

NATM 터널의 응력-간극수압 연계 유한요소모델링

Stress-Pore Pressure Coupled Finite Element Modeling of NATM Tunneling

유 충 식¹ Yoo, Chung-Sik

김 선 빈² Kim, Sun-Bin

Abstract

This paper concerns the finite element (FE) modeling approach for NATM tunneling in water bearing ground within the framework of 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 coupled FE analysis were identified. A parametric study was then conducted on the influencing factors such as soil-water characteristics, location of hydraulic boundary conditions, the way of modeling drainage flow, among others. The results indicate that the soil-water characteristics play the most important role in the tunneling-induced settlement characteristics. Based on the results, modeling guidelines were suggested for stress-pore pressure coupled finite element modeling of NATM tunneling.

요 지

본 논문에서는 지하수위 하에서 터널이 시공되는 조건을 대상으로 응력-간극수압 연계 유한요소해석 수행시 모델링 측면에서 중요하게 다뤄져야 하는 내용을 고찰하였다. 먼저 연계해석 수행시 요구되는 지하수위 저하와 지반거동과의 관계에 대한 배경 이론을 알아보았으며, 이를 토대로 모델링 측면에서 해석결과에 영향을 미칠 수 있는 다양한 인자들을 선정하고, 선정된 영향인자에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. 지하수위 저하가 동반되는 터널 시공조건에서의 유한요소해석 모델링 결과는 지반의 불포화특성 고려여부가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며 본 고에서는 결과를 종합하여 연계해석 모델링시 중요하게 검토되어야 고려사항을 제시하였다.

Keywords : Coupled analysis, Finite-element method, Groundwater, NATM, Tunneling

1. 서 론

최근에 들어 사회기반시설 확장의 필요성에 의해 고속철도, 지하철, 그리고 각종 도로 터널의 시공이 늘고 있다. 특히 도심지에서 시공되는 터널공사의 경우 불량한 지반 하에서의 시공이 증가하는 추세에 있으며 지하수위가 높은 지반조건에서도 불가피하게 터널이 계획되는 것을 종종 찾아볼 수 있다. 이러한 터널시공으로 고산습지 생태환경 영향과 인근 마을의 지하수 고갈, 도

심지의 지표침하 발생의 피해사례들이 계속적으로 보고되고 있으며, 터널과 지하수의 문제가 국내 환경영향 평가 대상으로도 포함되리만큼 그 중요성이 나날이 강조되고 있다.

지하수위가 높은 지반에서 터널을 시공하는 경우에는 터널-지하수의 상호작용으로 인하여 터널주변 지반의 하중지지력 저하로 인해 변위 및 응력이 크게 발생하고 특히 막장부 안정성 확보가 매우 중요한 이슈로 대두되며, 지하수 저하시 지반침하가 동반되어 시공상

1 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof. Dept. of Civil & Environ. Engrg., Sungkyunkwan Univ.)

2 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil & Environ. Engrg., Sungkyunkwan Univ., ksb9677@hanmail.net, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

문제가 발생할 소지가 있으므로 설계와 시공단계에서 이에 대한 고려가 필요하다. 설계단계에서는 터널시공 조건을 고려하여 계획된 지보패턴 및 굴착공법의 타당성을 검토하게 되는데 이때 일반적으로 유한차분법 혹은 유한요소법 등의 수치해석적인 기법이 주로 사용된다. 따라서 터널-지하수 상호작용이 발생하는 시공조건에 대한 수치해석에서는 터널과 지하수의 상호작용의 모사가 가능하도록 역학적 측면과 수리적 측면이 모두 반영된 응력-간극수압 연계해석(stress-pore pressure coupled analysis)을 수행하여야 한다(Yoo 2005). 그러나 현재 실무에서 적용하고 있는 각종 터널해석 프로그램의 연계해석 기능의 제한성 및 해석 모델링시 지반공학적인 문제를 반영하는데 있어서의 각종 해석 모델링에 대한 경험부족으로 응력-간극수압 연계해석을 설계에 적절하게 반영한 예는 많지 않은 실정이다.

지하수위 하에서 터널을 시공하는 경우에 대한 영향을 분석하기 위하여 수치적인 기법을 이용한 연구로는 Gunn & Taylor(1984), Atwa & Leca(1994), Pottler 등(1994), 그리고 Schweiger 등(1999)이 수행하였으나 정상류 조건인 경우에 국한되거나 전응력해석에 침투해석 결과를 반영하는 정도여서 터널시공과 지하수의 상호작용을 정확히 모델링하지는 못하였다고 할 수 있다. 보다 진보된 형태로는 Shin 등(2002, 2005)이 터널의 장기거동 측면에서 지하수 유동과 라이닝에 작용하는 간극수압의 영향을 연구하기 위하여 평면변형과 축대칭 유한요소모델을 이용하여 연계해석을 수행한 바 있으며, Yoo(2003, 2005)는 3차원 응력-간극수압 연계해석을 통해 터널굴착시 지하수 유동에 따른 막장거동 및 지표면위 특성을 고찰하였으며 터널-지하수 상호작용 관점에서 지반/라이닝 투수성에 따른 슛크리트 라이닝 응력 발생 경향에 대한 결과를 보고한 바 있다. 선행 연

구결과에 의하면 터널-지하수 상호작용 및 이로 인한 지하수 저하는 지표침하량 및 터널 변위를 증가시키며 라이닝 배면수압과 라이닝 축력 등 전반적인 터널의 거동에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있어 응력-간극수압 연계해석이 적절히 구현되지 않을 경우 터널 및 주변 영향에 대한 안정성이 과소평가될 소지가 있으므로 연계해석의 현실적인 적용이 무엇보다 중요하다.

본 연구에서는 터널-지하수 상호작용이 발생하는 시공조건에 대한 응력-간극수압 연계해석의 적절한 적용을 위한 모델링 기준을 제시하고자 연계해석 모델링 측면에서 해석결과에 영향을 미칠 수 있는 다양한 인자들에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. 그 결과를 토대로 연계해석 모델링시 고려되어야 할 각종 영향인자의 영향범위와 모델링시 반영되어야 할 주안점을 제시하였다.

2. 터널굴착과 지하수위 저하로 인한 지반침하 메카니즘

지하수위 하부 지반에서 터널을 시공하는 경우 지반 내에 배수구를 설치하는 것과 같아서 수두차이로 인해 지하수 유동이 발생하며 이로 인하여 지하수위 저하는 물론 지반내 간극수압의 변화가 유발되게 된다(그림 1). 이는 포화상태의 지반을 불포화 상태로 전이시키며 초기상태와는 다른 불포화토의 특성을 갖게 한다. 지하수가 유출되면서 생긴 간극에 공기가 유입되면 물과 공기 사이의 압력차로 부의 간극수압을 갖는 모관흡수력(matric suction)이 발생하게 되고(그림 2), 이로 인하여 지반의 유효응력이 증가하게 된다. 불포화토 내의 유효응력 σ' 는 식 (1)과 같이 정의된다(Bishop and Blight, 1963).

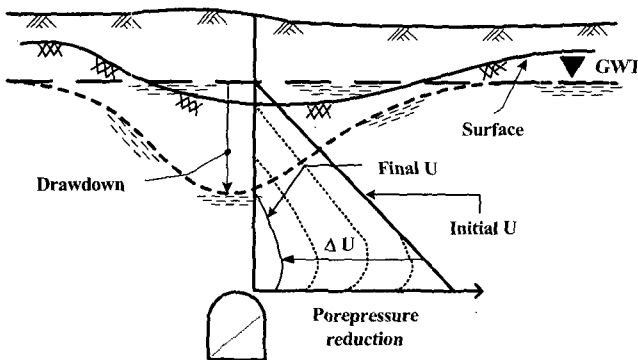


그림 1. 터널 시공시 지반침하 메카니즘

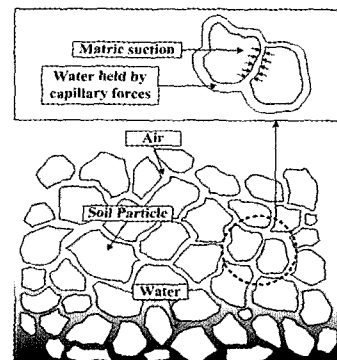


그림 2. 토립자간 모관흡수력

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (1)$$

여기서, σ =전응력, σ' =유효응력, u_a =간극 공기압, u_w =간극수압, $\chi = \frac{A_w}{A_v}$

식 (1)에서 계수 χ 는 물-입자 간 표면장력과 포화도에 관한 계수로 포화상태에서 건조상태에 이르는 모든 함수상태를 0과 1사이의 값을 갖는다.

지하수위 저하구간의 지반침하는 1차원 압밀이론에 근거할 때 식 (2)를 이용하여 결정할 수 있다.

$$S_c = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H_{dd} \quad (2)$$

여기서 H_{dd} 는 지하수 저하구간의 높이로 표현할 수 있으며, 지하수 저하로 인해 발생하는 간극의 변화량은 지하수위 저하로 인한 유효응력 변화량 $\Delta\sigma'$ 와 직접적으로 연관된다. 따라서 결국 지하수 저하로 인한 지표침하는 간극의 변화로 인한 체적변화가 큰 비중을 차지하게 된다.

한편 터널주변 지반은 지하수가 배출됨에 따라 간극수압이 감소하여 유효응력이 증가하게 되며, 굴착으로 인하여 최대주응력(σ_3)과 최소주응력(σ_1)은 $\sigma_1 \gg \sigma_3$ 인 관계가 되므로 전단응력(τ)이 급격히 증가한다. 아울러 지하수가 흐르는 방향으로의 침투압까지 작용하므로 응력적으로 매우 취약한 상태가 된다. 이는 곧 터널 주변 지반의 하중지지능력을 감소시켜 라이닝에 작용하는 하중의 증가로 나타난다.

3. 응력-간극수압 연계해석의 이론적 배경 및 모델링

3.1 이론적 배경

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 모델링하

며, 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. 유효응력 $\bar{\sigma}^*$ 의 식은 다음의 식 (3)으로도 나타낼 수 있다.

$$\bar{\sigma}^* = \sigma + (\chi u_w + (1 - \chi) u_a) I \quad (3)$$

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 가능하여 식 (4)와 같이 단순화 될 수 있다.

$$\bar{\sigma}^* = \sigma + \chi u_w I \quad (4)$$

또한 요소내 흡착수(trapped fluid)가 존재하는 경우 흡착수의 함수로 나타내면 유효응력 $\bar{\sigma}^*$ 는 흡착수의 평균응력 \bar{p}_t , 흡착수의 간극률 n_t 에 관한 아래의 식 (5)로 표현된다.

$$\bar{\sigma}^* = (1 - n_t) \bar{\sigma} - n_t \bar{p}_t I \quad (5)$$

연계해석에서 다공성 매질에 대한 평형방정식은 가상일의 원리를 이용하여 다음의 식 (6)으로 표현된다.

$$\int_V \sigma : \delta \varepsilon dV = \int_S t \cdot \delta v dS + \int_V \hat{f} \cdot \delta v dV \quad (6)$$

여기서, δv =가상의 속도, $\delta \varepsilon = sym(\partial \delta v / \partial x) =$ 가상의 변형율, σ =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 (7)과 같이 표현하며, $f = \hat{f} - f_w$ 라 할 때 가상의 일에 대한 평형방정식은 식 (8)로 정리될 수 있다.

$$f_w = (sn + n_t)\rho_w g \quad (7)$$

$$\int_V \sigma : \delta \epsilon dV = \int_S t \cdot \delta v dS + \int_V f \cdot \delta v dV + \int_V (sn + n_t)\rho_w \cdot \delta v dV \quad (8)$$

여기서, s =포화도, n =간극률, ρ_w =물의 질량, g =중력 가속도

이러한 유한요소모델의 평형방정식은 보간함수(interpolation function)을 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 $\delta \epsilon = \beta^N \delta v^N$ 로서 보간이 가능하며, 식 (8)은 식 (9)와 같이 이산화된다.

$$\delta v^N \int_V \beta^N : \sigma dV = \delta v^N \left[\int_S N^N \cdot t dS + \int_V N^N \cdot f \delta v dV + \int_V (sn + n_t)\rho_w N^N \cdot g dV \right] \quad (9)$$

각 변에 있는 δv^N 를 소거하면 좌변 항은 내력(internal force)을, 우변 항은 외력(external force)을 나타내며 따라서 위 식 (9)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 모관흡수력과 투수성의 관계등 다양한 관계식이 필요하게 된다.

3.2 연계해석의 모델링

유한요소해석에서 지배방정식은 해석대상 조건에 대한 경계조건과 초기조건을 부여하여 해를 얻게 된다. 응력해석에서 변위에 대한 경계조건을 부여하는 것과 같은 개념으로 연계해석시 해석영역에 대해 유입과 유출에 관한 경계조건을 부여하여야 한다. 이러한 유입과 유출은 수두(head difference), 유량(flux), 혹은 간극수압(porewater pressure)으로 지정할 수 있으며, 해석시 사용하는 프로그램에서 지원하는 형태에 부합되는 형식으로 모델링을 수행하면 된다. 실제 터널시공시 굴착면을 통해서 지하수가 유출이 되므로 굴착면에서의 간극수압은 “0”으로 고려할 수 있으며, 따라서 굴착과 동시에 굴착면의 해당 절점들에 간극수압을 “0”으로 부여하여 지하수의 유출에 대한 모델링을 할 수 있다. 또한 굴착면 요소의 간극수압이 부의 간극수압에 도달할때까

지 배수가 되도록 하여 모델링 할 수도 있다. 지하수 유입에 대한 모사는 시공중의 단기문제인지 운영중 장기문제를 대상으로 하는지에 따라 구분할 수 있다. 시공중 단기문제로 국한하는 경우 강우와 같은 수문특성을 시공과정에서 굳이 고려할 필요가 없이 원거리 측면경계부를 통하여 초기조건으로 부여한 수압이 일정하게 유지되도록 하여 지하수 유입을 모델링 하면 된다. 그러나 운영중 장기문제를 대상으로 하는 경우 강우와 같은 수문특성을 반영하여야 현실적인 결과를 얻을 수 있으므로 측면경계로부터의 지하수 유입과 아울러 강우의 일부가 지표로부터 유입이 되도록 모델링 하여야 한다. 구체적으로 먼저 대상지역의 수문특성을 조사하여 연강수량 및 지표로 유입되는 양을 정리한 후 이를 해석기간으로 환산하여 지표에 간극수압으로 부여하여 강우의 일부가 지표로 유입되도록 모델링 한다.

한편, 2차원 해석시 일반적으로 라이닝은 빔(beam) 요소로 모델링하게 되는데 이 경우 빔 요소가 연계해석이 가능하지 않으므로 라이닝의 수리적 특성을 반영하기 어렵게 된다. 이를 해석에서 반영하기 위하여 빔 요소에 접해 있는 외부 솔리드(Solid) 요소를 라이닝 두께로 설정하고, 역학적 특성은 해당 지반의 물성으로 사용하되 수리적 특성은 라이닝의 물성을 사용하여 모델링할 수 있다. 이러한 번거로움을 제거하기 위하여 라이닝을 빔 요소로 모델링하지 않고 해당 두께를 가진 솔리드 요소로 모델링할 수도 있다.

아울러 터널굴착으로 인하여 지하수위가 저하되는 조건에서는 포화상태의 지반이 불포화 상태로 전이되어 초기상태와는 다른 불포화토의 특성을 갖게 된다. 지하수가 유출되면서 생긴 간극에 공기가 유입되면 물과 공기사이의 압력차로 부의 간극수압을 갖는 모관흡수력(matric suction)이 발생하게 되며, 지반의 투수계수도 모관흡수력에 따라 변하는 불포화 투수계수가 된다. 이 경우 포화도에 따른 부의 간극수압과 불포화 투수계수가 지반의 유효응력 및 지하수 흐름에 지대한 영향을 미치게 된다. 따라서 지하수위 저하시 나타나는 불포화토의 특성을 재료 모델링에 반영하여야 현실에 근접한 결과를 얻을 수 있다. 불포화토의 특성은 함수특성곡선(soil water characteristic curve, SWCC)와 투수계수함수(permeability function)를 이용하여 표현된다. 불포화토의 기본적인 내용은 본 논문의 범위를 벗어나며 관심있는 독자는 Lu & Likos(2004)를 참조하기 바란다.

4. 유한요소해석 매개변수 연구

4.1 해석 대상 시공조건

본 연구에서는 직경(D) 12m의 터널이 지표면으로부터 30m 하부에 시공되는 경우를 고려하였으며, 해석대상 지반은 철도터널 ○-○공구 현장의 지반조건을 고려하였다. 즉 그림 5에서 보이는 바와 같이 터널의 스프링 라인(Springline) 상부 지층은 풍화토로 구성되어 있으며 그 하부에는 연암이 위치하는 것으로 가정하였다. 주 지지재료는 두께 30cm의 슛크리트가 시공되며 4m 길이의 록볼트가 1.5m 간격으로 설치되는 것으로 간주하였다.

본 연구에서 계획한 연계해석 모델링 측면에서 영향인자들에 대한 검토를 위해 연계해석시 불포화토 특성에 대한 고려여부와 측면경계범위, 라이닝 모델링 방법, 터널내부로의 배수 모델링 방법에 따른 매개변수 연구를 수행하였다. 표 1은 본 연구에서 수행한 해석조건에 대하여 정리하여 보이고 있다.

4.2 해석 모델링

1) 사용 프로그램

해석 프로그램은 범용 유한요소 해석 패키지인 ABAQUS 6.4-2를 사용하였다. ABAQUS는 토목 및 기계 등 다양한 분야에 적용되는 프로그램으로서 특히 지반공학분야에서 다양한 흙의 구성모델을 제공하고 소성거동 모사에 대한 알고리즘이 효율적이어서 지반구조물의 항복 후 거동 평가에 효율적임과 아울러서 효율적인 응력-

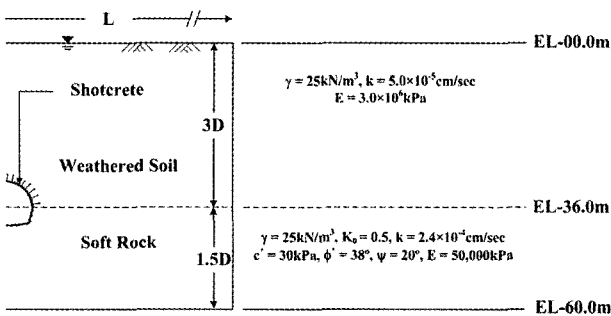


그림 5. 해석 조건

간극수압 연계해석 알고리즘을 채택하고 있다는 장점이 있다.

2) 변위경계 및 수리경계

터널 굴착의 모델링에 있어서 해석의 편의상 전단면 굴착으로 시공되는 것으로 가정하였으며 터널 중심축으로부터 좌우 대칭인점을 감안하여 우측 반단면에 대한 해석을 수행하였다. 한편, 터널 중심으로부터 5D~20D(D=터널직경)의 거리에 측면 경계면을 위치시켜 수평방향으로의 변위를 구속하였으며 터널 바닥으로부터 약 1.5D 하부에 하부 경계를 위치시키고 롤러를 설치하여 연직방향의 변위를 구속하였다.

수리적 경계조건으로 측면경계와 하부경계에는 초기 조건으로 부여한 수압이 일정하게 유지되도록 하였다. 아울러 연계해석 과정에서 원 지하수위 위치에 no-flow 경계를 부여하여 지하수의 터널내부로의 유입은 연직 및 하부경계를 통해서만 이루어지도록 하였으며, 터널 내부로 지하수가 배수되는 과정을 모사하기 위해서는 터널 라이닝 내벽을 따라 각 절점에 간극수압 "0"의 경계조건을 부여하는 방법과 ABAQUS에서 제공하는 플로우 옵션(flow option)인 굴착면 요소의 간극수압이 부의 간극수압에 도달할때까지 침투속도 v_n 으로 배수가 되도록 하는 방법을 이용하여 모델링하였다. 침투속도 v_n 은 식 (11)에서 정리하고 있으며, 식에서 표현된 k_s 는 $k_s \approx \frac{10^5 k}{\gamma_w c}$ (c =굴착면 요소의 배수길이, k =굴착면 요소의 투수계수)인 관계를 따른다(ABAQUS users manual 2005).

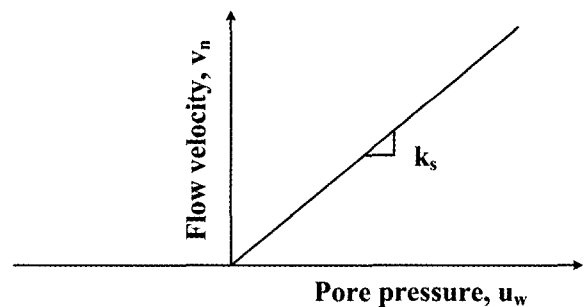


그림 6. 간극수압과 침투유속간의 관계

표 1. 해석조건

해석조건	불포화토 특성	측면경계범위(L)	*라이닝 모델링	배수 모델링
내용	고려/미고려	5D/8D/10D/ 15D/20D	(Beam+Solid)요소/ Solid 요소	굴착면 간극수압 "0"/ *Flow option

*라이닝 모델링과 Flow option에 대한 세부 내용은 4.2절에서 설명

$$\begin{aligned} v_n &= k_s u_w, & u_w > 0 \\ v_n &= 0, & u_w \leq 0 \end{aligned} \quad (11)$$

3) 지반 및 지보재 모델링

지반 및 지보재의 이산화에 있어 지반은 8절점 가감적분 응력-간극수압 연계고체요소(CPE8RP)를 적용하였으며, 록볼트는 트러스 요소(T3D2)를 이용하여 모델링하였다. 숏크리트 라이닝의 모델링에 있어서 빔 요소를 적용시 그림 7과 같이 라이닝의 수리적 특성을 고려하기 위하여 빔 요소에 접해 있는 외부 솔리드 요소를 라이닝 두께로 설정하고, 역학적 특성은 해당 지반의 물성으로 사용하되 수리적 특성은 라이닝의 물성을 사용하여 모델링하였다. 라이닝을 솔리드 요소로 모델링 하는 경우 라이닝의 두께에 해당하는 크기로 설정하여 8절점 가감적분 응력-간극수압 연계고체요소(CPE8RP)를 사용하였다. 그림 8은 해석에 적용된 유한요소모델을 보여주고 있다.

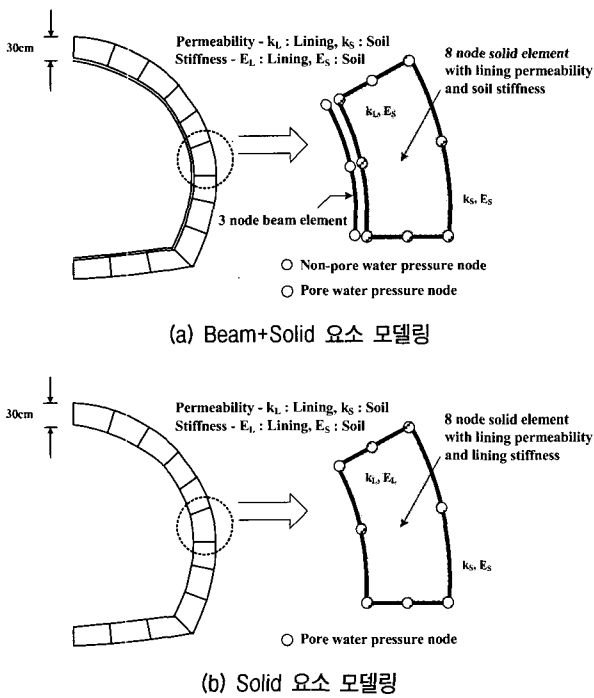


그림 7. 라이닝의 투수성을 고려한 모델링

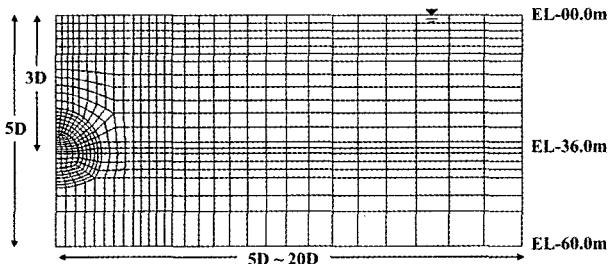


그림 8. 해석에 적용된 유한요소망

4) 재료 모델링

재료 모델링에 있어 해석 대상 지반은 Mohr-Coulomb 항복규준을 따르는 비관련 흐름법칙(non-associated flow rule)을 따르는 탄소성 재료로 가정하였으며 숏크리트 라이닝과 록볼트는 탄성재료로 가정하였다. 지하수 저하시 불포화구간 불포화도 특성은 그림 9에서의 SWCC를 고려하였으며, 투수계수 함수를 적용하기 보다 근사적인 방법으로 불포화 투수계수는 포화투수계수(k_s)와 포화도(s)는 식 (12)와 같은 관계가 있는 것으로 가정하였다(ABAQUS users manual 2005).

$$k = k_s \cdot s^3 \quad (12)$$

5) 시공과정의 모델링

일반적으로 2차원 해석에서는 3차원적 터널 시공과정을 현실적으로 모델링하기 위해 하중분배 개념을 도입하여 해석을 수행한다. 다만 지하수위 하부 지반에서 시공되는 터널의 하중분담율에 관한 내용은 매우 중요한 또 다른 주제이며 따라서 심도 있는 연구가 필요하나 재료 및 기타 모델링 이슈에 국한하여 본 해석에서는 굴착단계, 연한 숏크리트 단계, 강한 숏크리트 단계의 하중분담율을 50%-25%-25%로 적용하였으며 각 굴착하중을 유사한 시공환경에서의 자료를 고려하여 무지보 굴착단계 2일, 숏크리트 연화단계 8일, 숏크리트 경화단계 20일 가량이 소요되는 것으로 가정하였다. 한편, 해석조건에 대한 장기거동측면에서의 비교를 위해 시

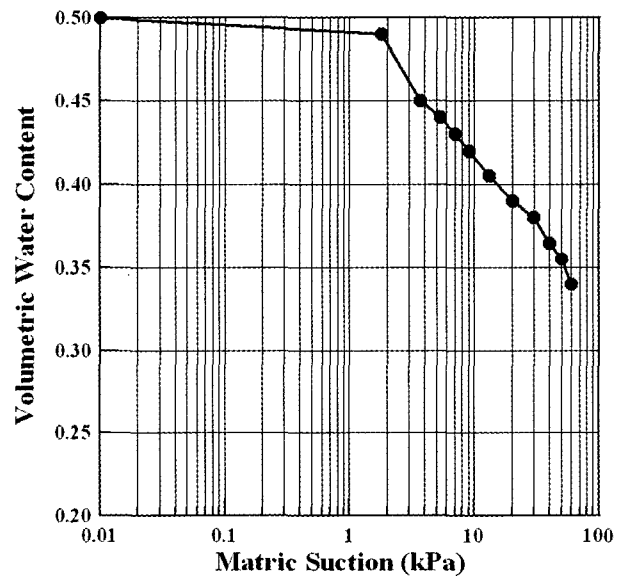


그림 9. 포화도에 적용된 SWCC

공 후 10년에 걸친 부정류 해석을 수행하였으며 측면 경계에서의 지하수위는 초기 지하수위가 유지되는 것으로 가정하여 측면부에서 지하수 유입이 이루어지는 것으로 가정하였다.

5. 매개변수 연구 결과 분석

5.1 불포화 특성의 영향

1) 간극수압 분포 및 유효응력, 지하수 저하량

지하수위하에서 터널이 시공되는 경우 수두차로 인한 지하수 유동이 발생하므로 지하수위가 저하된다. 이때 지하수위가 저하된 구간에서는 포화상태의 지반이 불포화 상태로 전이됨에 따라 부의 간극수압이 발생하

게 되며 따라서 유효응력은 물론 지반내 체적변형이 포화상태의 지반과는 상이하게 나타날 수 있다. 그림 10은 불포화토 특성인 SWCC에 대한 고려 여부에 따라 터널 중심축에서의 간극수압 분포를 시공단계별로 보이고 있다. 그림 10을 관찰하면 불포화토의 특성을 반영하지 않은 경우 지반내 간극수압이 급격히 소산되어 불포화 영역이 확대된 것을 볼 수 있다. 이는 지반의 투수계수가 불포화토의 모관흡수력에 따라 변하는 불포화 투수계수를 따르는 반면 이를 고려하지 않는 경우 초기포화상태의 투수계수가 지속적으로 유지되어 지하수 유출속도가 실제 조건보다 커 지반내 간극수압이 급격하게 소산된 것으로 파악된다.

그림 11은 불포화토 특성을 고려한 경우에 대하여 시공단계별로 터널중심축에서 0D, 2D, 4D 이격된 단면에

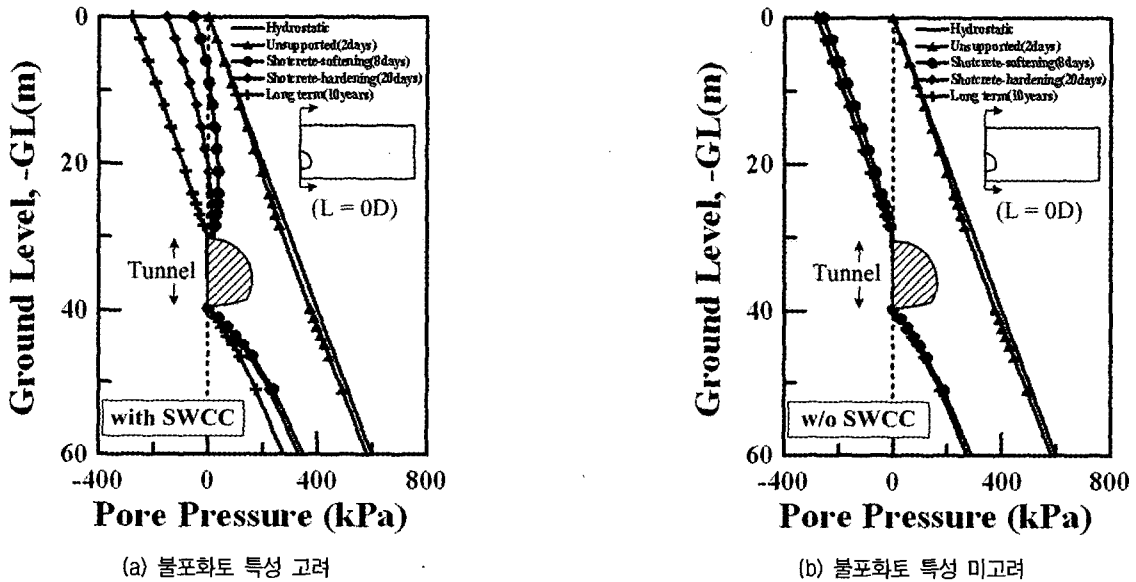


그림 10. 불포화토 특성 여부에 따른 터널 중심축의 간극수압 분포

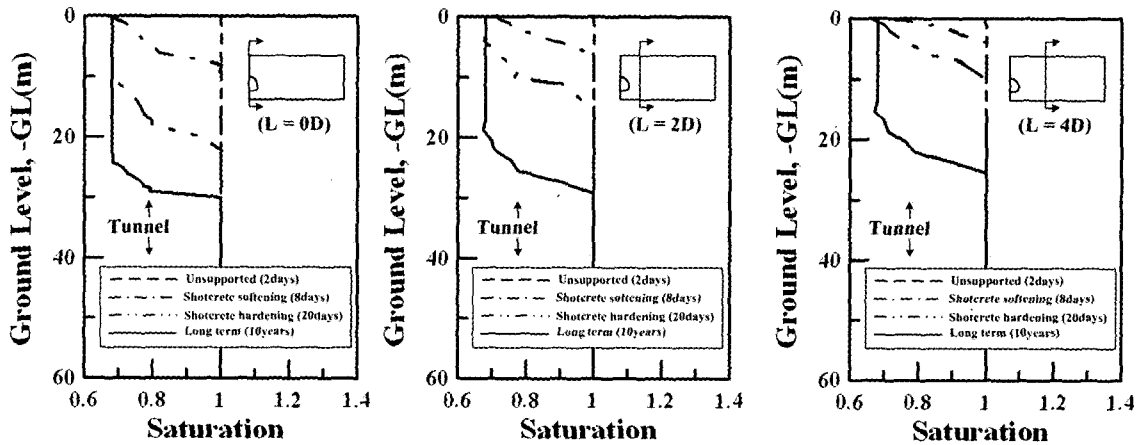


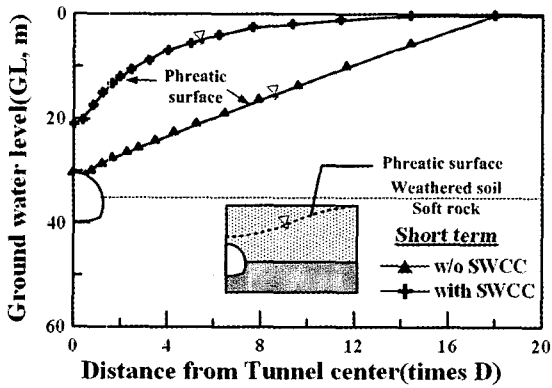
그림 11. 불포화토 특성 고려시 시공단계별 지반내 포화도

서의 포화도를 도시하고 있다. 불포화토의 특성을 고려하지 않은 경우 부의 간극수압에 대한 포화도 곡선인 SWCC를 반영하지 못하므로 지하수위가 저하되더라도 전 지반에 걸쳐 포화도가 100%로 나타나지만 불포화토의 특성을 반영한 경우는 그림에서 보는 바와 같이 간극수압 변화에 따라 부의 간극수압이 발생한 구간에서는 포화도가 100% 이내로 나타나 지하수위 저하 정도를 현실적으로 평가하는 것이 가능하다. 이러한 결과는 지하수위하의 터널시공조건에서 수위가 저하되는 경우에 대해 연계해석을 통한 검토를 위해서는 불포화토의 특성을 해석에 반영하는 것이 중요함을 보여주는 것이라 하겠다.

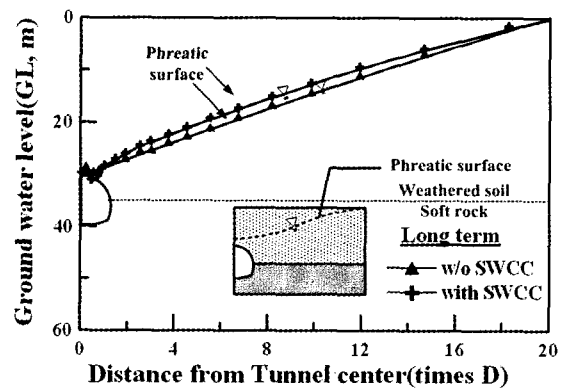
지반내 간극수압 분포로부터 간극수압이 "0"인 지점을 연결한 선을 지하수위면으로 간주하여 도시한 그림 12는 불포화토 특성 고려여부에 대한 지하수위 저하량

을 비교하고 있다. 그림을 관찰하면 불포화토 특성 고려 여부에 따라 현저한 차이를 보여 불포화토 특성 미고려 시 결과는 시공직후 터널 천단위치까지 저하되는 것으로 나타나 있다. 이는 앞서 기술된 바대로 지반이 포화상태에서 불포화상태로 전이되면 투수계수 역시 모관흡수력에 따라 변하는 불포화 투수계수로 사용되어야 하나 이를 고려치 않아 터널내부로의 지하수 유출 속도가 실제 조건보다 크게 나타난 것에 기인한 것으로 판단된다.

한편 터널직상부 지표로부터 터널 인버트 하부지반까지의 지반내 유효응력 분포를 시공단계별로 도시하고 있는 그림 13을 관찰하면 시공경과에 따라 지반내 유효응력이 그림 10에서 나타낸 바와 같이 간극수압이 소산됨에 따라 증가하는 것으로 나타나 불포화토 특성 미고려시에는 유효응력이 급격히 증가하는 경향을 볼 수가 있다.

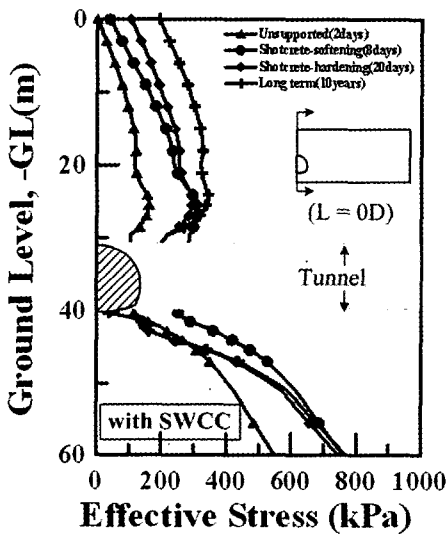


(a) 시공직후

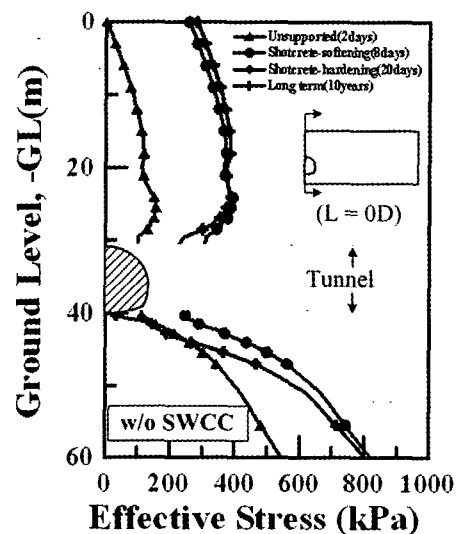


(b) Long term 시

그림 12. 불포화토 특성 고려여부에 따른 지하수위 저하곡선



(a) 불포화토 특성 고려



(b) 불포화토 특성 미고려

그림 13. 불포화토 특성 여부에 따른 터널 중심축의 유효응력 분포

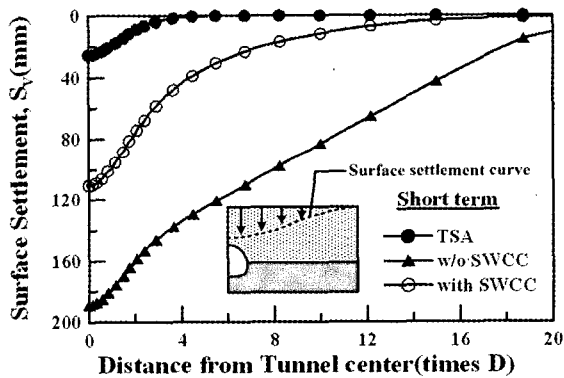
2) 지표변위 및 지반손실량

그림 14는 지하수를 고려하지 않은 전응력 해석조건과 불포화토 특성 고려 여부에 대한 연계해석조건에서의 터널굴착으로 인한 지표침하곡선을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 전응력 해석결과는 최대 25mm 가량의 지표침하가 발생하고 있으며, 불포화토 특성을 고려하지 않은 연계해석시 지표침하는 최대 190mm를 나타내고 있다. 불포화토의 특성을 고려한 경우의 침하는 시공직후 110mm, 지하수 흐름이 정상류 상태에 도달시 155mm 가량이 발생하는 것으로 나타나고 있다. 전응력 해석의 경우 지하수위 저하로 인한 지반내 체적변형이 반영되지 못하므로 지표침하를 과소평가하는 것이며, 연계해석을 수행하는 경우에서 불포화토의 특성을 반영하지 않을시에는 불포화 투수계수를 반영하지 못하여 지하수가 급격히 저하되고 체적변형이 크게 증가하여 지표침하 역시 과대평가하는 것이다.

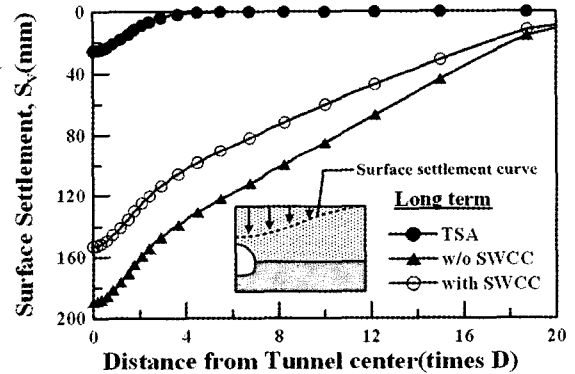
그림 15는 각 해석조건별 터널굴착으로 인한 수평변위 곡선을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 전응력

해석결과는 장단기 수평변위 모두 최대 10mm 가량으로 나타나고 있으며, 불포화토 특성을 고려하지 않은 연계 해석 결과는 최대 40mm의 수평변위가 광범위하게 나타나고 있다. 한편, 불포화토의 특성을 고려한 경우의 침하 경향을 관찰하면 시공직후에는 터널직상부에서 2~3D 떨어진 지점에서 최대변위가 발생하여 40mm 가량이 발생하는 것으로 나타나며 장기거동시 추가적인 지하수위 저하로 인한 수평방향으로의 지하수 유입으로 수평변위가 광범위하게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다.

각 해석조건별 터널굴착으로 인한 시공경과일수별 지반손실율(%)을 보이고 있는 그림 16을 보면 지반의 불포화 특성을 고려한 연계해석결과 시공직후 약 10%의 지반손실이 발생한 후 향후 10년여에 걸쳐 35%까지 유발되는 것으로 나타나고 있다. 전응력 해석시 지반손실율은 2~3% 내외인 범위에서 나타나고 있어 매우 작게 평가하며, 불포화 특성을 고려치 않은 연계해석결과는 시공직후 이미 45% 가량의 지반손실이 발생하는 것으로 나타나 매우 과대평가하는 것으로 검토되었다. 지

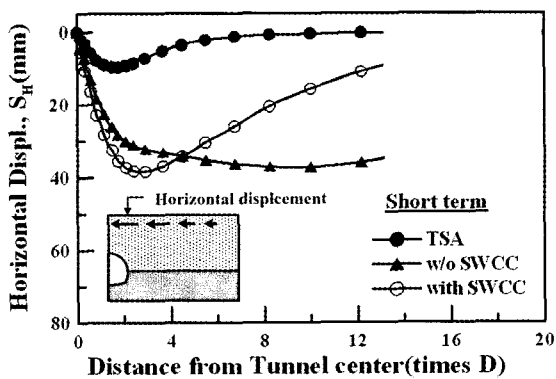


(a) 시공직후

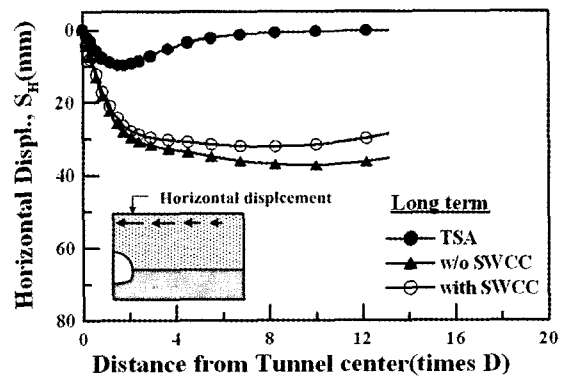


(b) Long term 시

그림 14. 불포화토 특성 고려여부에 따른 지표침하곡선



(a) 시공직후



(b) Long term 시

그림 15. 불포화토 특성 고려여부에 따른 지표수평변위

하수의 유동을 고려하지 못하는 전응력 해석의 경우 지하수 저하로 인한 지반의 체적변형을 반영하지 못하므로 지표침하 및 지반손실을 과소평가하게 된다. 또한 연계해석을 수행하는 경우에 있어서도 불포화 특성을 반영하지 않을 시에는 지반내 불포화토의 투수계수를 반영하지 못하여 지하수위가 급격히 저하되며, 이로 인한 지반의 체적감소가 실제보다 크게 나타나 지표침하 및 지반손실을 과대평가 할 수 있다.

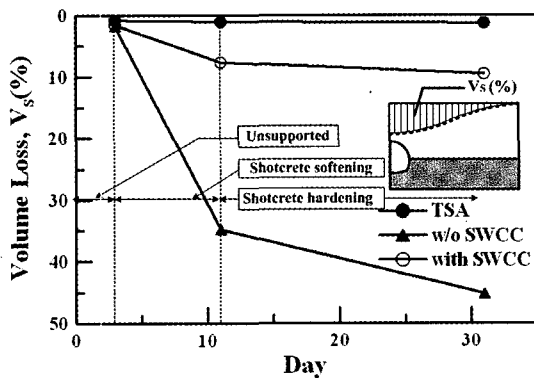
이와같이 불포화 특성 반영여부에 따른 지하수 유동이 지표침하 및 수평변위 등 지반거동에 지대한 영향을 받게 되는 만큼 현장조건에 대한 현실적인 검토를 위해서는 불포화토의 특성을 반영한 연계해석을 수행하는 것이 바람직하다.

3) 터널 거동

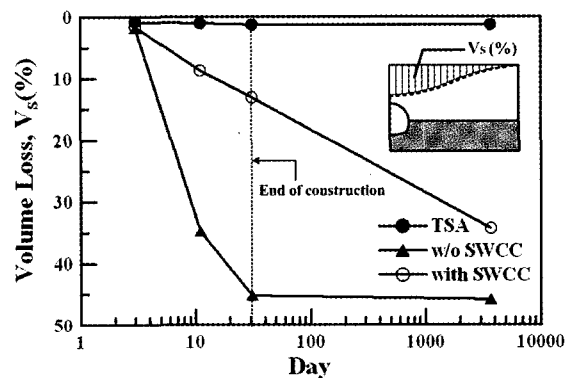
앞서 언급한 바와 같이 터널굴착에 따른 지하수위 저하는 지반침하 뿐만 아니라 터널 및 터널 주변지반의

간극수압 및 응력상태에 영향을 미치게 된다. 불포화토 특성 고려여부에 따른 라이닝 배면수압을 시공단계별로 나타내고 있는 그림 17를 관찰할 때 정상류 상태에 도달한 후 간극수압은 비교적 동일한 수압분포를 보이고 있으나 시공중 부정류 상태에서는 풍화토에 위치하고 있는 라이닝 천단~측벽간 라이닝 배면수압이 불포화토 특성 고려여부에 따라 2배 이상의 급격한 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 시공 직후 터널 주변 간극수압을 보여주고 있는 그림 18에서 잘 관찰 할 수 있는데, 이는 불포화토 특성에 따라 동일 시간조건에서 터널 상부에서의 지하수위 저하량이 다르기 때문이며, 불포화토 특성을 반영하지 않을 경우 지하수위가 급격히 저하되므로 배면수압이 작게 발생하는 것이다.

한편 터널주변의 간극수압이 소산이 되면 지반내 유효응력이 증가되어 터널 굴착시 터널주변지반의 하중 지지력이 감소하며 라이닝에 작용하는 하중이 증가하

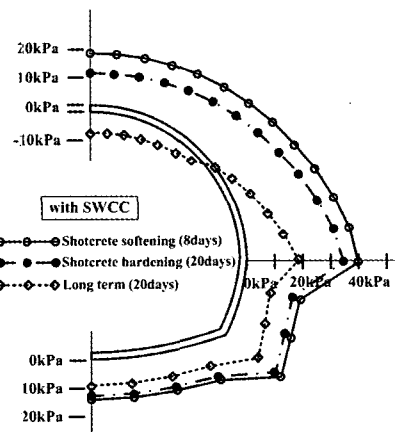


(a) 시공직후

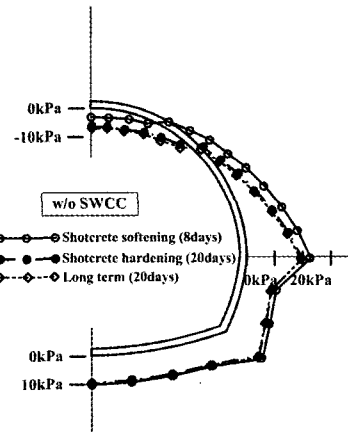


(b) Long term 시

그림 16. 불포화토 특성 고려여부에 따른 지반손실을



(a) 불포화토 특성 고려

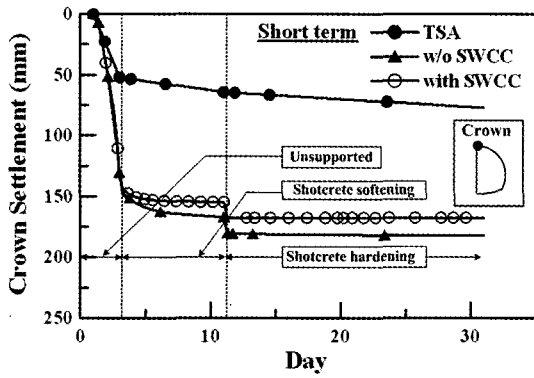


(b) 불포화토 특성 미고려

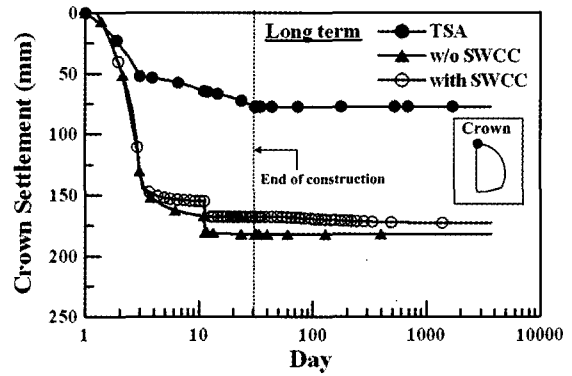
그림 17. 불포화토 특성 고려여부에 따른 라이닝 배면수압

게 된다. 그림 18과 그림 19의 터널 천단변위와 라이닝 압축응력을 관찰하면 불포화토 특성 미고려시의 터널 천단변위와 라이닝 압축응력이 5~10% 가량 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이는 터널주변 간극수압이 불

포화토 특성을 반영한 경우보다 불포화토 특성을 반영하지 않은 경우 빨리 소산되기 때문이며, 이로 인하여 터널주변의 유효응력이 보다 증가하였기 때문이다.

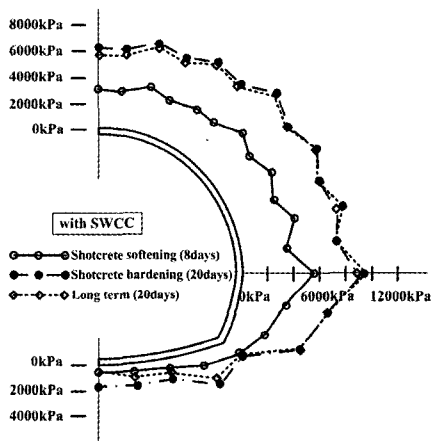


(a) 시공중

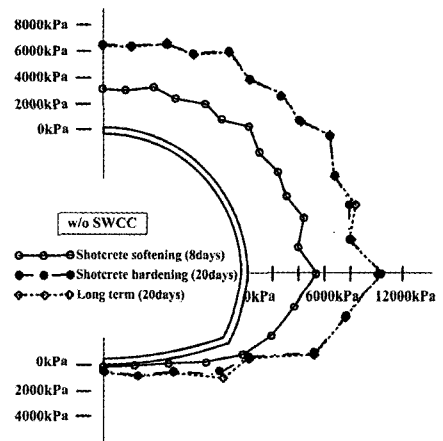


(b) Long term 시

그림 18. 불포화토 특성 고려여부에 따른 시공단계별 터널천단변위

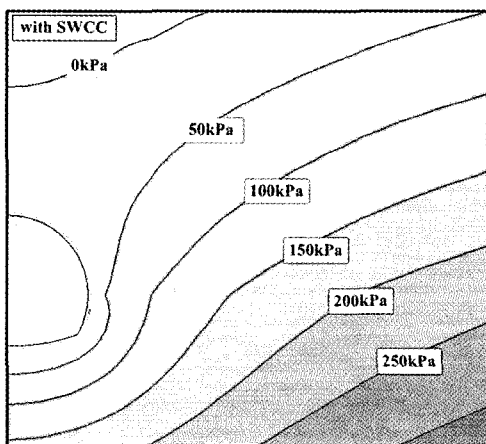


(a) 불포화토 특성 고려

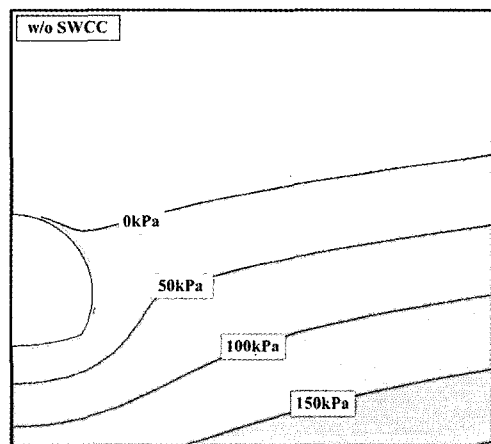


(b) 불포화토 특성 미고려

그림 19. 불포화토 특성 고려여부에 따른 라이닝 압축응력



(a) 불포화토 특성 고려



(b) 불포화토 특성 미고려

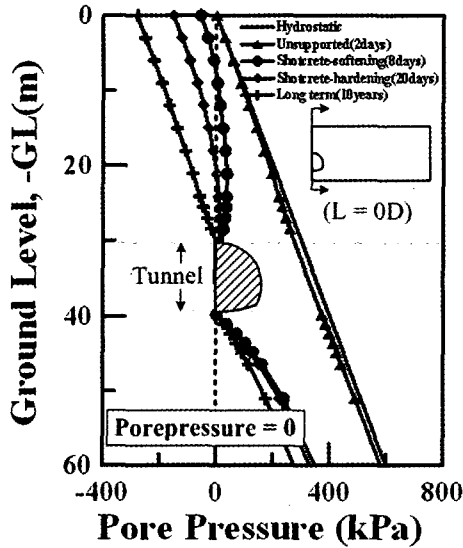
그림 21. 불포화토 특성 고려여부에 따른 시공직후 라이닝 주변 간극수압

5.2 배수 모델링 방법의 영향

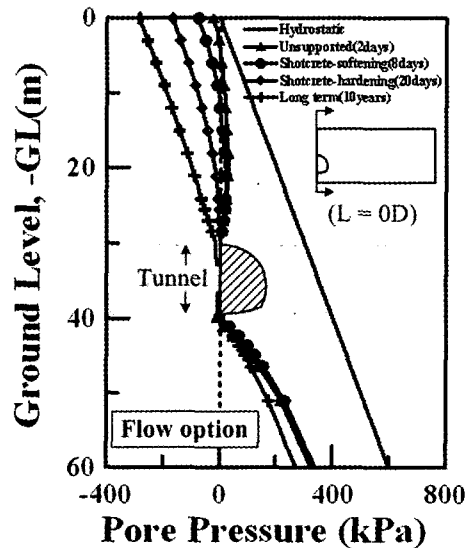
터널시공시 굴착면을 통해서 지하수가 유출이 되므로 이에 대한 효과를 모델링에 반영하여야 한다. 그 방법으로는 굴착과 동시에 굴착면의 해당 절점들에 간극수압을 “0”으로 부여하는 방법과 앞서 4.2절에서 설명한 flow option을 이용하여 모델링하는 방법이 있다. 그림 23은 이러한 배수모델링에 따른 터널중심축의 간극수압 분포를 시공단계별로 비교하여 보이고 있다. 간극수압 분포를 비교한 결과 그 경향은 대체로 유사하게 나타나고 있으나 무지보 굴착단계에서는 비교적 큰 차이를 보이고 있다. 무지보 굴착단계에서 굴착면의 간극수압을 “0”으로 모델링한 결과 터널주변 간극수압은 정수압 상태보다 9~10% 감소된 것으로 나타나고 있으나

flow option을 사용하여 모델링한 결과의 터널주변 간극수압은 90% 가량 감소되어 나타나고 있다.

그림 24는 시공단계별 지표침하를 배수모델링에 따라 비교하고 있다. 각각을 비교하면 그림 23의 간극수압 분포에서 나타난 경향과 마찬가지로 전 시공단계에서 지표침하는 대체로 유사하여 차이가 5% 이내로 나타나나 무지보 굴착단계에서는 굴착면 간극수압을 “0”으로 모델링한 경우 35mm 가량의 침하가 나타나는 반면 flow option을 이용하여 모델링한 경우 80mm 가량 발생하여 55% 이상 차이가 나타나고 있다. 이러한 원인은 무지보 굴착단계에서의 간극수압 분포 차이에 기인한 것이며 굴착면 간극수압을 “0”으로 모델링한 경우의 간극수압 변화가 크지 않아 지표 상부의 체적변형이 작게 발생하였기 때문이라 판단할 수 있다.

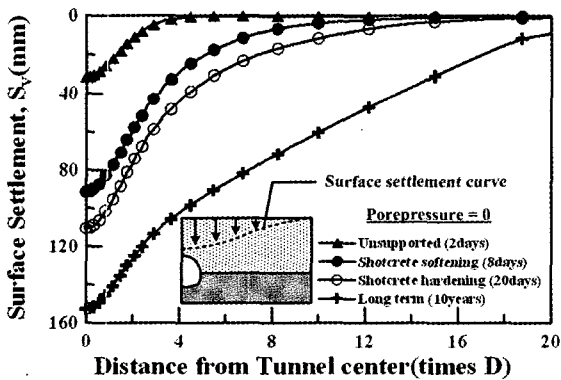


(a) 굴착면 간극수압 “0”

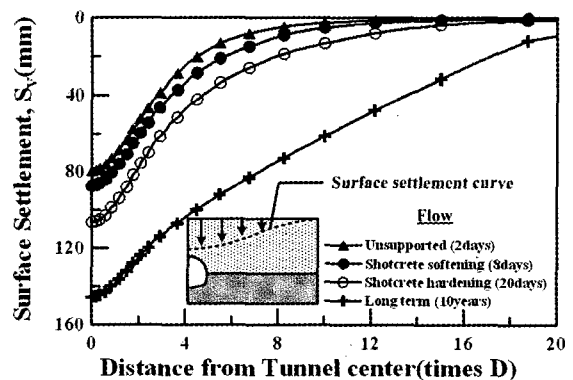


(b) Flow option

그림 23. 배수모델링에 따른 터널 중심축의 간극수압 분포

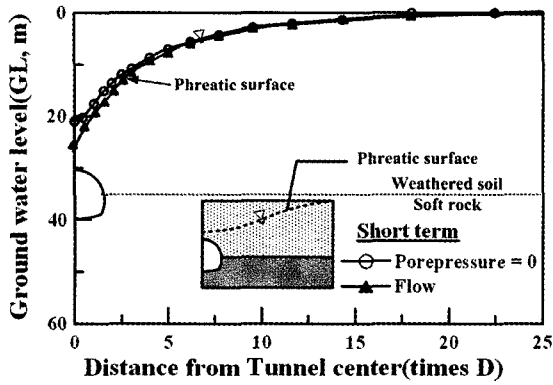


(a) 굴착면 간극수압 “0”

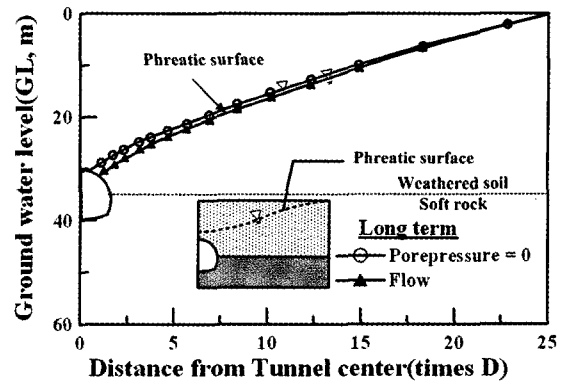


(b) Flow option

그림 24. 배수모델링에 따른 지표침하

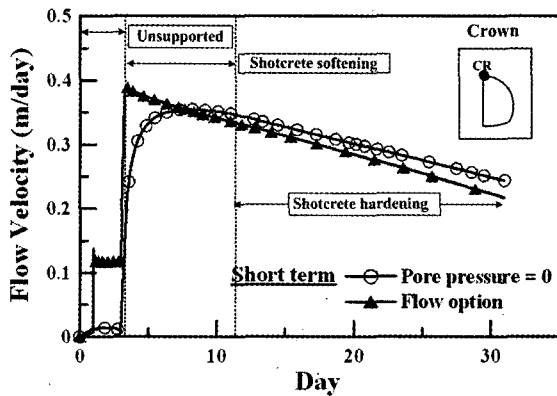


(a) 시공직후

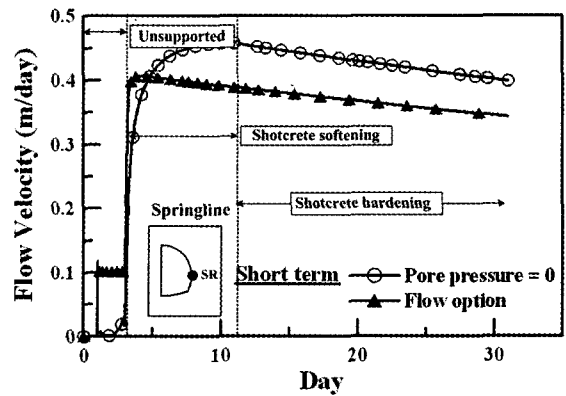


(b) Long term 시

그림 25. 배수모델링에 따른 지하수위 저하



(a) 천단부



(b) 측벽부

그림 26. 배수모델링에 따른 터널내부로의 지하수 유입속도

그림 25와 그림 26은 배수모델링 방법에 따라 지하수위 저하와 터널내부로의 지하수 유입속도를 비교하고 있다. 그림에서 볼수 있듯이 지하수위 저하량은 flow option을 사용한 경우 5m 가량 더 크게 발생하여 굴착면 간극수압 “0”인 경우에 비하여 25% 가량 증가한 것으로 나타났으며, 터널내부로의 지하수 유입속도는 굴착면 간극수압 “0”으로 모델링한 경우가 10~15% 가량 크게 나타났다.

5.3 측면경계 범위의 영향

본 연구에서 고려한 수리적 조건은 지하수 유입은 측면 경계를 통해서만 허용하며 지표로부터의 유입되는 지하수 유동은 배제하였다. 이와같은 모델링에서는 터널중심으로부터의 측면경계범위가 지하수위면(phreatic surface)의 형상과 관계되어 지하수위 저하량 및 지하범위에 영향을 미치게 된다. 본 절에서는 터널 굴착시 지하수 저하를 동반하는 경우에 대하여 측면경계로부터

지하수 유입이 실제 조건에서 지하수위면의 형상과 저하량에 영향을 미치지 않도록 하는 최적 측면경계 위치를 선정하는 내용을 다루었다.

그림 27과 그림 28은 측면경계 범위에 따라 시공직후와 향후 10년 후 정상류 상태에 이르렀을 때의 지하수위 저하와 지표침하를 도시하고 있다. 그림을 관찰하면 시공직후에는 측면경계 범위가 8D 이상인 경우에는 범위에 따라 지하수위 저하 및 지표침하가 그다지 차이가 크지 않으나 장기거동 검토시, 즉 정상류 상태에 도달한 경우에는 측면경계에 따라 지하수위 저하량과 지하범위 및 지표침하가 지대한 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 측면경계범위가 확대된 조건일수록 측면에서의 지하수 유입이 원거리에서 발생하므로 배출량≥유입량 관계가 형성되어 지하수위 저하량 및 지표침하가 크게 나타난 것이다.

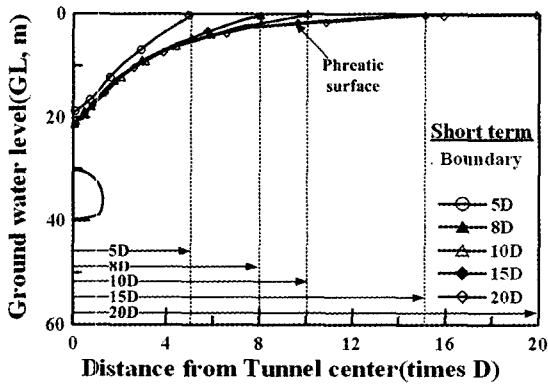
결과를 정리하여 측면경계범위에 따라 최대지하수위 저하 및 최대지표침하를 도시하고 있는 그림 29를 보면, 시공직후 측면경계범위가 8~10D 이상 확보되는 경우 지

표침하 및 지하수위 저하는 측면경계 범위에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타나고 있으나, 장기거동에 있어서는 경계조건 범위가 증가함에 따라 최대 지표침하가 계속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 토대로 실제 시공조건에 대하여 검토하는 경우 시공중에 대한 평가시 측면경계범위를 8~10D 정도 확보하는 것으로 충분하나 장기거동 평가시에는 그 이상의 범위를 확보해야 현

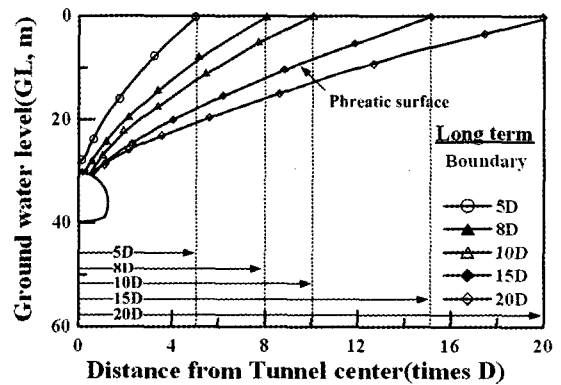
실적인 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단되었다.

5.4 라이닝 모델링 방법의 영향

앞서 언급하였지만 터널시공과 지하수의 상호작용 고려시 주안점은 지하수 저하로 인한 지반거동과 수입을 받는 터널 라이닝의 설계가 된다. 지하수가 존재하는

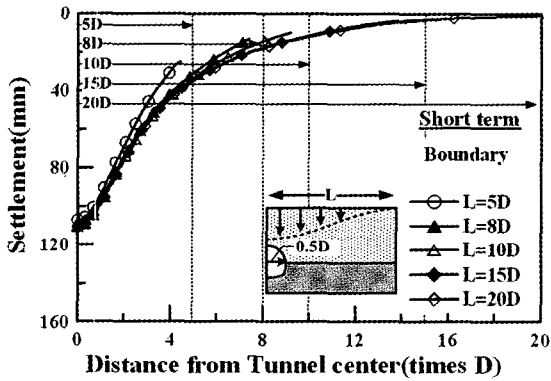


(a) 시공직후

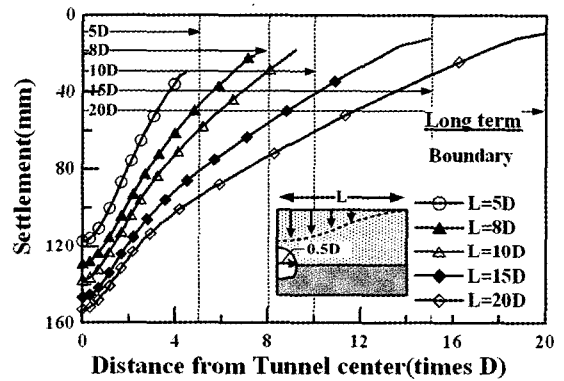


(b) Long term 시

그림 27. 측면경계 범위에 따른 지하수위 저하곡선

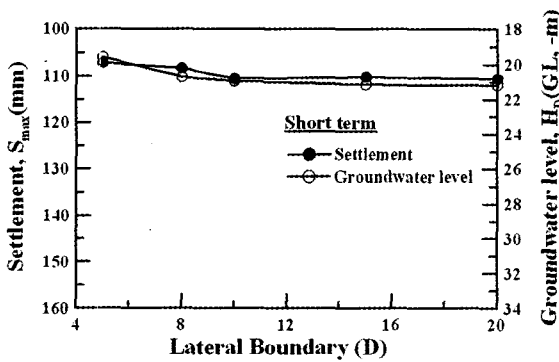


(a) 시공직후

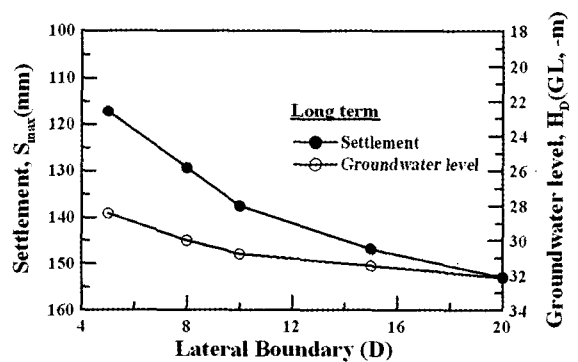


(b) Long term 시

그림 28. 측면경계 범위에 따른 지표침하곡선



(a) 시공직후



(b) Long term 시

그림 29. 측면경계 범위에 따른 최대지하수위 저하량 및 최대지표침하

지반조건에서 라이닝은 상부지반의 하중으로 인한 응력과 함께 지하수 수두에 해당하는 수압이 작용하며, 터널 내부로의 지하수 유동이 가능하도록 수리적 특성이 반영되어야 하며 터널내부의 수압은 “0”으로 하는 복잡한 모델링을 요구한다. 2차원 해석시 일반적으로 라이닝은 빔 요소로 모델링하는데 이 경우 빔 요소가 연계해석이 가능하지 않으므로 앞서 4.2절에서 언급한 바와 같이 빔 요소에 접해 있는 외부 솔리드 요소에 역학적 특성은 해당 지반의 물성으로 사용하되 수리적 특성은 라이닝의 물성을 사용하여 연계해석이 가능하도록 모델링할 수 있다. 이러한 번거로움을 피하기 위하여 라이닝을 빔 요소로 모델링하지 않고 솔리드 요소로 모델링할 수도 있다. 이와 같은 라이닝 모델링 방법에 따른 연계해석 결과 지표침하와 지하수위 저하, 터널주변 간극수압 등의 결과는 거의 일치하는 것으로 나타났다.

그림 30과 그림 31은 라이닝 모델링에 따라 영향을 받

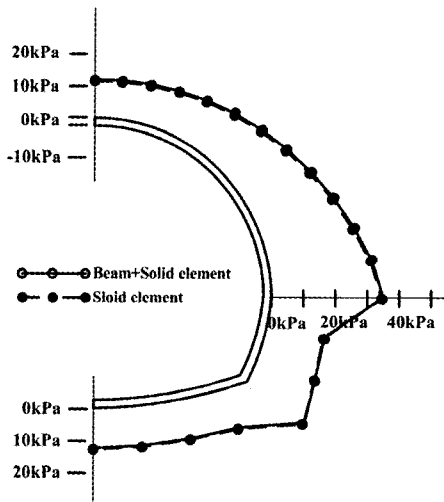


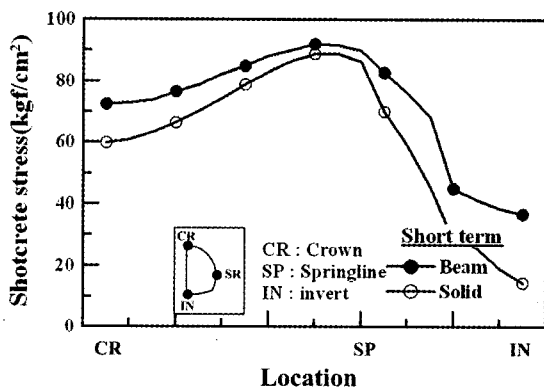
그림 30. 라이닝 모델링에 따른 라이닝 배면수압

을 수 있는 라이닝 배면에 작용하는 수압과 라이닝 압축응력을 각각 비교하고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 라이닝 배면수압의 경우 거의 일치하는 것으로 나타났으며, 라이닝 압축응력 역시 정성적으로는 유사한 경향을 보였으며 정량적으로는 솔리드 요소가 빔+솔리드 요소를 사용한 경우에 비하여 10~15% 가량 작게 발생하고 있다.

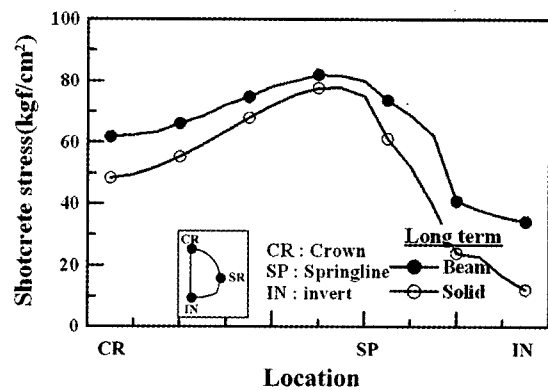
6. 결론

본 논문에서는 응력-간극수압 연계해석시 터널의 거동 및 주변지반에 미치는 영향인자를 모델링 측면에서 고찰하였다. 이를 위해 철도터널 ○-○공구 현장의 지반조건을 대상으로 연계해석 측면에서 해석결과에 영향을 미칠 수 있는 다양한 인자들에 대하여 매개변수연구를 수행하였으며, 그 결과를 토대로 연계해석시 반영하여야 하는 주요내용을 정리하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결과는 다음과 같이 요약된다.

- (1) 터널굴착으로 인하여 지하수 유동이 발생하여 지하수위가 저하되는 시공조건에서는 포화상태의 지반이 불포화 상태로 전이되며 지반내부의 간극수압이 발생하므로 연계해석 모델링시 불포화토 특성을 반영하여야 한다. 불포화토 특성을 반영하지 않은 경우 분석결과 시공직후의 지하수위 저하는 물론 지표침하, 라이닝 압축응력을 과대평가되며, 라이닝 배면수압 및 터널내 유입수량은 과소평가되는 것으로 나타났다.
- (2) 터널시공시 굴착면을 통해서 지하수가 유출이 되므로 이와 같은 현상을 모델링에 반영하여야 한다. 지하수 유출을 모사하는 방법으로는 굴착과 동시에 굴착면의 해당 절점들에 간극수압을 “0”으로 부여



(a) 시공직후



(b) Long term 시

그림 31. 라이닝 모델링에 따른 라이닝 압축응력

하는 방법과 터널굴착면 요소의 간극수압이 부의 간극수압에 도달할 때까지 배수가 되도록 모델링하는 방법이 있다. 모델링 방법에 따라 지표침하의 차이는 5% 이내로 나타나 그다지 차이가 없는 것으로 나타났으나, 굴착면 요소의 간극수압이 부의 간극수압에 도달할 때까지 배수가 되도록 모델링하는 조건에서 지하수위 저하는 시공직후 약 25% 가량 크게 나타났으며, 터널내 지하수 유입속도는 10~15% 가량 작게 나타나는 것으로 분석되었다.

- (3) 지하수 유입에 대한 수리적 경계조건을 측면 경계를 통해서 유입되도록 모델링하는 경우 터널중심으로부터의 측면경계범위가 지하수위면(phreatic surface)의 형상과 관계되어 지하수위 저하 및 지표침하에 영향을 미치게 된다. 터널 굴착시 지하수 저하를 동반하는 경우에 대하여 측면경계범위에 대한 최적조건을 도출한 결과 시공중 검토에 있어서는 8~10D 이상 확보하는 것으로 충분하나 장기침하 예측을 위해서는 그 이상 확보하여야 현실적인 검토가 가능한 것으로 나타났다.
- (4) 연계해석시 라이닝을 모델링하는데 있어 빔 요소는 연계해석이 가능하지 않으므로 빔+솔리드 요소를 복합적으로 사용하여 빔 요소는 라이닝의 역학적 특성이 반영되도록 하며 솔리드 요소는 지반의 역학적 특성과 라이닝의 수리적 특성이 반영되도록 모델링할 수 있다. 이러한 번거로움을 피하기 위하여 솔리드 요소를 이용하여 라이닝을 모델링한 경우 지표침하와 지하수위 저하, 라이닝 배면수압 등의 해석결과는 거의 일치하는 것으로 나타났으나 라이닝의 압축응력은 10~15% 가량 과소평가 할 수 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2005년 건설교통부가 출연한 IT 기반의 지하공간 지보시스템 설계기술 개발(과제번호 : C104A1010001-05A0501-00220)과 한국형 싱글셀 터널공법 메카니즘 이론 정립 및 설계/해석 요소기술 개발(과제번호 : C103A1000026-04A0200-02320) 연구비 지원에 의해 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 유충식 (2003), “지하수와 터널굴착 - 3차원 연계해석을 통한 고찰”, *한국터널공학회 불 정기 학술발표회 논문집*, pp.127-138.

2. 유충식 (2003), “터널시공과 지하수의 상호작용”, *대한토목학회 학술발표회 논문집*, pp.4664-4669.
3. 유충식 (2005), “용력-간극수압 3차원 연계해석을 이용한 터널시공과 지하수의 상호작용으로 인한 라이닝 거동특성 연구”, *한국지반공학회 학술발표회 논문집*, pp.465-474.
4. 유충식 (2005), “터널시공과 지하수의 상호작용이 터널의 거동에 미치는 영향”, *한국터널공학회 논문집*, pp.97-108.
5. Adachi, T., Kikuchi, T., and Kimura, H. (1988), “Behavior and simulation of soil tunnel with thin cover”, *Proc., 6th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics*, Innsbruck, Austria, 1585-1590.
6. ABAQUS users manual, Version 6.5. (2005), *Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Inc.*, Pawtucket, Providence, R.I.
7. Atawa, M., and Leca, E. (1984), “Analysis of groundwater seepage into tunnels”, *Proc., Int. Congress on Tunneling and Ground Conditions*, Cairo, Egypt, 303-310.
8. Biot, M.A. (1941), “General theory of three dimensional consolidation”, *J. Appl. Phys.*, Vol.12, pp.155-164.
9. Biot, M.A. (1955), “Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid”, *J. Appl. Phys.*, Vol.26, No.2, pp.182-185.
10. Gunn, M. J., and Taylor, R. N. (1984), “Discussion on Atkinson and Mair (1983)”, *Geotechnique*, 35(1), 73-75.
11. Katzenbach, R. (1985), “The influence of soil strength and water load to the safety of tunnel driving”, *Proc., 5th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics*, Nagoya, Japan, 1207-1213.
12. Lu, N and Likos W. (2004), *Unsaturated soil mechanics*, Wiley, USA.
13. Norwegian Urban Tunnelling (1995), *Norwegian Soil and Rock Engineering Association*, Publication No. 10.
14. Pottler, R., Hagemester, A., Schweiger, H. F., and Faust, P. (1994), “Influence of tunnel drive on groundwater level”, *Proc., 8th Conf. of the Int. Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Morgantown, 1249-1258.
15. Report on design issues of the concrete lining of the waterway tunnel (1997), KOWACO.
16. Schweiger, H. F., Schuller, H., and Pottler, R. (1999), “Some remarks on 2D models for numerical simulation of underground construction with complex cross-section”, *Proc., 8th Conf. of the Int. Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Wuhan, China, 1303-1308.
17. Shin, J.H., Addenbrooke, T.I., and Potts, D.M. (2002), “A numerical study of the effect of groundwater movement on long-term tunnel behavior”, *Geotechnique*, Vol.52, No.6, pp.391-403.
18. Shin, J.H., Potts, D.M., and Zdravkovic, L. (2002), “Three-dimensional modelling of NATM tunnelling in decomposed granite soil”, *Geotechnique*, Vol.52, No.3, pp.187-200.
19. Shin, J.H., Potts, D.M., and Zdravkovic, L. (2005), “The effect of pore-water pressure on NATM tunnel lining in decomposed granite soil”, *Can. Geotech. J.*, Vol.42, pp.1585-1599.
20. Ueshita, K., Sato, T., and Daito, K. (1985), “Prediction of tunneling effect on groundwater condition”, *Proc., 6th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics*, Nagoya, Japan, 1215-1219.
21. Vidar Kveldsvik & Kjell Karsrud, “Support methods and groundwater control”, *Norwegian Geotechnical Institute*, pp.69-77.
22. 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.

(접수일자 2006. 2. 10, 심사완료일 2006. 9. 26)