

지하수가 터널굴착에 미치는 영향에 관한 3차원 연계해석

3D coupled analysis on tunneling under groundwater

유충식*¹

Yoo, Chung-Sik

Abstract

This paper presents the effect of groundwater on tunnel performance. Fundamental issues in tunneling under high groundwater table together with an illustrative example are discussed. The effect of groundwater on tunnel excavation was examined using a 3D stress-pore pressure coupled finite-element analysis. The results of the 3D coupled analysis were then compared with those of a total stress analysis. Examined items included earth and pore pressures around lining, and lining stresses. Also the examined include face movement and ground surface movements. The results indicated that the effect of groundwater on tunnel excavation can only be captured through a fully coupled analysis. Implementations of the findings from this study are discussed in great detail.

Keywords: Tunneling, groundwater, coupled analysis, finite-element analysis

요 지

본 논문에서는 3차원 연계해석을 통해 지하수가 터널굴착에 미치는 영향을 고찰하였다. 먼저 국외사례를 토대로 높은 지하수위의 조건에서 터널시공시 발생하는 여러 가지 문제점을 짚어보았다. 아울러서 3차원 응력-간극수압 연계해석을 수행하고 그 결과를 토대로 라이닝 작용하중 및 유발응력, 막장안정성, 지표침하 등을 고찰하였다. 해석 결과 지하수가 터널굴착에 미치는 영향은 연계해석을 통해서 만이 이해가 가능하며 전응력해석을 수행할 경우 지하수의 영향을 과소 평가할 수 있는 것으로 나타났다. 한편, 본 해석에서 얻어지는 결과를 실무적 측면에서 다각도로 고찰하였다.

주요어: 터널, 지하수, 연계해석, 유한요소 해석

1. 서론

터널 설계/시공에서 “지하수 조절”은 터널시공 계획을 좌우하는 매우 중요한 인자로 간주된다. 도심지역에 시공되는 도심지터널이든 산악지역에 시공되는 산악터널이

든 많은 경우에 있어 지하수위 아래에 시공되는데 도심지의 경우 과거에는 터널 시공 중 안정성 확보를 목적으로 지하수를 터널 인버트 하부이하로 강제 저하시키는 경우가 많았으나 지하수 저하로 발생하는 지반침하나 환경적 요인을 고려하여 이제는 지하수 저하를 되도록이면

*1 정희원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수

억제하는 방향으로의 설계/시공이 요구되고 있다. 아울러서 도심지역이 아닌 산간이나 농촌지역에서의 철도 혹은 도로 터널 시공시 터널이 인근 하천이나 저수지 등을 인접하여 통과할 경우 터널내부로의 용수를 억제하지 않을 경우 주변 관정이 고갈되고 인근 저수지 수위가 저하되어 주변 물수지 변화에 대한 각종 민원이 발생할 소지가 있으므로 설계시 이에 대한 종합적인 검토가 요구된다.

지하수위 아래에서 터널 굴착으로 발생하는 지반 내 응력변화는 터널 주변의 간극수압의 변화를 동반하여 지반의 유효응력의 감소를 가져와 터널주변 지반의 하중지 지능력을 감소시키고 아울러서 흙의 체적변화로 인한 지반변형을 증가시킨다. 따라서 이러한 경우에 있어서의 터널 및 주변지반의 거동은 역학적 (mechanical) 측면과 수리학적 (hydraulic) 측면이 고려된 응력-간극수압 연계해석이 필요하다. 이러한 연계해석에서는 터널시공 중 발생하는 지하수위 저하의 영향을 검토하는 문제나 터널시공 후 터널라이닝의 균열이나 시공조인트 등을 통한 누수현상으로 인한 지하수위 저하 문제는 시간개념이 도입된 부정류 해석 (transient analysis)이 도입되어야 한다. 그러나 현재 실무에서 적용하고 있는 각종 터널 해석 프로그램의 연계해석 기능의 제한성 및 해석 모델링에서의 기술적인 어려움 등으로 인해 터널굴착과 지하수의 상호작용이 고려된 응력-간극수압 연계해석을 설계에 적절하게 반영한 예는 그다지 많지 않다.

이러한 측면에서 본 논문에서는 터널굴착과 지하수의 상호관계를 노르웨이 터널 시공사례를 통해 알아보고 응력-간극수압 연계해석에 대한 수치모델링의 기본 이론 제시하였다. 아울러서 3차원 유한요소해석 기법을 도입하여 지하수위 아래에서 시공되는 터널의 장·단기 거동 메카니즘을 고찰하였으며 지하수억제 및 터널안정성 확보 차원에서 수행되는 그라우팅이 터널의 거동에 미치는 영향을 정성·정량적으로 고찰하였다.

2. 노르웨이의 Romeriksporten 철도터널 사례

과거 노르웨이에서 수행된 여러 터널 프로젝트에서 얻어진 터널과 지하수와 관련된 문제의 공통된 점은 다음

과 같이 요약 된다 (Water Control in Norwegian Tunnelling, 2001).

- 지하수 관리에 소홀한 경우 주변구조물에 많은 손상을 야기시켜 법적 소송으로 이어지며 터널 관련 산업에 대한 인식이 나빠진다.
- 일반국민의 지하수를 포함한 환경에 대한 인식의 중요성이 높아지고 있으나 터널시공이 주변 환경에 미치는 영향에 대한 허용한계는 지속적으로 감소하고 있어 정밀한 터널 설계 및 엄격한 시공관리의 필요성이 높아지고 있다.
- 터널이 장대화·대심도화 되면서 이에 따른 수압 및 수두 증가로 인해 지하수의 영향이 증가하므로 지하수 관리의 중요성이 증가하고 있다.

1999년에 완공된 노르웨이의 Romeriksporten 철도터널은 위에 제시된 사항을 잘 반영하는 시공사례로 간주되며 본 장에서는 시공 중 발생한 각종 문제점에 대해 소개하고자 한다.

2.1 개요

Romeriksporten 터널은 오슬로와 인근 신 공항을 연결하는 총 연장 42km에 달하는 고속철도의 일부구간으로 총 연장 13.8km의 단선 쌍굴터널이며 굴착단면적은 102m²으로서 Drill & Blast 공법으로 시공되었다 (그림 1). 주 지보재로서는 습식 슛크리트와 록볼트가 활용되었으며 총연장 5% 정도의 구간에 현장타설 콘크리트 라이닝이 적용되었다. 그림 1에서와 같이 현장의 암반은 프리캠브리안 편마암이 주종을 이루며 일부 구간에 석회암과 셰일이 존재하며 인접한 단층대의 운동으로 인해 암반에 점토충진물이 협재된 절리가 많이 발달하였다. 터널의 심도는 100~250m 정도로서 수직응력이 수평응력 보다 현저히 큰 것으로 조사되었다. 주변에는 점토지반위에 건설된 빌딩 및 가옥을 포함한 작은 부락이 형성되어 있으며 지하수위는 매우 높은 것으로 조사되었다. 터널은 총 다섯 개의 막장으로 동시 굴착되었으며 시공 중 차수를 위해 시멘트, 마이크로 시멘트, 아크릴 레진 계열의 다양한 그라우팅 공법이 적용되었다. 2차 라이닝

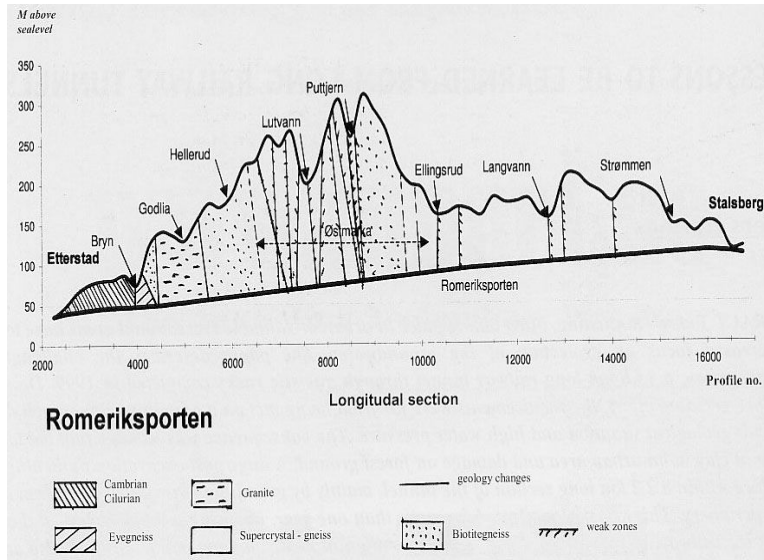


그림 4. Romeriksporten 터널 지층구조

으로서 길이 2.5km의 일부 구간에 프리캐스트 콘크리트 아치를 시공하였으며 누수가 많은 구간에 PE-폴과 두께 6 cm의 슛크리트를 추가로 설치하였다. 시공 후 터널내 부로의 용수량이 증가하여 약 2.2km 구간에 1년여에 걸쳐 대폭적인 그라우팅을 실시하였으며 이로 인해 준공이 늦어져 사회적인 쟁점으로 부각되었다.

2.2 조사 및 일반적 요구사항

계획단계에서 지반조사시에는 단층대 및 연약대의 위치, 조인트 패턴 그리고 암질 등 지질적 관점에 주안점을 두었다. 터널의 선형은 시·중점의 위치와 최소 토포고를 토대로 결정되었으며 지반-수리학적 관점에서의 수문지질도작성을 위한 코아채취를 위한 시추나 양수시험을 수행하지는 않았으나 단층대 인접부에서 집중적인 그라우팅이 필요할 것으로 예측되었다.

터널시공중 허용 용수량은 오슬로 지역의 다른 터널시공 경험으로 토대로 산악지역에서는 100m당 20~30 liter 정도로 설정하였으며 도회지가 형성되어 있는 구간 하부를 관통하는 지역에서는 터널내부로의 유입수량이 분당 약 10~15 liter/100m 정도가 되도록 제한하여 점

토지반의 간극수두가 2m 이상 저하되지 않도록 하였다.

터널내부로의 유입수량을 조절하기 위한 그라우팅의 필요성 여부와 수량의 산정은 시공 중 수반되는 시추조사를 통해서 결정하였으며 앞서 언급한 바와 같이 그라우팅은 시멘트, 마이크로 시멘트, 그리고 레진 그라우트 등을 사용하도록 규정되었다.

2.3 시공 중 발생한 문제점 및 교훈

터널시공 초기에 터널내 유입수량은 설계단계에서 예상한 양을 훨씬 상회하는 것으로 나타나 많은 구간에서 터널 굴착전 선그라우팅 (pre-grouting)이 수행되었다. 선그라우팅 수행여부는 probe drilling을 수행하고 시추공으로의 유입량이 분당 5리터를 초과하는 경우에 대해 수행하였다. 특히 그림 2에서 도시된 바와 같이 Lutvann 계곡하부를 관통할 때 그 지역의 수두가 높고 단층대에 절리가 많이 형성되어 있는 관계로 터널 내부로의 유입수량이 허용치를 초과하여 추가의 그라우팅이 요구되었으며 이로 인해 공기가 지연되는 등 많은 문제점이 도출되었다. 결국 총 연장 중 37%에 달하는 구간에선 그라우팅이 수행되었으나 이러한 노력에도 불구하고

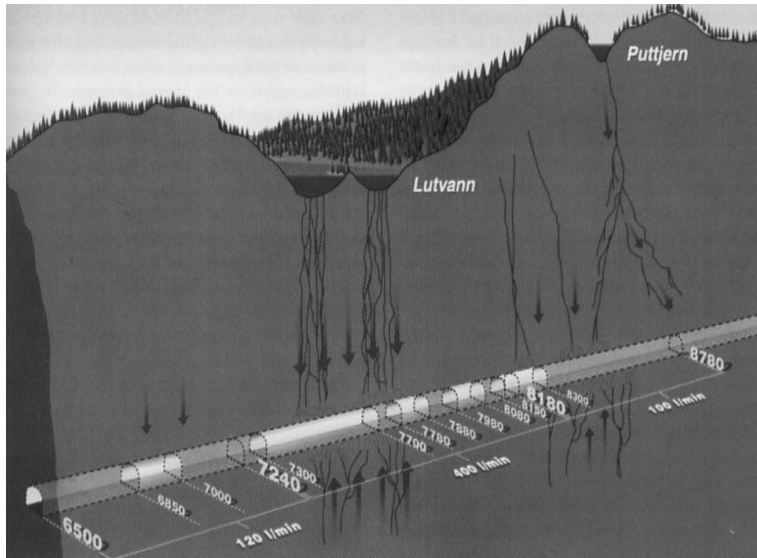


그림 5. Romeriksporten 터널 시공 개요

시공 후에도 터널내 용수로 인해 주변에 막대한 영향을 주었으며 acrylamide가 포함된 Siprogel을 이용한 과다한 그라우팅으로 인해 환경오염문제가 추가로 대두되는 등 터널 프로젝트 자체가 정치적·경제적 쟁점화 되었다.

특히 도회지가 형성된 Hellerud에 인접한 구간에서는 지반내 간극수두가 크게 저하되어 주변 건물이 침하되고 급기야 큰 구조적 손상이 발생하는 등 터널내부로의 용수로 인해 발생하는 문제점이 가시화 되었다. 한편, 이보다도 일반인들의 관심을 모은 것은 인근 휴양 산림지에 형성 호수의 수위가 저하되고 인근 지역 및 주변 나무들이 수 미터 가라앉는 등 주변 환경에 막대한 영향을 미친 점이다. 문제가 발생한 지역 하부의 약 2.2km 구간이 관심의 초점이었는데 이 구간에서는 굴착 후 분당 2500 liter 이상의 용수가 유입된 것으로 관측되었다. 추가 그라우팅으로 분당 300 liter 정도로 감소시킬 수 있었으나 이는 허용치를 훨씬 초과하는 수치여서 약 30여개의 관측정을 설치하고 지하수위 회복을 위해 펌프라인을 설치하는 등의 조치를 취하였다.

한편, 시공 완료 후에도 계속되는 터널내 과다 용수를 해결하고 용수량은 분당 25~30 liter의 허용치를 만족

시키기 위해 시공 후 터널 주변을 4~10m 폭의 그라우팅을 실시하였다. 그라우팅을 수행하는데 있어 대부분의 용수가 집중되는 인버트 부분에서의 그라우팅 주입에 많은 어려움을 겪었다. 1997년 11월부터 1999년 1월까지 수행된 시공 후 그라우팅에는 전 연장의 시공비에 상당하는 비용이 소요되었으며 그럼에도 불구하고 일부구간의 용수량은 허용 누수량을 초과하여 부득이 터널로부터 용수를 주변 지반에 재 충전(re-infiltration)하는 시스템을 채택하였다.

본 프로젝트에서 얻어진 교훈은 다음과 같이 요약된다.

- 터널시공 대상인 지반/암반의 불확실성에 대한 대처 시나리오의 필요성
- 지하수 조절에 있어서 시공 전 그라우팅이 시공 후 그라우팅 보다 효율적이고 용이하다는 점
- 그라우팅 재료에 대한 연구개발의 필요성
- 장기적인 영향에 대한 평가 및 설계반영

3. 터널해석에 있어서의 응력-간극수압 연계 해석

3.1 기본개념

지하수위 아래에서 시공되는 터널의 역학적 거동은 터널 주변지반의 유효응력에 지배되므로 응력과 간극수압이 연계된 해석 (stress-pore pressure coupled analysis)을 수행하여야만 현실적인 평가가 가능하다.

응력-간극수압의 연계해석에서는 지반을 다상재료 (multiphase material)로 간주하고 유효응력 개념을 적용하여 거동을 표현한다. Biot (1941, 1955)와 Zienkiewicz와 Shiomi (1984)가 제안한 기본적인 완전 연계 유효응력 과정은 선형 운동량의 평형 및 질량 보존의 법칙과 같은 물리적 법칙을 토대로 식 (1) 및 (2)와 같이 정식화 된다.

$$\sigma_{ij,j} - \rho b_j = -\rho \ddot{u}_i \quad (1)$$

$$n(v_{i,i} + \dot{\epsilon}_{vwc}) + \dot{u}_{i,i} = 0 \quad (2)$$

식 (1)에서 σ_{ij} =전응력; ρ =흙의 밀도; b_j =물체력; u_i =흙입자의 변위이며 식 (2)에서 v =침투속도; ϵ_{vwc} =압축으로 인한 간극수의 체적 변형률; 그리고 n =간극률이다. 식 (1)과 (2)로 정의되는 물리적 법칙이 흙입자, 간극수, 침투에 대한 구성법칙과 연계되는 과정을 토대로 유도되는 지배 방정식은 해석 대상 도메인에 대한 경계조건 및 초기조건을 토대로 해를 찾게 된다.

3.2 정상류 및 부정류 해석

응력-간극수압 연계해석은 시간개념의 적용여부를 토대로 정상류 (steady state) 해석과 부정류 (transient) 해석으로 구분된다. 정상류해석은 외부환경 변화에 의해 침투가 발생하여 평형상태에 도달한 후에 대한 해석결과를 제시하게 되며 평형상태에 도달하는 과정에 대한 결과는 얻을 수 없다. 터널해석적 측면에서 정상류 조건에 대한 해석은 터널굴착으로 지하수위가 어느 정도 저하되고 주변 지반변형에 어느 정도 영향을 미치는지에 대한 평가시 적용할 수 있다. 반면에 부정류 해석은 시간개념

이 도입된 것으로서 터널굴착으로 침투가 발생하는 시점에서 평형상태에 도달하는 시점까지 임의의 시간에서의 해를 얻을 수 있다. 즉, 부정류 해석을 수행함으로써 터널굴착 후 시간에 따른 지하수위 저하 경향과 이에 따른 터널 및 주변지반의 거동을 파악할 수 있다.

3.3 경계조건

수치해석에 있어서 지배방정식은 해석대상 조건에 대한 경계조건과 초기조건을 부여하여 해를 얻게 된다. 즉, 응력해석에서 변위에 대한 경계조건을 부여하는 것과 같은 개념으로 응력-간극수압 연계해석에서는 해석 영역에 대해 수압에 대한 경계조건을 부여하여야 한다. 응력해석에서의 경계조건과 마찬가지로 연계해석에서의 경계조건은 해석결과에 지대한 영향을 미치는 모델링 측면에서 매우 중요한 항목이라고 할 수 있다.

일반적으로 하저터널 이나 주변에서 지하수가 지속적으로 유입되어 터널 내부로의 지하수 유입에도 불구하고 지하수위가 저하되지 않는 경우는 “지하수위 유지조건”에 대한 해석이 타당하며 따라서 이때 초기 지하수위면은 해석과정에서 일정하게 유지되는 “일정수위 경계”의 경계조건을 부여하여야 한다. 그 밖의 “지하수위 저하조건”이 성립되는 경우에는 “원거리 경계부 (far field boundary)”에 “일정수위 경계조건”을 부여하여야 한다.

4. 해석사례

본 논문에서는 직경 10m, 토피 30m의 철도터널이 풍화함에 시공되는 경우에 대한 3차원 연계해석 결과를 다루었다. 해석에서는 연계해석 및 전응력 해석을 각각 수행하여 차이점을 검토하고 터널 주변에 그라우팅이 시공되는 경우에 있어서 터널의 안정성 및 간극수압 분포에 미치는 영향을 검토하였다. 한편, 연계해석에 있어서 터널굴착에 따른 지하수 저하 경향과 이에 따른 터널의 거동을 검토하기 위해 “지하수 저하조건”에 대한 해석을 수행하였다.

4.1 해석조건

해석에서는 그림 3과 같이 서울 도심 지역에서 일반적으로 나타나는 지반조건을 고려하였다 (Shin 등 2002). 보이는 바와 같이 상부 5m는 실트질 모래로 이루어진 매립층 및 충적층으로 구성되어 있으며 그 하부에는 두께 10m의 화강 풍화토층이 화강 풍화암 상부에 위치한다. 터널은 화강 풍화암층에 시공되는 것으로 가정하였다. 주 지보재로 두께 30cm의 슛크리트가 시공되며 하루당 2m의 굴진속도로 시공되는 것으로 간주하였다 (Shin 등 2002). 해석의 편의상 록볼트는 모델링에서 제외하였다.

4.2 해석 모델링

4.2.1 적용 프로그램 및 이산화

해석에서는 범용 유한요소해석 패키지인 ABAQUS 6.3을 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-간극수압 연

계해석 알고리즘을 채택하고 있다는 장점이 있다.

해석 영역의 모델링에 있어서 해석 모델링의 편의상 터널은 전단면 굴착으로 시공되는 것으로 가정하였으며 터널중심축으로부터 좌우 대칭인 점을 고려하여 우측 반단면에 대한 해석을 수행하였다. 한편, 터널 중심으로부터 약 8D (D=터널직경)의 거리에 측면 경계면을 위치시켜 수평방향으로의 변위를 구속하였으며 터널 바닥으로부터 약 2D 하부에 하부 경계를 위치시키고 롤러를 설치하여 연직방향의 변위를 구속하였다. 종방향 해석 영역 역시 터널이 시작되는 지점으로부터 8D까지 설정하였다.

지반 및 지보재의 이산화에 있어서 지반은 8절점 가감적분 응력-간극수압 연계 고체요소 (C3D8RP)를 적용하였으며 슛크리트는 4절점 가감적분 쉘요소를 이용하여 모델링하였다. 한편, 록볼트는 3절점 트리스 요소 (T3D)로 모델링하였다. 그림 4는 해석에 적용된 유한요소모델을 보여주고 있다.

4.2.2 경계조건 및 굴착과정 모사

응력-간극수압 연계해석에서는 해석 영역에 대해 변위에 대한 경계조건을 부여함과 아울러서 수리적 경계조건을 부여하여야 한다. 먼저 터널의 횡단면 중심축과 일치하는 단면 ($x=0$)과 터널굴착 시점 ($y=0$)에는 no-

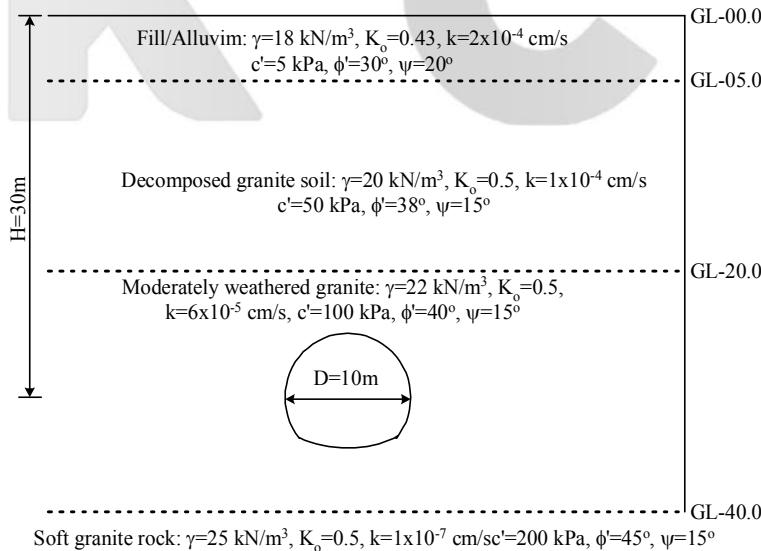


그림 6. 지반조건

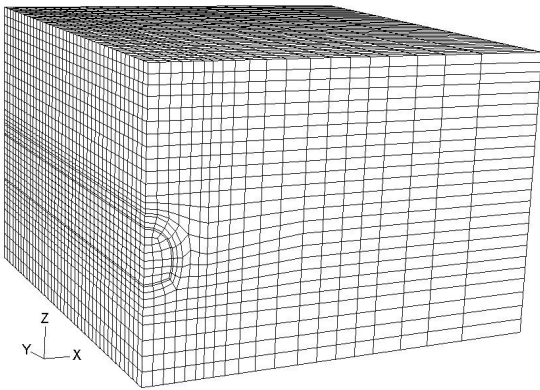


그림 7. 해석에 적용된 유한요소망

flow의 경계조건을 부여하였으며 그 밖의 측면경계와 하부경계에는 초기조건으로 부여한 수압이 일정하게 유지 되도록 하였다. 아울러서, 터널 시공 중 및 시공 후 발생하는 침투과정에서 원 지하수위 위치에 no-flow 경계를 부여하여 지하수의 터널내부로의 유입은 연직 및 하부경계를 통해서만 이루어지도록 하였다.

터널 굴착이 시작되면서 터널 굴착면 주위에서의 응력 해방과 함께 지하수가 터널 내부로 유입되고 터널의 거동은 지반내 유효응력에 좌우된다. 터널굴착과 함께 발생하는 지하수의 유입은 터널굴착면을 따라 간극수압 $u=0$ 의 경계조건을 부여하는 방법으로 모사하였다. 한편, 슛크리트 라이닝이 타설 후 터널내부로의 지하수위 유입량은 결국 슛크리트의 투수성에 좌우되며 이에 대한 모델링은 Shin 등 (2002)이 제시한 모델링 기법을 적용하여 즉 터널 굴착면에 설치되는 라이닝은 구조요소인

셀요소를 이용하여 모사하나 연계해석이 안되는 점을 감안하여 주변에 30cm 두께의 고체요소를 형성하고 라이닝의 투수계수 ($k_{\text{ring}}=1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$)를 부여하여 라이닝 설치에 따른 유입량 억제 효과를 모사하였다.

터널 굴착과정의 모사는 현장 시공공정을 최대한 반영 하도록 하여, 기존의 시공자료 및 연구결과를 토대로 1일 굴진장을 2m로 설정하였으며 굴착후 슛크리트 라이닝은 비교적 짧은 시간에 설치되는 것으로 가정하였다. 본 해석에서 채택한 굴진과정에 대한 개요도가 그림 5에 나타나 있다.

5. 해석결과 및 고찰

앞서 언급한 바와 같이 일반적으로 흙 또는 암반의 응력-변형률-강도 특성은 유효응력에 의해 좌우된다. 따라서, 지하수위가 터널 상부에 위치하는 시공조건에서의 터널 및 주변 지반의 거동은 단지 지하수로 인한 추가적인 수압만을 고려하는 것으로는 그 영향을 과소평가하는 결과를 초래할 수 있다. 본 절에서는 앞에서 언급한 조건에 대한 전응력 및 유효응력 해석 결과를 비교하고 그 결과를 분석하였다.

5.1 터널 작용하중 및 라이닝 유효응력

그림 6에서는 터널 막장 1.5D 후방에 위치하는 단면에서의 터널라이닝에 작용하는 토압 및 수압을 보여주고 있다. 그림 6(a)에 보이는 바와 같이 연계해석의 경우

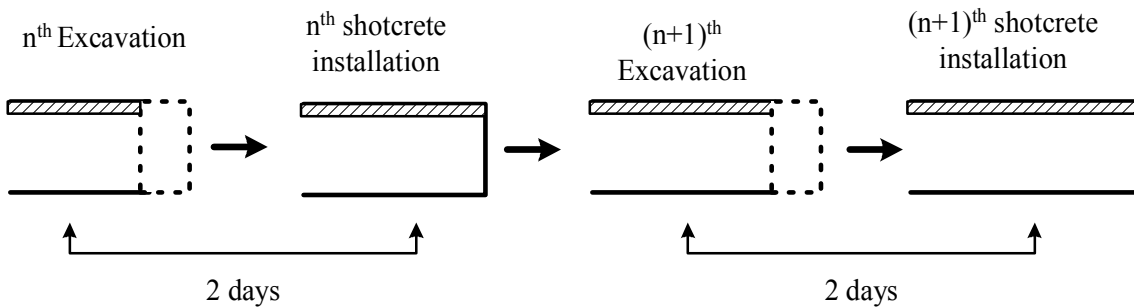


그림 8. 굴진과정 모사 개요도

최대 터널중심부 유효상재압의 약 60% 정도가 어깨부에서 발생하는 것으로 나타났으며 일정한 크기의 침투 수압 (약 80kPa)이 터널 전반에 걸쳐 작용하는 것으로 나타났다. 숯크리트 라이닝 배면의 수압은 숯크리트 라이닝의 차수 효과에 기인한 것으로서 라이닝 설계시 침투 수압 고려의 필요성을 보여주고 있다. 전응력 해석 결과의 경우 그림 6(b)에서 관찰할 수 있는 바와 같이 최대 터널중심부 상재압의 약 60% 정도가 어깨부에서 발생하

는 것으로 나타나 상재압대비 라이닝 주변 토압은 거의 유사한 것으로 나타났다.

연계해석 및 전응력 해석으로부터 얻어진 숯크리트 라이닝 유발응력이 그림 7에 제시되어 있다. 이 그림에서는 몇 가지 중요한 경향을 관찰할 수 있는데 먼저 연계해석이 전응력해석 보다 1.5배 정도의 큰 응력을 제시하는 것으로 나타나 라이닝 응력 검토시 전응력해석으로는 부적절한 검토가 이루어 질 수 있음을 보여주고 있다. 한

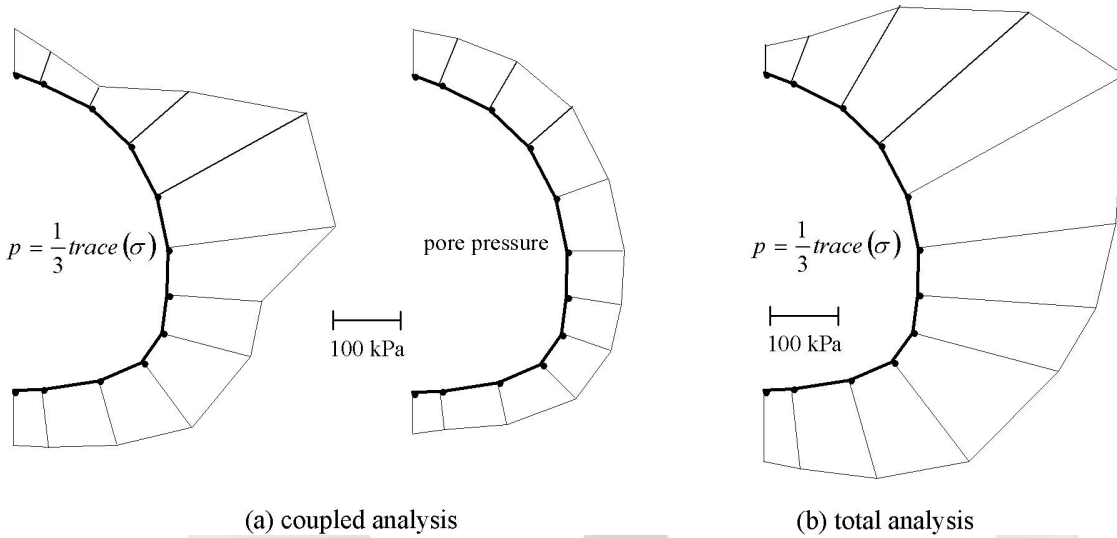


그림 9. 토압 및 간극수압 분포

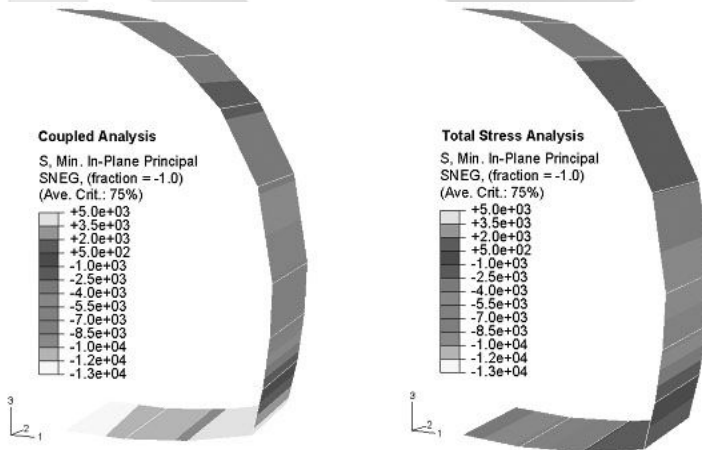


그림 9. 숯크리트 라이닝 최대주응력 분포

편, 최대 압축응력은 연계해석의 경우 인버트에서 발생하는 반면 전응력해석에서는 측벽부에서 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 인버트 하부로의 침투로 인한 수압에 기인한 것으로 앞서 소개한 기존의 시공 경험과도 잘 일치함을 알 수 있다.

5.2 간극수압 분포

그림 8은 터널시점에서 약 3.6D 떨어져 위치하는 Section 11의 수압분포를 터널 굴진과정에 따라 도시하고 하고 있다. 보이는 바와 같이 터널 막장이 후방 2.0D에 도달하면서부터 지하수위가 감소하는 경향을 보이고

있어 막장전방의 상당한 영역이 이미 터널굴착의 영향으로 지하수위가 저하됨을 알 수 있다. 아울러서 임의 단면에 있어서 터널 관통시의 지하수위가 거의 최종 수위에 도달하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 그라우팅 범위 설정시 수위저하를 최대한로 억제하기 위해서는 굴착 후 수행하는 그라우팅은 지반의 본 지층구성 조건에서는 그다지 효율적이지 못함을 의미하며 막장전방 약 1.5D 정도를 선 그라우팅하는 것이 매우 중요함을 단적으로 보여주고 있다.

그림 9는 임의단면에서의 숏크리트 라이닝 주변 수압 분포를 굴착단계에 따라 보여 주고 있다. 보이는 바와 같이 막장이 도달하기 이전부터 수압이 감소하다 막장

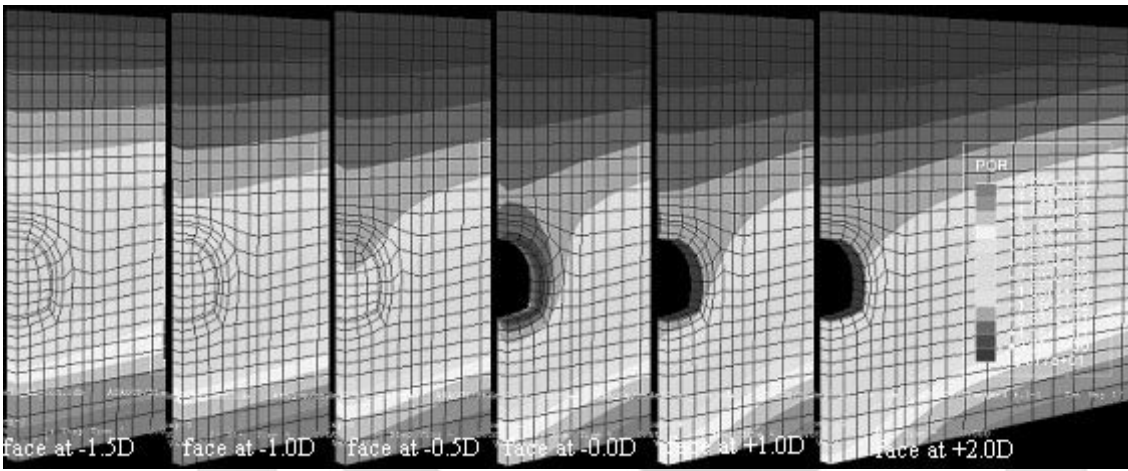


그림 10. 터널 굴착 중 간극수압분포 (Section 11)

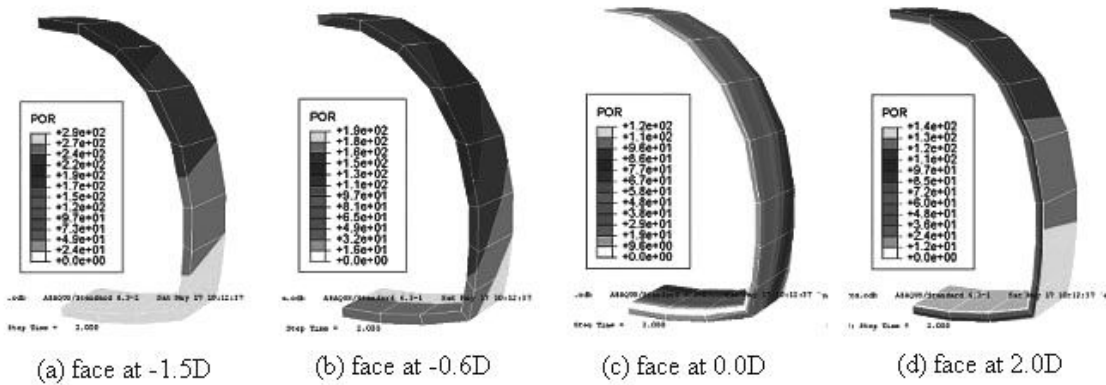


그림 10. 막장과과의 거리에 따른 라이닝 주변 간극수압 분포

통과시 수압이 최저점에 도달한 후 막장이 진전함에 따라 다시 증가하여 약 100 kPa 정도 까지 증가하는 경향을 보여 주고 있다. 이러한 경향은 앞서 언급한 바와 같이 숏크리트 라이닝의 차수로 인한 침투수압 증가현상에 그 원인이 있으며 터널굴착 후 지하수위가 인버트 하부로 저하되지 않는 경우에 있어서 정상류 상태에 도달한 후 침투로 인한 수압이 지속적으로 작용할 수 있다는 것을 의미하며 라이닝 배면으로의 지하수 유입을 허용하더라도 일정기간의 수압이 작용할 수 있다는 것으로 의미하여 라이닝 설계시 이에 대한 고려가 필요하다는 점을 보여준다고 할 수 있다.

5.3 터널 및 주변 지반 변위거동

높은 수두하에서의 터널굴착시 터널의 안정성은 막장의 안정성 확보여부와 밀접한 관계가 있다. 그림 10은 터널막장 전방에서의 수평변위를 비교하고 있다. 보이는 바와 같이 막장에서의 최대 변위 또한 연계해석의 결과가 전응력해석의 결과에 비해 약 두 배 이상 큰 것으로 나타나고 있다. 이러한 경향은 막장에서의 침투수압에 기인한 것으로 지하수 아래에서의 터널굴착에 있어서 역시 막장의 안정성 확보가 관건이 됨을 단적으로 보여주고 있다. 이러한 경향은 전응력해석으로는 터널의 거동을 과소평가할 수 있음을 보여 주고 있으며 응력-간극수압 연계해석의 중요성을 반영한다고 할 수 있다.

앞서 언급한 바와 같이 굴착이나 기타 원인으로 의해

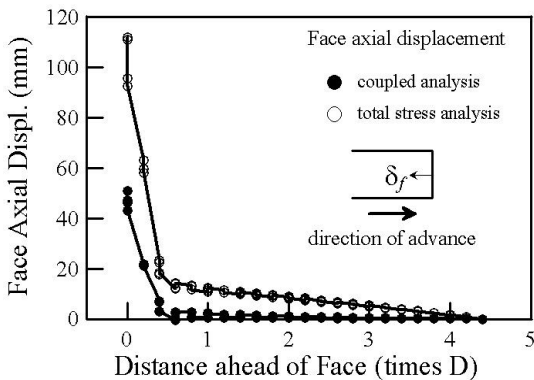
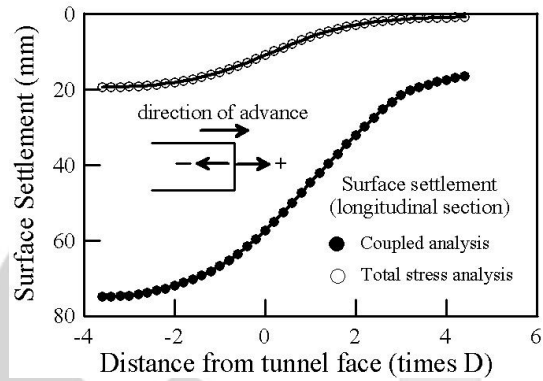
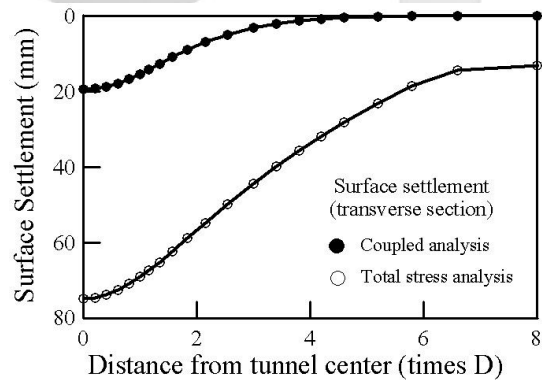


그림 11. 막장 전방 수평변위 비교

지하수가 저하 될 경우 유효응력의 감소로 인해 지반의 변형이 증가하므로 터널굴착으로 인해 지하수가 저하될 경우 주변지반의 침하는 크게 증가하게 된다. 그림 11과 12는 각각 횡·종단면상에서 터널 굴착으로 인한 지표침하 양상과 천단침하곡선을 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 연계해석의 결과가 전반적으로 전응력해석에 비해 월등히 큰 것으로 나타났으며 횡·종단면의 지표손실량을 고려할 때 약 다섯배 이상으로 나타나 지하수 저하를 허용할 경우 과도한 지반침하로 인해 주변 구조물에 막대한 영향을 미칠 수 있음을 보여주고 있다.



(a) 횡단면



(b) 종단면

그림 11. 지표침하곡선
(coupled analysis vs. total analysis)

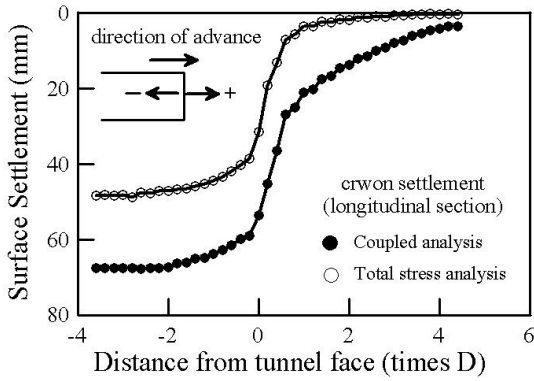


그림 12. 터널 천단부 침하곡선

5.4 그라우팅의 효과

터널굴착시 터널내부로의 지하수 유입을 억제하고 터

널의 안정성을 확보하기 위해 수행되는 그라우팅에 있어서의 주 설계항목은 주입범위라고 할 수 있다. 그라우팅의 주입범위는 결국 터널의 안정성 확보와 지하수위 억제라는 두 가지를 만족시키도록 수행하여야 한다. 본 절에서는 그라우팅에 따른 터널의 전반적인 거동을 분석하였다. 그라우팅 패턴은 횡단면상에서는 터널 외부로 약 0.5D, 종방향으로는 막장전방 0.5D까지 선 그라우팅이 되는 경우를 고려하였다.

그림 13은 간극수압 분포도를 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 그라우팅 적용시 지하수위 저하량이 1.5m 정도로 억제되는 경향을 잘 관찰할 수 있다. 한편, 그림 14~16은 막장의 수평변위 임의 단면에 타설된 슛크리트 라이닝에 작용하는 토압 및 수압, 그리고 유발응력을 그라우팅 실시 여부 및 범위에 따라 비교 하고 있다. 보이는 바와 같이 그라우팅을 적용함에 따라 전반적으로 지

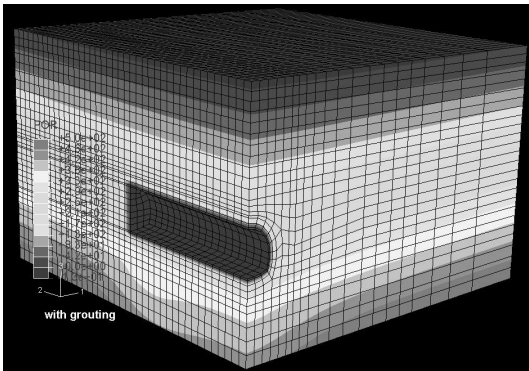


그림 13. 간극수압 분포

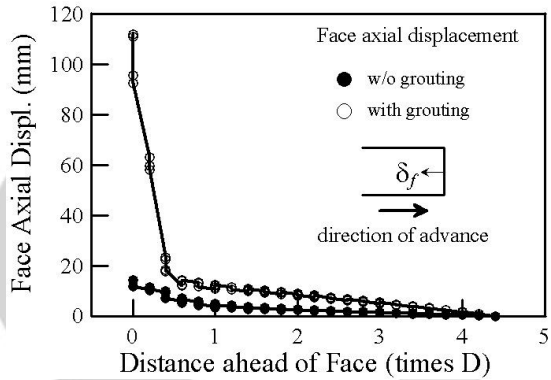


그림 14. 막장 전방 수평변위 비교

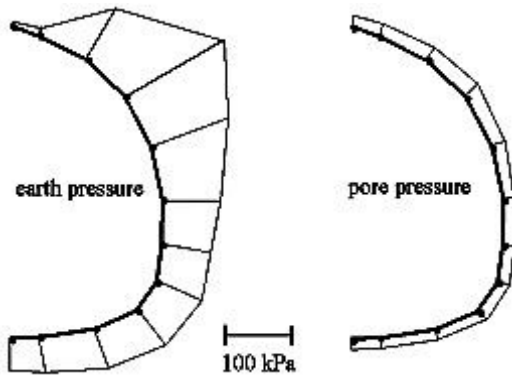


그림 15. 토압 및 수압분포 (grouting)

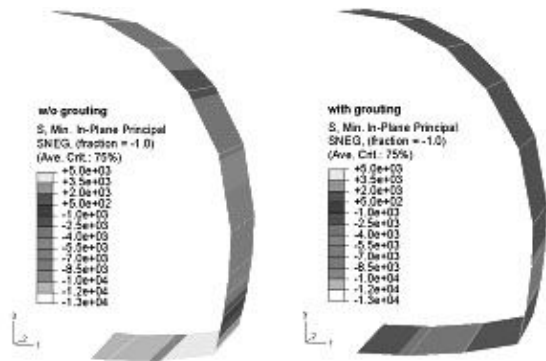
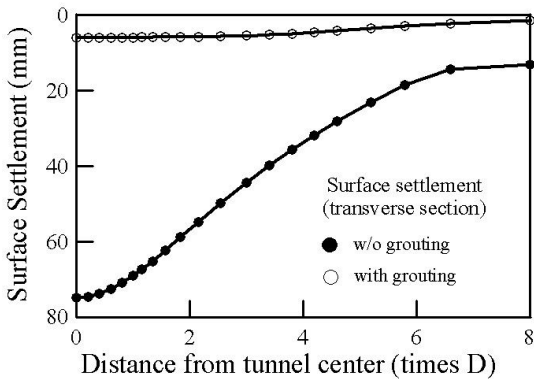
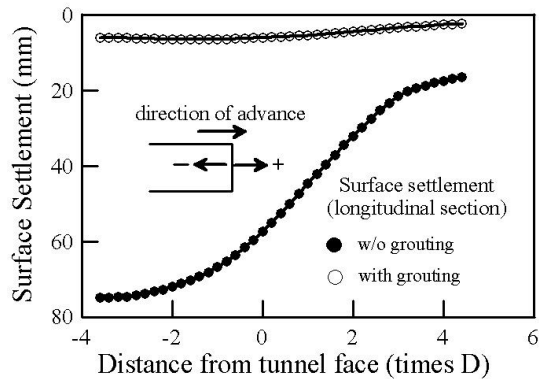


그림 16. 라이닝 응력분포 비교



(a) w/o grouting



(b) with grouting

그림 17. 지표침하곡선 (with grouting vs. w/o grouting)

하수위 저하가 억제되고 막장의 변위가 현저히 감소됨과 아울러서 라이닝에 발생하는 응력 및 토압, 그리고 작용 수압이 앞서 제시된 그라우팅이 수행되지 않은 결과와 비교할 때 50% 이상 저감되는 경향을 보여주고 있다.

그림 17에서는 지하수 저하가 억제됨에 따라 지표침하가 현저히 억제되는 경향을 잘 관찰할 수 있다. 이러한 경향은 앞서 2장에서 언급한 바와 같이 선 그라우팅이 지하수의 영향을 억제하는데 매우 효율적임을 단적으로 보여주고 있다.

6. 결론

본 논문에서는 터널굴착과 지하수의 상호관계를 노르웨이 터널 시공사례를 통해 알아보고 응력-간극수압 연계 해석에 대한 수치모델링의 기본 이론을 제시하였다. 아울러서 3차원 유한요소해석 기법을 도입하여 지하수 위 아래에서 시공되는 터널의 장·단기 거동 메커니즘을 고찰하였으며 지하수억제 및 터널안정성 확보 차원에서 수행되는 그라우팅이 터널의 거동에 미치는 영향을 정성 정량적으로 고찰하였다.

가상의 시공조건에 대한 3차원 해석 결과에서는 연계 해석의 결과가 터널의 거동 및 주변지반의 거동 측면에

서 불리한 결과를 주는 것으로 나타났다. 따라서 전응력 해석으로는 지하수 아래에서 시공되는 터널의 거동과 이와 주변지반의 거동에 대한 적절한 검토가 이루어 질수 없는 것으로 나타나 설계시 수행되는 터널해석시 연계해석이 수행되어야 할 것으로 판단된다. 한편, 터널 굴착 이전에 '선그라우팅'이 수행될 경우 상당 부분의 지하수 저하를 억제할 수 있으며 터널 및 주변 지반의 거동을 최소화 할 수 있는 것으로 나타나 지하수문제가 대두될 경우 '선그라우팅'이 매우 중요한 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Norwegian Urban Tunnelling (1995), Norwegian Soil and Rock Engineering Association, Publication No. 10.
2. 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.
3. 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.



유충식

성균관대학교 토목환경공학과 교수
csyoo@yurim.skku.ac.kr

K C I