

응력-간극수압 3차원 연계해석을 이용한 터널시공과 지하수의 상호작용으로 인한 라이닝 거동특성 연구

Performance of Shotcrete Lining due to Tunneling and Groundwater Interaction Using a 3D Stress-pore Pressure Coupled Analysis

유충식¹⁾, Chungsik Yoo, 김선빈²⁾, Sunbin Kim

¹⁾ 성균관대학교 토목환경공학과 교수, Prof., Dept. of Civil and Envir. Engrg., Sungkyunkwan Univ.

²⁾ 성균관대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Envir. Engrg., Sungkyunkwan Univ.

SYNOPSIS : This paper presents the interaction effect between tunneling and groundwater on tunnel behavior. A parametric study is then conducted on the various tunneling situations frequently encountered in Seoul area using a 3D stress-pore pressure coupled finite-element model with emphasis on the effects of ground and lining permeabilities. It is shown that the ground and lining responses are significantly influenced by the relative permeability between the ground and the lining, and that the circumferential pre-grouting is effective in minimizing the tunnelling and groundwater interaction.

주요어(Key words) : Tunneling, Groundwater, Coupled analysis, Finite-element analysis

1. 서 론

터널시공이 주변 환경에 미치는 영향과 관련된 이슈 중 터널시공으로 인한 지하수 저하는 주변 물수지에 미치는 영향에 대한 사회적 관심이 증가함에 따라 터널 시공 중 발생할 수 있는 안정성 혹은 시공성 문제와 더불어 지속성이라는 측면에서 매우 중요하게 다루어져야 한다. 즉, 지하수위 아래에서 시공되는 도심지 터널의 경우 시공 중 안정성 확보를 목적으로 지하수를 터널 인버트 하부 이하로 강제 저하시키는 경우가 많았으나 지하수 저하로 발생하는 지반침하나 환경적 요인을 고려하여 이제는 지하수 저하를 억제하는 방향으로의 시공계획을 요구하고 있다. 아울러서 도심지역이 아닌 산간이나 농촌지역에서의 철도 혹은 도로 터널 시공시 터널이 인근 하천이나 저수지 등을 인접하여 통과하는 시공조건에서는 터널내부로의 유입수를 조절하지 않을 경우 주변 관정이 고갈되고 인근 저수지 수위가 저하되어 주변 물수지 변화에 대한 각종 민원이 발생할 소지가 있으므로 설계시 터널시공과 지하수의 상호작용으로 인한 영향 검토가 매우 중요한 설계항목이 되고 있다.

최근에 들어 터널시공과 지하수의 상호작용으로 터널 및 주변 환경에 미치는 영향이 사회적 관심사가 되면서 이에 관련된 연구도 꾸준히 진행되고 있다. 시공분야에서는 고강도 슛크리트나 록볼트 등 지보재 재질의 향상 및 내구성 확보 측면의 연구가 수행되고 있으며, 설계적 측면에서는 터널의 안정성과 관련된 지반-지하수-지보재 상호작용 및 설계기법 개발에 관한 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서 다루고자 하는 터널시공과 지하수의 상호작용이 라이닝의 거동에 미치는 영향에 대한 선행연구로서도 KOWACO(1997, 1999)와 Shin(2002) 등이 수행한 바 있었다. 최근 수행된 턴키 설계에서 적용된 지

반 및 암반의 투수계수를 조사한 결과 그림 1에서와 같이 연암이하 암반의 투수계수가 1.0×10^{-5} cm/s 이상으로 나타나 일반적인 점토의 투수계수 1.0×10^{-6} cm/s 보다도 크게 나타나고 있다. 이 수치는 현장투수시험결과를 토대로 산정된 것으로서 연암 정도의 암반의 경우에서도 상당한 크기의 투수성을 갖는다는 것을 알 수 있으며, 터널시공시에는 터널 주변에 이완영역이 형성되므로 보다 크게 나타날 수 있다. KOWACO(1997)는 콘크리트 라이닝의 투수계수가 그림 2와 같이 일반적으로 1.0×10^{-6} cm/s 정도로 나타나나 라이닝 타설 후 발생하는 수축균열이나 시공 조인트 등으로 인해 시공 후 투수계수는 제시된 수치보다 현저히 크다고 하였다. 이러한 현상들로 인해서 터널 내부로 지하수가 유입되어 라이닝 외부수압은 지하수위 전수두보다는 작게 형성되며 대상지반 혹은 암반의 투수성에 따라서도 다르게 나타난다고 보고하고 있다.

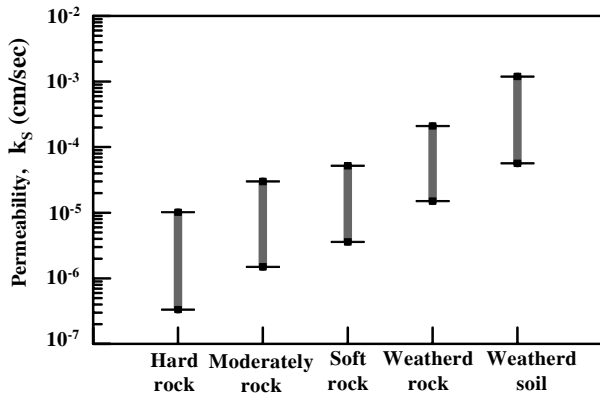


그림 1. 최근 터키 설계구간 지층별 적용 투수계수

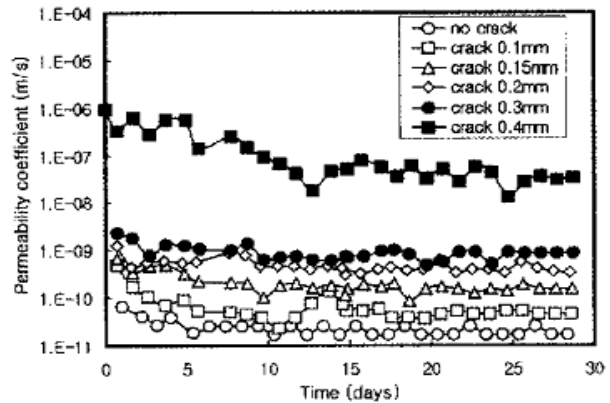


그림 2. 균열폭에 따른 콘크리트의 투수계수 변화량

한편 Shin(2002)과 유충식(2004)는 3차원 응력-간극수압 연계해석을 통해 터널굴착시 라이닝 배면수압이 암반의 투수성 뿐만이 아니라 상대적인 라이닝의 투수성에도 영향을 받는다는 것을 보고한바 있으며, 이러한 연구의 연장선상에서 본 논문을 다루었다. 터널시공과 지하수의 상호작용이 우려되는 가상의 시공조건에 대한 3차원 응력-간극수압 연계해석을 통해 매개변수 연구를 수행하여 터널설계시 터널-지하수 상호작용 고려의 중요성을 고찰함과 아울러 터널-지하수-숏크리트 라이닝 상호작용 측면에서 대상지반의 종류, 지반과 라이닝의 상대적 투수성, 차수 그라우팅이 숏크리트 라이닝의 거동에 미치는 영향을 정성·정량적으로 고찰하였다.

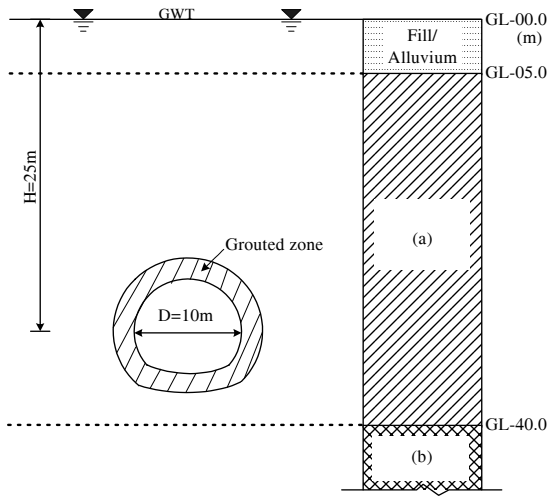
2. 매개변수의 상호관계 연구

2.1 해석조건

본 연구에서는 그림 3과 같이 직경 10m의 터널이 지표면으로부터 25m 하부에 시공되는 경우를 고려하였으며 해석대상 지반은 서울 도심 지역에서 일반적으로 나타나는 지반조건을 고려하였다. 즉 그림 3에서 보이는 바와 같이 해석 대상지반의 상부 5m는 실트질 모래로 이루어진 매립층 및 충적층으로 구성되어 있으며 그 하부에는 점토 Case에 따라 각각 풍화암/연암/경암이 위치하는 것으로 가정하였다. 주 지보재로 두께 30cm의 숏크리트가 시공되며 하루당 1.5m의 굴진속도로 시공되는 것으로 간주하였다. 해석의 편의상 록볼트는 모델링에서 제외하였다. 한편, 일반적인 도심지에서의 시공조건을 반영하여 터널시공시 지하수위가 저하되는 조건만을 해석 대상조건으로 하였으며 시공중 발생할 수 있는 각종 단기문제로 국한하였다.

또한 추가 매개변수로서 터널이 시공되는 굴착대상 암반의 투수계수(k_s)와 숏크리트 라이닝의 투수계수(k_L)를 채택하여 $k_L/k_s = 0.01, 0.05, 0.1, 1.0$ 인 조건과 지하수 억제 및 터널안정성 확보차원에서 수

행되는 차수그라우팅이 포함된 해석을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 해석case를 표 1에서 정리하고 있으며, 본 해석에서 고려한 지반조건 및 각 지층에서의 역학적, 수리학적 특성을 채택하여 표 2에 나타내었다. 이 수치는 최근 수행된 터널 프로젝트의 설계와 시공자료를 토대로 정리한 것이다.



Case	(a)	(b)
I	풍화암(WR)	연암(SR)
II	연암(SR)	보통암(MR)
III	경암(HR)	경암(HR)

그림 3. 해석대상 지반조건

표 1. 본 연구에 수행된 해석조건

구분	해석 조건	비고
Case 1	1-1. 토피고 H/D=2.5, $k_S=WR$, $k_L=0.01k_S$ 1-2. 토피고 H/D=2.5, $k_S=WR$, $k_L=0.05k_S$ 1-3. 토피고 H/D=2.5, $k_S=WR$, $k_L=0.1k_S$ 1-4. 토피고 H/D=2.5, $k_S=WR$, $k_L=1.0k_S$	k_L/k_S 에 따른 비교(암반종류 I)
Case 2	2-1. 토피고 H/D=2.5, $k_S=SR$, $k_L=0.01k_S$ 2-2. 토피고 H/D=2.5, $k_S=SR$, $k_L=0.05k_S$ 2-3. 토피고 H/D=2.5, $k_S=SR$, $k_L=0.1k_S$ 2-4. 토피고 H/D=2.5, $k_S=SR$, $k_L=1.0k_S$	k_L/k_S 에 따른 비교(암반종류 II)
Case 3	3-1. 토피고 H/D=2.5, $k_S=HR$, $k_L=0.1k_S$ 3-2. 토피고 H/D=2.5, $k_S=HR$, $k_L=1.0k_S$	k_L/k_S 에 따른 비교(암반종류 III)
Case 4	4-1. 토피고 H/D=2.5, $k_S=HR$, $k_L=0.05k_S$, without grouting 4-2. 토피고 H/D=2.5, $k_S=HR$, $k_L=0.05k_S$, post-grouting 4-3. 토피고 H/D=2.5, $k_S=HR$, $k_L=0.05k_S$, pre-grouting	그라우팅 수행방법에 따른 비교

표 2. 해석에 고려된 지반조건 및 각 지층의 역학적·수리학적 특성

구분	점착력 c' (kPa)	내부마찰각 ϕ' (deg)	팽창각 ψ (deg)	간극률 n	투수계수 k (m/sec)	단위중량 g (kN/m ³)	탄성계수 E (MPa)	축압계수 K_0
매립층/충적층	10	35	20	0.45	2×10^{-6}	18	20	0.43
풍화암	100	40	15	0.3	6×10^{-7}	22	150	0.5
연암	200	45	15	0.1	1×10^{-7}	25	2,600	0.7
보통암	300	50	15	0.1	4×10^{-8}	25	3,000	0.75
경암	500	55	15	0.1	3×10^{-10}	25	12,000	0.8
숏크리트	-	-	-	0.2	1×10^{-8}	23	2,000	-

Notes: c' =점착력; ϕ' =내부마찰각; ψ =팽창각; n =간극률; k =투수계수; g =단위중량; E =변형계수; K_0 =축압계수

2.2 유한요소 모델링

2.2.1 대상구간의 모형화

본 해석에서는 범용 유한요소해석 패키지인 ABAQUS 6.4를 사용하였다 (Hibbitt et al. 2003). 터널 굴착의 모델링에 있어서 해석의 편의상 전단면 굴착으로 시공되는 것으로 가정하였으며 터널 중심축으로부터 좌우 대칭인 점을 고려하여 우측 반단면에 대한 해석을 수행하였다. 2차원 해석을 통해서는 터널굴진으로 인해 발생하는 주변지반의 응력상태 변화와 지하수 유동에 대한 경계조건의 모사가 복잡하므로 터널굴진과정에 대한 모사가 보다 용이한 3차원 해석을 수행하였다. 해석 모델링에서는 터널 중심으로부터 약 6D (D=터널직경)의 거리에 측면 경계면을 위치시켜 수평방향으로의 변위를 구속하였으며 터널 바닥으로부터 약 3D 하부에 하부 경계를 위치시키고 롤러를 설치하여 연직방향의 변위를 구속하였다. 종방향 해석 영역은 터널이 시작되는 지점으로부터 8D까지로 설정하였다.

지반 및 지보재의 이산화에 있어서 지반은 8절점 가감 적분 응력-간극수압 연계 고체요소(C3D8RP)를 적용하였으며 숏크리트는 4절점 가감적분 쉘요소를 이용하여 모델링 하였다. 그림 4는 해석에 적용된 유한요소모형을 보여주고 있다.

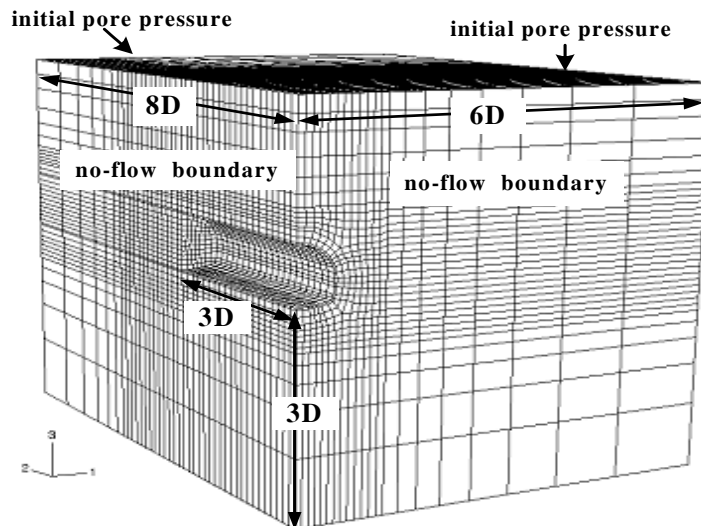


그림 4. 해석에 적용된 유한요소망

해석 대상 지반은 extended Drucker-Prager 항복기준과 비관련 소성흐름법칙(nonassociated flow rule)을 따르는 탄소성 재료로 가정하였으며 숏크리트 라이닝은 탄성재료로 가정하였다. 매립층은 지하수 저하시 부의 간극수압이 발생할 가능성이 있으므로 불포화토 개념에서 SWCC(Soil Water Characteristic Curve)를 이용한 sorption을 고려하였다. Extended Drucker-Prager 모델과 sorption에 대한 상세한 내용은 Hibbitt (2002)에 나타나 있다. 한편, 지반의 투수계수는 이방성을 나타내는 것이 일반적이거나 또 다른 변수의 도입으로 인한 결론 도출의 어려움을 피하고자 지반의 투수성은 등방인 것으로 가정하였다.

2.2.2 경계조건 및 굴착과정의 모사

수리적 경계조건으로 터널의 횡단면 중심축과 일치하는 단면($x=0$)과 터널굴착 시점($y=0$)에는 no-flow의 경계조건을 부여하였으며 그 밖의 측면경계와 하부경계에는 초기조건으로 부여한 수압이 일정하게 유지되도록 하였다. 아울러 연계해석 과정에서 원 지하수위 위치에 no-flow 경계를 부여하여 지하수의 터

터널내부의 유입은 연직 및 하부경계를 통해서만 이루어지도록 하였으며 터널굴착과 함께 발생하는 지하수의 유입은 터널굴착면을 따라 간극수압 $u=0$ 의 경계조건을 부여하는 방법으로 모사하였다.

한편, 숏크리트 타설후 얻어지는 라이닝의 차수효과에 대한 모델링은 Shin 등 (2002)이 제시한 모델링 기법을 적용하여 즉 터널 굴착면에 설치되는 라이닝은 구조요소인 쉘요소를 이용하여 모사하였으며 쉘요소의 특성상 연계해석이 수행되지 않는 점을 감안하여 주변에 30cm 두께의 고체요소를 형성하고 라이닝의 투수계수를 부여하는 방법으로 모델링하였다. 터널 굴착과정의 모사는 현장 시공공정을 최대한 반영하도록 하여, 기존의 시공자료 및 연구결과를 토대로 1일 굴진장을 1.5m로 설정하였으며 굴착 후 숏크리트 라이닝은 비교적 짧은 시간에 설치되는 것으로 가정하였다. 본 해석에서 채택한 굴진과정에 대한 개요도가 그림 5에 나타나 있다.

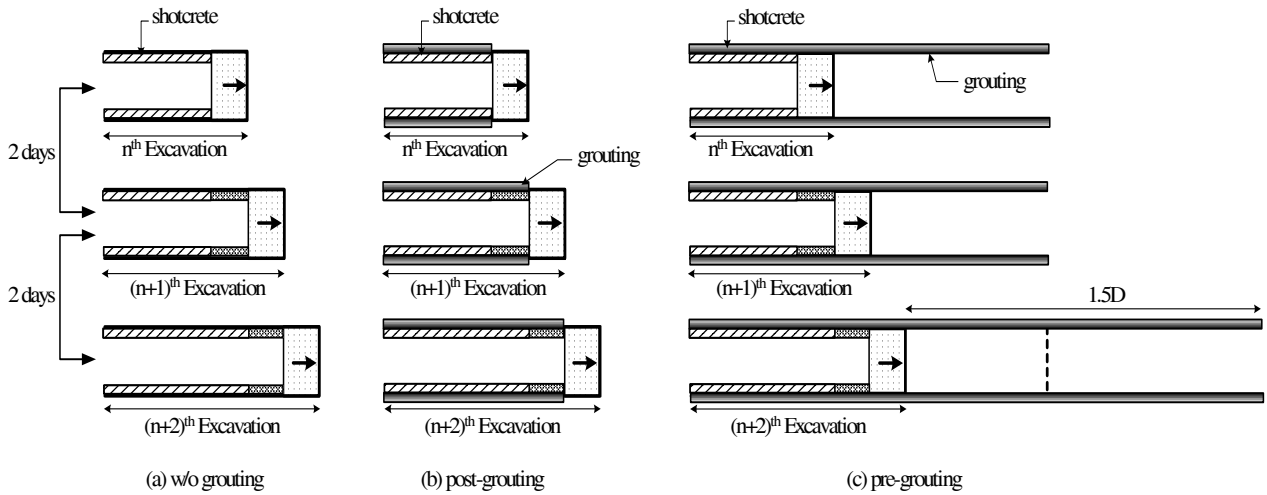


그림 5. 굴진과정에 대한 모사

3. 터널시공과 지하수의 상호작용이 터널 라이닝의 거동에 미치는 영향

3.1 라이닝 배면수압 및 압축응력 분포

그림 6과 그림 7은 해석조건 case 1과 case 2에 대한 해석결과의 라이닝 배면수압과 압축응력을 나타내고 있다. 그림 6은 30m 굴착시 터널 막장면으로부터 1.5D 후방, 즉 굴착이 진행되면서 지하수위가 저하되기 시작한 후 정상류 상태에 도달한 지점에 위치한 단면에서의 라이닝 배면수압을 보여주고 있다.

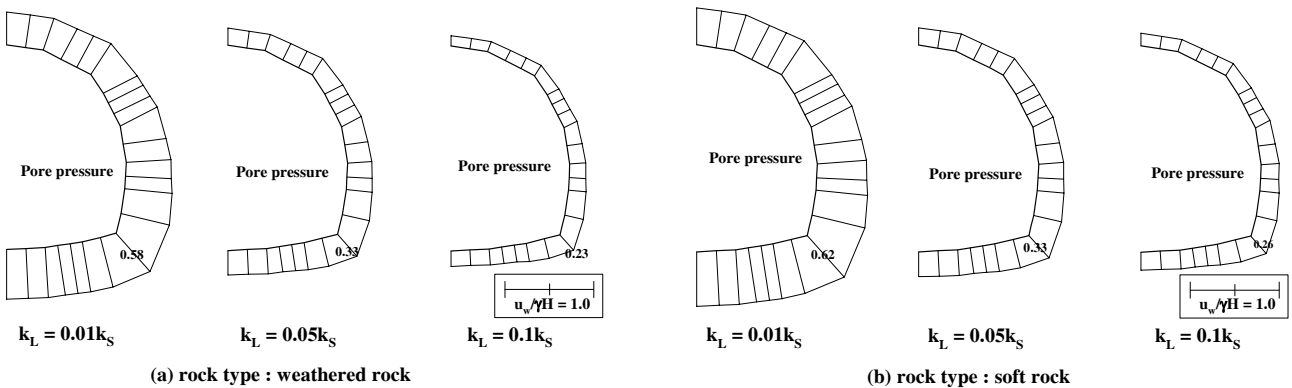


그림 6. 라이닝 배면수압

라이닝 배면에 작용하는 수압은 그림에서 보는 것처럼 터널내부로의 침투로 인해 지하수위 전수두보다는 작게 형성되며 암반종류에 따라 다르게 나타나고 있고, 라이닝의 투수계수가 굴착대상지반의 투수계수와 일정한 비율을 갖는 경우 굴착대상 지반 자체의 투수성 보다는 지반과 라이닝의 상대적인 투수성에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 지반과 라이닝의 투수계수비 k_L/k_S 이 작을수록, 즉 지반과 라이닝의 투수계수 차이가 클수록 배면수압은 증가하고 있다. 터널시공시 굴착대상지반의 종류와 숏크리트 라이닝의 품질에 따라 k_L/k_S 이 달라질 수 있으므로 설계와 시공시 이러한 결과를 고려해야 할 것으로 판단된다.

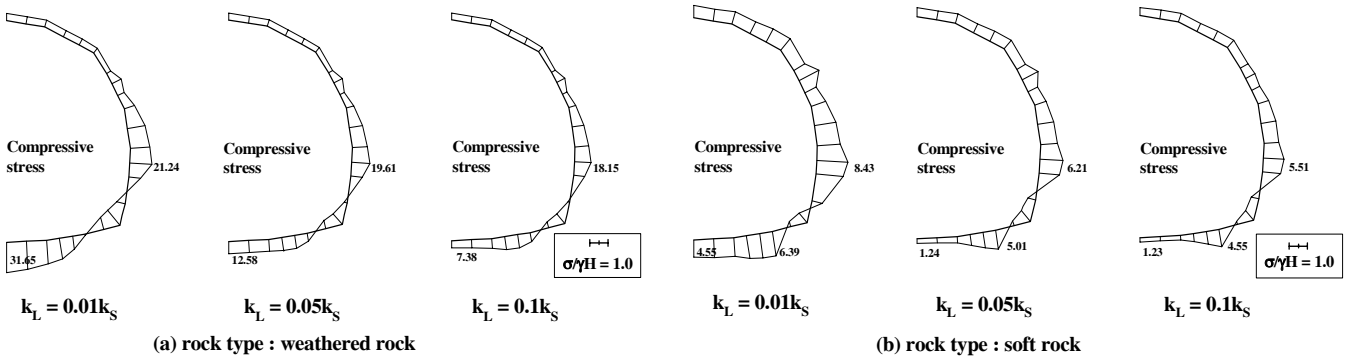


그림 7. 라이닝 압축응력

그림 7은 30m 굴착시 터널 막장면으로부터 1.5D 후방에 위치한 단면에서의 라이닝 압축응력을 나타내고 있다. 굴착대상 지반의 암반종류에 따라 숏크리트 라이닝에 작용하는 압축응력이 현저한 차이를 보이고 있음을 볼 수 있다. 이는 암반종류별 지반의 강성이 다르기 때문에 터널 굴착으로 인한 지반변위와 이완영역이 달라져 라이닝에 작용하는 이완하중 또한 차이를 나타내기 때문으로 판단된다. 또한 k_L/k_S 에 따라서도 인버트부에서의 압축응력이 뚜렷하게 구분되는 경향을 볼 수가 있는데 이 결과는 앞서 기술된 내용에서처럼 라이닝 주변에서의 상대적인 투수성으로 차수효과가 발생하여 차수정도에 따라 라이닝에 작용하는 배면수압이 다르게 나타나는데서 원인을 찾을 수 있다. $k_L = 0.01k_S$ 에서 인버트부의 배면수압이 크므로 압축응력 또한 $k_L = 0.01k_S$ 에서의 인버트부 압축응력이 현저하게 큰 것으로 나타나 있다.

3.2 k_L 과 k_S 의 효과

그림 8과 그림 9는 해석조건 case 1에서 case 3까지에 대한 해석결과로서 k_L/k_S 에 따른 라이닝 지점별 배면수압과 압축응력을 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 k_L/k_S 이 작을수록, 즉 지반과 라이닝의 투수계수 차이가 클수록 라이닝 배면수압이 증가하고 있으며 특히 인버트에서의 변화량이 큰 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 라이닝 압축응력도 같은 양상으로 나타나 k_L/k_S 이 작을수록 증가하고 있다. 한편 굴착암반의 종류에 따라 라이닝의 배면수압은 그다지 차이를 보이고 있지 않고 정량적으로도 거의 유사하게 나타나고 있다. 굴착대상의 암반과 숏크리트의 품질을 감안할 때 k_L/k_S 이 달라질 수 있으므로 설계단계에서부터 이에 대한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

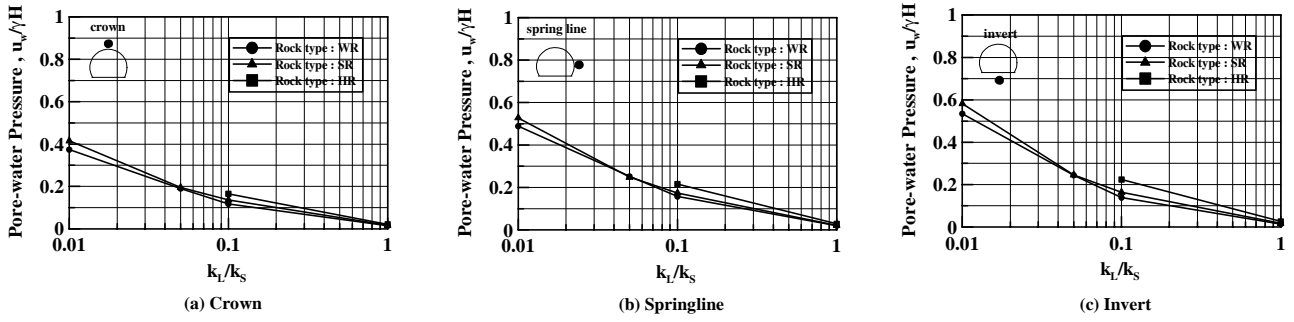


그림 8. k_L/k_S 에 따른 라이닝 배면수압

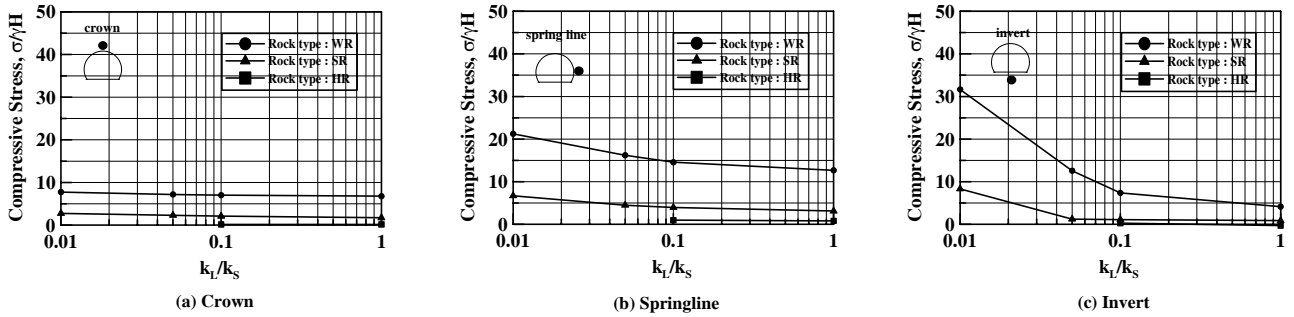


그림 9. k_L/k_S 에 따른 라이닝 압축응력

3.3 지하수위 저하량에 따른 영향

그림 10과 그림 11은 해석조건 case 1에서 case 3까지에 대한 해석결과로 굴착이 진행되면서 지하수가 저하되기 시작한 뒤 정상류 상태에 도달한 지점인 막장면 후방 1.5D 단면에서의 굴착압반의 종류와 지하수위 저하량(H_D)에 따른 천단부와 측벽, 인버트부에서의 라이닝 압축응력과 배면수압을 보여주고 있다. 그림 10을 관찰하면 라이닝 배면수압은 터널상부 지하수위 전수두에 해당하는 정수압 분포에 비해서 작게 나타나고 있으나 k_L/k_S 에 따라서는 현격한 차이를 나타내고 있다. 이러한 경향은 라이닝 압축응력에서도 유사하게 나타나고 있다. 이로 미루어볼때 라이닝 배면수압과 압축응력은 지하수위 저하로 인한 영향보다는 굴착압반과 라이닝의 상대적 투수성에 더 큰 영향을 받는 것으로 파악된다. 한편, 일반적으로 실무에서 라이닝 설계시 잔류수압을 천단부에서 $u_w = 0.5\gamma_w H_t$ 로 가정하여 산정하기도 하나 본 연구결과에 따르면 그림 10(a)에 나타난 바와 같이 $k_L > 1.0k_S$ 범위에 있는 경우에서만 적용 가능한 것으로 나타나 이와 관련된 연구가 지속적으로 요망된다.

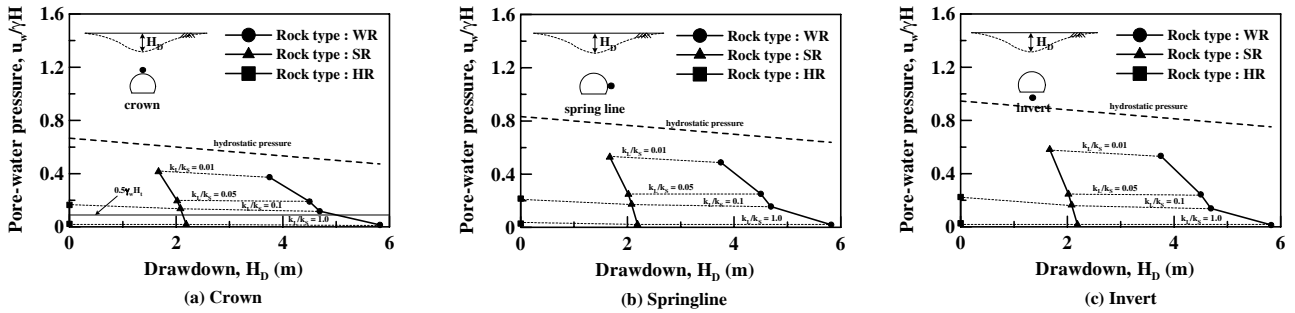


그림 10. 암반의 종류와 지하수위 저하량에 따른 지점별 라이닝 배면수압

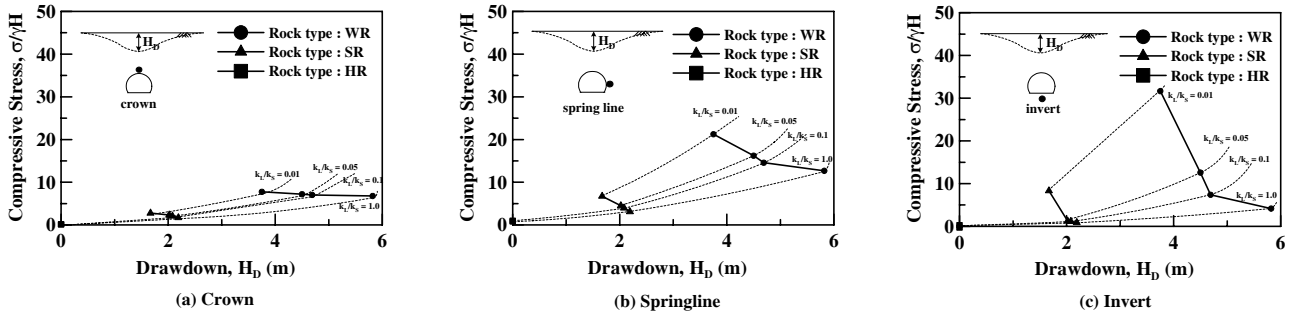


그림 11. 암반의 종류와 지하수위 저하량에 따른 지점별 라이닝 압축응력

3.4 그라우팅의 효과

그림 12와 그림 13은 해석조건 case 4의 해석결과로서 풍화암을 굴착대상 암반으로 하여 그라우팅을 수행하지 않은 without grouting과 굴착이후 터널내 지하수 유입 억제에 대해 수행하는 사후 그라우팅 (post-grouting), 굴착이전에 그라우팅을 수행하는 사전 그라우팅(pre-grouting)에 대한 효과를 비교하였다. 그림 12는 30m 굴착시 터널막장면으로부터 2.0D 후방 지점에서의 막장면 위치에 따른 라이닝 배면수압의 변화양상을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 터널 굴진시 터널굴착면은 자유수면이 형성되므로 터널내부로 지하수가 유출되어 라이닝 주변 간극수압이 저하되고 있으며, 막장이 통과한 이후 슛크리트 라이닝이 타설되면 터널내부로의 지하수 유입이 억제되므로 라이닝 배면수압은 점차 증가하여 굴착이전 간극수압의 1/2~1/3 가량을 회복하는 것으로 나타나고 있다. 반면 그라우팅 수행시에는 라이닝 배면수압이 막장에 도달하기 까지 유사한 형태를 보이나 막장 통과이후 라이닝 배면수압이 회복되지 않고 감소된 채로 유지되고 있다. 이러한 현상은 사전 그라우팅 수행시에도 막장면에 대한 그라우팅은 수행되지 않으므로 굴착시 지하수가 막장면을 통해 유입되어 그라우팅을 수행하지 않은 경우처럼 간극수압은 저하되기 시작하나 굴진이 계속되면서 슛크리트 라이닝 주변에 그라우팅 영역이 형성되어 있으므로 지하수 유동이 작아지기 때문이다. 따라서 막장이 2.0D 전방으로 전진한 이후에도 간극수압은 회복되지 않고 감소된 채로 유지되고 있다.

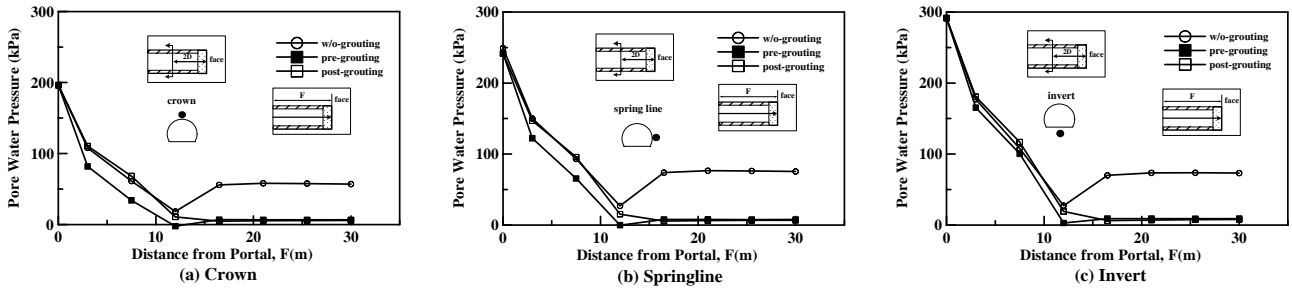


그림 12. 터널 굴진에 따른 라이닝 배면수압

그림 13은 30m 굴착시 터널막장면으로부터 1.5D 후방에 위치한 단면에서의 라이닝 지점별 압축응력을 나타내고 있다. 그라우팅을 수행한 경우의 라이닝 압축응력이 보다 작은 것을 확인할 수 있는데 이는 먼저 그라우팅 영역의 지반강성이 커 라이닝 주변에 지보효과가 발휘되며 아울러서 라이닝 배면수압도 감소되므로 라이닝에 작용하는 외부하중도 줄어들었기 때문으로 사료된다.

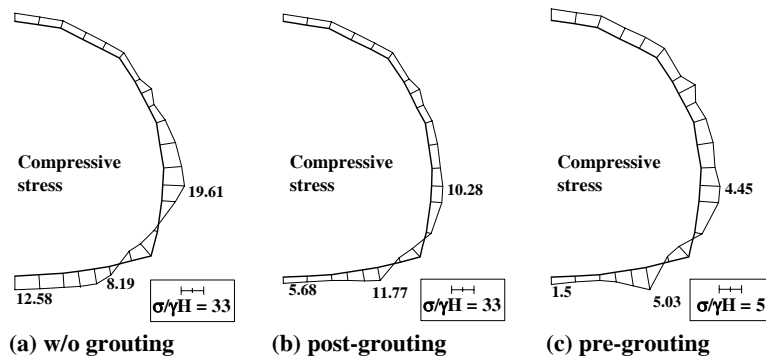


그림 13. 그라우팅 적용 유무에 따른 라이닝 압축응력

이와같이 차수가 고려된 그라우팅 수행시 지하수 유동을 억제하여 라이닝 배면수압이 억제됨은 물론 라이닝 부재력을 감소시키는 효과를 나타내는 것으로 확인되었다. 또한 사후 그라우팅보다는 사전 그라우팅을 수행하는 것이 보다 공학적으로 유리한 것으로 나타났다.

4. 결론

본 논문에서는 터널굴착과 지하수의 상호작용이 터널의 거동에 미치는 영향에 대하여 종합적으로 고찰하였다. 이를 위해 서울시 지하철 구간의 일반적인 시공조건을 고려하여 3차원 응력-간극수압 연계 해석을 수행하였으며, 그 결과를 토대로 터널시공시 지하수와 상호작용으로 인한 터널 라이닝의 거동 매커니즘과 지하수 저하 억제 및 터널안정성 확보를 위해 수행되는 그라우팅의 효과에 대하여 고찰하였다.

매개변수 연구결과 터널 시공시 지하수 유동이 발생하는 시공조건에서 라이닝 배면수압과 압축응력은 굴착지반 자체의 투수성보다는 지반과 숏크리트 라이닝의 상대적인 투수성에 보다 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며 숏크리트의 투수성이 상대적으로 낮을 경우 숏크리트 응력의 증가는 인버트부에서 가장 큰 것으로 나타났다. 또한 사전 그라우팅 수행시 라이닝 배면수압 및 압축응력이 현저하게 줄어드는 것으로 나타나 터널 안정성 측면에서 매우 유리한 것으로 나타났다.

감사의글

본 연구는 2005년 건설교통부가 출현한 한국형 싱글셀 터널공법 개발 (과제번호 :

C103A1000026- 03A0200-02620)에 의한 것이며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 유충식 (2004), “응력-간극수압 3차원 연계해석을 통한 터널굴착과 지하수의 상호작용 고찰”, 한국지반공학회 논문집, Vol. 20, No. 3, pp. 33-46.
2. 유충식 (2004), “터널시공과 지하수의 상호작용이 터널의 거동에 미치는 영향”, 한국터널공학회 학술발표회 논문집, pp. 77-90.
3. Biot, M.A., (1941), "General theory of three dimensional consolidation", *J. Appl. Phys.*, Vol. 12, pp. 155~164.
4. Biot, M.A., (1955), "Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid", *J. Appl. Phys.*, Vol. 26, No. 2, pp. 182~185.
5. Drucker, J.M and Prager, W., (1952), "Soil Mechanics and Plastic Analysis in Limit Design", *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol. 10, No. 2, pp. 157~165.
6. Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Inc. (2002) *ABAQUS users manual, Version 6.3*, Providence, R.
7. Lee, I.M. and Nam, S.W., (2001), "The study of seepage forces acting on the tunnel lining and tunnel face in shallow tunnels", *Tunnelling and Underground Sapce Technology*, Vol. 16, pp. 31~40.
8. Norwegian Urban Tunnelling (1995), Norwegian Soil and Rock Engineering Association, Publication No. 10.
9. Peck, R. B. (1969). "Deep excavations and tunneling in soft ground." *Proc., 7th Int. Conf. on Soil Mech. And Found. Engrg.*, 225-29
10. Report on design issues of the concrete lining of the waterway tunnel (1997), KOWACO.
11. 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.
12. 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.
13. Zienkiewicz, O.C. and Shiomi, T., (1984), "Dynamic behavior of saturated porous media: The generalized Biot formulation and its numerical solution", *Int. J. Numer. Analyt. Meth. Geomech.*, Vol. 8, pp. 71~96.