

터널 굴착시 지하수 저하로 인한 지반침하에 관한 연구

유충식¹, 김선빈^{2*}

A study on ground surface settlement due to groundwater drawdown during tunnelling

Chung-Sik Yoo, Sun-Bin Kim

Abstract This paper presents the results of investigation on tunnelling-induced ground surface settlement characteristics in water bearing ground using finite element (FE) stress-pore pressure coupled analysis. Fundamental interaction mechanism of ground and groundwater lowering was first examined and a number of influencing factors on the results of the coupled FE analysis were identified. A parametric study was then conducted on the influencing factors such as rock type, thickness of soil layer, permeability of shotcrete lining, among others. The results indicate that the tunneling-induced groundwater drawdown results in a deeper and wider settlement trough than without groundwater drawdown, and that the Error function approach does not yield satisfactory result in predicting a settlement profile. The results of analysis are summarized so that the relationship between the settlement and the influencing factors can be identified.

Keywords: Tunnelling, Groundwater, Settlement, Finite element analysis

요 지 본 논문에서는 터널시공시 지하수 저하를 동반하는 시공조건에서 발생하는 지표침하 특성에 관한 연구내용을 다루었다. 이를 위해 먼저 지하수 저하로 인한 지반침하 문제에 대한 국내의 기존연구내용을 살펴보았으며, 지하수 유동시 응력-간극수압 상호작용이 고려된 유한요소해석 모델을 구축하고 이론적 검증을 통해 유한요소해석 모델의 타당성을 검토하였다. 구축된 유한요소해석 모델을 토대로 다양한 시공조건에 대한 매개변수 연구를 수행하고 그 결과를 토대로 지하수 유동시 지반침하에 영향을 미치는 주요 인자를 검토하였으며, 아울러 터널시공이 지하수 저하를 동반하는 시공조건에서의 지표침하 특성을 기존의 이론과 연계하여 고찰하였다.

주요어: 터널굴착, 지하수, 지표침하, 유한요소해석

1. 서 론

터널 굴착이나 지하수 양수, 혹은 그 밖의 각종 공사로 인해 발생하는 지반침하는 도로 및 철도 등 국가 기간망의 안전에 심각한 위함요소로 작용하고 있으며, 특히 인구 및 각종 산업시설이 밀집되어 있는 도심지 지역에서는 가옥과 시설물의 붕괴요인으로 작용할 수 있다. 지표침하는 지표구성 물질의 이동에 의한 점진적인 안정화 현상이거나 지반 혹은 암반의 지지력이 상실되어 발생하는 지표함몰로 구분될 수 있으며, 유형별로는 폐광산 상부 지반에서 발생하는 침하, 연약지반의 압밀침하, 석고나 암염과 같은 용해되기 쉬운 암석들에 의한 싱크홀, 영구 동결층의 용해 등으로 인한 침하 등 다양한 원인으로

로 나타나고 있다. 최근에 자주 나타나는 침하의 원인으로는 도시화와 공업화가 가속화됨에 따라 대규모 아파트 단지나 공장 등이 시공조건이 좋지 않은 연약지반에 시공되는 경우가 많아 발생하는 침하 및 도심내에서의 교통해결을 위해 시공되는 지하철과 같은 터널공사로 인한 침하가 증가되고 있는 실정이다. 일반적으로 터널 굴착은 내부 지지력의 상실과 지반손실을 가져와 토립자간에 큰 전단변형을 유발시키고 이러한 영향들이 지표까지 전달되어 침하를 발생시키기도 하나 지하수위 하에서 시공되는 경우 지하수 저하를 동반하여 침하가 발생하기도 한다.

최근 국내에서는 도심지 등에서의 터널굴착으로 인해 지하수위 저하를 동반한 지표침하 발생사례가 증가하고 있으며 특히 한강이 가로지르는 서울지역에서 그 피해사례가 늘고 있다. 그럼에도 불구하고 지하수 저하로 인한 지반침하는 그동안 그다지 관심있게 인식되지 못하여 왔다. Terzaghi(1925)는 간극수압 소산과 지반내 응

¹정회원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수

²정회원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정

*교신저자: 김선빈 (ksb9677@hanmail.net)

력과 관계로부터 유효응력의 원리에 기초를 둔 압밀 이론을 제안하였으며, 비슷한 시기에 미국 지질조사소(USGS)에서는 지하수 양수로 인한 대수층의 압축 현상을 밝힌 바 있다. 이후 지하수위 저하로 인한 지반침하에 관한 문제는 주로 지하수 양수에 의한 침하연구를 통해 진행되었으며, 특히 지속적인 개발과정에서 해안 도시를 중심으로 지하수 양수로 인한 지반침하 피해사례가 많은 중국에서 비교적 활발한 연구가 수행된 바 있다(Shen 등, 2006; Qiao & Liu, 2006; Xu 등, 2006). 이들 연구에서는 지하수 양수시 지반침하량을 예측하기 위한 방안으로서 단계적 수치모델을 적용한 것으로 보고하고 있다. 먼저 Xue 등(2003)과 Chai 등(2005)은 수치 시뮬레이션 초창기 모델로서 중국 상하이 도심지 지역에 대한 침하를 예측하기 위하여 1차원 침투와 압밀과의 관계를 컴퓨터 코드화 하여 구축하였는데 광범위한 지역을 대상으로 하기는 어려운 문제가 있는 것으로 보고된 바 있고, Chen과 Pei(2001), Zhang과 Xue(2002)는 two-step 모델, 즉 침투해석을 통해 지하수위 변화를 먼저 예측한 후 지하수위에 따라 각 지층에서의 유효응력과 지반변형을 계산하여 각 지층에서의 침하량을 합한 총 침하량을 산정하는 방법을 제안한 바 있다. 보다 진보된 형태의 모델로서 Shen 등(2004)과 Xu 등(2005)은 3D 지하수 침투와 1차원 압밀이론을 결합한 형태의 모델링 방법으로서 유효응력과 간극비와의 관계를 고려할 수 있는 모델을 제안하였다. 그러나 이 모델 역시 2D 조건에서만 적용가능하다는 한계를 지니고 있어 향후 지속적인 연구가 필요한 것으로 보고되고 있다.

한편 지하수위 하에서 터널을 굴착하는 과정에서 발생하는 지하수위 저하와 지반침하에 관한 연구는 국내 외에서 아직까지 활발하게 보고되고 있지는 않은 실정이다. Yoo(2005)는 3차원 응력-간극수압 연계해석을 통해 터널굴착시 지하수 유동에 따른 막장거동 및 지표변위 특성을 고찰하여 보고한 바 있는데, 연구결과에 의하면 터널굴착시 지하수 상호작용에 의한 영향으로 지하수가 저하되면서 지표침하량 및 변위가 증가되며 수평성분에 비해서는 연직성분의 변위가 증가하는 경향을 보이는 것으로 분석된 바 있다.

본 논문에서는 이와 관련된 연구로서 터널굴착시 지하수위 저하로 인한 지표침하의 기본적인 메커니즘과 지하수위 저하를 동반하는 경우 침하특성 및 침하에 영

향을 미치는 인자들에 대해 다각적으로 분석한 내용을 다루었다.

2. 지하수위 저하시 지반침하 메커니즘

일반적으로 지하수위 하에서 터널이 시공되는 경우에는 터널내부로 지하수가 유입이 되면서 수두차이로 인해 지하수 유동이 발생하게 되며 이로 인하여 포화상태 지반의 간극수가 빠져나가 지반내 간극수압의 변화가 유발되며 따라서 지하수위 저하가 발생하게 된다(그림 1).

이러한 지반내 간극수압의 변화는 Terzaghi(1925)가 제안한 유효응력의 원리로부터 지반내 연직응력(σ)과 유효응력(σ') 및 간극수압(p)는 다음의 관계가 성립하게 된다.

$$\sigma = \sigma' + p \quad (1)$$

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma' + \Delta p \quad (2)$$

지반내 상재하중의 변화없이 지하수위 변화가 발생하게 되면 $\Delta\sigma = 0$ 이 되므로 식 (2)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

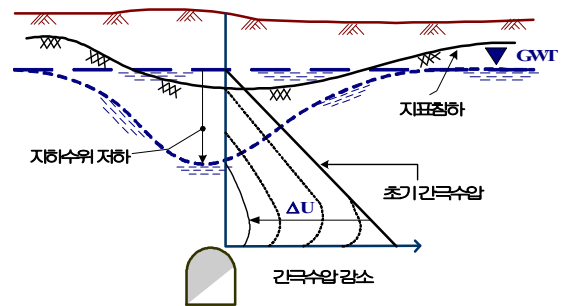


그림 1. 터널 시공시 지반침하 메커니즘

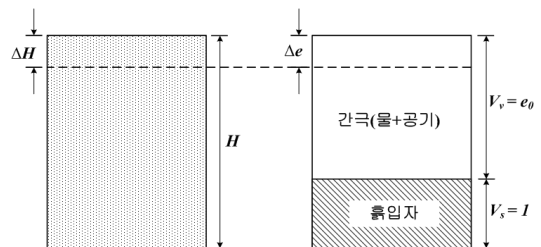


그림 2. 지하수 저하로 인한 침하

$$\Delta\sigma' = -\Delta p \quad (3)$$

따라서 지하수위 저하로 인해 간극수압이 감소하게 되면 유효응력은 증가하게 되며, Terzaghi의 압밀이론에 의한 다음의 식 (4)로부터 지반내 간극률의 변화로 인한 지반변형이 발생하게 된다.

$$S_c = \frac{\Delta e}{1+e_0} H, \Delta e = f(\Delta\sigma') \quad (4)$$

여기서 H 는 터널 상부에서 초기 지하수위까지의 높이, e_0 는 초기 간극비, Δe 는 지하수 저하로 인해 발생하는 간극의 변화량을 의미하며, Δe 는 지하수위 저하로 인한 유효응력의 변화량 $\Delta\sigma'$ 와 직접적으로 연관된다. 따라서 결국 지하수 저하로 인한 지표침하하는 간극의 변화로 인한 체적변화가 큰 비중을 차지하게 된다.

3. 유한요소해석

3.1 연계해석 기본이론

본 장에서는 터널굴착시 지하수위 저하로 인한 지표침하에 관한 기본적인 메커니즘 분석을 위하여 응력-간극수압 연계해석을 수행한 내용을 다루었다. 지하수 유동이 발생하여 간극수압의 변화가 예상되는 지반공학 문제에 대한 유한요소해석에서는 대상 지반의 역학적 거동이 유효응력에 지배되므로 응력과 간극수압이 연계된 해석(stress-pore pressure coupled analysis)을 수행하여야 현실적인 평가가 가능하다. 연계해석에서는 지반을 다상재료(multiphase material)로 간주하고 유효응력 개념을 적용하여 거동을 표현한다. 다공성 매질은 그 내부에 비압축성으로 가정되는 “wetting liquid”와 압축성을 지닌 “gas”의 두 유체가 존재하는 것으로 모델링하며, 완전 포화시 간극은 wetting liquid로 채워진 것을 의미한다. 이하 논문에서 wetting liquid는 지하수, gas는 공기라 칭하도록 한다. 지반내 임의지점의 요소(element)의 부피를 dV 라 하고 간극의 부피를 dV_v , 간극수의 부피를 dV_w 라 할 때, 완전 포화상태에서는 $dV_w = dV_v$ 이나 부분적인 포화상태인 경우 즉, $dV_w \leq dV_v$ 가 되면 지하수의 일부는 입자에 흡착되어 dV_t 부피를 갖는 흡착수(trapped liquid)가 된다. 유효응

력 σ' 의 식은 다음의 식 (5)로도 나타낼 수 있다.

$$\sigma' = \sigma + [\chi u_w + (1-\chi)u_a]I \quad (5)$$

여기서 χ 는 물-입자 간 표면장력과 포화도에 관한 계수로 0과 1사이의 값을 가지게 되는 값으로 실험 데이터나 경험적인 증거의 빈약함 때문에 단순히 포화상태로 가정하여 1로 간주하여 무시하는 경우가 많다. 간극내에 존재하는 공기는 해석구간의 전영역에 걸쳐 일정하고 시간에 따라 변하지 않는 것으로 가정하며, 그 값은 무시해도 되리만큼 작은 값이다. 따라서 공기압 u_a 를 일반적인 대기압으로 간주하여 식에서 제거가 가능하므로 식 (6)과 같이 단순화 될 수 있다.

$$\sigma' = \sigma + \chi u_w I \quad (6)$$

또한 요소내 흡착수(trapped fluid)가 존재하는 경우 흡착수의 함수로 나타내면 유효응력 σ' 는 흡착수의 평균응력 \bar{p}_t , 흡착수의 간극률 n_t 에 관한 아래의 식 (7)로 표현된다.

$$\sigma' = (1-n_t)\sigma - n_t \bar{p}_t I \quad (7)$$

연계해석에서 다공성 매질에 대한 평형방정식은 가상일의 원리를 이용하여 다음의 식 (8)로 표현된다.

$$\int_V \sigma : \delta \epsilon dV = \int_S t \cdot \delta v dS + \int_V \hat{f} \cdot \delta v dV \quad (8)$$

여기서, δv 는 가상의 속도, $\delta \epsilon = sym(\partial \delta v / \partial x) =$ 가상의 변형율, $\sigma =$ 실제 응력, $t =$ 단위 면적당 면력(surface traction), $\hat{f} =$ 단위 체적당 체력(body force).

또한 f_w 를 \hat{f} 중에서 지하수에 해당하는 체력으로 정의하여 식 (9)와 같이 표현하며, $f = \hat{f} - f_w$ 라 할 때 가상의 일에 대한 평형방정식은 식 (10)으로 정리될 수 있다

$$f_w = (s n + n_t) \rho_w g \quad (9)$$

$$\int_V \sigma : \delta \epsilon dV = \int_S t \cdot \delta v dS + \int_V f \cdot \delta v dV + \int_V (s n + n_t) \rho_w \cdot \delta v dV \quad (10)$$

여기서, $s =$ 포화도, $n =$ 간극률, $\rho_w =$ 물의 질량,

g = 중력가속도

이러한 유한요소모델의 평형방정식은 보간함수(interpolation function)를 이용하여 해를 찾게 된다. $N^N(S_i)$ 를 원좌표에 대해 정의된 보간함수라 하고, $\beta^N = sym\left(\frac{\partial \delta N^N}{\partial x}\right)$ 라 할 때 가상의 속도는 $\delta v = N^N \delta v^N$, 가상의 변형률은 $\delta \varepsilon = \beta^N \delta v^N$ 로서 보간이 가능하며, 식 (10)은 식 (11)과 같이 이산화된다.

$$\delta v^N \int_V \beta^N : \sigma dV = \delta v^N \left[\int_S N^N \cdot t dS + \int_V N^N \cdot f \delta v dV + \int_V (s_n + n_t) \rho_w N^N \cdot g dV \right] \quad (11)$$

각 변에 있는 δv^N 를 소거하면 좌변 항은 내력(internal force)을, 우변 항은 외력(external force)을 나타내며 따라서 위 식 (11)에 대한 해가 응력과 간극수압이 연계된 해석 결과가 된다. 위와 같이 응력-간극수압 연계해석에서는 지반의 응력-변형 관계를 나타내는 구성방정식과 더불어 불포화토의 모관흡수력과 포화도, 그리고 모관흡수력

과 투수성의 관계등 다양한 관계식이 필요하게 된다.

3.2 대상조건

해석에서 고려한 시공조건은 직경(D) 10 m의 터널이 지표면으로부터 3D/5D/7D 하부에 시공되며, 대상 지반은 지표상부에 실트질 모래로 이루어진 매립토 및 충적토의 토사층이 위치하고 그 하부에는 표 2에서 제시하고 있는 암반이 위치하는 조건을 고려하였다. 지하수위는 지표(G.L -0.0 m)에 위치하는 조건으로 간주하였다. 터널 라이닝의 두께는 굴착암반의 공학적 특성에 따라 달라지나 본 검토에서는 편의상 라이닝의 두께가 20 cm인 것으로 간주하였으며 록볼트가 1.5 m간격으로 설치되도록 하였다. 또한 원거리 경계에서 지하수가 유입되어 터널시공시 지하수위가 저하되는 조건만을 해석 대상조건으로 하였다.

터널내 지하수 유입은 슛크리트의 투수계수를 $2 \times 10^{-7} \sim 2 \times 10^{-5}$ cm/sec의 범위에서 변화시켜 용수량을 조절하였으며, 토사층의 두께는 표 1에서 제시한 바와 같이 토피고 및 초기지하수위에 따라 0.5~3.0D 범위에 있는 조건을 대상으로 하였다. 표 1은 본 연구에서 수행한 해석 조건을 정리하고 있으며, 해석에서 고려한 지반 및 암반의 역학적

표 1. 본 장에서 수행된 해석조건

토피고/초기 지하수위	암반조건	토사두께	스�크리트 투수계수 (cm/sec)
3D	II	1.5D	$2 \times 10^{-5} / 2 \times 10^{-6} / 2 \times 10^{-7}$
	III	1.0D/1.5D	$2 \times 10^{-5} / 2 \times 10^{-6} / 2 \times 10^{-7}$
	IV	0.5D/1.0D/1.5D	$2 \times 10^{-5} / 2 \times 10^{-6} / 2 \times 10^{-7}$
5D	II	3.0D	$2 \times 10^{-5} / 2 \times 10^{-6} / 2 \times 10^{-7}$
	III	2.0D/3.0D	$2 \times 10^{-5} / 2 \times 10^{-6} / 2 \times 10^{-7}$
	IV	1.0D/2.0D/3.0D	$2 \times 10^{-5} / 2 \times 10^{-6}$
7D	II	3.0D	$2 \times 10^{-5} / 2 \times 10^{-6} / 2 \times 10^{-7}$
	III	2.0D/3.0D	$2 \times 10^{-5} / 2 \times 10^{-6} / 2 \times 10^{-7}$
	IV	1.0D/2.0D/3.0D	$2 \times 10^{-5} / 2 \times 10^{-6}$

표 2. 해석에 고려된 각 지층 및 지보재의 역학적·수리학적 특성

구분	단위중량 γ (kN/m ³)	탄성계수 E (kPa)	프아송비 ν	점착력 c (kPa)	내부마찰각 ϕ (°)	투수계수 k (cm/sec)	
토사층	25	50,000	0.3	30	30	5.8×10^{-3}	
굴착암반	II	25	4,000,000	0.3	200	40	3.0×10^{-8}
	III	25	2,500,000	0.3	150	38	5.0×10^{-6}
	IV	25	100,000	0.3	50	30	1.3×10^{-4}
록볼트	1	200,000,000	0.3	-	-	-	
스�크리트	25	15,000,000	0.3	-	-	variable	

수리학적 특성은 표 2에서 제시된 수치를 사용하였다.

3.3 유한요소해석 모델링

3.3.1 해석모델

해석 프로그램은 범용 유한요소해석 패키지인 ABAQUS 6.5 (ABAQUS Users Manual, 2005)를 사용하였다. 터널 굴착의 모델링에 있어서 해석의 편의상 전단면 굴착으로 시공되는 것으로 가정하였으며 터널 중심축으로부터 좌우 대칭인 점을 고려하여 우측 반단면에 대한 2차원 해석을 수행하였다. 해석 모델링에서는 토피고에 따라 수평경계범위를 토피고가 3D인 경우 터널 중심축으로부터 약 15D, 토피고가 5D인 경우 20D, 토피고 7D의 경우 25D의 거리에 위치시켜 수평방향으로의 변위를 구속하였으며, 터널 바닥으로부터 약 1.5~4.0D 하부에 수평롤러를 설치하여 연직방향의 변위를 구속하였다. 지반 및 숏크리트의 이산화는 응력-간극수압 연계해석이 가능한 8절점 가감 적분 응력-간극수압 연계요소

(CPE8RP)를 적용하여 모델링 하였다. CPE8RP 요소의 변위 성분 및 간극수압 성분에 관한 자유도(Degree of freedom, DOF)와 적분점(Integration point)를 그림 3에서 유한요소망과 함께 보여주고 있으며 요소에 관한 보다 자세한 내용은 ABAQUS users manual(2005)에 제시되어 있다.

수리적 경계조건으로 터널의 횡단면 중심축과 일치하는 단면($x=0$)에는 no-flow의 경계조건을 부여하였으며 그 밖의 측면경계와 하부경계에는 초기조건으로 부여한 수압이 일정하게 유지되도록 하였다. 아울러 연계해석 과정에서 원 지하수위 위치인 수평경계면에 no-flow 경계조건을 부여하여 지하수의 터널내부로의 유입은 연직 및 하부경계를 통해서만 이루어지도록 하였으며, 터널굴착과 함께 발생하는 지하수의 유입에 대한 모시는 그림 4에서 보이는 바와 같이 무지보 굴착단계에서는 굴착면의 수리적 경계조건을 $u=0$, 숏크리트 타설후에는 숏크리트 내공 절점의 수리적 경계조건을 $u=0$ 으로 모델링하였다.

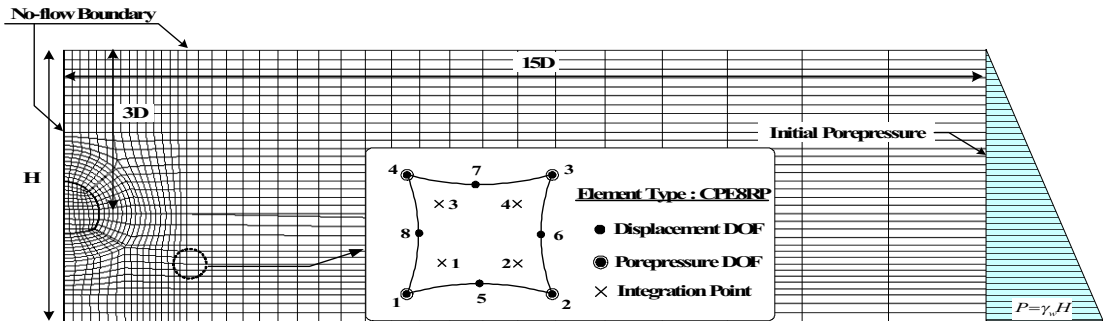


그림 3. 해석에 적용된 유한요소망(토피고, 초기지하수위 3D) 및 요소타입

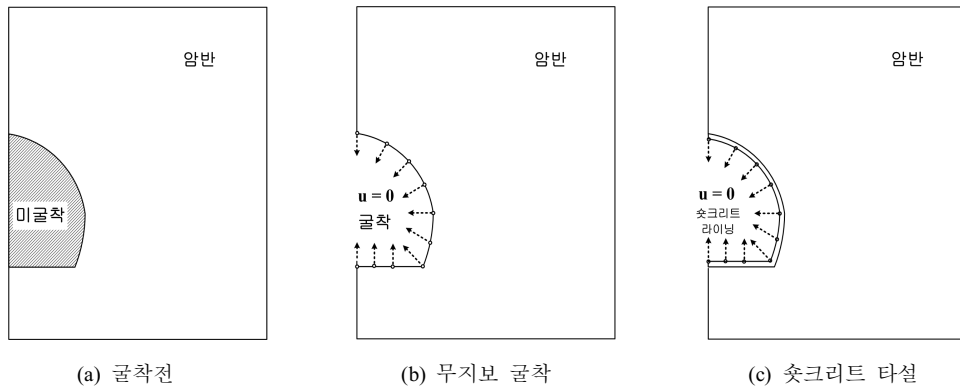


그림 4. 터널 굴착 및 숏크리트 타설 후 터널내 지하수 유입 모델링

터널 굴착과정의 모사를 위해 적용한 하중분담율은 굴착단계(30%) → 숏크리트 연화단계(40%) → 숏크리트 경화단계(40%)로 적용하였다.

해석 대상 지층은 Mohr-Coulomb 항복규준을 따르는 비적합 탄소성 재료로 가정하였으며 상부 토사층의 불포화기동 모델링을 위한 SWCC(Soil Water Characteristic Curve)는 기존의 문헌연구결과를 토대로 그림 5와 같이 적용하였다. 한편, 지반의 투수계수는 이방성을 나타내는 것이 일반적이거나 또 다른 변수의 도입으로 인한 결론 도출의 어려움을 피하고자 지반의 투수성은 등방인 것으로 가정하였다.

3.3.2 연계해석 모델검증

1) 이론적 검증

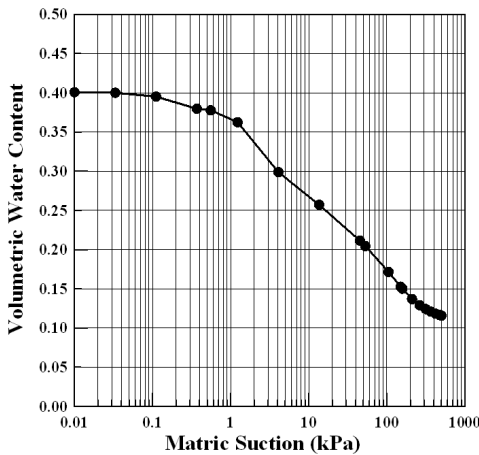


그림 5. 풍화토에 적용된 SWCC

본 논문에서 고려한 연계해석 모델을 검증하기 위하여 그림 6과 같은 가상의 모델박스를 이용하여 Terzaghi의 압밀이론에 근거한 계산결과를 해석결과와 비교하였다. 먼저 Terzaghi의 압밀이론에 근거한 계산은 배수밸브를 통하여 지반내 간극수를 강제 배수시킴으로써 하향침투를 유도한 경우에 대해 간극수가 모두 배출되는 임의의 시점에서의 침하량을 식 (12)를 이용하여 산정하였다.

$$S = \int_0^H \frac{\Delta e}{1+e_0} dz \quad (12)$$

여기서 S =침하량, e_0 =초기 간극비, Δe =간극비 변화량, H =시료높이, z =지반내 임의 깊이를 나타내며, 시료의 물성은 $E=50,000 \text{ kPa}$, $c=30 \text{ kPa}$, $\phi=30^\circ$, $k=5.8 \times 10^{-3}$

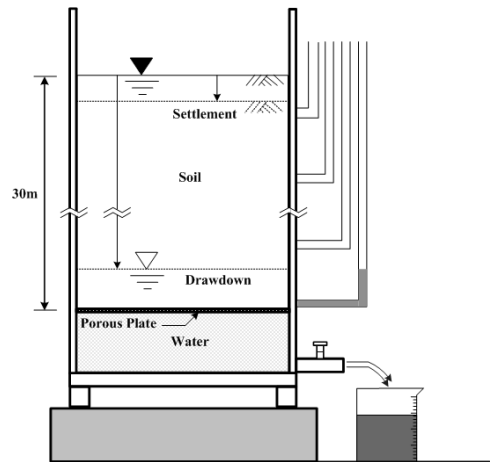
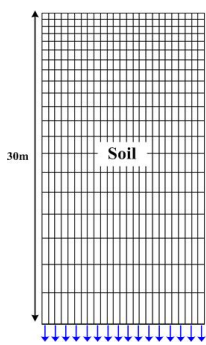
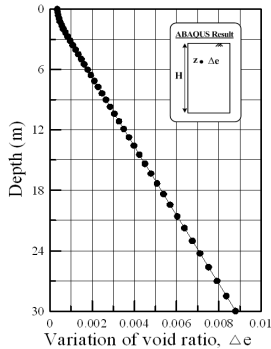


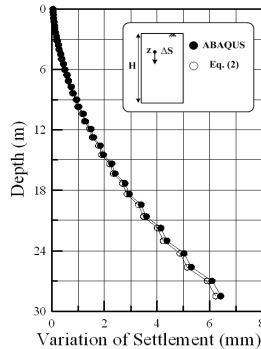
그림 6. 가상의 모델박스



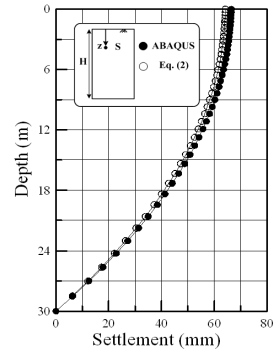
(a) 해석메쉬



(b) Δe



(c) ΔS



(d) S

그림 7. 모델박스의 해석메쉬 및 깊이별 침하량 비교

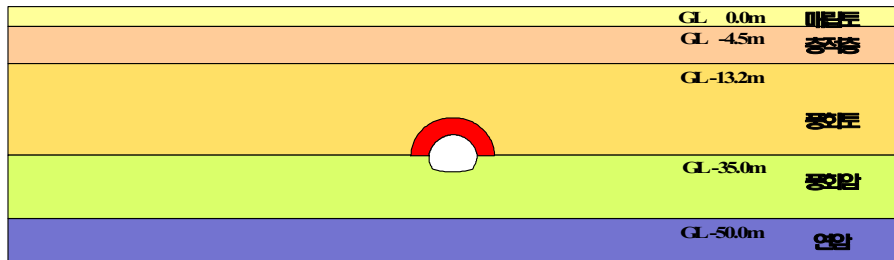
cm/sec, $e_0=1.0$ 로 적용하였다. 그림 7은 모델박스에 대한 해석메쉬와 임의 시간에서의 깊이별 간극비 변화량과 해당위치에서의 상대침하량을 보여주고 있으며, 해석결과 중 그림 7(b)에서 보여주고 있는 임의시간에서의 깊이별 간극비 변화량(Δe)을 식 (12)에 적용하여 깊이별 상대침하를 계산한 결과를 그림 7(c)에서 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 시료 하단부에서의 상대침하량이 6.5 mm 정도로 가장 크게 나타나고 있으며, 이론식 적용결과와 해석결과가 거의 일치하고 있음을 볼 수 있다. 또한 이와같이 산정한 깊이별 상대침하량을 합하여 지표에서의 침하량을 비교한 결과를 그림 7(d)에서 나타내고 있는데 지표침하량이 각각 66 mm와 64 mm로 나타나 오차는 2 mm로 3% 이내인 수준으로 나타났다. 이러한 오차는 이론식 적용시 깊이별 임의 지점에서의 간극비 변화량(Δe)을 평균하여 계산한데 따른 결과이므로 본 논문에서 적용한 연계해석 모델이 타당한 것으로 판단되었다.

2) 현장 계측결과 검증

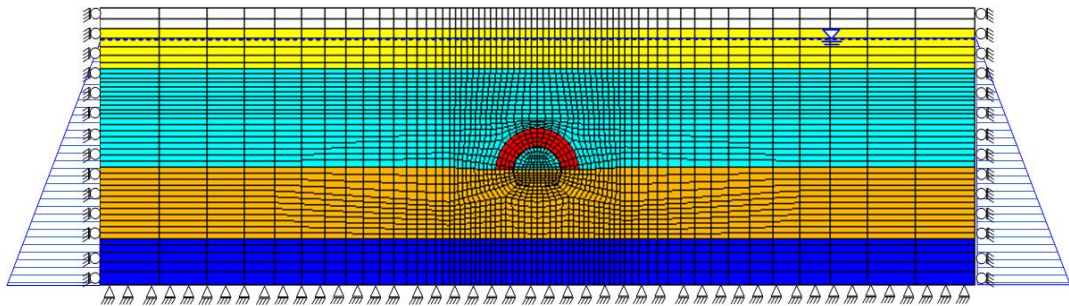
다음은 본 논문에서 적용한 해석모델을 검증하는 차

원에서 국내 ○○공구 터널현장의 지표침하 계측결과와 해석결과를 비교한 내용을 기술하고 있다. 그림 8(a)는 대상현장의 단면도를 보여주고 있는데, 대상현장의 지층은 매립층, 충적층, 풍화토, 풍화암, 연암 순으로 분포하며, 지하수위는 GL -4 m 정도에 위치하고 있다. 터널은 풍화토와 풍화암의 경계부에 시공되어 터널주변에 강관다단그라우팅 및 차수그라우팅이 적용되었다. 대상구간의 해석모델은 3.3.1절에서 기술한 모델링과 동일한 방법으로 모델링 하였으며 적용한 물성은 대상 현장의 지반조사보고서 내용을 토대로 하였다. 그림 8(b)에서는 대상현장의 대표단면 2차원 유한요소망을 보여주고 있다.

그림 9는 대상현장의 터널시공과정을 모델링하여 해석결과로부터 얻은 터널직상부에서의 침하량을 계측결과와 비교한 그림이다. 그림 9에서 보이는 바와같이 계측결과에 근접하여 해석결과가 나타나고 있음을 볼 수가 있는데, 대상현장 지층조건 및 시공과정에서의 각종 변수들을 고려할 때 해석에서 얻은 결과는 계측결과와 잘 일치한 것으로 간주할 수 있다. 따라서 본 논문에서 고려하는 해석조건에 대해 연계해석 모델의 적용이 가



(a) 대상현장 단면도



(b) 대상현장 대표단면 2차원 유한요소망

그림 8. 대상 터널현장 계측지점 단면도 및 유한요소망

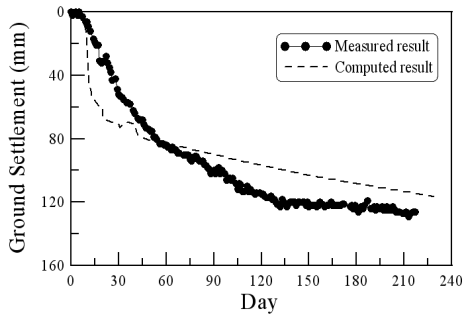


그림 9. 계측결과와 해석결과 지표침하 이력곡선 비교 가능한 것으로 판단되었다.

4. 지하수 저하시 지표침하 메커니즘 고찰

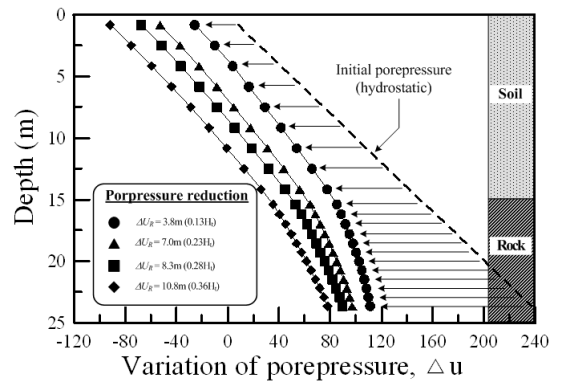
4.1 침하 메커니즘

지하수위 하에서 터널이 시공되는 경우 터널내부로 용수가 배출됨으로 인해 지표침하가 발생하게 된다. 그림 10의 지반내 간극수압과 유효응력, 간극비의 변화로부터 이와같은 침하 메커니즘의 파악이 가능하다. 그림 10은 토 피고 및 초기지하수위가 3D이며, 토사층의 두께는 1.5D, 슛크리트의 투수계수가 $2 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ 인 조건에 대한 결과를 제시한 것이다. 터널 굴착과 함께 터널 내부로 지하수가 배출이 되면 터널 상부 지반과의 수두차이로 인하여 정상류 상태에 도달하기 까지 계속적인 지하수 유동이 발생하게 되며, 지하수 유동으로 인한 터널 상부지반의 간극수압의 변화가 야기된다. 이러한 지반내 간극수압의 변화는 Terzaghi 압밀이론에 근거하여 그림 10과 같이 유효응력이 증가하게 되며, 지반내 간극비의 변화가 초래되어 침하가 발생한다. 따라서 지하수위 하에서 터널이 시공되는 경우에는 터널굴착으로 인해 야기되는 내부 지지력의 상실로 인한 지반손실 뿐만 아니라 터널 내부로의 배수로 인한 지반내 간극수압과 유효응력의 변화 및 간극비 감소에 의한 연직성분의 침하가 증가하게 된다.

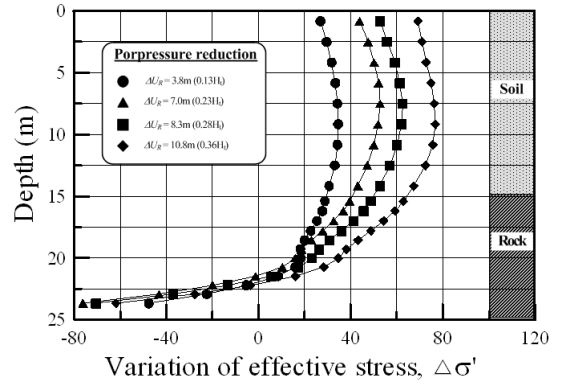
4.2 지표침하 특성

1) 횡방향 지표침하

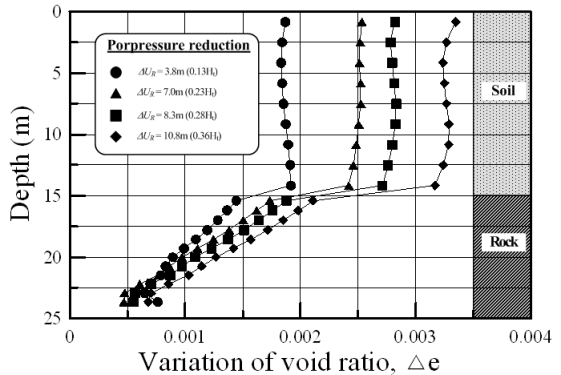
앞서 살펴본 바와 같이 지하수위 하에서 터널굴착은 암반내 배수구를 설치하는 것과 같아서 터널내부로 지하수가 유입되게 되며, 외부로부터의 유입량이 이보다



(a) 간극수압



(b) 유효응력 변화



(c) 간극비 변화

그림 10. 지하수위 저하에 따른 지반내 간극수압 및 유효응력, 간극비 변화

작을 경우 지하수위가 저하되게 된다. 일반적으로 지하

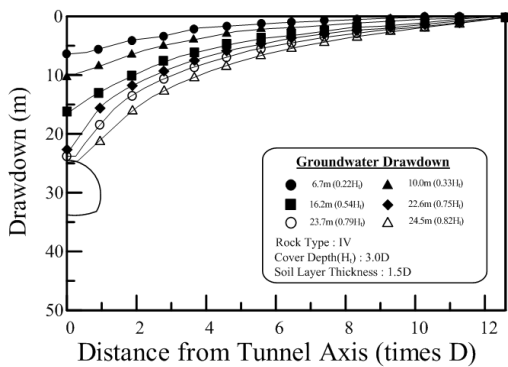
수위 저하를 동반하는 터널시공조건에서는 지표침하가 광범위하게 발생하는 것으로 알려져 있는데 다음의 그림 11은 지하수위 하에서 터널이 시공되는 경우에 대한 시공 완료 후 지하수위 저하 및 지표침하곡선을 보여주고 있다. 그림 11(a)의 지하수위 저하곡선을 살펴보면 지하수위는 시공완료 이후에도 시간이 경과함에 따라 정상류 상태에 도달하기까지 저하가 계속되어 시공중 저하량의 두배 이상이 발생하고 있음을 볼 수 있다. 이와같은 지하수위 저하로 인해서 볼 수 있는 침하특성은 다음과 같다. 먼저 그림 11(b)를 보면 시공완료 직후의 지하수위 저하량 $0.22 H_i$ (H_i : 토포곡에서 지표침하량은 약 60 mm)가 발생하고 있으며, $0.54 H_i$ 만큼 저하시 지표침하량은 약 72 mm, $0.79 H_i$ 만큼 저하시 지표침하량은 80 mm 가량 발생하고 있어 터널굴착 완료 이후에도 지하수위 저하로 인한 지표침하가 추가로 발생하고 있음을 볼 수

있다. 그림 11(c)에서는 이와같은 지하수위 저하와 지표 침하와의 관계를 보여주고 있는데 전반에 걸쳐 선형관계에 있는 것을 확인할 수 있다.

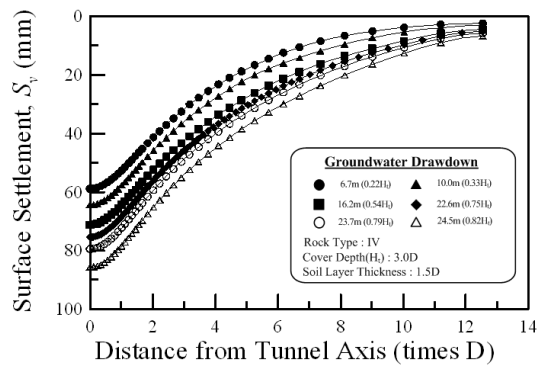
터널굴착에 따른 지표침하는 일반적으로 식 (13)으로 정의되는 오차함수(error function)을 잘 따르는 것으로 보고되고 있는데(Peck 1969), 지하수 저하를 동반하는 경우 침하가 보다 광범위하게 나타나므로 이와같은 오차함수의 적용이 가능한지 여부를 검토할 필요가 있다

$$S_v = S_{max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (13)$$

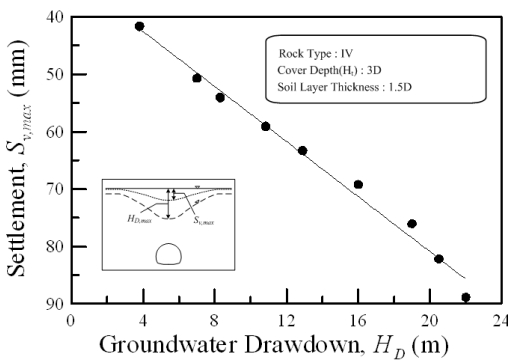
그림 11(d)는 그림 11(b)에서 보인 지표침하곡선의 지하수위 저하별 지표침하량(S_v)을 최종침하량($S_{v,max}$)로 정규화한 곡선과 오차함수곡선을 함께 도시하고 있다. 오차함수의 특성은 변곡점(i)에 따라 그 형태가 달라지



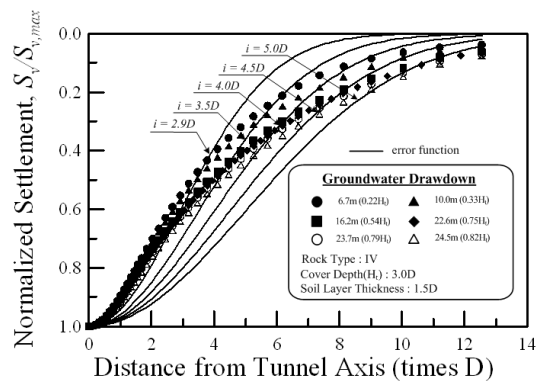
(a) 지하수위 저하곡선



(b) 지하수 저하에 따른 지표침하곡선



(c) 지하수위 저하별 지표침하



(d) 지표침하특성곡선과 오차함수

그림 11. 지하수위 저하에 따른 지표침하곡선

게 되는데 기존 연구결과에 의하면 i 가 $S_{v,max}$ 의 60% 수준의 침하발생지점인 $2.9D$ 인 경우 침하곡선과 잘 일치한다고 알려져 있으나 지하수위 저하를 동반하는 경우 지표침하곡선은 터널중심으로부터 약 $4.0D$ 범위까지는 그 형태가 오차함수곡선과 비교적 유사하게 나타나고 있으나 그 이상범위에서는 오차함수곡선에 비하여 더 광범위한 영역에서 발생함을 볼 수 있다. 또한 i 를 수정하여 도시한 경우의 오차함수곡선 역시 해석에서 얻어진 지표침하곡선과는 그 형태가 달라 터널굴착시 지하수위 저하를 동반하는 경우에서 지표침하량을 예측하기 위해 오차함수를 적용하는 것은 부적합한 것으로 파악되었다.

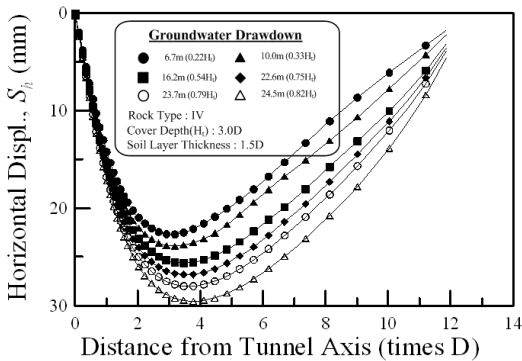
2) 지표 수평변위

수평변위의 경우 Attewell 등(1986)의 연구결과에 의하면 터널중심축으로부터의 거리 x 에서 해당위치의 침

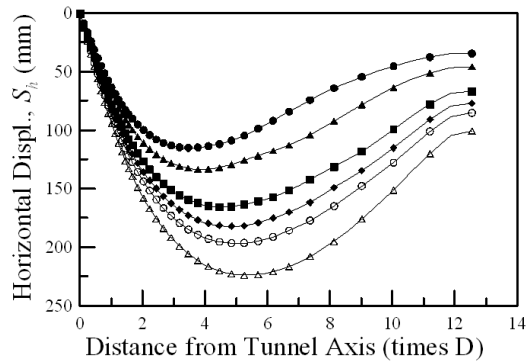
하량 $[S_v(x)]$ 과의 관계를 식 (14)와 같이 적용할 수 있다. 그러나 앞서 지표침하곡선에서 관찰된 바와 같이 지하수 저하를 동반하는 경우에서의 수평변위특성 또한 기존의 연구결과와는 차이가 있을 수 있으므로 이를 확인하는 차원에서 Attewell 등이 제안한 식의 적용이 가능한지 여부를 검토하였다.

$$S_h(x) = \frac{x}{D-z} S_v(x) \quad (14)$$

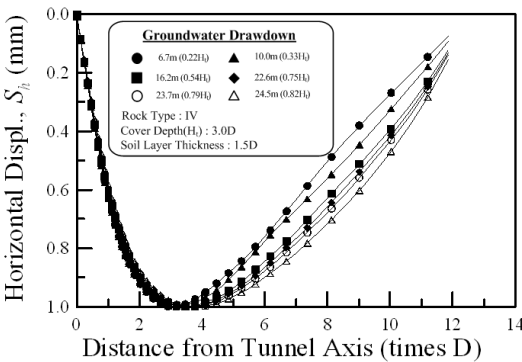
그림 12는 해석에서 얻어진 횡방향 수평변위곡선과 Attewell 등이 제안한 식을 적용한 결과를 비교하고 있다. 그림 12(a)는 해석에서 얻어진 횡방향 수평변위곡선을 나타낸 것이며, 12(b)는 해석에서 얻어진 지표침하곡선을 식 (14)에 적용하여 나타낸 곡선이다. 이들 곡선을 비교하면 Attewell 등이 제안한 식을 적용하여 산정한 횡방향 수평변위 결과가 해석에서 얻어진 수평변위에



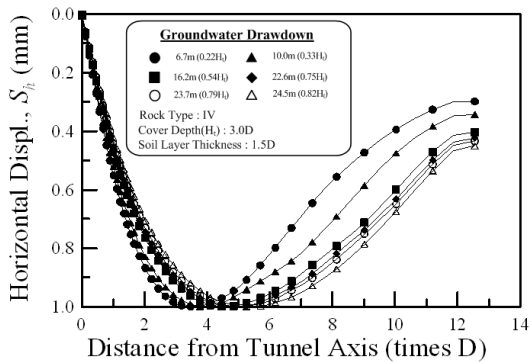
(a) 지표 수평변위 곡선 (raw)



(b) Attewell 등 제안식을 이용



(c) 지표 수평변위 곡선 (정규화)



(d) Attewell 등 제안식을 이용 (정규화)

그림 12. 지표 수평변위 프로파일

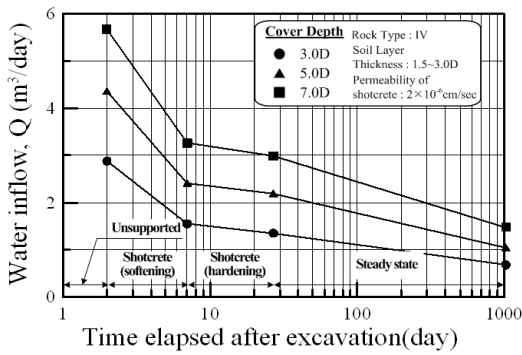
비하여 5~8배 가량 크게 평가하고 있음을 볼 수 있다. 아울러 그림 12의 (c)와 (d)는 그림 12의 (a)와 (b)를 각각의 최대수평변위($S_{h,max}$)로 정규화하여 도시한 그래프로서 수평변위 프로파일을 비교한 것이다. 비교결과에 따르면 해석에서 얻어진 수평변위 프로파일에서는 최대 수평변위 발생지점이 터널 중심으로부터 약 3.0D 위치로 일치하는데 비하여 Attewell 등의 제안식을 적용한 결과는 3.5~5.5D 범위에서 저하량이 클수록 최대수평변위 발생위치가 터널중심에서 외곽으로 이동하여 그 범위가 확대됨을 보여주고 있다. 이러한 결과는 터널 시공과정에서 지하수 저하를 동반하는 경우 지표변위 특성이 기존의 오차함수와 Attewell 등의 제안식을 따르지 않음을 보여주는 것으로서 지표변위 프로파일을 추정하기 위해 오차함수를 적용하게 되면 침하범위를 과소평가하게 되며, Attewell 등의 제안식을 적용하는 경우 수

평변위를 과대평가하게 된다.

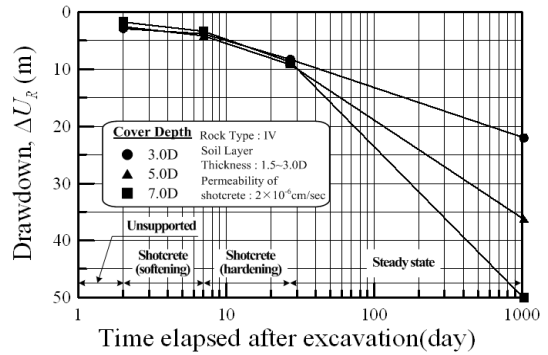
그림 11과 12에서 관찰된 지표침하특성과 횡방향 수평변위 특성을 종합하여 터널 굴착시 지하수 저하를 동반하는 경우의 지표변위 특성을 지하수 저하가 없는 경우와 비교하면 수평성분에 비하여 연직성분의 변위가 대체로 크게 발생되는 것으로 분석될 수 있다. 이는 앞서 기술한 바와같이 터널굴착으로 인해 야기되는 내부 지지력의 상실로 인한 지반손실 뿐만 아니라 배수로 인한 터널 상부지반의 간극비 감소에 원인이 있다고 하겠다.

3) 지표침하 이력곡선

그림 14는 지표침하 특성 중 초기 지하수위에 따른 지표침하 이력곡선의 특성을 보여주고 있다. 지표침하 이력곡선을 분석하기에 앞서 그림 13의 터널내 용수량과 지하수위 저하량을 먼저 살펴보면 터널내 용수량(Q)

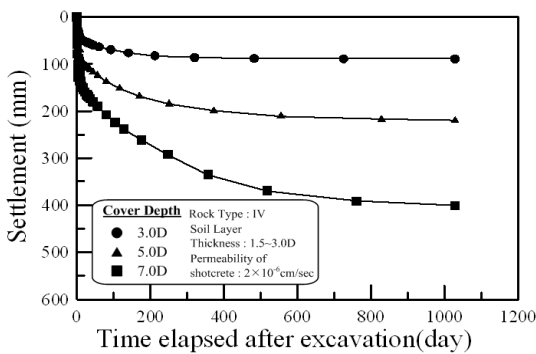


(a) 터널내 비용수량

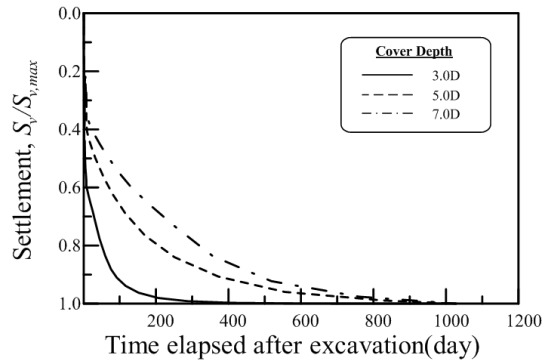


(b) 지하수위 저하량

그림 13. 초기지하수위에 따른 터널내 비용수량 및 지하수위 저하량



(a) 지표침하 이력곡선



(b) 지표침하 이력곡선 정규화

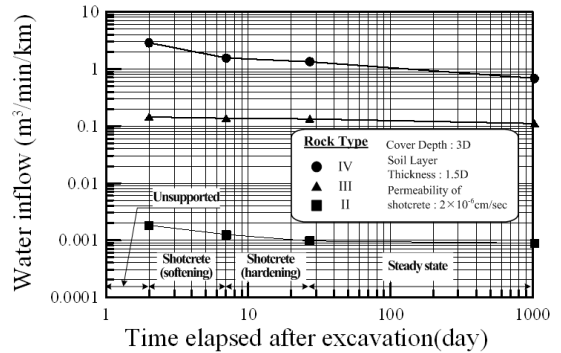
그림 14. 초기지하수위에 따른 지표침하 이력곡선

의 경우 초기지하수위가 높아짐에 따라 Q 가 비례하여 증가하는 경향을 볼 수 있으며, 지하수위 저하(지표에서의 수두변화, ΔU_R)의 경우는 시공중 30일 경과시까지 각각의 경우에 있어서 8~9 m 저하되어 비교적 일치하는 것으로 나타나고 있으나 정상류에 도달하기까지 초기지하수위가 큰 경우에서 저하량이 크게 나타나는 현상을 보이고 있다. 이같은 원인은 초기 지하수위가 3D로 비교적 작은 경우 지하수위가 터널 천단위까지 저하된 이후에는 터널로의 배수량과 외부로부터의 유입량이 평형을 이루어 추가 저하가 발생하지 않는데 비하여 초기지하수위가 큰 경우는 이러한 평형 상태에 도달하기 까지 계속 지하수위가 저하되기 때문이다.

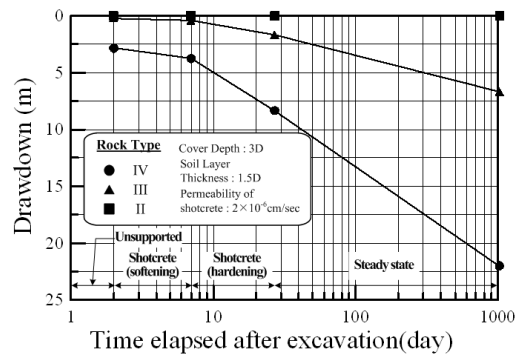
이러한 경향을 반영하여 그림 14의 지표침하 이력곡선은 지하수위 저하 수준에 따라 큰 차이를 보이는 것으로 나타나고 있다. 동일한 암반 조건임에도 불구하고 지하수위 저하량이 25~50 m로 두배 정도 차이가 나타남에 따라 지표침하량은 90~400 mm로 4배 이상의 차이를 보이는 것으로 나타나고 있다. 또한 초기지하수위가 큰 조건일수록 지표침하 이력곡선은 완만하게 나타나고 있음을 볼 수 있는데, 이러한 영향으로 지표침하가 수렴하는데 까지 소요되는 시간은 초기 지하수위가 3D인 경우 약 400일이며, 5D와 7D인 경우는 그 두배 이상인 1000일 정도로 나타나고 있다. 따라서 지하수위 하에서 터널 시공하는 조건에서 초기지하수위가 높은 경우에는 침하문제에 대하여 장기적인 유지 관리가 필요함을 보여준다.

5. 터널내 용수량과 지하수 저하 및 지표침하와의 관계

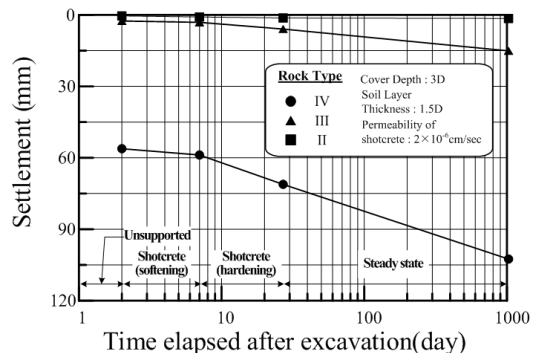
앞서 기술한 바와 같이 지하수위 하에서 터널을 시공하는 경우에는 지반 혹은 암반의 지지력 상실과 지반손실이 발생하여 지표침하가 발생하며, 또한 터널내부로 지하수가 유입됨으로써 지하수위 저하가 발생하게 된다. 본 장에서는 해석결과로부터 시간경과에 따라 터널내 유입수량과 지하수위 저하 및 지표침하와의 관계를 고찰하기 위한 분석을 수행하였다. 먼저 그림 15는 굴착의 종류에 따른 터널내 유입수량 및 터널직상부의 지표침하를 시간경과에 따라 나타낸 그림으로서 토피고 및 초기지하수위가 3D이며, 토시층의 두께는 1.5D, 슛크리트



(a) 터널내 비용수량



(b) 터널 직상부 지하수위 저하



(c) 터널 직상부 지표침하

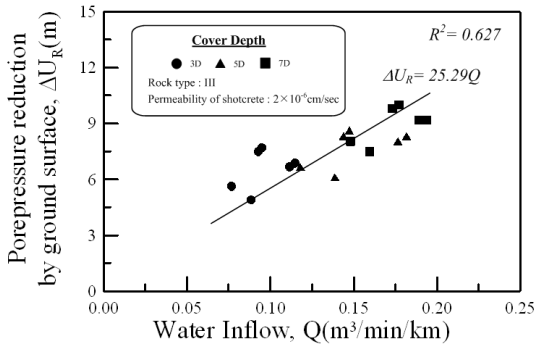
그림 15. 시간경과에 따른 터널내 비용수량 및 터널 직상부 지하수위 저하량

의 투수계수가 $2 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ 인 조건에 대한 결과를 제시하고 있다. 그림 15를 살펴보면 암반종류별로 결과가 큰 차이를 보이는 것을 볼 수 있는데 암반의 투수계수가 $1.3 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 로 투수성이 큰 암반종류 IV의 경우 터

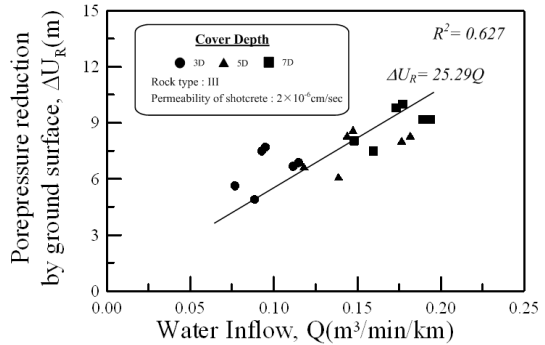
널내 비용수량은 굴착초기에 2.9 m³/min/km 가량으로 투수계수가 3.0×10⁻⁸ cm/sec와 5.0×10⁻⁶ cm/sec인 암반 종류 II와 III에 비하여 20~1,000배 크게 나타나고 있는데 시간 경과에 따라 점차 감소하여 정상류 상태에 도달시 0.7 m³/min/km에서 수렴하는 경향을 볼 수 있다. 한편 그림 15(b)와 (c)를 살펴보면 터널내 용수 발생정도에 따라 터널 상부에서의 지하수위 저하 및 지표침하가 현격한 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 암반종류 II와 같이 암반의 투수성이 매우 작아 터널내 용수량이 거의 발생하지 않는 경우에는 지하수위 저하 및 지표침하 발생량이 매우 작게 나타나고 있으나, 암반종류 IV와 같이 정상류 상태에 도달하기까지 0.7 m³/min/km 이상의 용수량이 발생하는 경우 지하수위가 터널 천단부 위

치까지 저하되며 지표침하 또한 100 mm 가까이 유발되고 있다. 이러한 결과로부터 터널내 용수량과 지하수위 저하 및 지표침하 관계에서 일정한 상관관계를 찾을 수 있을 것으로 판단되었다.

다음의 그림 16과 17은 해석결과로부터 터널내 용수량(Q)과 지하수위 저하(ΔU_R) 및 지표침하량(S_v)와의 상관관계를 정리한 그림으로서 초기지하수위(토피고)를 3D, 5D, 7D 범위로 하여 터널내 용수 발생량이 큰 암반 종류 III과 IV를 대상으로 결과를 제시하고 있다. 먼저 그림 16을 관찰하면 Q와 ΔU_R 의 관계가 일정한 선형관계를 이루고 있음을 볼 수 있어 터널내 용수량 발생이 큰 경우일수록 지하수위 저하량도 비례하여 발생하는 것을 알 수 있다. Q와 S_v 와의 관계 또한 그림 17에서

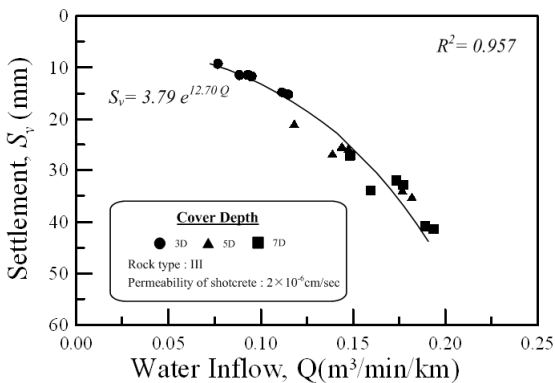


(a) 암반조건 III

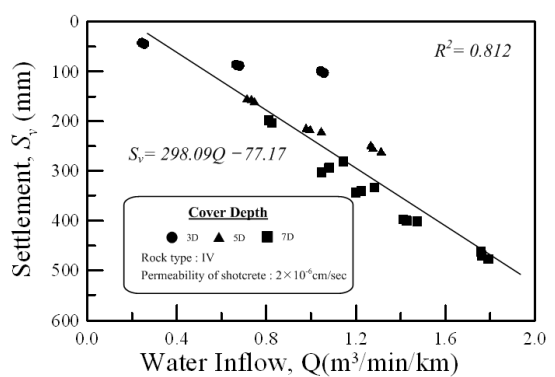


(b) 암반조건 IV

그림 16. 터널내 용수량-지하수 저하량 관계



(a) 암반조건 III



(b) 암반조건 IV

그림 17. 터널내 용수량-지표침하량 관계

보이는 바와같이 Q 가 증가함에 따라 S_v 가 증가하는 형태를 보이고 있는데, 암반종류 III과 같이 암반의 투수성이 작아 터널내 용수량이 적은 범위에서는 지수함수 형태를 보이고 있으며 암반종류 IV와 같이 투수성이 커 Q 가 $0.2 \text{ m}^3/\text{min}/\text{km}$ 이상인 범위에서는 선형관계를 나타내는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 굴착암반의 투수성이 큰 지반조건에서 배수터널로 시공되는 경우 지하수 저하를 동반한 지표침하가 추가로 발생할 가능성이 있으며, 침하가 문제시 되는 구간에서 이를 제어하기 위해서는 터널내부로 용수량을 제어하는 방안을 마련하는 것이 효과적임을 보여준다.

6. 결 론

본 논문에서는 터널굴착시 지하수위 저하로 인한 지표침하의 기본적인 메커니즘과 지하수위 저하를 동반하는 경우 침하특성 및 침하에 영향을 미치는 인자들에 대해 다각적으로 분석한 내용을 다루었다. 이를 위해 지하수 유동시 응력-간극수압 상호작용이 고려된 유한요소해석 모델을 이용하여 다양한 시공조건에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 지하수위 하에서 터널굴착시 터널내부로의 지하수 유입과 함께 지하수위 저하와 지표침하가 동시에 발생하게 되는데, 시공완료 후 지하수 흐름이 정상류 상태에 이르는 동안 지하수위가 추가로 저하될 수 있으며 이때 발생하는 지표침하량은 터널내 유입수량과 지하수위 저하정도에 비례하여 증가한다.
- 터널굴착에 따른 지표침하는 일반적으로 오차함수(error function)을 잘 따르는 것으로 보고되고 있으나, 지하수 저하를 동반하는 경우 오차함수에 비하여 보다 광범위하게 나타나며, 지하수 저하량이 클수록 침하량 역시 증가하는 것으로 분석되었다.
- 또한, 지하수 저하를 동반하는 경우의 지표변위는 지하수 저하가 없는 경우와 비교시 수평성분에 비하여 연직성분의 변위가 대체로 크게 발생한다는 특성을 보인다.
- 따라서 지하수위 하에서 터널굴착시에는 지하수 저하로 인한 지표침하 발생문제를 고려하는 것이 바람직하며, 특히 지하수위가 높은 경우 장기간에 걸쳐

침하가 발생하므로 이에 대한 유지관리가 중요하다.

- 지반침하를 억제하기 위한 방법으로는 터널내부로의 용수량을 제어하는 방안이 효과적인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2005년 건설교통부가 출현한 한국형 싱글 쉘 터널공법 메카니즘 이론 정립 및 설계/해석 요소기술 개발(과제번호 : C103A1000026-04A0200-02320)과 IT 기반의 지하공간 지보시스템 설계기술 개발(과제번호 : C104A1010001-05A0501-00220)에 의한 것이며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. *ABAQUS Users Manual, Version 6.5.* (2005), Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Inc., Pawtucket, Providence, R.I.
2. Attewell, P.B., Yeates, J., Selby, A.R. (1986), "Ground deformation and strain equations", *Soil movements induced by tunneling and their effects on pipeline and structures*, Blackie, Glasgow, pp. 53-66.
3. Chai, J.-C., Shen, S.-L., Zhu, H.-H., Zhang, X.-L. (2005), "1D analysis of land subsidence in Shanghai", *Lowland Technology International*, Vol. 7, No. 1, pp. 33-41.
4. Chen, C.-X., Pei, S.-P. (2001), "Study on the prediction model of land subsidence due to withdrawal of groundwater", *Hydrogeo. and Engrg. Geology*, Vol. 25, No. 2, pp. 5-8 (in Chinese)
5. Peck, R.B. (1969), "Deep excavations and tunneling in soft ground", *Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mech. And Found. Engrg.*, 225V29.
6. Qiao, S., Liu B. (2006), "Prediction of ground displacement and deformation induced by dewatering of groundwater", *Underground Construction and Ground Movement*, pp. 73-79.
7. Shen, S.-L., Tohno, I., Nishaki, M., Miura, N. (2004), "Land subsidence due to withdrawal of deep-groundwater", *Lowland Technology International*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-8.
8. Shen, S.-L., Tang C.-P. Bai, Y., Xu, Y.S. (2006), "Analysis of settlement due to withdrawal of groundwater around an unexcavated foundation pit", *Underground Construction and Ground Movement*, pp. 377-384.
9. Terzaghi, K. (1925), *Principles of soil mechanics*, IV

- Settlement and consolidation of clay: Engineering News-Record, 95(3), pp. 874-878.
10. Yoo, C. (2005), "Interaction between tunneling and groundwater-numerical investigation using three dimensional stress-pore pressure coupled analysis", *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No. 2, pp. 240-250.
 11. Xue, Y.-Q., Zhang, Y., Ye, S.-J. (2003), "Land subsidence in China and its problems", *Quaternary Sciences*, Vol. 23, No. 6, pp. 585-592 (in Chinese)
 12. Xu, Y.S. Shen, S.-L., Tang, C.-P., Jiang, H. (2005), "3D-Analysis of land subsidence based on groundwater flow model", *Rock and Soil Mechanics*, Vol. 26 (suppl.): pp. 109-112. (in Chinese)
 13. Xu, Y.S. Shen, S.-L., Bai, Y. (2006). "State-of-art of land subsidence prediction due to groundwater withdrawal in China", *Underground Construction and Ground Movement*, pp. 58-65.



유 충 식

성균관대학교
건설환경시스템공학과
교수

E-mail: csyoo@kku.edu



김 선 빈

성균관대학교
건설환경시스템공학과
박사과정

E-mail: ksb9677@hanmail.net