

터널 배면의 간극수압이 해저터널의 안정성에 미치는 영향

Influence of Pore Pressure Behind a Subsea Tunnel on Its Stability

유광호*¹, 이광훈²

You, Kwang-Ho·Lee, Kwang-Hoon

Abstract

In this study, it was analyzed how the pore pressure behind a subsea tunnel influences on the stability of the tunnel. The tunnel is located in the soft rock layer, and a soft sandy layer and weathered soil layer are located on the top of it. Coupled numerical analyses are performed for both drained and undrained condition with varying coefficients of lateral earth pressure. In the case of undrained conditions, the stability of the tunnel was analyzed with different thicknesses of shotcrete. On the other hand, a sensitivity analysis was performed with different hydraulic conductivities and porosities of the shotcrete for the drained conditions. The stability of a subsea tunnel was evaluated in terms of safety factor suggested by You et al.(2000, 2001, 2005) based on the shear strength reduction technique. In this paper, the safety factor of a tunnel was calculated under steady state flow condition during hydro-mechanical coupled analysis. As a result, it was found that the stability of a subsea tunnel could be rather increased by allowing a proper amount of groundwater inflow into a subsea tunnel.

Keywords : Subsea tunnel, coupled analysis, safety factor

요 지

본 연구에서는 연약한 지반에 속하는 모래지반과 풍화토가 터널상부에 존재하며 연암층에 위치하는 해저터널을 대상으로 터널 배면의 간극수압이 터널의 안정성에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 비배수 조건과 배수조건을 가정하여 연계해석을 수행하였다. 비배수 터널의 경우에도 쏫크리트 두께를 달리하여 안정성을 비교하였으며, 배수 터널의 경우는 쏫크리트의 투수계수와 공극률을 달리하여 민감도분석을 수행하였다. 해저터널의 안정성은 유광호 등(2000, 2001, 2005)에 의해 제안된 전단강도감소 기법을 사용하여 수치적으로 구해지는 안전율을 사용하였다. 본 연구에서는 수리-역학적 연계해석 시 시공단계별 정상류 상태를 먼저 재현하고 터널의 안전율을 구했다. 연구결과 터널내로의 지하수 유입량을 어느 정도 허용함으로써 오히려 터널의 안정성이 높아짐을 확인할 수 있었다.

주요어 : 해저터널, 연계해석, 안전율

*1 정회원, 수원대학교 토목공학과 교수 (khyou@suwon.ac.kr)

2 수원대학교 토목공학과 석사과정

1. 서론

해저 시설물은 그 특성상 설계 및 시공을 위해 수리-역학적 연계해석이 매우 중요하다. 특히 해저에서 지하 구조물을 시공할 경우는 대부분의 도로 및 철도 터널의 안정성 평가를 위해 수행되는 역학적 해석과는 달리 높은 수압 및 침투압 등의 영향이 무시될 수 없으므로 지하저장 공동의 정확한 거동평가를 위해서는 수리-역학적 해석이 수행되어야만 한다. 또한, 해저 시설물이 아닐 경우라 하더라도 지하수위가 높은 지반에서 터널을 시공하는 경우 터널-지하수의 상호작용으로 인하여 터널주변 지반의 하중지지력이 저하되어 변위 및 응력이 크게 발생한다. 특히 터널 막장부의 안정성 확보가 매우 중요한 문제가 되며, 지하수 저하 시 지반침하가 동반되어 시공상의 문제가 발생할 소지가 있으므로 설계와 시공단계에서 이에 대한 고려가 필요하다.

하지만 해저터널과 같이 대심도 터널에 관한 연구는 많지 않은 실정이다. 선행된 연구를 살펴보면 유충식(2003)은 지하수위 아래 위치한 터널의 굴착 시 발생하는 유효응력의 감소로 인한 지반 내 응력변화에 의해 지반의 하중 지지력이 감소되는 현상을 연계해석을 통해 규명한 바 있다. 또한 이인모 등(1993)에 의해 배수조건 및 지하수위 강하조건에서 터널 라이닝에 걸리는 하중의 차이를 비교·검토하여 합리적인 고려방안을 제시하였다.

본 연구에서는 배수조건별 해저터널의 안정성을 고찰해보기 위하여 국내·외 해저터널의 심도를 분석하여 수심 60m, 해저면 하부 100m에 구조적으로 가장 안전한 직경 10m의 원형터널이 균질한 암반에 굴착되는 것으로 가정하였다. 이를 위해 비배수 조건과 배수조건을 가정하여 터널 배면의 간극수압이 터널의 안정성에 미치는 영향을 분석하였다. 배수조건에서는 슛크리트의 투수계수 및 공극률을 증가시킴으로써 유도배수량을 증가시켜 터널의 안정성을 비교하였다. 또한 비배수조건에서는 슛크리트의 두께를 달리하여 안정성을 비교하였다. 터널의 안정성은 유광호 등(2000, 2001, 2005)이 제안한 전단강소감소기법에 기초하여 수치적으로 구할 수 있는 안전율(safety factor)을 구함으로써 정량적으로 평가하였다.

2. 해저터널의 배수조건

2.1 배수형 터널

배수형 터널은 지하수의 유입이 그리 많지 않은 지역에서 그림 1과 같이 터널내부로 유입되는 지하수를 충분히 배수할 수 있는 경우에 국한하여 시공된다(이인모 등, 1993). 이러한 경우에는 터널배면에 수압이 작용하지 않으므로 간극수압의 변화가 없고, 따라서 지중응력의 분포를 해석하고자 할 때는 유효응력의 개념이 아니라 전응력의 개념으로 해야 한다. 하지만 해저터널과 같이 해수면의 변화가 거의 없는 경우에는 일정량을 유도 배수시킴으로써 터널 지보재에 걸리는 하중을 감소시켜 안정성을 확보하는 것이 바람직할 수 있다.

또한, 배수형 터널에서 콘크리트 라이닝 배면의 수압은 배수시설의 배수능력과 직결되어 있다. 즉, 유입 수량이 소량이라 할지라도 배수시설이 이를 원활하게 배수시키지 못하면 수압이 콘크리트 라이닝에 작용하게 된다. 이러한 경우에는 배수시설의 배수능력을 증대시켜 수압이 상승되지 않도록 하거나 배수터널이라 할지라도 배수지연 등으로 인해 발생될 수 있는 수압을 안전하게 견딜 수 있는 콘크리트 라이닝 구조를 갖추도록 해야 한다.

배수형 터널의 장점으로는 단면형상이 비배수형 보다 자유롭고 경제적인 콘크리트 라이닝의 시공이 가능하며 시공성이 양호하다. 하지만 배수 시설의 기능 마비 시에는 구조물의 안정성을 위협하게 될 수 있으므로 시공 시 배수시설의 안정성에 대하여 검토하여야 한다.

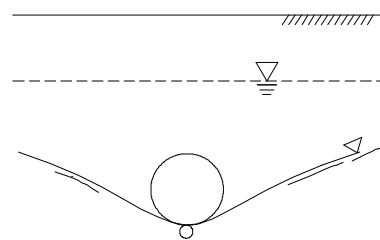


그림 1. 배수터널의 지하수위

2.2 비배수(방수)형 터널

비배수형 터널은 터널 굴착 후 라이닝 주변을 완전 방수 처리하여 라이닝 내부로의 지하수의 유입을 그림 2와 같이 완전히 차단하는 터널이다(이인모 등, 1993). 비배수 터널은 터널 주위의 지하수를 배수시키지 않기 때문에 지중응력을 유효응력과 정수압으로 고려하게 된다. 그러므로 터널 지보재는 수압에 견딜 수 있도록 보강되어야 한다. 이 때 작용수압에 가장 유리한 단면은 원형이며 수압이 클 경우에는 철근보강이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 비배수 터널 해석 시 지보재인 슛크리트의 적절한 두께를 찾아보기 위하여 두께를 변화시켜가며 안정성을 평가해 보았다.

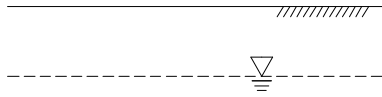


그림 2. 비배수 터널의 지하수위



3. 해저터널의 안정성 평가

해저터널과 같이 터널 굴착으로 인한 주변으로부터 지하수가 지속적으로 유입되어 터널 내부로의 지하수 유입에도 불구하고, 지하수위가 일정하게 유지되는 조건에서의 터널의 안정성을 고찰하기 위하여 해저터널의 안정성을 유광호 등(2000, 2001, 2005)에 의해 제시된 전단강도 감소기법을 사용한 안전율 기법을 적용함으로써 터널의 안정성을 정량적으로 평가하였다.

이를 위해 배수터널에서의 주 지보재는 두께가 30cm의 슛크리트가 시공되는 것으로 간주하였으며 수리 물성치를 변화시키는 방법으로 터널내로의 유입량을 변화시켜 그에 따른 안전율을 구하였다. 또한 비배수 터널에서는 주 지보재인 슛크리트의 두께를 변화시켜가며 안정성을 평가하여 적정두께를 살펴보았다.

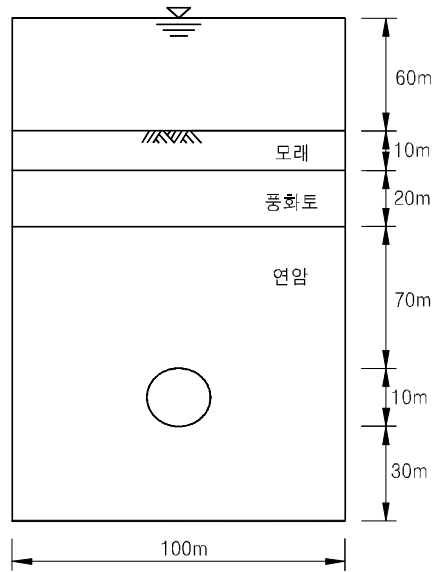


그림 3. 해석단면 형상

본 연구에서는 그림 3에서 나타난 것과 같이 모래층이 지표로부터 GL-10m, 풍화토층이 GL-10m에서 GL-30m에 위치하며 GL-30m에서 터널굴착 부분을 포함하여 나머지 모든 영역에 연암이 위치한 것으로 가정하여 해석하였다. 터널은 직경 10m의 원형터널이었으며, 해석에 사용된 구성모델은 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다.

3.1 대상 지반 물성값

대상지반의 물성값은 일반적인 상황의 대표적인 값들을 이용하여 표 1과 같이 가정하였다.

3.2 민감도 분석을 위한 슛크리트 물성치

스�크리트는 범요소로 모델링하였으며 역학적 특성을 고려하기 위하여 표 2와 같은 물성치를 적용하였다.

스�크리트는 강섬유보강 슛크리트(Steel fiber reinforced shotcrete, SFRS)가 사용되는 것으로 가정하여 해석을 수행하였다. SFRS는 일반 슛크리트에 비하여 설계기준강도 σ_{sk} 가 약 10% 증가한다고 알려져 있으며,

표 1. 대상암반 물성치

구분 \ 특성치	체적탄성계수 (Pa)	전단탄성계수 (Pa)	마찰각 (°)	점착력 (kPa)	단위중량 (kgf/m ³)	투수계수(cm/sec)	공극률
토 사	1.7×10 ⁷	5.5×10 ⁶	30	0	1,900	1.0×10 ⁻³	0.3
풍화토	5.8×10 ⁸	2.7×10 ⁸	35	30	2,500	2.4×10 ⁻⁴	0.25
연 암	4.2×10 ⁹	1.9×10 ⁹	38	100	2,600	1.2×10 ⁻⁵	0.2

표 2. 숏크리트의 물성치

구 분	탄성계수(GPa)	단면 2차 모멘트(m ⁴)	면적(m ²)
Soft S/C	3.0	2.25×10 ⁻³	0.3
Hard S/C	30.0	2.25×10 ⁻³	0.3

표 3. 일반 숏크리트와 강섬유 보강 숏크리트의 허용 휨응력

일반 숏크리트 허용 휨응력	강섬유 보강 숏크리트 허용 휨응력
$\sigma_{ca} = 0.4\sigma_{ck} (kg/cm^2)$ $\sigma_{ta} = 0.42\sqrt{\sigma_{ck}} (kg/cm^2)$	$\sigma_{ca} = 0.6\sigma_{ck} (kg/cm^2)$ $\sigma_{ta} = 0.63\sqrt{\sigma_{ck}} (kg/cm^2)$

파괴 후에도 지지력을 상실하지 않아 에너지 흡수량이 수백% 증가한다고 알려져 있다(한국도로공사 도로연구소, 2001). 이러한 사항을 고려하여 SFRS의 허용압축 응력 σ_{ca} 및 허용인장응력 σ_{ta} 가 일반 숏크리트의 경우에 비해 약 50% 증가될 것으로 가정하였다. 따라서, 설계기 준강도 σ_{ck} 가 20.6 MPa(210kg/cm²)일 경우, 다음의 표 3의 식과 같이 12.3 MPa, 0.89 MPa(126.0kg/cm², 9.1kg/cm²)값을 각각 SFRS의 허용압축 및 인장응력으로 사용하였다.

또한, 연계해석을 위해서는 해석영역에서의 지층별로의 유효수리전도도가 입력파라미터로 이용된다. 여기서 유효수리전도도라 함은 주어진 규모의 영역 내에서 지하수의 흐름을 지배하는 매체의 특성으로서의 수리전도도를 의미하며 동일한 유효수리전도도를 갖는 매체에서의 유동은 동일한 거동특성을 보이게 된다.

그러나 숏크리트 투수계수는 실험 결과가 나와 있지 않으므로 콘크리트의 투수계수 시험 결과와 숏크리트의 시공 기준을 참고로 적용하였다. 일반적으로 콘크리트의 투수계수는 물/시멘트비에 따라 10⁻⁸ ~ 10⁻¹⁰cm/sec의

범위를 보이며, 숏크리트는 가능한 투수성이 작게 시공 되도록 최대 공극률이 12% 이내이어야 하나, 터널 시공 시 비 균질성 등을 감안하여 통상 콘크리트보다는 투수성이 큰 값으로 가정하여 적용하였다. 표 4는 터널내로의 유도배수량을 인위적으로 조절하기 위해 Case별로 비례적으로 증가시킨 지보재의 수리적 물성치를 나타낸 것으로, 해수의 영향으로 숏크리트 및 콘크리트의 부식은 발생하지 않는 것으로 가정하였다.

3.3 해석 모델링 방법

수치해석을 위해 지반범용해석 프로그램으로 미국 미네소타주의 Itasca Consulting Group에 의해 개발된 FLAC Ver. 5.0이 사용되었다(Itasca Consulting Group, 2005).

본 수치해석에서 적용한 해석영역은 하부로 3D, 측방으로 5D, 상부로는 지표면까지 토피고의 높이를 100m로 하였으며 지하수위 60m에 대하여는 물의 단위중량을 고려하여 외력으로 처리함으로써 모델링하였다. 한편, 해석속도를 높이기 위해 터널 축을 중심으로 좌우 대칭

표 4. 배수조건에서의 지보재 수리적 특성 물성치

	-shotcrete 종류	투수계수(cm/sec)	공극률
Case 1	Soft S/C	4.9×10^{-11}	0.03
	Hard S/C	4.9×10^{-13}	0.02
Case 2	Soft S/C	4.9×10^{-9}	0.05
	Hard S/C	4.9×10^{-11}	0.04
Case 3	Soft S/C	4.9×10^{-7}	0.08
	Hard S/C	4.9×10^{-9}	0.06
Case 4	Soft S/C	4.9×10^{-5}	0.1
	Hard S/C	4.9×10^{-7}	0.09
Case 5	Soft S/C	4.9×10^{-3}	0.12
	Hard S/C	4.9×10^{-5}	0.11

경계 조건을 적용하였다. 해석영역에서의 투수계수 및 공극률은 주변지반과 동일한 값을 사용하여 균일한 흐름 조건(steady state)이 되도록 하였다. 해석에 사용된 하중분담율은 굴착 시 60%, shotcrete 연화단계 20%, shotcrete 경화단계 20%를 가정하여 적용하였다. 또한 각 굴착하중을 유사한 시공환경에서의 자료를 고려하여 무지보 굴착단계 2일, shotcrete 연화단계 8일, shotcrete 경화단계 20일이 소요되는 것으로 가정하였다(유충식과 김선빈, 2006). 수치해석에 사용된 mesh의 터널주변 요소크기는 0.5m×0.5m인 정사각형으로 모델링하였고, 이에 사용된 요소 수는 50×115개이며 그림 4와 같다.

또한, 본 연구의 대상터널이 대심도인 경우를 감안하여 과지압에 의한 안정성을 검토하기 위해 측압계수를 1.0, 2.0, 3.0의 경우로 가정하여 지보재의 파괴를 고려하여 안전율을 구하였다.

연계해석의 경계조건은 응력해석에서의 경계조건과 마찬가지로 좌우 측면경계는 수평방향 변위를 구속하고 하부경계는 수직방향을 구속하였다. 수리적 해석을 위한 경계조건에서는 우측면경계와 상부경계의 간극수압을 구속하여 터널 내부로의 지하수 유입에도 불구하고 지하수위가 저하되지 않는 경우로 해석과정에서 지하수면이 일정하게 유지되는 경계조건을 부여하였다.

그림 5에서 나타난 것과 같이 터널 지보재인 shotcrete는 일반적으로 빔요소로 해석된다. 하지만 shotcrete의 수리특성을 반영하기 위하여 역학적 특성을 빔요소로 반영하고 수리적 특성은 연속체요소로 동일한 두께에 해당

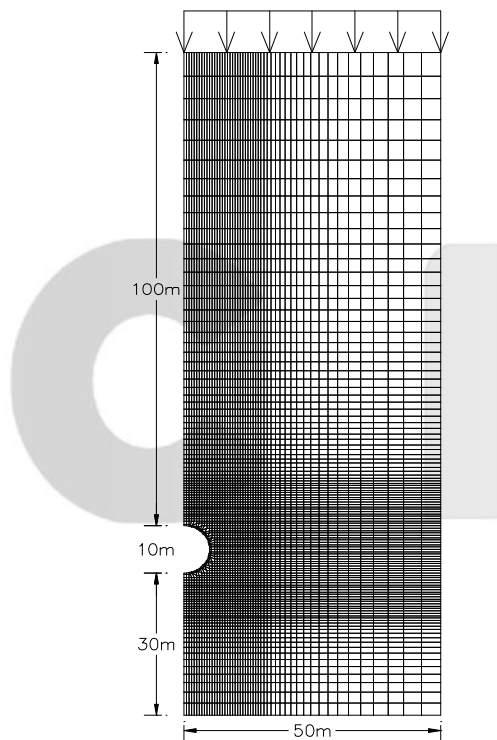


그림 4. 수치해석에 사용된 mesh도

하는 요소 크기를 설정하여 반영하였다(Shin 등, 2002, 2005). 이때의 shotcrete에 해당하는 연속체요소의 층수는 1층으로 모델링을 실시하였다.

또한 터널 시공 시 굴착면을 통해서 해수가 유입되므로

굴착면에서의 간극수압을 영(zero)으로 함으로써 배수 터널에 대한 조건을 부여하였다. 그리고 역학적 계산을 수행할 때에는 물의 체적 탄성계수를 영(zero)으로 하여 역학적인 움직임에 의해 발생하는 과잉간극수압을 막고 해석에 정확성을 높여 수행하였다.

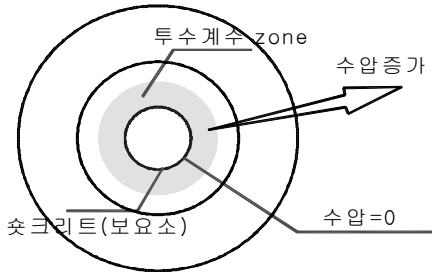


그림 5. 숏크리트 지보재 모델링

4. 해석 결과

4.1 배수터널

Case별로 투수계수와 공극률을 달리하여 수치해석을 실시한 결과를 측압계수별로 정리하여 다음의 표 5에서부터 표 7까지에 나타내었다.

수치해석 결과 측압계수와 관계없이 투수계수가 커질수록 최대·최소 휨응력, 최대변위가 작아지고 있음을 알 수 있다. 이는 터널의 지보재인 숏크리트가 받고 있는 하중이 투수계수 증가로 인해 유도 배수됨에 따라 하중이 감소하여 측압계수 1.0과 2.0인 Case 5의 경우와 같이 최대압축응력이 허용압축응력 내에 있어 안전율이 각각 1.49와 1.27이 산출되었다. 하지만 측압이 3.0으로 증가된 경우에는 안전율이 1.0 이하로 나타나 불안정할 것임을 예측할 수 있다. 또한 유도배수량을 증가시켜 일

표 5. 배수터널에서의 수치해석 결과($K_0=1.0$)

구분	최대휨응력 (MPa)	최소휨응력 (MPa)	파괴 직전 최대변위 (cm)	안 전 율	유입량($m^3/hr\cdot m$)
Case 1	26.95	19.48	3.38	1.0이하	2.73×10^{-5}
Case 2	26.77	19.54	3.37	1.0이하	4.23×10^{-5}
Case 3	26.07	18.56	2.30	1.0이하	1.38×10^{-3}
Case 4	21.70	14.33	0.99	1.0이하	0.07
Case 5	13.73	11.01	0.91	1.49	0.20

표 6. 배수터널에서의 수치해석 결과($K_0=2.0$)

구분	최대휨응력 (MPa)	최소휨응력 (MPa)	파괴 직전 최대변위 (cm)	안 전 율	유입량($m^3/hr\cdot m$)
Case 1	27.43	20.09	3.73	1.0이하	8.58×10^{-5}
Case 2	27.47	20.22	3.75	1.0이하	8.37×10^{-5}
Case 3	27.16	19.05	2.69	1.0이하	1.40×10^{-3}
Case 4	22.75	14.80	0.97	1.0이하	0.07
Case 5	13.72	10.15	0.90	1.27	0.20

표 7. 배수터널에서의 수치해석 결과($K_0=3.0$)

구분	최대휨응력 (MPa)	최소휨응력 (MPa)	파괴 직전 최대변위 (cm)	안 전 율	유입량($m^3/hr\cdot m$)
Case 1	28.22	19.98	4.30	1.0이하	1.12×10^{-4}
Case 2	28.27	19.92	4.25	1.0이하	1.37×10^{-4}
Case 3	28.52	18.37	2.83	1.0이하	1.45×10^{-3}
Case 4	25.23	15.01	1.19	1.0이하	0.07
Case 5	13.82	8.23	1.08	1.0이하	0.20

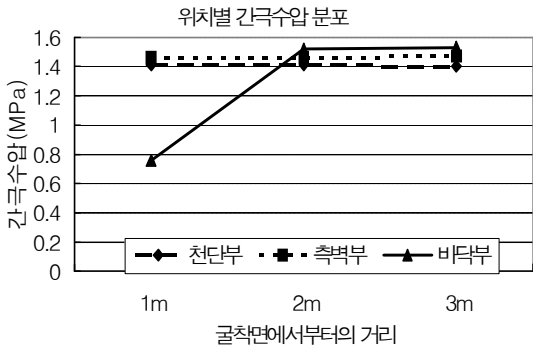


그림 6. Case 1에서의 위치별 간극수압 분포

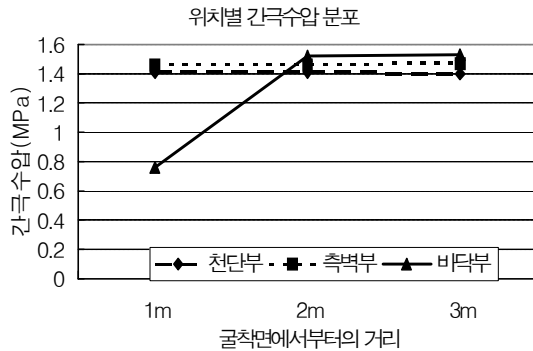


그림 7. Case 2에서의 위치별 간극수압 분포

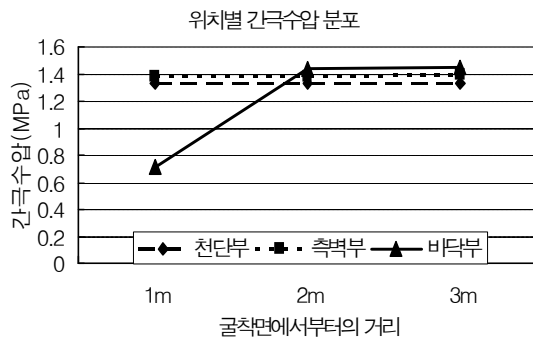


그림 8. Case 3에서의 위치별 간극수압 분포

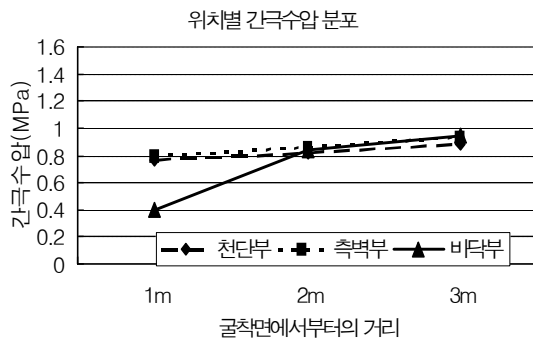


그림 9. Case 4에서의 위치별 간극수압 분포

정유입량이 배수되었을 경우 터널의 안정성을 확보할 수 있음을 알 수 있었다. 한편, 지보재내에 발생하는 휨응력은 모두 압축응력으로 인장응력이 발생하지 않음을 알 수 있었다.

그림 6에서부터 그림 10까지는 Case별 터널 위치에 따른 간극수압의 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 가로 축은 터널 중심을 기준으로 터널 굴착면, 즉 천단부, 측벽부 및 바닥으로부터 방사방향으로 떨어진 거리를 의미한다.

위의 결과로부터 투수계수가 증가할수록 라이닝 배면의 간극수압이 작아지며 특히 터널 굴착면으로부터 떨어진 거리가 가까울수록 작아짐을 알 수 있다. 특히, 투수계수가 제일 큰 Case 5의 경우 터널주변 간극수압이 제일 작게 나타남을 알 수 있다. 또한 각각의 Case에서 바닥 굴착면으로부터 수직으로 1m 떨어진 지점의 간극

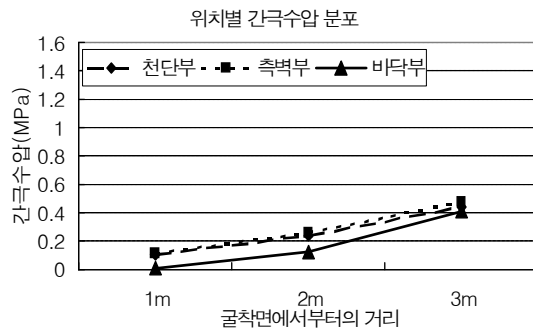


그림 10. Case 5에서의 위치별 간극수압 분포

수압이 천단과 측벽 굴착면으로부터 각각 수직과 수평으로 1m 떨어진 지점의 간극수압보다 적게 나타났다.

Case 1 및 Case 2의 경우는 간극수압 분포가 거의 차이를 보이고 있지 않고 있는데, 이는 두 경우 모두 솟

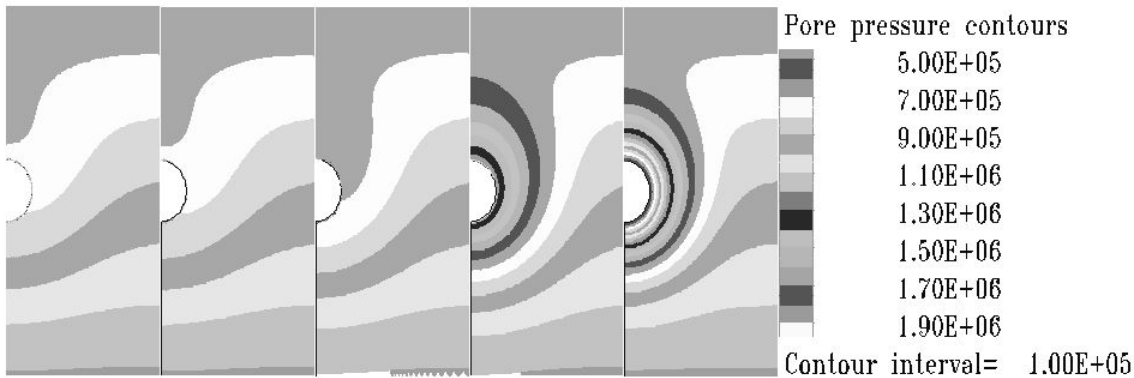


그림 11. Case별 간극수압 분포

표 8. 비배수 터널에서의 수치해석 결과

구 분	숏크리트 두께(cm)	단면2차모멘트(m ⁴)	파괴직전 최대변위(cm)			안 전 율		
			측 압 계 수			측 압 계 수		
			1.0	2.0	3.0	1.0	2.0	3.0
Case ①	30	2.250×10^{-3}	1.353	1.233	1.341	0.1	0.1	0.1
Case ②	60	1.800×10^{-2}	0.615	0.581	0.760	0.1	0.1	0.1
Case ③	90	6.075×10^{-2}	0.427	0.434	0.607	2.77	0.1	0.1
Case ④	120	1.440×10^{-1}	0.466	0.459	0.565	14.01	3.73	1.51

크리트 투수계수가 너무 작아서 지하수위의 변화가 없기 때문에 판단된다. 그러나 수리 특성치(투수계수, 공극률)가 커져 유도배수량이 증가 되었을 때에는 터널 굴착면에서의 간극수압이 점점 감소하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한, Case 5의 경우는 다른 Case의 간극수압 분포에 비해 굴착면에서의 간극수압이 현저히 감소되어 터널이 받고 있는 간극수압이 감소하고 있음을 터널 주변의 간극수압 분포를 보여주는 그림 11을 통하여 확인할 수 있다.

4.2 비배수터널

비배수 터널의 경우 지보재에 작용하는 응력은 지반의 유효응력과 수압의 합이다. 심도가 깊은 해저터널의 경우 높은 수압이 작용하여 지보재에 큰 압력이 걸린다. 그러므로 비배수 터널의 경우에서도 배수터널의 경우와 동일하게 측압계수를 1.0, 2.0, 3.0으로 조건을 달리하였으며 이에 따른 숏크리트의 두께를 변화하여 터널의

안정성을 예측하였다. 이때 수리적 물성치는 배수터널의 경우에서 Case 1과 같은 물성치를 사용하였다. 수치해석을 실시한 결과를 표 8에 나타내었다.

숏크리트의 두께가 증가할수록 파괴직전 최대변위는 감소하고, 안전율은 증가되는 것으로 나타났다. 측압계수가 1.0일 경우 숏크리트 두께가 90cm일 때 터널의 안전율이 2.77로 나타나고 있으며 측압계수가 커질수록 안전율은 감소하고 있는 경향을 알 수 있다.

그림 12에서 볼 수 있듯이 비배수 터널의 경우 예상대로 터널 굴착면으로부터 떨어진 거리에 관계없이 간극수압이 일정한 분포를 보이고 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 수심 60m, 해저면 하부 100m의 직경 10m의 해저터널을 가정하여 측압계수를 달리하여 배수터널의 경우와 비배수 터널의 경우로 나누어 모델링하여

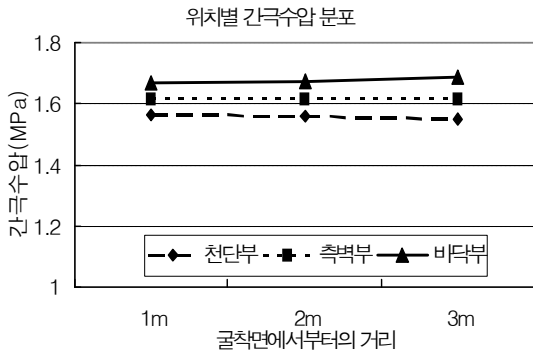


그림 12. 비배수 조건에서 위치별 간극수압분포

터널의 안정성을 비교 고찰하였다.

배수터널의 경우 지보재가 받는 하중이 터널내로의 유도 배수량에 의해 터널 주변에서의 간극수압이 감소되어 안정성이 높아짐을 확인할 수 있었다. 비배수 터널의 경우 숏크리트의 두께를 변화시켜가며 안정성이 확보되는 적정 두께를 찾아보았으나 매우 두꺼운 숏크리트가 요구되는 것으로 나타나 비경제적임을 알았다. 그러므로 경제적이고 안정된 해저 터널의 설계 및 시공을 위해서는 배수조건을 고려한 보다 자세한 연계해석 연구가 절실히 요구된다.

또한, 축압계수가 커짐에 따라 터널의 안정성을 저해하는 것으로 나타났다. 따라서, 과지압이 작용하는 조건 하에서는 보다 정확한 터널 안전율 산정방법이 연구될 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술 평가원에서 위탁시행 한 2005년도 건설핵심기술연구개

발사업(과제번호: 05-건설핵심 D10, 과제명: 해저시설물 차폐기술연구)에 의하여 연구비가 지원되었기에 관계자분들에게 감사드립니다.

참고문헌

1. 이인모, 김용진, 이명재, 남석우 (1993), "터널설계시 지하수의 고려방안", 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, 건설기술연구원, pp. 1-8.
2. 유광호, 박연준, 배규진 (2000), "연약 암반층에 굴착된 터널의 안전율 평가", 대한터널협회 논문집, 제2권, 제3호, pp. 47-57.
3. 유광호, 박연준, 강용 (2001), "절리암반 터널의 안전율 평가를 위한 수치해석적 연구", 터널과 지하공간, Vol. 11, No. 3, pp. 279-288.
4. 유광호, 박연준, 홍근영, 이현구, 김재권 (2005), "지보재 파괴를 고려한 터널 안전율의 수치해석적 산정 연구", 터널기술, Vol. 7, No. 1, pp. 37-49.
5. 유충식 (2003), "지하수와 터널굴착 - 3차원 연계해석을 통한 고찰", 한국터널공학회 봄 정기학술발표회 논문집, 과학기술회관 대강당, pp. 127-138.
6. 유충식, 김선빈 (2006), "NATM 터널의 응력-간극수압 연계 유한요소모델링", 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, 한양대학교, pp. 189-198.
7. 한국도로공사 도로연구소 (2001), 강섬유보강 숏크리트의 성능 향상 및 품질기준 정립(II).
8. Itasca Consulting Group, Inc. (2005), FLAC, Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 5.0, Itasca Consulting Group, Minneapolis, USA.
9. Shin, J.H., D.M. Potts and L. Zdravkovic (2002), "A numerical study of the effect of groundwater movement on long-term tunnel behaviour", Geotechnique, Vol. 52, No. 6, pp. 391-403.
10. Shin, J.H., D.M. Potts and L. Zdravkovic (2005), "The effect of pore-water pressure on NATM tunnel linings in decomposed granite soil", Can. Geotech. J., Vol. 42, pp. 1585-1597.



유광호

수원대학교 토목공학과 교수
khyou@suwon.ac.kr



이광훈

수원대학교 토목공학과 석사과정
thomas4711@hanmail.net