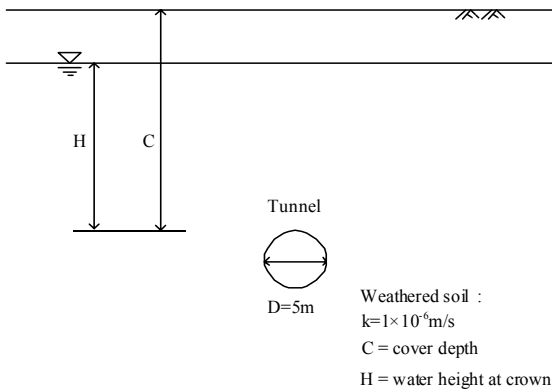


그림 6. 예제 원형 터널

표 1. 침투력 산정 범위

	침투력 산정 범위 (m)			
	C/D=2.5	C/D=5.0	C/D=7.5	C/D=10
H/D=2.5	12.5	12.5	12.5	12.5
H/D=5.0	12.5	25.0	25.0	25.0
H/D=7.5	12.5	25.0	37.5	37.5
H/D=10	12.5	25.0	37.5	50.0

표 2. 터널에 작용하는 침투압

	C/D=2.5		C/D=5.0		C/D=7.5		C/D=10	
	seepage pressure (kN/m ²)	seepage pressure ratio (%)	seepage pressure (kN/m ²)	seepage pressure ratio (%)	seepage pressure (kN/m ²)	seepage pressure ratio (%)	seepage pressure (kN/m ²)	seepage pressure ratio (%)
H/D=2.5	117.6	95.0	105.8	86.4	105.8	86.4	107.8	88.0
H/D=5.0	235.2	96.0	235.2	96.0	224.4	91.6	225.4	92.0
H/D=7.5	352.8	96.0	352.8	96.0	351.8	95.7	339.1	92.3
H/D=10	477.3	97.4	473.3	96.5	468.4	95.6	469.4	95.8

2에 나타나 있다. 표 2에 표시된 침투압비는 계산된 침투압을 터널 천단에서의 정수압으로 정규화 시킨 값이다. 그림 7은 터널부터 지표까지의 토피코고 일정할 때, 지하수위 변화에 따른 침투압의 변화를 보여주고 있다. 지하수위가 증가할수록 전수두 차이가 증가하므로 침투압이 증가하는 양상을 보여준다. 또한, 그림 8은 침투압을 해당 지반 조건에서 터널 천단에서의 정수압으로 정규화한 침투압비를 나타내는데, 지표가 지하수위 위에 있는 경우는 정수압의 85~95%의 값을 보여주고, 지표가 지하수위 아래에 있는 경우는 95%이상의 값을 보여준다.

선행연구자 들은 정량적인 침투압에 대하여 다음과 같이 평가하였다. Schweiger 등(1991)은 침투압이 정수압의 50~80%라고 하였으며, Lee와 Nam(2001)은 침투압을 정수압의 30~50%라고 평가하였다. 또한, Lee 등(2007)은 한계 동수경사를 사용하여 침투압을 정수압

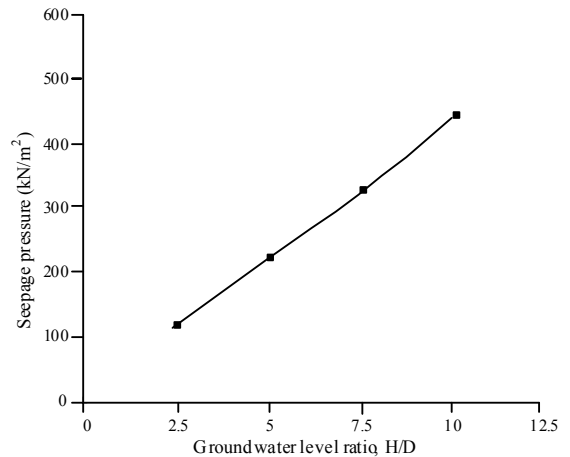


그림 7. 지하수위의 변화에 따른 침투압 (C/D=10)

의 50~80%라고 하였다. 이러한 차이는 해석 조건과 가정의 차이에 기인한 것이다. Schweiger 등(1991)의 경우는 터널 굴착시 발생하는 지반의 변위를 고려하였기 때문에 배수조건에의 침투압이 정수압보다 작게 나왔고, 수치 해석시에 일차 라이닝을 모사하여 응력의 이전효과가 적용되었다. 반면, Lee와 Nam(2001)은 일차 라이닝뿐 아니라 이차 라이닝과 라이닝 사이에 삽입되는 배수재까지 고려하여, 라이닝의 모델링에 의한 응력 이전과 배수재에 의한 쿠션효과등으로 상대적으로 Schweiger 등(1991)보다 작은 침투력을 보여주었다. 또한, Lee 등(2007)은 라

이닝과 배수재의 고려없이 한계동수경사의 정의만을 가지고 침투력을 계산하였다. 본 연구의 침투압은 선행 연구자들의 제안보다 큰 값을 보여주는데, 이는 침투력 산정 범위를 반경 방향 동수경사가 0인 지점으로 결정하였고 라이닝과 배수재를 모사하지 않았기 때문이다.

3. 침투력을 고려한 지반반응곡선의 이론식

3.1 응력에 대한 이론해

본 연구에서는 등방, 균질한 지반을 가정하였으며, 그림 9와 같이 Mohr-Coulomb 파괴 기준에 입각한 탄소성 모델을 적용하였다.

$$\sigma'_1 = k\sigma'_3 + (k-1)a \tag{4}$$

여기서, σ'_1 는 최대 주응력이며, σ'_3 는 최소 주응력이다. $k = \tan^2(45 + \phi/2)$ 이고 $a = c/\tan \phi$ 로써 k 와 a 는 Mohr-Coulomb 계수이며, c 는 점착력이고, ϕ 는 내부 마찰각이다.

그림 10은 원지반 응력, σ'_0 이 작용하고 있는 축압계수 $k_0 = 1$ 인 반경 r_0 의 원형 터널을 보여주고 있다. 터널 단면에는 터널 외부 방향으로 지보압, p_i 이 작용하고 있다. 그림 11과 같이 축 좌표계를 따르는 단위 두께의 미소 지반 입자 $abcd$ 의 응력 상태를 고려하면 반경 방향의 평형 방정식은 다음과 같이 정리될 수 있다.

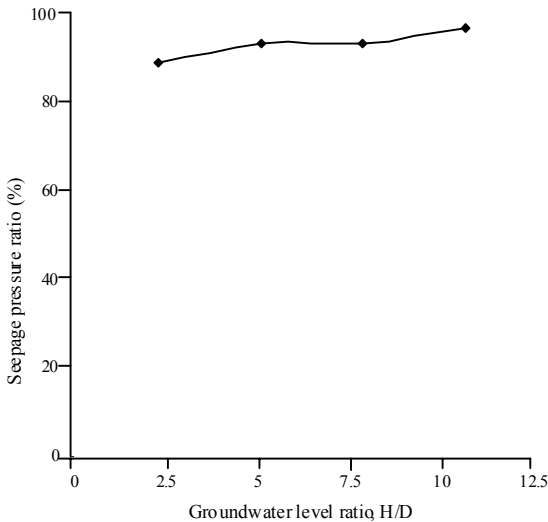


그림 8. 지하수위의 변화에 따른 침투압비 ($C/D = 10$)

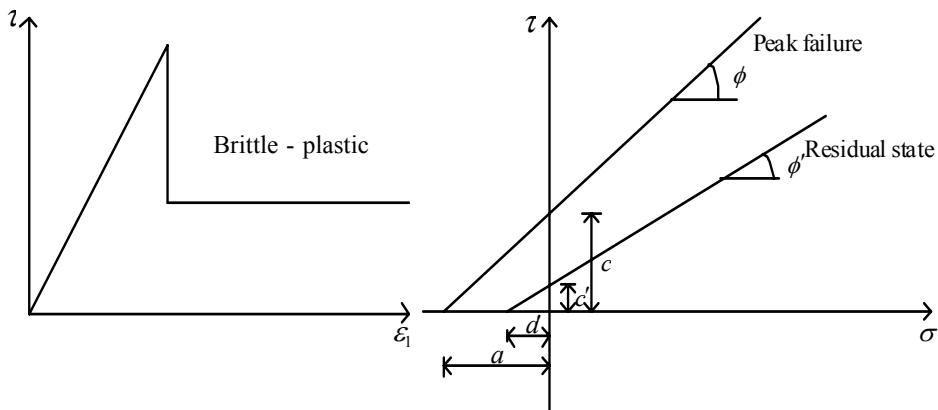


그림 9. Mohr-Coulomb 파괴 기준에 기초한 탄소성 모델

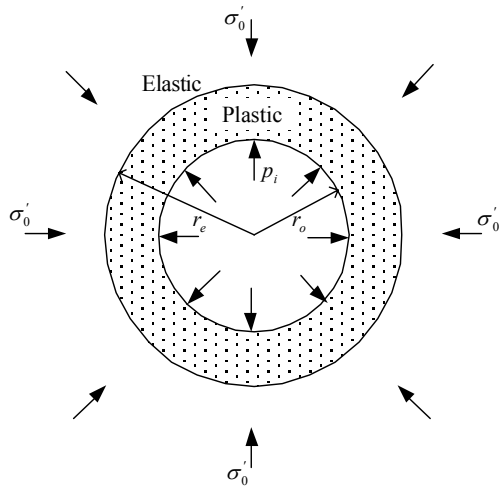


그림 10. 축압계수가 1인 원형 터널

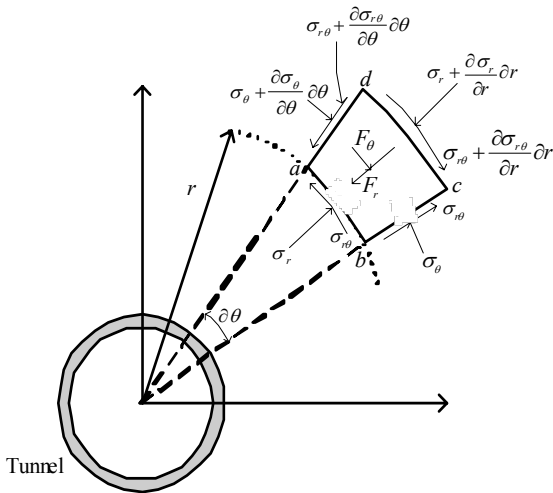


그림 11. 미소지반입자에 작용하는 응력

$$\begin{aligned}
 & \left(\sigma'_r + \frac{\partial \sigma'_r}{\partial r} \cdot dr \right) (r + dr) \partial \theta - \sigma'_r r \partial \theta - \left(\sigma'_\theta + \frac{\partial \sigma'_\theta}{\partial \theta} \cdot \partial \theta \right) dr \sin \frac{\partial \theta}{2} \\
 & - \sigma'_\theta dr \sin \frac{\partial \theta}{2} + \left(\sigma_{r\theta} + \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial \theta} \cdot \partial \theta \right) dr \cos \frac{\partial \theta}{2} - \sigma_{r\theta} dr \cos \frac{\partial \theta}{2} \\
 & + F_r r \partial r \partial \theta = 0
 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서, F_r 과 F_θ 는 각각 반경, 접선 방향의 물체력이다.

$\partial \theta$ 가 매우 작다면, $\sin(\partial \theta/2)$ 는 $\partial \theta/2$ 로 $\cos(\partial \theta/2)$ 는 1로 대체 가능하다. 고차원 항들을 추가적으로 정

리하고, 접선 방향에 대해서도 평형방정식을 정리한 후, 양 방향을 $r \partial r \partial \theta$ 으로 나누면 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{\partial \sigma'_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma'_r - \sigma'_\theta}{r} + F_r = 0 \tag{6}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \sigma'_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma'_{r\theta}}{\partial r} + \frac{2\sigma'_{r\theta}}{r} + F_\theta = 0 \tag{7}$$

지하수위 아래 터널이 굴착되어 터널이 일종의 배수구처럼 거동한다면, 그림 11의 물체력은 침투력이 된다.

$$F_r = i_r \gamma_w \tag{8}$$

$$F_\theta = i_\theta \gamma_w \tag{9}$$

이때, i_r 와 i_θ 는 각각 반경방향과 접선방향의 동수경사이며, γ_w 는 지하수의 단위중량을 뜻한다. 따라서 식 (6)과 (7)은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\frac{\partial \sigma'_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma'_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma'_r - \sigma'_\theta}{r} + i_r \gamma_w = 0 \tag{10}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \sigma'_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma'_{r\theta}}{\partial r} + \frac{2\sigma'_{r\theta}}{r} + i_\theta \gamma_w = 0 \tag{11}$$

추가적으로 그림 11과 같이 응력 분포가 축대칭이라면, 각, θ 변화에 따라 응력이 변하지 않는다. 즉, 반경 방향, r 만의 식으로 축소될 수 있다. 따라서 식 (10)은 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{d\sigma'_r}{dr} + \frac{\sigma'_r - \sigma'_\theta}{r} + i_r \gamma_w = 0 \tag{12}$$

소성 영역에서는 식 (4)는 다음과 같이 수정된다.

$$\sigma'_\theta = k_r \sigma'_r + (k_r - 1) a_r \tag{13}$$

여기서 $k_r = \tan^2(45 + \phi_r/2)$, $a_r = c_r / \tan \phi_r$ 이며, k_r 과 a_r 는 Mohr-Coulomb계수이고, c_r 는 소성영역에서의 점착력, ϕ_r 는 소성영역에서의 내부마찰각이다. 식 (12)에 식 (13)을 대입하면 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{d\sigma'_r}{dr} + \frac{1}{r} \{ (1-k_r)\sigma'_r + (1-k_r)a_r \} + i_r \gamma_w = 0 \quad (14)$$

경계조건 $r = r_0$ 에서 $\sigma'_r = p_i$ 를 대입하여 편미분 방정식을 풀면 소성영역에서의 반경, 접선방향 유효응력은 다음과 같이 정리된다.

$$\sigma'_{rp} = \left(\frac{r_0}{r} \right)^{1-k_r} (p_i + a_r) - a_r - \frac{\gamma_w}{r^{1-k_r}} \left[\int_{R_0}^r \xi^{1-k_r} i_r(\xi) d\xi - \int_{R_0}^{r_0} \xi^{1-k_r} i_r(\xi) d\xi \right] \quad (15)$$

$$\sigma'_{\theta p} = k_r \left(\frac{r_0}{r} \right)^{1-k_r} (p_i + a_r) - a_r - k_r \frac{\gamma_w}{r^{1-k_r}} \left[\int_{R_0}^r \xi^{1-k_r} i_r(\xi) d\xi - \int_{R_0}^{r_0} \xi^{1-k_r} i_r(\xi) d\xi \right] \quad (16)$$

여기서, p_i 는 원지반 응력과 침투력에 의해 발생하는 지보압을 뜻하며, 아래첨자 rp 와 θp 는 소성영역에서의 반경, 접선 방향을 뜻한다.

탄성 영역에서는 침투력을 고려한 유효응력을 구하기 위해 그림 12와 같이 중첩의 개념이 사용되었다. 그림 12에서 보듯이 침투력을 고려한 유효응력은 건조 상태의 평형방정식의 해와 침투력만을 고려한 평형방정식의 해를 합한 유효응력으로 가정하였다.

건조상태의 탄성영역에서의 반경, 접선방향 유효응력은 Kirsch solution에 의해 구할 수 있다(Timoshenko and Goodier, 1969). $r = r_0$ 와 $r = \infty$ 에서 각각 $\sigma'_r = p_i$ 와 $\sigma'_r = \sigma'_0$ 라는 경계조건을 대입하면 건조상태의 탄성영역에서의 반경, 접선방향 유효응력은 다음과

같다.

$$\sigma'_{rei(d)} = \sigma'_0 - (\sigma'_0) \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \quad (17)$$

$$\sigma'_{\theta ei(d)} = \sigma'_0 + (\sigma'_0) \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \quad (18)$$

이때 아래첨자 re 와 θe 는 탄성영역에서의 반경, 접선 방향을 뜻하고, d 는 건조상태, σ'_0 는 유효상재 하중을 나타낸다.

Stern(1965)은 물체력(침투력)만을 고려한 탄성영역에서의 유효응력을 다음과 같이 제시하였다.

$$\sigma'_{rei} = -\frac{C}{r^2} - \frac{A}{4} [2 \log(r) - 1] - \frac{B}{2} - \frac{1}{2(v-1)} I(r) - \frac{2v-1}{2(1-v)} J(r) \quad (19)$$

$$\sigma'_{\theta ei} = \frac{C}{r^2} - \frac{A}{4} [2 \log(r) + 1] - \frac{B}{2} - \frac{1}{2(v-1)} I(r) + \frac{2v-1}{2(1-v)} J(r) \quad (20)$$

여기서 $I(r) = \gamma_w \int_{R_0}^r i_r(\xi) d\xi$, $J(r) = \frac{\gamma_w}{r^2} \int_{R_0}^r \xi^2 i_r(\xi) d\xi$ 이며, C 와 A , 그리고 B 는 경계조건에 의해 정의되는 상수이다.

경계조건 $r = r_0$ 에서 $\sigma'_{rei} = 0$, $r = R_0$ 에서 $\sigma'_{rei} = 0$, 그리고 $r = R_0$ 에서 $\sigma'_{\theta ei} = 0$ 을 적용하면 식 (19)와 (20)은 다음과 같이 정리된다.

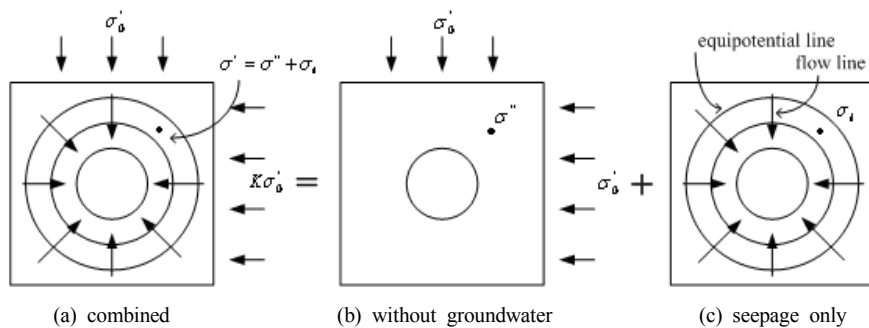


그림 12. 탄성 영역에 적용된 중첩 원리

$$\begin{aligned} \sigma'_{rei} = & \frac{-Z}{\frac{-1}{r_0^2} + \frac{2 \log R_0 - 2 \log r_0 + 1}{R_0^2}} \frac{1}{r^2} \\ & - \frac{Z}{\frac{-1}{r_0^2} + \frac{2 \log R_0 - 2 \log r_0 + 1}{R_0^2}} \frac{1}{R_0^2} [2 \log(r) - 1] \\ & + \frac{Z}{\frac{-1}{r_0^2} + \frac{2 \log R_0 - 2 \log r_0 + 1}{R_0^2}} \frac{2 \log R_0}{R_0^2} \\ & - \frac{1}{2(v-1)} I(r) - \frac{2v-1}{2(1-v)} J(r) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \sigma'_{oei} = & \frac{Z}{\frac{-1}{r_0^2} + \frac{2 \log R_0 - 2 \log r_0 + 1}{R_0^2}} \frac{1}{r^2} \\ & - \frac{Z}{\frac{-1}{r_0^2} + \frac{2 \log R_0 - 2 \log r_0 + 1}{R_0^2}} \frac{1}{R_0^2} [2 \log(r) + 1] \\ & + \frac{Z}{\frac{-1}{r_0^2} + \frac{2 \log R_0 - 2 \log r_0 + 1}{R_0^2}} \frac{2 \log R_0}{R_0^2} \\ & - \frac{1}{2(v-1)} I(r) + \frac{2v-1}{2(1-v)} J(r) \end{aligned} \quad (22)$$

여기서, $Z = \frac{1}{2(v-1)} \gamma_w \int_{r_0}^{r_0} i_r(\xi) d\xi + \frac{2v-1}{2(1-v)} \frac{\gamma_w}{r_0^2} \int_{r_0}^{r_0} \xi^2 i_r(\xi) d\xi$ 이며, 아래첨자 i 는 앞장과 같이 침투력과 관련된 용어임을 뜻한다.

결과적으로 탄성 영역에서 침투력을 고려한 반경, 접선 방향 응력은 식 (17), (18)과 식 (19), (20)의 중첩에 의해 다음과 같아진다.

$$\begin{aligned} \sigma'_{re} = & \frac{-Z}{\frac{-1}{r_0^2} + \frac{2 \log R_0 - 2 \log r_0 + 1}{R_0^2}} \frac{1}{r^2} \\ & - \frac{Z}{\frac{-1}{r_0^2} + \frac{2 \log R_0 - 2 \log r_0 + 1}{R_0^2}} \frac{1}{R_0^2} [2 \log(r) - 1] \\ & + \frac{Z}{\frac{-1}{r_0^2} + \frac{2 \log R_0 - 2 \log r_0 + 1}{R_0^2}} \frac{2 \log R_0}{R_0^2} - \frac{1}{2(v-1)} I(r) \\ & - \frac{2v-1}{2(1-v)} J(r) + \sigma'_0 - (\sigma'_0 - p_i) \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \sigma'_{oe} = & \frac{Z}{\frac{-1}{r_0^2} + \frac{2 \log R_0 - 2 \log r_0 + 1}{R_0^2}} \frac{1}{r^2} \\ & - \frac{Z}{\frac{-1}{r_0^2} + \frac{2 \log R_0 - 2 \log r_0 + 1}{R_0^2}} \frac{1}{R_0^2} [2 \log(r) + 1] \\ & + \frac{Z}{\frac{-1}{r_0^2} + \frac{2 \log R_0 - 2 \log r_0 + 1}{R_0^2}} \frac{2 \log R_0}{R_0^2} - \frac{1}{2(v-1)} I(r) \\ & + \frac{2v-1}{2(1-v)} J(r) + \sigma'_0 + (\sigma'_0 - p_i) \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \end{aligned} \quad (24)$$

식 (23)과 식 (24)와 탄소성 경계에서 Mohr-Coulomb 파괴기준을 종합하면 식 (25)와 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \sigma'_{\epsilon} = & \frac{1}{1+k} (2\sigma'_0) + \frac{1-k}{1+k} a + \frac{1}{1+k} \left(-A [\log(r_e)] \right. \\ & \left. - B - \frac{1}{(v-1)} I(r_e) \right) \end{aligned} \quad (25)$$

여기서, $A = \frac{Z}{\frac{-1}{r_0^2} + \frac{2 \log R_0 - 2 \log r_0 + 1}{R_0^2}} \frac{4}{R_0^2}$ 이며,

$B = \frac{-Z}{\frac{-1}{r_0^2} + \frac{2 \log R_0 - 2 \log r_0 + 1}{R_0^2}} \frac{4 \log R_0}{R_0^2}$ 이다.

터널을 굴착하면 그림 13에서와 같이 소성 영역이 발생하는데, 이때의 탄소성 경계 영역, $r = r_e$ 에서는 소성 영역의 반경 방향 유효응력이 탄성영역에서의 그것과 같아져야 한다. 즉, 식 (15)와 식 (25)가 같아지는 지점

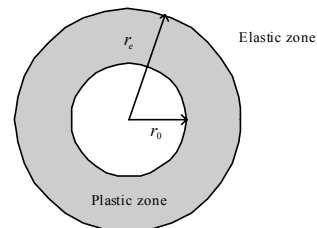
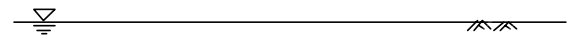


그림 13. 소성영역의 발생

이 탄소성 경계 영역, r_e 이다. 탄소성 경계영역을 구하는 식 (26)은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$r_e = r_0 \left[\frac{1}{p_i + a_r} \left\{ -A[\log(r_w)] - B \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\gamma_w}{r_e^{1-k}} \left[\int_{r_0}^{r_e} \xi^{1-k} i_r(\xi) d\xi - \int_{r_0}^{r_0} \xi^{1-k} i_r(\xi) d\xi \right] \right\} \right]^{\frac{1}{k_v-1}} \quad (26)$$

3.2 변위에 대한 이론해

원형 터널에서의 내공변위에 대한 이론해는 탄소성 이론에 기초하여 계산된다. 소성영역에서의 변형은 탄성과 소성 변형으로 이루어져 있으며, 이는 식 (27), (28)과 같이 표시될 수 있다. 위점자 e 와 p 는 각각 탄성, 소성 영역을 뜻한다. 압축 방향을 (+)로 생각한다면, 지반 입자에서 변위와 변형률의 관계는 다음과 같다.

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r^e + \varepsilon_r^p \quad (27)$$

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_\theta^e + \varepsilon_\theta^p \quad (28)$$

$$\varepsilon_r = \frac{-du_r}{dr} \quad (29)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{-u_r}{r} \quad (30)$$

소성 변형률은 유동 법칙에 의해 영향을 받는데, 체적 팽창의 영향이 중요할 때는 비연합 유동법칙을 사용할 수 있다. 그렇지 않은 경우에는 연합 유동법칙의 사용이 유효하다. 비연합 유동법칙을 적용할 때의 소성 포텐셜 함수는 다음과 같다.

$$Q = f(\sigma_r, \sigma_\theta) = \sigma_\theta - k_\psi \sigma_r - 2c\sqrt{k_\psi} = 0 \quad (31)$$

여기서, $k_\psi = (1 + \sin\psi)/(1 - \sin\psi)$ 이며 ψ 는 체적 팽창각을 의미한다.

소성영역에서의 변형률 간에는 다음과 같은 관계가 성립한다(Wang, 1994).

$$\varepsilon_r^p = -k_\psi \varepsilon_\theta^p \quad (32)$$

식 (29)~(32)를 종합하면 다음과 같은 미분방정식으

로 정리된다.

$$\frac{du_r}{dr} + k_\psi \frac{u_r}{r} = f(r) \quad (33)$$

$$\text{여기서, } \varepsilon_r^e + k_\psi \varepsilon_\theta^e = f(r) \quad (34)$$

식 (33)을 풀기 위해 다음과 같은 탄소성 경계영역에서의 경계조건을 적용한다(Brady and Brown, 1993).

$$u_{r(r=r_e)} = \frac{-b}{2G}(\sigma_{v0} - \sigma_{r(r=r_e)}) \quad (35)$$

여기서, G 는 전단 탄성계수이다.

식 (33)~(35)를 종합하면 반경방향 변위에 대한 이론해는 다음과 같이 정리된다.

$$u_r = r^{-k_\psi} \int_{r_e}^r r^{k_\psi} f(r) dr + u_{r(r=r_e)} \left(\frac{r}{r_e} \right)^{k_\psi} \quad (36)$$

위의 이론해에서 적분 부분을 계산하기 위해 다음과 같은 ε_r^e 와 ε_θ^e 를 적용한다(Brady and Brown, 1993).

$$\varepsilon_r^e = \frac{1}{2G} \left[(1-2\nu)C + \frac{D}{r^2} \right] \quad (37)$$

$$\varepsilon_\theta^e = \frac{1}{2G} \left[(1-2\nu)C - \frac{D}{r^2} \right] \quad (38)$$

$$\text{여기서 } C = \frac{(\sigma'_{r(r=r_e)} - \sigma'_0)r_e^2 - (p_i - \sigma'_0)r_0^2}{r_e^2 - r_0^2},$$

$$D = \frac{(p_i - \sigma'_{r(r=r_e)})r_0^2 r_e^2}{r_e^2 - r_0^2} \text{이며, } \nu \text{는 지반의 포아송 비이다.}$$

식 (37)과 (38)을 식 (34)에 대입하면, 식 (36)의 적분이 수학적으로 계산된다. 이를 이용한 반경 방향의 변위의 이론해는 다음과 같다(Sharan, 2003).

$$u_r = \frac{1}{2G} r^{-k_\psi} [C(1-2\nu)(r_e^{k_\psi+1} - r^{k_\psi+1}) \\ - D(r_e^{k_\psi-1} - r^{k_\psi-1})] + u_{r(r=r_e)} \left(\frac{r}{r_e} \right)^{k_\psi} \quad (39)$$

식 (39)에 $r = r_0$ 를 대입하면 터널 단면에서의 반경 방향 변위, $u_{r(r=r_0)}$ 는 다음과 같이 정리된다.

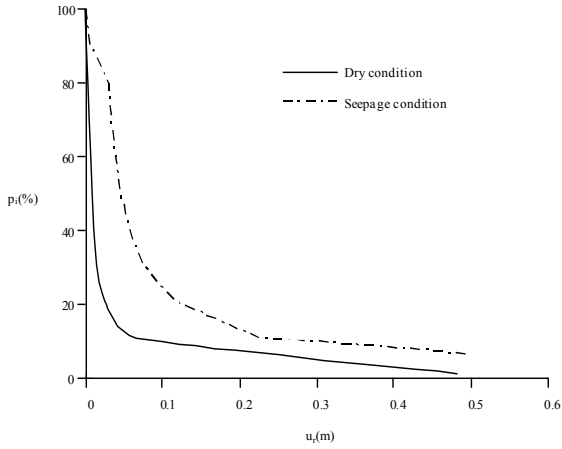


그림 14. 침투력을 고려한 지반반응곡선 ($C/D=10, H/D=10$)

$$u_{r(r=r_0)} = \frac{1}{2G} r_0^{-k_\nu} [C(1-2\nu)(r_e^{k_\nu+1} - r_0^{k_\nu+1}) - D(r_e^{k_\nu-1} - r_0^{k_\nu-1})] + u_{r(r=r_e)} \left(\frac{r_e}{r_0}\right)^{k_\nu} \quad (40)$$

그림 14에서 토피고, C 와 지하수위, H 가 터널직경, D 의 10배일 때 유도한 이론해를 사용하여 지반반응곡선을 계산하였다. 그림 14에서 볼 수 있듯이, 침투력을 고려한 지반반응곡선이 동일한 지반조건을 가지고 있는 건조 상태의 지반반응곡선에 비해 변위가 증가한 것을 알 수 있다. 이는 유효 상재하중은 아칭현상에 영향을 받아 감소할 수 있지만, 침투력은 아칭현상에 영향을 받지 않기 때문이다.

3.3 탄성영역에의 침투응력

본 연구에서는 침투력을 고려한 탄성 영역의 유효응력을 구하기 위해 건조 상태의 유효응력과 침투력만을 고려한 유효응력을 따로 구하여 중첩시켰다. 즉, 탄성영역에서 침투력을 고려한 유효응력은 건조상태의 유효응력과 침투응력을 더한 것이다. 본 연구에서 적용한 침투응력을 선행 연구들과 비교, 검토하여 평가하였다. Muir Wood(1975)는 침투력에 의해 발생하는 탄성영역의 응력을 다음과 같이 나타내었다.

$$\sigma_r = \frac{q(r_o^2 \ln r_o - r^2 \ln r)}{2k(1-\nu)r^2} \quad (41)$$

$$\sigma_\theta = \frac{q}{k} \left[1 - \frac{r_o^2 \ln r_o + r^2 \ln r + r^2}{2(1-\nu)r^2} \right] \quad (42)$$

여기서, h_o 는 지하수위부터 터널 축까지의 거리이며, q 는 터널의 단위 길이당 터널 내로 유입되는 유량이다.

Muir Wood(1975)는 터널 내로 유입되는 유량을 이용해서 이론해를 유도하였다. 지하수 흐름에 의해 발생하는 응력이 원지반응력에 더해질 수 있다고 언급하였다. 또한, 만약 상대적으로 지반보다 투수계수가 낮은 라이닝이 설치된 경우 식 (41)과 (42)의 단위 길이당 유량, q 가 작아지므로 침투력에 의한 응력은 줄어들고, 대신 라이닝에 직접 가해지는 수압의 영향이 이를 대신한다고 주장하였다. 하지만 그는 이론해를 유도할 때 경계조건을 틀리게 적용하여 Curtis(1976) 등이 이를 수정하였고, 수정된 식은 다음과 같다.

$$\sigma_r = \left[\ln R_0 - \frac{r_o^2}{r_o^2 - R_0^2} \ln \left(\frac{R_0}{r_o} \right) \right] \frac{q}{2k(1-\nu)} + \frac{R_0^2 r_o^2}{r_o^2 - R_0^2} \ln \left(\frac{R_0}{r_o} \right) \frac{q}{r^2} - \frac{q \ln(r)}{2k(1-\nu)} \quad (43)$$

$$\sigma_\theta = \left[\ln R_0 - \frac{r_o^2}{r_o^2 - R_0^2} \ln \left(\frac{R_0}{r_o} \right) \right] \frac{q}{2k(1-\nu)} - \frac{R_0^2 r_o^2}{r_o^2 - R_0^2} \ln \left(\frac{R_0}{r_o} \right) \frac{q}{r^2} - \frac{q \ln(r)}{2k(1-\nu)} - \frac{q}{2k(1-\nu)} + \frac{q}{k} \quad (44)$$

Fernandez and Alvarez(1994)는 정상류 조건에서 지하수의 터널내로의 침투에 의한 탄성응력을 다음과 같이 제안하였다.

$$\sigma'_r = \gamma_w h_o \frac{1}{2(1-\nu)} \left\{ \left(\frac{r_o^2}{r^2} - 1 \right) + \frac{2 \ln \frac{r}{r_o} + [(1-2\nu)T - 2(1-\nu)] \ln \left(\frac{r^2 - r_o^2}{r_o^2 T} \right)}{\ln T} \right\} \quad (45)$$

$$\sigma'_\theta = \gamma_w h_o \frac{-1}{2(1-\nu)} \left\{ \left(\frac{r_o^2}{r^2} + 1 \right) - \frac{2 \ln \frac{r}{r_o} - \left[(1-2\nu) \left(1 + \frac{4h_o^2}{r^2} \right) + 2\nu \right] \ln \left(\frac{r^2 - r_o^2}{r_o^2 T} \right)}{\ln T} \right\} \quad (46)$$

이때, h_o 는 지하수위부터 터널 축까지의 거리이며, $T=1+\frac{4h_o^2}{r^2}$ 이다.

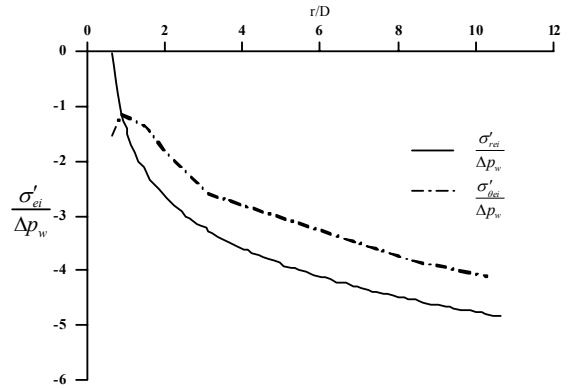
반면, Bobet(2003)는 탄성 지반에 대해 수압, u_f 를 외력과 같이 고려하여 이론해를 제안하였다.

$$\sigma'_r = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \frac{r_o^2}{R_o^2 - r_o^2} u_f \left[\left(\frac{R_o}{r} \right)^2 - 1 \right] + \frac{u_f}{2(1-\nu)} \frac{\ln \frac{R_o}{r}}{\ln \frac{R_o}{r_o}} \approx \frac{u_f}{2(1-\nu)} \left[1 + (1-2\nu) \left(\frac{r_o}{r} \right)^2 \right] \quad (47)$$

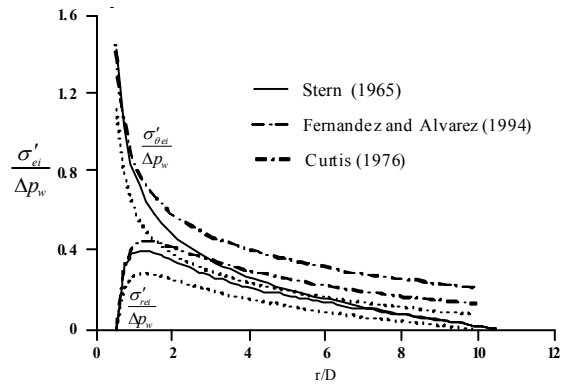
$$\sigma'_\theta = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \frac{r_o^2}{R_o^2 - r_o^2} u_f \left[\left(\frac{R_o}{r} \right)^2 + 1 \right] + \frac{u_f}{2(1-\nu)} \frac{\ln \frac{R_o}{r} + 1 - 2\nu}{\ln \frac{R_o}{r_o}} \approx \frac{u_f}{2(1-\nu)} \left[1 - (1-2\nu) \left(\frac{r_o}{r} \right)^2 \right] \quad (48)$$

그림 15는 위에서 언급한 지하수 아래의 터널 굴착으로 추가되는 침투력에 의한 탄성 영역에서의 응력을 보여주고 있다. 이때, 탄성 영역에서의 침투능력, σ'_{ei} 는 터널 천단에서의 정수압, Δp_w 으로 정규화 되었으며, 거리는 터널 직경, D 로 정규화 되었다. 그림 15의 (a)에는 Muir Wood(1975)에 의한 이론해를, (b)에는 Curtis(1976) 등이 이를 수정한 것을 보여주고 있다. 또한, 그림 15의 (b)에는 본 연구에서 적용한 Stern(1965)와 Fernandez and Alvarez(1994), 그리고 Curtis(1976)의 이론해를 함께 비교하여 보여주고 있다. 세 경우 모두 비슷한 경향을 보여 주고 있으나 경계 조건의 차이로 터널 단면에서 멀어질수록 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 Fernandez and Alvarez(1994)와 Curtis(1976)는 무한 경계 조건, $r = \infty$ 일때 $\sigma'_\theta = 0$ 을 Stern(1965)은 유한 경계 조건, $r = R_0$ 일때 $\sigma'_\theta = 0$ 을 사용했기 때문이다. 그러나, 그 차이가 미세하기 때문에 본 연구에서 적용한 유한 경계 조건은 적절하다고 여겨진다(i.e., R_0 : 터널 천

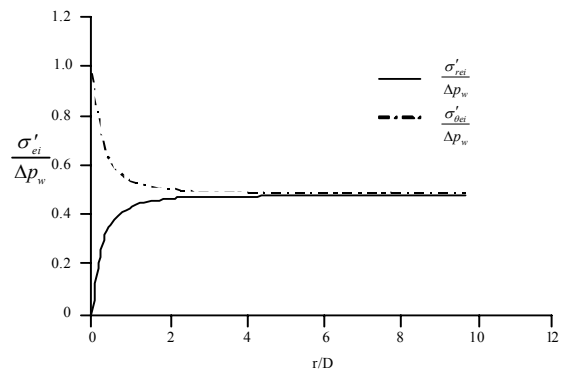
단부터 지하수위까지의 거리). 그림 15의 (c)는 Bobet (2003)의 이론해를 보여주고 있는데 전술한 바와 같이 수압을 외력과 같이 사용하여 다른 연구자들과 사뭇



(a) Muir Wood(1975)의 탄성 영역에서의 이론해



(b) 탄성 영역에서의 이론해



(c) Bobet(2003)에 의한 탄성 영역에서의 이론해

그림 15. 탄성 영역에서의 이론해

다른 결과를 보여주고 있다. 위의 결과들을 종합하여 보면, 본 연구의 이론해에서 침투력만에 의한 탄성 영역 유효응력으로 Stern(1965)의 이론해를 적용한 것은 적절하다고 판단된다.

3.4 라이닝 설치를 고려한 지반반응곡선

실제 터널에서는 터널 굴착 과정중에, 터널 단면에 상대적으로 지반보다 투수계수가 낮은 라이닝을 설치하는 것이 일반적이다. 앞에서 유도한 지하수위 아래서 굴착되어 침투력을 고려한 터널에서의 변위에 대한 이론해는 터널이 일종의 배수구 처럼 거동한다고 생각하여 완전 배수 조건을 가정한 것이다. 그러나 상대적으로 지반보다 투수계수가 낮은 라이닝의 존재를 고려하게 되면 완전 배수 조건이 아닌 부분 배수 조건이 되어 지하수의 흐름이 달라지게 된다. 라이닝 설치를 고려하였을 때 지반내 수압 분포의 변화는 그림 16과 같다. 터널 굴착에 의한 수압 분포는 지반과 투수계수의 비례에 따라 차이가 있을 수 있지만, 앞서 이론해를 유도한 완전 배수 조건의 경우 수압이 증가하다가 터널단면에서 0, 즉 $u_w = 0$ 으로 완만하게 수렴되는 반면, 라이닝이 설치되어 터널 단면 부근에서 부분 배수 조건으로 변하게 되면 수압이 거의 정수압처럼 증가하다 라이닝 근처부터 급속하게 0으로 감소하게 된다.

상대적으로 지반보다 투수계수가 작은 라이닝 설치를 추가로 고려하면, 그림 16과 같이 지하수의 흐름이 변한다. 이것은 라이닝 표면에 잔류수압의 발생을 유발하고, 또한 이론해에 적용되는 반경 방향 동수경사의 변화를 유발한다. 즉, 식 (26)의 반경 방향 동수경사, i_r 이 라이닝 설치에 의해 잔류수압 발생을 반영한 반경 방향

동수경사, i_r' 로 변하게 된다. 그림 17은 라이닝 설치로 인한 부분 배수 조건에서의 반경 방향 동수경사의 변화를 보여주고 있다. 따라서 식 (26)과 (40)은 라이닝의 설치를 고려하여 다음과 같이 표시될 수 있다. 여기서 r_{el} 는 지하수위 아래에서 터널 굴착시 지반보다 투수계수가 작은 라이닝 설치를 고려한 탄소성 경계영역을 뜻한다.

$$r_{el} = r_0 \left[\frac{1}{p_i + a_r} \left\{ \begin{aligned} & \left(\frac{1}{1+k} (2\sigma'_0) + \frac{1-k}{1+k} a + a_r + \frac{1}{1+k} \left(\frac{-1}{v-1} \right) \gamma_w \int_{r_0}^{r'} i'_r(\xi) d\xi \right)^{\frac{1}{k_v-1}} \\ & - A [\log(r_{el})] - B \\ & + \frac{\gamma_w}{r_{el}^{1-k_v}} \left[\int_{r_0}^{r'} \xi^{1-k_v} i'_r(\xi) d\xi - \int_{r_0}^{r_{el}} \xi^{1-k_v} i'_r(\xi) d\xi \right] \right\} \right] \quad (49)$$

$$u_{r(r=r_0)} = \frac{1}{2G} r_0^{-k_v} [C(1-2\nu)(r_{el}^{k_v+1} - r_0^{k_v+1}) D(r_{el}^{k_v-1} - r_0^{k_v-1})] + u_{r(r=r_{el})} \left(\frac{r_{el}}{r_0} \right)^{k_v} \quad (50)$$

전장에서 묘사한 예제 터널에서 지반과 라이닝의 투수계수의 비가 천분의 일인 라이닝, $k_l / k_s = 0.001$ 을 설치하였을 때의 지반반응 곡선의 변화를 평가하였다. 지하수위 아래에서 터널을 굴착하면 라이닝이 설치되기 전까지는 완전 배수 조건에서의 지반 거동과 같은 거동을 보인다. 라이닝이 설치되고 나면 라이닝 표면에 잔류수압이 발생한다. 발생한 잔류수압은 터널 근처의 침투력의 증가를 유발하고 이는 그림 18과 같이 터널 내공변위를 증가시킨다. 즉, 라이닝의 투수계수와 설치시기가 지반거동에 영향을 미침을 알 수 있다.

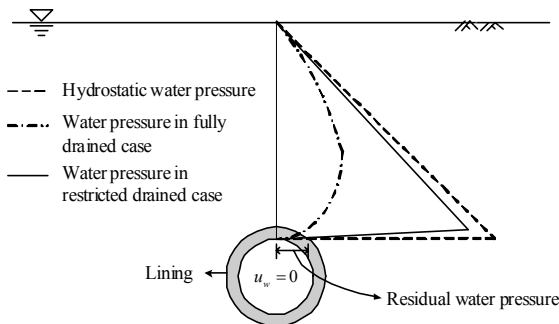


그림 16. 완전배수 조건과 부분배수 조건의 수압분포

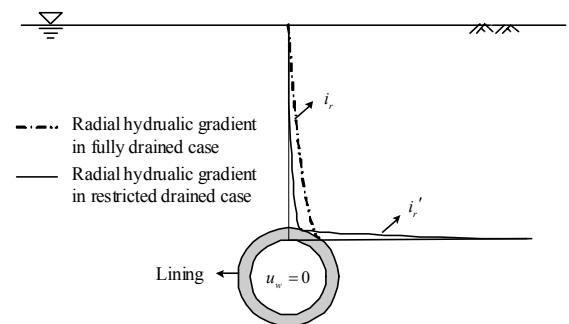


그림 17. 라이닝 설치에 의한 동수경사 분포의 변화

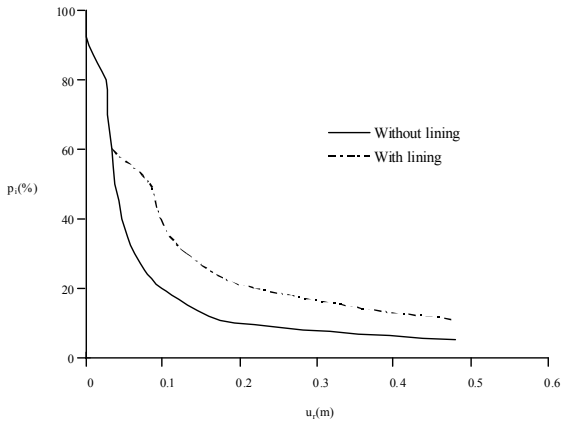


그림 18. 지하수위 아래 라이닝 설치를 고려한 지반반응곡선 ($C/D=10, H/D=10$)

4. 수치해석을 통한 지반반응곡선의 평가

침투력을 고려하여 유도한 이론해를 검증하기 위해, 수치해석과 이론해로 계산된 지반반응 곡선을 비교, 평가하였다. 우선, 본 연구에서 사용한 수치해석의 적정성을 평가하기 위해, Sharan(2003)에 의해 제시된 건조 상태에서의 이론해를 수치해석에 의한 지반반응 곡선으로 비교, 검토하였다. 이를 바탕으로 침투력을 고려한 지반

반응곡선의 이론해를 평가하였고, 이론해의 사용한계를 제시하였다.

4.1 수치해석 방법

본 연구에서 수치해석을 위해 PENTAGON 2D(Emerald Soft Consulting Co., 1998)가 사용되었다. 이것은 터널, 옹벽과 같은 지반공학적 문제에 대한 해석과 지하수 흐름에 의한 침투 해석이 가능한 2차원 유한 요소 해석 프로그램이다. 또한, 연계수리 해석 및 동해석이 가능하다. 수리 해석시에는 포화/불포화 지반에 대해 Darcy의 법칙이 적용되고, 항복후의 소성 변형률에는 연합 유동 법칙과 비연합 유동법칙이 적용 될 수 있다. 본 연구에서는 지반 거동이 선형 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의해 지배받는 것으로 가정하였으며, 해석시 적용된 물성치는 표 3에 제시되었다.

그림 6과 같이 직경 5m의 원형 터널에서 토피고 C 와 지하수위, H 를 표 4와 5와 같이 변화시켜가며 지반반응곡선을 계산하였다. 침투해석을 위한 경계조건은 그림 19와 같다. 외부 경계에 정상류 상태의 전수두를 적용하였고, 터널 경계에는 압력수두를 0으로 사용하였다. 수치해석에 의한 지반반응곡선은 터널 단면에 작용하는 내압, p 를 10단계로 나누어 감소시킬 때, 각 단계에서의

표 3. 해석 지반의 물성치

Soil type	Submerged unit weight, γ_{sub} (kN/m ³)	Cohesion, c (kN/m ²)	Internal friction angle (deg)	Elastic modulus, E (kN/m ²)	Poisson's ratio	Coefficient of permeability (m/sec)
Weathered soil	4.9	9.81	35.0	49000	0.30	0.000001

표 4. 건조 상태의 해석 조건 ($H/D=0$)

		C/D		
		5.0	10.0	15.0
Dry condition		case 1	case 2	case 3

표 5. 침투력을 고려한 해석 조건

		C/D		
		5.0	7.5	10.0
H/D	2.5	case 21	case 31	case 41
	5.0	case 22	case 32	case 42
	7.5	case 23	case 33	case 43
	10.0	case 24	case 34	case 44

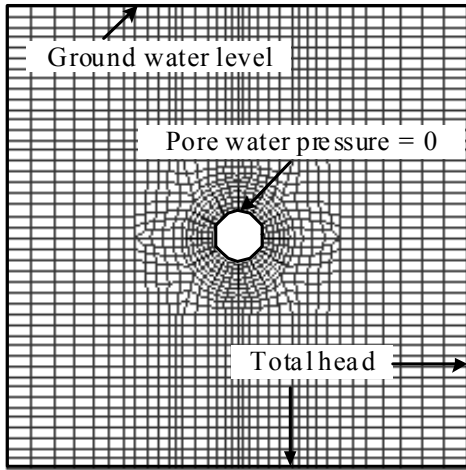


그림 19. 수치해석을 위한 경계조건

내공변위, u_r 을 통해 계산된다.

4.2 이론해를 통한 지반반응곡선 산정

이론해를 통해 지반반응곡선을 산정하는 과정은 다음과 같다. 첫째, 침투해석을 통해 동수경사의 분포를 계산한다. 둘째, 내압, p_r 를 가정한다. 셋째, 식 (26)과 (40)을 이용하여 탄소성 경계구역, r_e 와 터널 단면에서의 내공변위, u_r 을 산정한다. 넷째, 위의 과정을 새로 가정하는 내압에 맞추어 반복한 후 내압과 내공변위의 관계에 의한 지반반응곡선을 완성한다.

4.3 이론해와 수치해석의 비교

본 연구에 사용된 수치해석의 적정성을 검증하기 위해 Sharan(2003)에 의해 제시된 건조상태 ($H/D = 0$)에서의 이론해를 수치해석과 비교, 검토하였다. 그림 20은 토피고, C 가 직경, D 의 5배, 10배, 그리고 15배일 때의 건조상태에서 터널 천단에서의 지반반응곡선을 이론해와 수치해석 두 가지 방법을 통해 계산한 후, 비교하였다. 수치해석과 같은 조건에서의 이론해는 거의 같은 결과를 보여주고 있다. 즉, 이 결과는 본 연구에서 적용한 수치해석의 모델링이 타당함을 입증해 준다.

추가적으로 침투력을 고려하여 유도된 이론해로 구해진 지반반응 곡선을 연계 해석을 사용한 수치해석에 의해 평가된 지반반응 곡선과 비교, 평가하였다. 해석에 사용된 지반 조건은 토피고, C 를 터널 직경, D 의 5배,

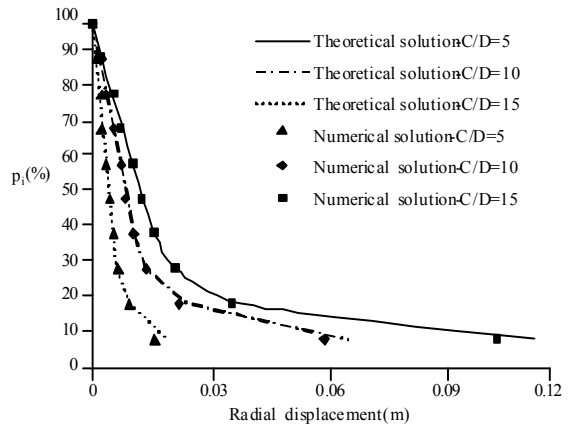
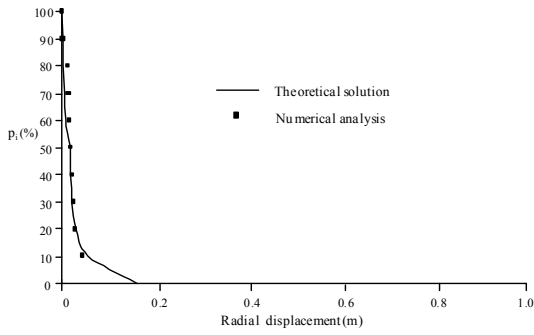
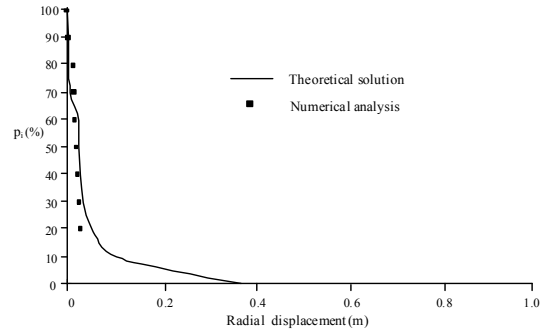


그림 20. 건조 상태에의 지반반응곡선

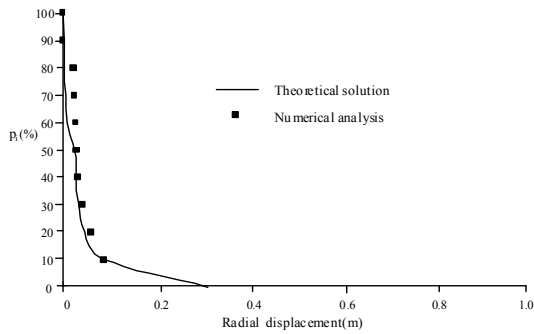
7.5배, 10배로 변화시킬 때, 지하수위, H 를 직경의 2.5배부터 10배까지 변화시켰다. 이때의 지반반응 곡선은 그림 21과 22 그리고 23에 나타나 있다. 수치해석으로 구한 결과와 이론해로 구한 결과는 매우 유사하다. 즉, 본 연구에서 유도한 침투력을 고려한 지반반응곡선의 이론해는 수치해석을 통해 검증되었다. 하지만 동일한 조건의 건조 상태의 경우와는 결과에 차이가 있다. 이 차이는 이론해에서 침투력을 취급하는 방법 때문이다. 일반적으로 지하수의 거동은 특정 조건을 제외하고는 비방사형으로 흐르는게 대부분이다. 이것은 이론해에서 고려된 침투력과 실제 지하수의 흐름이 다르다는 것을 뜻한다. 이론해에서는 먼저 수치해석으로 구해진 반경 방향 동수경사를 적분하여 구한 침투력을 이론해에 대입시키는 것에 비해, 수치해석에서는 지하수위부터 터널 단면까지의 전수두차에 의해 계산된 침투력이 각 격자에 적용된다. 따라서, 지하수의 흐름에 의해 발생하는 모든 힘이 이론해에 모두 반영되지는 않는다는 것이다. 즉, 지하수를 적용하는 방식의 차이는 이론해와 수치해석의 결과의 차이를 설명한다. 그림 21의 (d)와 그림 23의 (a)는 이론해와 수치해석의 결과가 다른 케이스에 비해 상대적으로 많은 차이를 보여준다. 그림 21의 (d)는 지하수위와 토피고의 비가 2인 경우이며($H/C = 2$), 그림 23의 (a)는 지하수위와 토피고의 비가 0.25인 경우이다($H/C = 0.25$). 지하수위가 토피고보다 너무 크거나 너무 낮은 경우에는 이론해와 수치해석 결과가 크게 차이난다는 사실은 본 이론해의 사용의 한계를 지적해주고 있다.



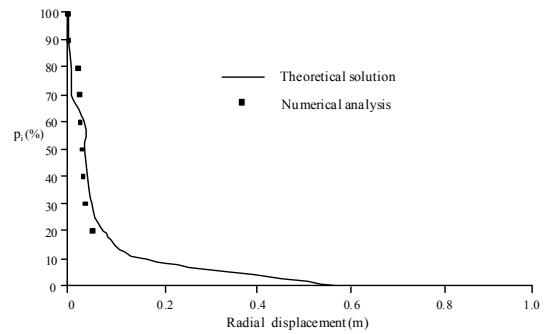
(a) $H/D = 2.5$



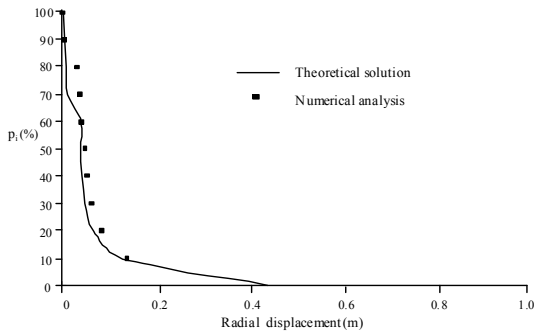
(a) $H/D = 2.5$



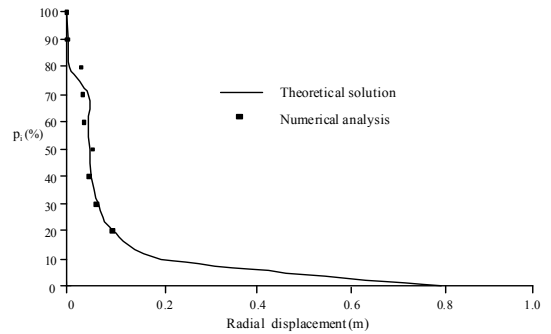
(b) $H/D = 5.0$



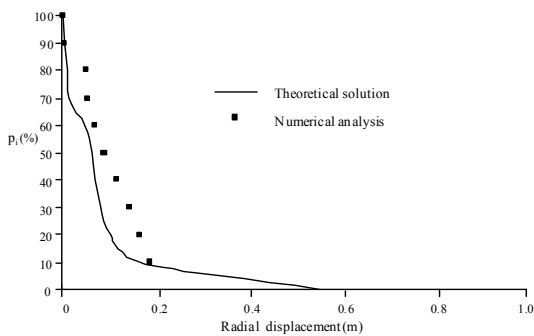
(b) $H/D = 5.0$



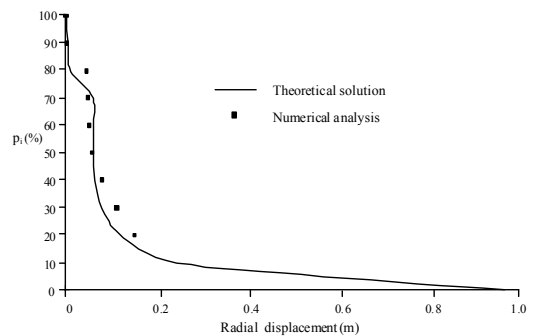
(c) $H/D = 7.5$



(c) $H/D = 7.5$



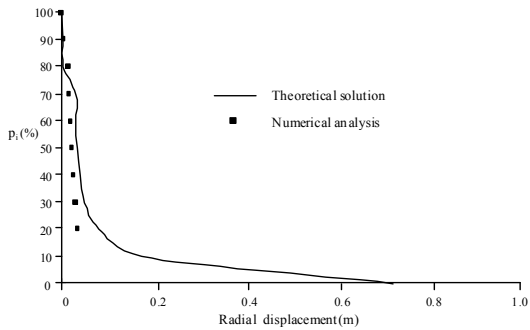
(d) $H/D = 10.0$



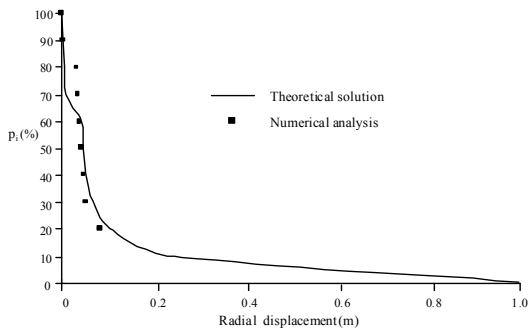
(d) $H/D = 10.0$

그림 21. 침투력을 고려한 지반반응곡선 ($C/D = 5.0$)

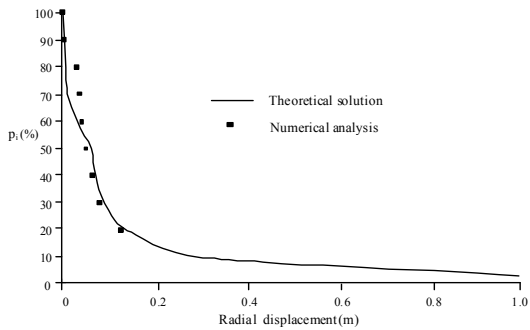
그림 22. 침투력을 고려한 지반반응곡선 ($C/D = 7.5$)



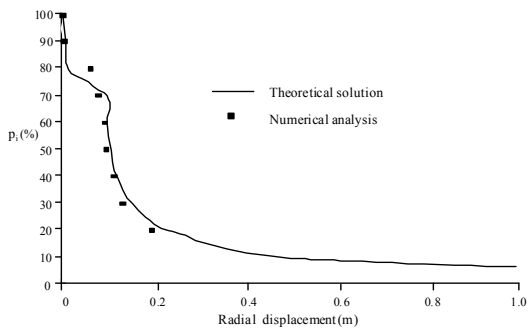
(a) $H/D = 2.5$



(b) $H/D = 5.0$



(c) $H/D = 7.5$



(d) $H/D = 10.0$

그림 23. 침투력을 고려한 지반반응곡선 ($C/D = 10.0$)

4.4 지반반응곡선의 이론해의 사용한계

전술한 바와 같이 유도된 이론해와 수치해석의 결과를 비교하면, 본 연구에서 유도된 침투력을 고려한 터널 내 공변위에 대한 이론해는 지하수위와 토피고의 비, H/C 가 0.25 이상 2 이하인 경우 ($0.25 \leq H/C \leq 2$)에서 적용 가능하다. 또한, 본 연구의 이론해는 방사형 흐름이 성립될 때도 유효하다. Fernandez and Alveradez(1994)는 지하수위와 지반고가 같은 조건($H/C = 1$)에서 지하수위와 터널 직경의 비, H/D 가 10 이상일 때 방사형 흐름이 성립된다고 언급하였다. 따라서, 이 두 가지 조건이 본 연구의 이론해가 유효한 사용 한계이다.

5. 전면 접착형 록볼트로 보강한 지반반응곡선

실제 터널 시공 현장에서 지하수위 아래 터널을 굴착할 경우, 지하수의 흐름에 의해 터널 단면에 가해질 위험요소에 대응하기 위해 전면 접착형 록볼트 등의 지보재가 널리 쓰이고 있다. 이러한 전면 접착형 록볼트는 터널에 가해지는 하중을 받아주기 보다는 터널 주변을 보강하는 지보재로서의 기능을 하고 있다. 전면 접착형 록볼트로 보강한 지반반응곡선을 얻기 위해, 침투력을 고려한 이론해를 기반으로 록볼트의 설치를 고려하여 유도하였다.

5.1 전면 접착형 록볼트의 거동

전면 접착형 록볼트의 거동은 지반과 록볼트사이의 상대적 거동에 따라 좌우된다. 본 연구에서는 침투력이

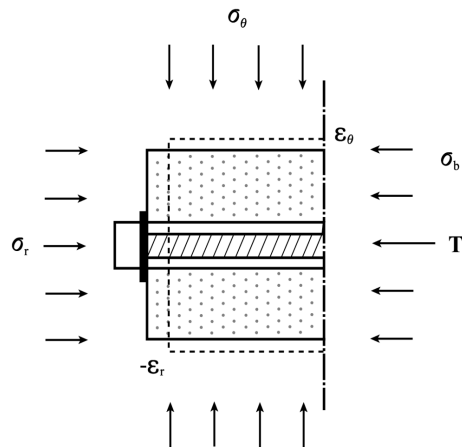


그림 24. 전면 접착형 록볼트의 거동

고려될 때 록볼트로 보강된 지반반응곡선의 변화에 초점을 맞추었으므로 해석의 간편화를 위해, 지반과 록볼트의 일체거동을 가정하였다. 또한, 보강된 영역이 균질한 물성치를 가지고 있고, 록볼트가 동일하게 설치되었음을 가정하였다. 그림 24와 같이 지반과 록볼트가 일체로 거동하게 되면 동일한 변형이 발생한다. 이를 바탕으로 전면 접촉형 록볼트에 대한 기본 방정식은 다음과 같다.

$$T = E_s \cdot \epsilon_r \cdot Y \quad (51)$$

여기서, T 는 록볼트의 축력, E_s 는 록볼트의 탄성계수, Y 는 단면적, 그리고 ϵ_r 은 보강된 지반의 반경방향 변형을 뜻한다.

5.2 전면 접촉형 록볼트로 보강된 지반반응곡선의 이론해

전술한 바와 같이 축대칭 평형방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d\sigma'_r}{dr} + \frac{\sigma'_r - \sigma'_\theta}{r} + i_r \gamma_w = 0 \quad (12)$$

록볼트에 발생하는 인장응력은 지반에 추가적인 압축 응력을 발생시킨다. 따라서, 그림 24에 보여지는 지반의 반경방향 응력, σ'_b 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

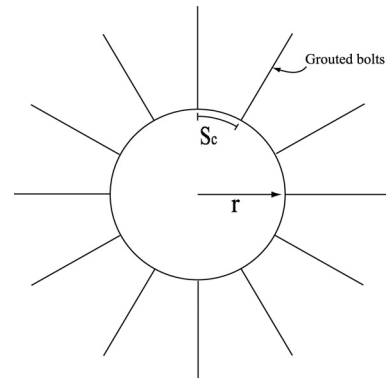
$$\sigma'_b = \sigma'_r - \frac{T}{S_c S_L} \quad (52)$$

여기서 S_c 와 S_L 은 그림 25에서 나타난 것처럼 터널 축에 횡방향 및 종방향의 록볼트 간격이다.

그림 26에서 보여 지듯이, 록볼트 설치 후에 지반에 발생하는 응력의 일부가 전이되므로, 소성영역에서의 Mohr-Coulomb 계수, k_r 은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$k_r = \frac{\sigma'_\theta + a_r}{\sigma'_b + a_r} \quad (53)$$

전술한 바와 같이 압축 방향을 (+)로 규정한 부호 규약을 사용하였다. 소성영역에서의 변형은 식 (27)과 (28)과 같이 탄성변형과 소성변형으로 이루어져 있으며, 원지반 응력, σ_0 부터 탄소성 경계에서의 반경 방향 응력, σ_{re}



(a) 횡단면



(b) 종단면

그림 25. 전면 접촉형 록볼트의 설치

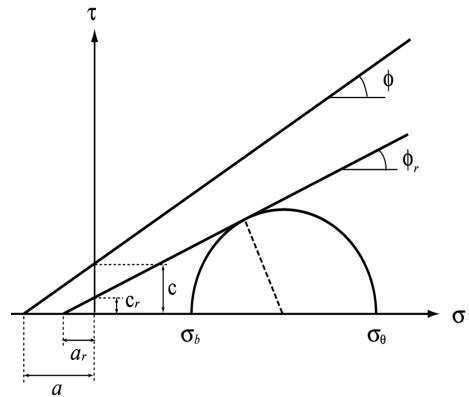


그림 26. 보강된 영역에서의 Mohr 원

까지의 응력 변화에 수반된 반경 방향의 변형률은 다음과 같다.

$$\epsilon_r^e = -\left(\frac{1+\nu}{E}\right)(\sigma_0 - \sigma_{re}) = -S \quad (54)$$

유사하게, 탄소성 경계에서의 접선 방향 변형률은 다음과 같다.

$$\varepsilon_{\theta}^e = \left(\frac{1+\nu}{E} \right) (\sigma_0 - \sigma_{re}) = S \quad (55)$$

식 (56)과 (57)을 식 (33)에 대입하고, 경계조건으로 $r = r_e$ 일때 $u = -S \cdot r_e$ 를 적용하면 반경방향 변형은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\varepsilon_r = \frac{-2k_{\psi} S}{k_{\psi} + 1} \left(\frac{r_e}{r} \right)^{k_{\psi} + 1} + \frac{k_{\psi} - 1}{k_{\psi} + 1} S \quad (56)$$

평형방정식 (12)에 대입하고 정리하면 다음과 같은 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d\sigma_r'}{dr} + \frac{1}{r} \left\{ (1 - k_r) \sigma_r' + \frac{E_s Y}{S_c S_L} \left[\frac{-2k_{\psi} k_r}{k_{\psi} + 1} S \left(\frac{r_e}{r} \right)^{k_{\psi}} + k_r \frac{k_{\psi} - 1}{k_{\psi} + 1} S \right] + (1 - k_r) a_r \right\} + i_r \gamma_w = 0 \quad (57)$$

경계조건 $r = r_0$ 에서 $\sigma_r = p_i$ 를 적용하면, 식 (57)에 의해 지하수위 아래 굴착하여 침투력이 작용할 때 전면 접착형 록볼트로 보강된 소성영역의 반경 방향 유효응력이 다음과 같이 정리된다.

$$\sigma_r' = P \left(r^{-k_{\psi} - 1} - \frac{r_0^{-k_r - k_{\psi}}}{r^{1 - k_r}} \right) + Q \left[1 - \left(\frac{r_0}{r} \right)^{1 - k_r} \right] + \left(\frac{r_0}{r} \right)^{1 - k_r} (p_i + a_r) - a_r - \frac{\gamma_w}{r^{1 - k_r}} \left[\int_{R_0}^r \xi^{1 - k_r} i_r(\xi) d\xi - \int_{R_0}^{r_0} \xi^{1 - k_r} i_r(\xi) d\xi \right] \quad (58)$$

표 6. 전면 접착형 록볼트를 고려한 해석 조건

		C/D		
		5.0	7.5	10.0
H/D	2.5	case 25	case 35	case 45
	5.0	case 26	case 36	case 46
	7.5	case 27	case 37	case 47
	10.0	case 28	case 38	case 48

$$\text{여기서, } P = -\frac{E_s Y}{S_c S_L} \frac{2k_{\psi}}{k_{\psi} + 1} \frac{k_r}{k_r + k_{\psi}} S r_e^{k_{\psi} + 1}, \quad Q = -\frac{E_s Y}{S_c S_L} \frac{k_{\psi} - 1}{k_{\psi} + 1} \frac{k_r}{1 - k_r} S$$

탄성영역에서는, 탄소성 경계에서의 반경방향 응력이 식 (25)와 같이 표시된다. 지하수위 아래에서 전면 접착형 록볼트로 보강된 터널을 굴착할 때 발생하는 소성영역까지의 거리, r_{eg} 는 탄소성 경계 영역에서 탄성영역과 소성영역의 반경방향 유효응력이 같아진다는 원리를 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$r_{eg} = r_0 \left\{ \frac{1}{p_i + a_r} + \frac{\gamma_w}{r_e^{1 - k_r}} \left[\int_{R_0}^{r_e} \xi^{1 - k_r} i_r(\xi) d\xi - \int_{R_0}^{r_0} \xi^{1 - k_r} i_r(\xi) d\xi \right] + q - P(r_e^{-k_r - 1} - \frac{r_0^{-k_r - k_{\psi}}}{r_e^{1 - k_r}}) \right\}^{\frac{1}{k_r - 1}} \quad (59)$$

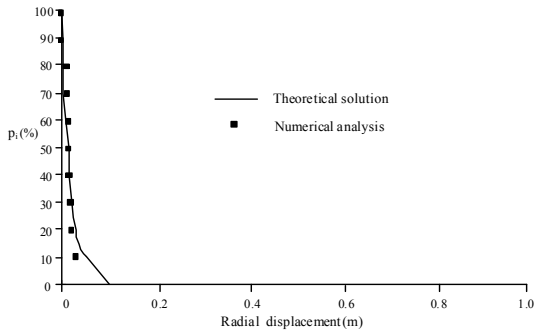
지하수위 아래에서 전면 접착형 록볼트를 고려한 내공면위, $u_{r(r=r)}$ 는 다음과 같이 정리된다.

$$u_{r(r=r_0)} = \frac{1}{2G} r_0^{-k_{\psi}} [C(1 - 2\nu)(r_{eg}^{k_{\psi} + 1} - r_0^{k_{\psi} + 1}) - D(r_{eg}^{k_{\psi} - 1} - r_0^{k_{\psi} - 1})] + u_{r(r=r_{eg})} \left(\frac{r_{eg}}{r_0} \right)^{k_{\psi}} \quad (60)$$

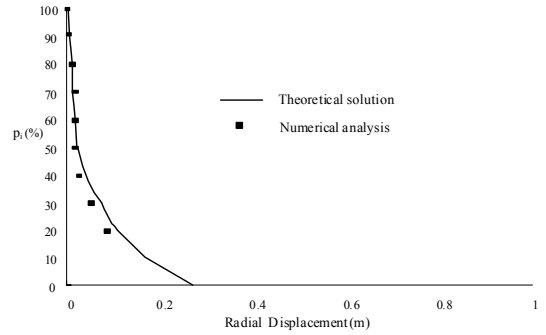
여기서 r_{eg} 는 전면 접착형 록볼트로 보강된 지반의 탄소성 경계 영역이다.

5.3 전면 접착형 록볼트로 보강된 지반반응곡선의 평가

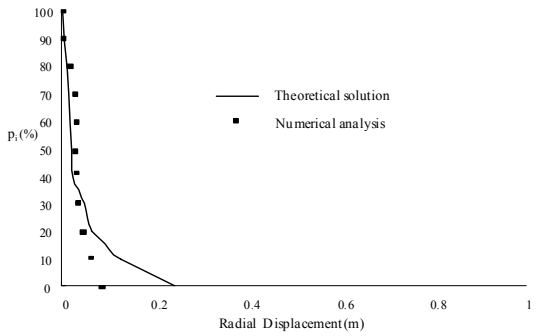
지하수위 아래에서 전면 접착형 록볼트로 지반을 보강한 후 터널을 굴착할 때 발생하는 지반반응곡선의 이론해는 연계해석으로 계산된 수치해석과 비교, 검토되었다. 해석조건은 표 6과 같다. 토피고, C를 터널 직경, D의 5배, 7.5배, 10배로 변화시켰고, 지하수위, H를 직경



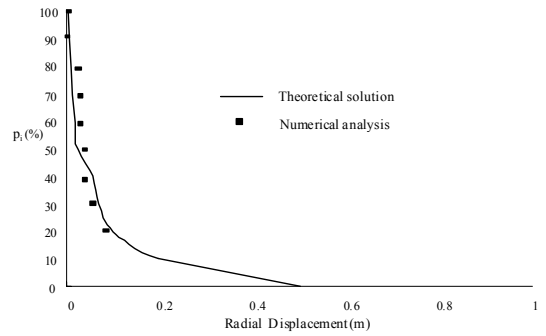
(a) $H/D = 2.5$



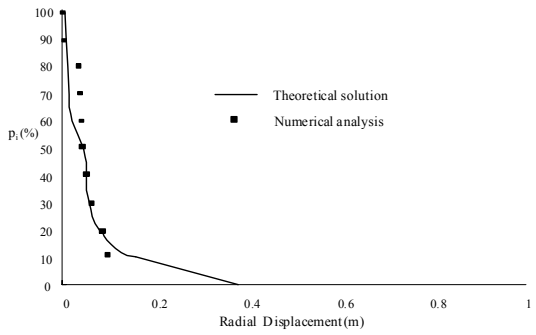
(a) $H/D = 2.5$



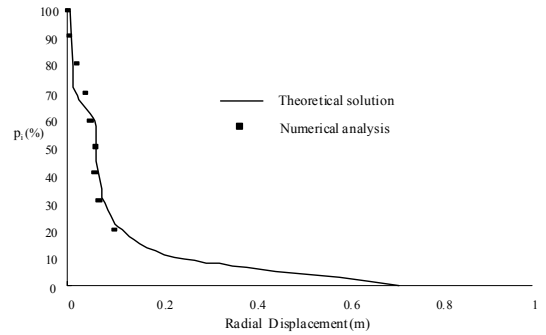
(b) $H/D = 5.0$



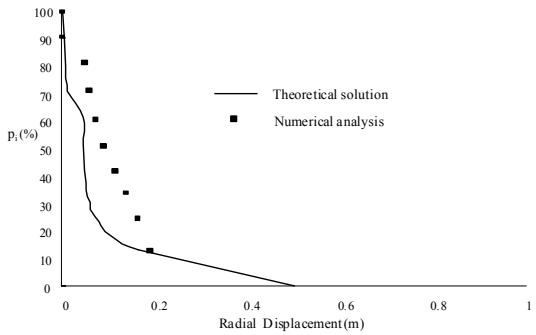
(b) $H/D = 5.0$



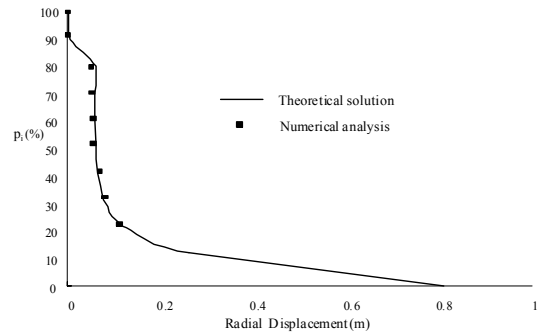
(c) $H/D = 7.5$



(c) $H/D = 7.5$



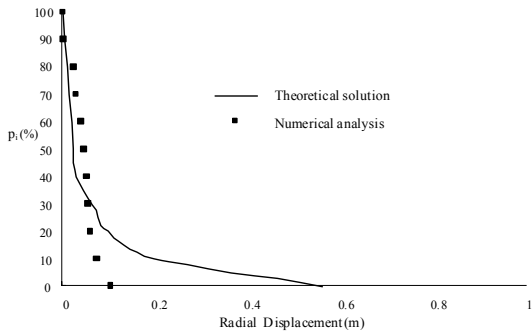
(d) $H/D = 10.0$



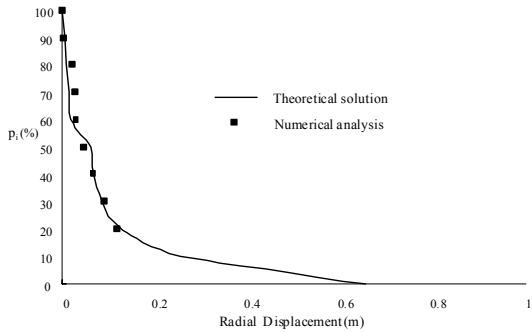
(d) $H/D = 10.0$

그림 27. 전면 접촉형 록볼트로 보강된 지반반응곡선 ($C/D=5.0$)

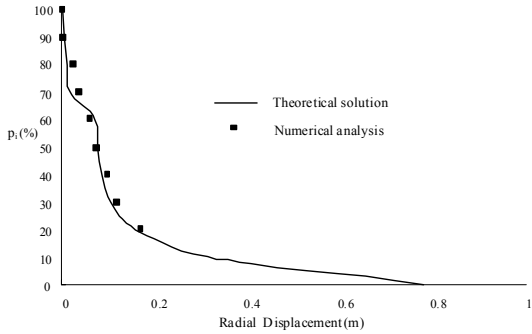
그림 28. 전면 접촉형 록볼트로 보강된 지반반응곡선 ($C/D=7.5$)



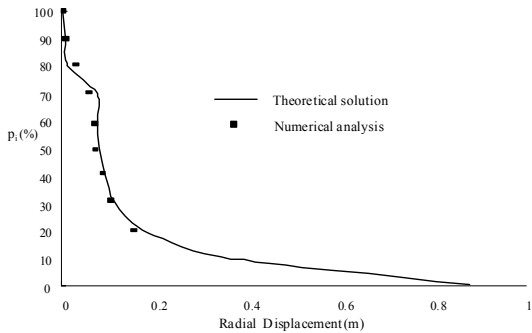
(a) $H/D = 2.5$



(b) $H/D = 5.0$

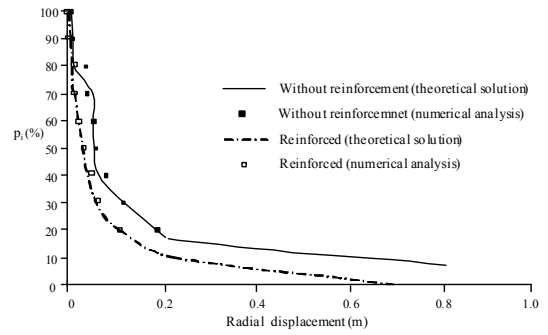


(c) $H/D = 7.5$

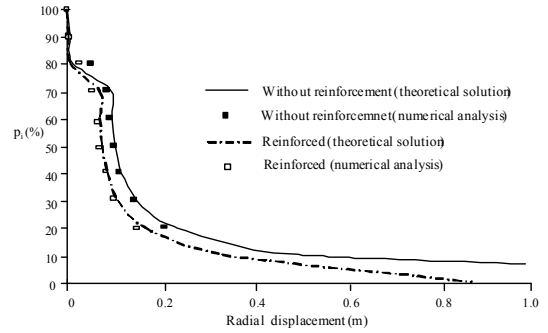


(d) $H/D = 10.0$

그림 29. 전면 접촉형 록볼트로 보강된 지반반응곡선 ($C/D=1.0$)



(a) $H/D = 7.5, C/D = 7.5$



(b) $H/D = 10.0, C/D = 10.0$

그림 30. 지반보강 유무에 의한 지반반응곡선의 변화

의 2.5배부터 10배까지 변화시켰다. 이때의 지반반응곡선은 그림 27, 28, 그리고 29에 나타나 있으며, 수치해석으로 구한 결과와 이론해로 구한 결과는 매우 유사하다는 것을 알 수 있다. 즉, 본 연구에서 유도한 지하수위 아래에서 전면 접촉형 록볼트로 지반 보강후 터널을 굴착할 때 발생하는 지반반응곡선의 이론해는 수치해석을 통해 검증되었다. 보강을 고려하지 않은 경우와 마찬가지로, 지반 조건에 따라 이론해와 수치해석 결과의 상관 관계가 결정된다. 즉, 이론해의 적용한계($0.25 \leq H/C \leq 2$) 안에서는 이론해와 수치해석 결과가 거의 일치하고, 그렇지 않은 경우에는 오차가 발생한다. 그림 27의 (d)와 그림 29의 (a)가 실제의 흐름을 반영하는 수치해석과 이론해의 차이를 보여준다.

5.4 지반 보강이 지반반응곡선에 미치는 영향

지하수위 아래에 터널을 굴착하여 침투력에 의해 영향을 받을 때 전면 접촉형 록볼트의 보강 유무에 따른 영향을 살펴보기 위해 지하수위, H 와 토피고, C 가 터널

직경, D 의 7.5배와 10배의 경우에 보강을 하였을 때와 하지 않았을 때의 지반반응곡선을 이론해와 수치해석을 통해 계산하여 비교하였다. 그림 30에서 볼 수 있듯이, 전면 접착형 록볼트로 보강하였을 때의 지반반응곡선이 보강하지 않은 지반반응곡선에 비해 작은 것을 알 수 있다. 이는 전면 접착형 록볼트의 설치가 터널 단면의 내공변위를 제어하고 있기 때문이다. 즉, 터널 주변 지반에 설치된 록볼트는 터널에 가해지는 하중을 받아주기 보다는 터널 주변을 보강하는 지보재로서 기능을 하고 있는 것이다. 그러나, 지반 보강에 의한 내공변위의 제어는 전면 접착형 록볼트와 같은 지보재의 설치이후에 가능한 것이므로, 보강 전에 침투력에 의해 발생하는 초기 변위를 제어하는 것은 매우 어렵다.

전장의 유도를 통해 침투력을 고려한 지반반응곡선이 건조 상태의 지반반응곡선 보다 크다는 것을 입증하였으며, 이는 추가적인 침투력이 터널 단면에 작용하였기 때문이다. 이에 록볼트를 터널 주변 지반에 설치하면, 증가된 지반반응곡선의 변위가 억제되는 경향이 발생하는 것을 입증하였으며, 이는 록볼트의 보강 효과에 의한 것이다.

6. 결 론

지하수의 존재는 터널의 거동에 큰 영향을 미친다. 이것은 유효 상재하중이 아칭현상에 의해 감소가 될 때, 침투력은 아칭현상에 영향을 받지 않기 때문이다. 본 연구를 통한 결론은 다음과 같이 정리될 수 있다.

1. 침투력 산정 범위는 반경방향 동수경사가 0인 지점으로 정의되었다. 이는 터널에서는 웅벽구조물이나 터널막장과 같이 명확한 파괴면이 발생하지 않기 때문이다. 지하수위가 지표보다 아래에 있는 경우에는 침투압비가 터널천단의 정수압 대비 85~90%, 지하수위가 지표보다 커지면 침투압비는 터널천단의 정수압 대비 95% 이상이다.
2. 지하수의 흐름은 터널 벽면의 내공변위에 큰 영향을 미친다. 터널굴착동안 유효 상재하중은 아칭현상에 의해 감소될 때, 침투력은 영향을 받지 않기 때문이다. 따라서, 침투력을 고려한 지반반응곡선은 건조상태에 비해 큰 내공변위를 보여준다.
3. 상대적으로 지반보다 투수계수가 낮은 슛크리트 라이닝이 설치되면, 라이닝의 표면에 잔류수압이 발생한다. 이것은 터널근처 지반에 침투력의 증가를 유발하고, 따라서 내공변위가 추가적으로 증가한다.
4. 침투력을 고려한 지반반응곡선의 이론해는 수치해석을 통해 검증되었다. 이론해와 수치해석의 결과의 비교를 통해 본 연구에서 유도된 이론해는 지하수위와 토피고의 비, H/C 가 0.25~2 사이에서 유효하다. 또한 지하수위와 토피고가 같을 때, 지하수위와 직경의 비, H/D 가 10 이상일 때 방사형 흐름이 성립하여 본 연구의 이론해가 적용 가능하다.
5. 지하수위 아래에서 전면 접착형 록볼트로 터널 주변 지반을 보강하면, 록볼트는 지반을 보강하는 역할을 한다. 따라서, 보강이 없는 경우에 비해 터널 벽면에서 내공변위의 발생이 제어된다.

감사의 글

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

참고문헌

1. Atkinson, J.H., Mair, R.J. (1983), “Loads on leaking and watertight tunnel lining, sewers and buried pipes due to groundwater”, *Geotechnique*, Vol. 33, No.3, pp. 341-344.
2. Bobet, A. (2003), “Effect of pore water pressure on tunnel support during static and seismic loading”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 18, pp. 377-393.
3. Brady, B.H.G., Brown, E.T. (1993), *Rock mechanics for underground mining*. London: Chapman and Hall.
4. Carranza-Torres, C., Fairhurst, C. (1999), “The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 36, pp. 777-809.
5. Carranza-Torres, C., 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.
6. Carranza-Torres, C. (2002), "Dimensionless graphical representation of the exact elasto-plastic solution of a circular tunnel in a Mohr-Coulomb material subject to uniform far-field stresses", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 36, No.3, pp. 237-253.
 7. Curtis, D.J., Mott, Hay, Anderson (1976), "The circular tunnel in elastic ground", Geotechnique, Vol. 26, No.1, pp. 231-237.
 8. Emerald Soft Consulting (1998), Co. PENTAGON-2D Users Manual, Seoul, Korea.
 9. Fernandez, G., Alvarez, T.A. (1994), "Seepage-induced effective stresses and water pressures around pressure tunnels", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, No. 1, pp. 108-128.
 10. Fernandez, G. (1994), "Behavior of pressure tunnels and guidelines for liner design", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, No. 10, pp. 1768-1791.
 11. Lee, I.M., Nam, S.W. (2001), "The study of seepage forces acting on the tunnelling and tunnel face in shallow tunnels", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 16, pp. 31-40.
 12. Lee, S.W., Jung, J.W., Nam, S.W., Lee, I.M. (2007), "The influence of seepage forces on ground reaction curve of circular opening", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 21, pp.28-38.
 13. Muir Wood, A.M. (1975), "The circular tunnel in elastic ground", Geotechnique, Vol. 25, No.1, pp. 115-127.
 14. 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.
 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 15. Advances in Geomechanics, Beer, Booker&Carter(eds), pp. 1503-1508.
 16. Sharan, S.K. (2003), "Elastic-brittle-plastic analysis of circular openings in Hoek-Brown media", International journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 40, pp. 817-824.
 17. Shin, J.H., Potts, D.M., Zdravkovic, L. (2005), "The effect of pore-water pressure on NATM tunnel linings in decomposed granite soil", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 42, pp. 1585-1599.
 18. Stern, M. (1965), "Rotationally symmetric plane stress distribution", Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik, Vol. 45, No. 6, pp. 446-447.
 19. Stille, H., Holmberg, M., Nord, G. (1989), "Support of weak rock with grouted bolts and shotcrete", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 26, No. 1, pp. 99-113.
 20. Timoshenko, S. P., Goodier, J. N. (1969), Theory of Elasticity, McGraw-Hill, New York.
 21. Wang, Y. (1994), "Ground response of circular tunnels in poorly consolidated rock", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 122, No. 9, pp. 703-708.



신 영 진

Purdue 대학교
박사후 과정

E-mail: iamjshin@gmail.com



김 병 민

고려대학교
지하공간 건설기술 연구단
선임연구원

E-mail: byoungmin@gmail.com



신 종 호

건국대학교
토목공학과
교수

E-mail: jhshin@konkuk.ac.kr



이 인 모

고려대학교
건축사회환경공학과
교수

E-mail: inmolee@korea.ac.kr