

모형실험 및 현장계측을 통한 배수형 실드터널의 작용수압 저감 평가

김동민¹ · 마상준^{1*} · 이영섭¹

¹정회원, 한국건설기술연구원

The study on the hydraulic pressure reduction of drainage shield tunnel using model test and field instrumentation

Dong-Min Kim¹, Sang-Joon Ma^{1*}, Young-Sub Lee¹

¹Korea, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyang-daero, Goyang-Si 411-712

ABSTRACT: In this study, model test equipment was developed to evaluate the hydraulic pressure reduction in applying the drainage shield tunnel and the model test for hydraulic pressure difference was performed in case of drainage and undrained conditions. In the result of model test, increase ratio of pore water pressure was decreased in drainage condition and total stress in drainage condition was smaller than that in undrained condition, so the hydraulic pressure was reduced by the groundwater inflow into the model tunnel. In the result of field instrumentation, the hydraulic pressure in the back ground of shield tunnel was small by 11~22% in comparison with the calculated hydraulic pressure ($r_w \cdot H$) in same groundwater level. In the result of model test and field instrumentation, it was appeared in drainage and undrained conditions that the difference between the theoretical hydraulic pressure and the real hydraulic pressure. It shows that it is possible to apply the reduced hydraulic pressure in applying the drainage shield tunnel and to reduce the segment section due to hydraulic pressure reduction.

Keywords: Drainage shield tunnel, Drainage furrow, Model test, Field instrumentation, Hydraulic pressure reduction

초 록: 본 연구에서는 배수형 실드터널 적용시 작용수압의 저감을 평가하기 위해 모형실험장치를 개발하여 배수 및 비배수 조건에서 작용수압 차이를 실험하였다. 모형실험 결과 배수 조건에서 간극수압 증가율이 감소하는 경향을 보였고, 비배수 조건에 비해 전응력이 더 작게 나타나 모형터널 내 지하수 유입에 의해 작용수압이 저감되는 것으로 나타났다. 현장계측 결과 실드터널 배면 지반 내 작용수압은 지하수위로 계산되는 수압($r_w \cdot H$)보다 약 11~22%정도 적게 나타났다. 모형실험 및 현장계측 결과에서 배수 및 비배수 조건의 이론적인 설계수압과 작용수압의 차이가 나타났는데, 배수형 실드터널 적용시 기존 설계수압보다 감소된 수압을 적용하는 것이 가능할 것으로 판단되며, 수압 감소를 통해 세그먼트 단면 축소도 가능할 것으로 판단된다.

주요어: 배수형 실드터널, 배수 유로홀, 모형실험, 현장계측, 수압 저감

1. 서 론

최근 국가 기간 철도망이 도심지를 통과하게 되면 시 민원 환경, 기존 노선과의 접촉 등의 문제가 발생되

어 근접 구조물이나 하저 통과 구간, 다양한 복합지반 구간과 같이 더 가혹한 현장상황에서 터널공법 적용 이 요구되고 있다(Jue et al., 2012). 근래 들어 가장 많이 사용되고 있는 터널 공법 중의 하나인 실드터널 (shield tunnel) 공법은 대심도 지하공간을 효율적으로 이용할 수 있는 지하 공간 구축기술로, 세계 각국에서 공법 적용과 함께 관련 기술의 개발이 이루어지고 있다(Ma et. al., 2013). 실드터널 공법은 실드(shield)

*Corresponding author: Sang-Joon Ma
E-mail: sjma08@hanmail.net

Received June 4, 2015; Revised June 19, 2015;
Accepted June 22, 2015

라는 강재의 큰 통 전면에 설치된 비트(bit)를 이용하여 지반을 굴착해 가면서, 후방에서 토사의 붕괴를 막기 위해 세그먼트(segment)라는 콘크리트 블록을 원형(직경에 따라 5~7분할)으로 조립해 가면서 터널을 만드는 방법이다(Kim et al., 2012). 하지만, 쉴드터널 전체 공사비는 NATM 터널 전체 공사비의 110~120% 정도로 고가이고, 세그먼트 라이닝은 쉴드터널의 직접공사비에서 약 25~40%로 가장 큰 비중을 차지하기 때문에 합리적이고 경제적인 세그먼트 라이닝의 설계가 중요하다(Chang et al., 2011). 특히, 쉴드터널은 주로 지하수위 아래에 위치하는 경우가 많아 방수 및 배수 처리가 터널 구조물의 품질에 크게 영향을 미친다(Kim et al., 2012).

현재 쉴드터널은 일률적으로 비배수(undrained) 터널로 설계 및 시공되고 있으나, 비배수 설계임에도 불구하고 수팽창 지수재의 기능 상실 후에는 장기적인 누수관리가 불가능한 상황으로 누수 방지를 위한 과도한 뒤채움 주입으로 시공비만 증가하고 있는 현실이다(Kim and Ma, 2013). 또한, 실제 운영 및 시공 중인 쉴드터널의 경우 터널 내부로의 지하수 유입이 빈번하게 발생하고 있고, 비배수 터널임에도 불구하고 배수시설을 설치하고 있는 상황이다(Kim and Ma, 2013). 토압 및 수압까지 고려한 비배수 설계에서는 안정성 확보 방안으로 쉴드터널 라이닝 단면을 증가시키게 되는데, 이로 인해 세그먼트 재료비가 높아져서 전체 공사비 증가를 유발하고 있다.

Ward 와 Pender (1981)은 운영 중인 터널들에 대한

누수량 계측자료를 토대로 모든 터널은 궁극적으로 배수구(drain)처럼 거동한다고 하였다. 이는 비배수 터널로 건설하였다 하더라도 장기적으로 구조물 열화 등의 원인으로 인해 누수가 발생하며, 터널은 궁극적으로 비배수 개념이 유지되지 않음을 의미하는 것이다(Shin et al., 2005). 만일, 쉴드터널에서 세그먼트 라이닝에 지하수 유입을 고려하거나 혹은 보다 적극적으로 배수 기능을 도입할 경우 지하수 배수에 의해 라이닝에 작용하는 하중을 감소시킬 수 있고, 결과적으로 세그먼트 두께를 감소시켜 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 배수 및 비배수 조건에서 쉴드터널 라이닝에 작용하는 압력을 분석하기 위해 모형실험장치를 개발하였고, 다양한 조건에서의 실험을 통해 배수 및 비배수 조건에서 수압 저감 효과를 평가하였다. 또한, 실제 쉴드터널 시공현장에서 세그먼트 배면에 작용하는 수압을 측정하기 위해 현장 계측시스템을 구축하였고, 이론적 계산에 의해 설계된 수압과 실제 측정된 수압과의 차이를 비교하여 배수 조건에서의 수압 저감 효과를 확인하고자 하였다.

2. 배수형 쉴드터널

배수 개념이 적용된 쉴드터널에서 유입되는 지하수를 배수시키기 위해서 세그먼트에 배수 유로홈(drainage furrow) 개념이 적용되었다. Fig. 1은 배수형 쉴드터널에 적용되는 세그먼트 형상과 기본적인 지하수의 흐

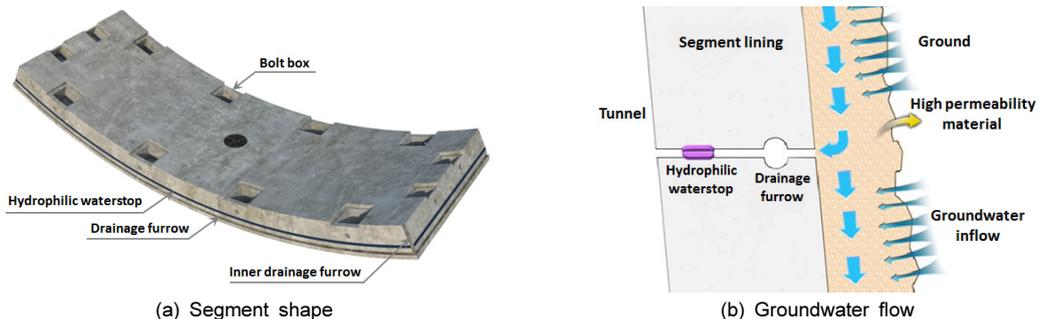


Fig. 1. Basic concept of drainage shield tunnel

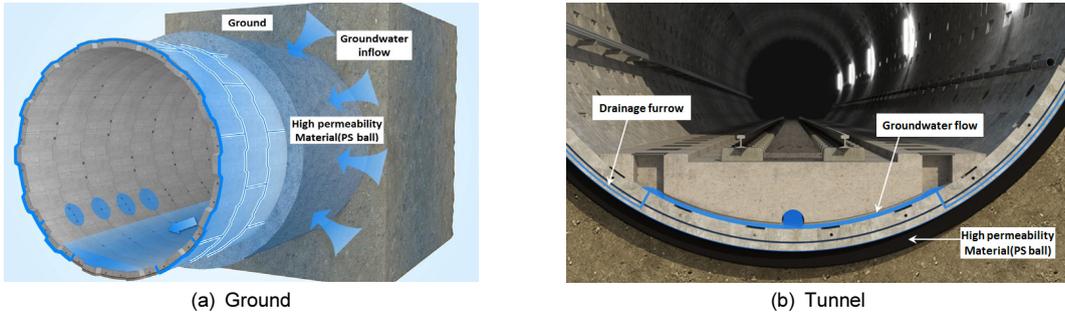


Fig. 2. Groundwater flow in drainage shield tunnel

름을 모사한 것이다. 배수 유로홈은 쉴드 세그먼트면에 일반적으로 형성되는 2열의 수팽창 지수재 설치 홈 중 한열을 직경 20~30 mm 정도의 반원 형상으로 변경하고, 2개의 세그먼트가 조립되면 반원과 반원이 접하여 원형의 수로를 형성하게 하는 것이다. 세그먼트 4면에 형성된 배수 유로홈은 터널 외부에서 유입되는 지하수의 자연 배수로 역할을 하게 된다.

중력방향으로 유도된 지하수는 내부 배수구를 통해 터널 내부로 유입되고, 터널 경사에 의해 집수정에 모여 펌프 등을 이용하여 터널 외부로 배출시키게 된다. 금형몰드에서 탈형하는 방식의 공장생산 제품인 쉴드 세그먼트는 금형몰드 제작시 배수용 유로홈 위치만 구현하게 되면, 시공과정의 변경이나 추가적인 생산비용 없이 배수형 세그먼트 생산이 가능하다. 특히, 기존에 누수방지와 공극 충진을 위해 쉴드터널 배면에 뒤채움 되던 그라우트재를 사용하지 않고, PS 볼과 같은 투수성 재료를 충전함으로써 효과적인 지하수 배수를 유도하고 환경유해 재료로 인한 지반오염을 방지할 수 있다(Kim and Ma, 2013; Lee et al., 2015). Fig. 2는 배수형 쉴드터널의 배면 지반과 터널 내에서 지하수 흐름의 개념을 나타낸 것이다.

3. 배수 조건에 따른 모형실험

3.1 모형실험장치 제작

쉴드터널에서 배수 기능을 도입할 경우 지하수 흐

름에 따라 터널 라이닝에 작용하는 수압의 감소 가능성을 평가하기 위해, 배수 및 비배수 조건에서 쉴드터널에 작용하는 압력을 분석할 수 있는 모형실험장치를 개발하였다(Ma et al., 2015).

Fig. 3은 모형실험장치를 나타낸 것인데, 토조(chamber), 유압장치(hydraulic equipment), 모형터널 설치 홈(model tunnel hole), 계측장치(load cell, earth pressure cell) 등으로 구성되어 있다. 토조는 지중에 시공된 쉴드터널을 모사하기 위해 시험사를 채우는 부분으로, 지하수위 모사가 가능하고 폭 0.6 m, 길이 0.6 m, 높이 1.0 m, 부피 0.36 m³의 크기로 제작되었다. 토조 하단부에는 쉴드터널 모형을 삽입할 수 있는

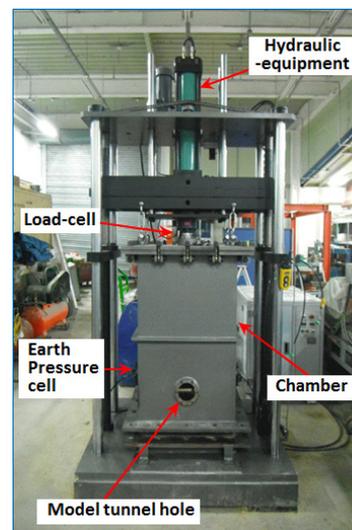


Fig. 3. Shield tunnel model test equipment

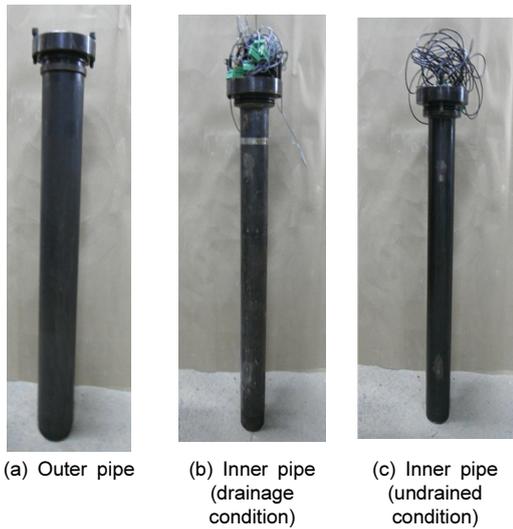


Fig. 4. Model shield tunnel

구멍을 설치하였다. 토조 상부관 중앙에는 심도에 따른 토압의 변화를 모사하고 시료에 가해지는 하중 측정 및 압력 조절을 위해 유압장치와 로드셀을 설치하였다. 로드셀 하부에는 시료에 고른 하중을 가할 수 있는 가압판을 설치하였다. 가압판에는 다수의 구멍을 천공하여 하중을 가하면서 지하수가 자유롭게 이동할 수 있도록 하여 토조 외부에서 지중내에 작용하는 수압조절을 용이하도록 하였다. 그리고 토조 뒷개의 측면에는 수압 변화를 측정하고 조절하기 위한 수동식 수압조절장치를 설치하였다.

Fig. 4는 쉴드터널 모형을 나타낸 것이다. 외관은 쉴드터널 굴착시 원지반과 라이닝 사이 주변지반의 이완영역을 모사하기 위한 장치로서, 외경 100 mm, 내경 80 mm의 파이프로 제작되었다(Fig. 4(a)). 내관은 배수 및 비배수 조건에서 쉴드터널 라이닝을 모사하기 위한 장치로서, 외경 75 mm, 내경 60 mm로 제작되었다(Fig. 4(b), (c)). 배수 조건 실험에 사용되는

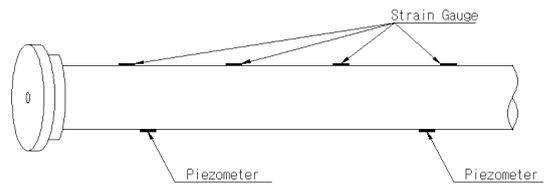


Fig. 5. Measuring instrument of inner pipe

내관(b)는 표면에 직경 5 mm의 지하수 유입구를 25개소 설치하고, 지하수는 통과 가능하지만 표준사는 유입되지 않는 필터를 유입구 내부에 설치하여 실험을 수행하였다.

Fig. 5는 내관에 설치된 계측기를 나타낸 것인데, 내관(fig. 4(b), (c))에 작용하는 간극수압을 측정하기 위한 간극수압계(piezometer), 내관의 거동을 측정하기 위한 변형률계(strain gauge)로 구성되어 있다.

토압계는 쉴드터널 모형이 삽입되지 않는 토조 양측 벽면에 2개소 설치하였는데, 쉴드터널 모형과 동일한 높이에 설치하였다. 간극수압계는 배수구 및 집수장치가 쉴드터널 하단에 설치되는 것을 고려하여 내관 아래 면에 2개소 설치하였으며, 변형률계는 내관의 상면에 동일한 간격으로 4개 설치하였다. 설치된 계측기와 연결된 계측선은 Fig. 4(a), (b)에서와 같이 내관 머리부분을 통해 외부 계측장치와 연결되도록 하였다.

모형실험에서 지반 구성에 사용된 시료는 투수성이 크고 통일분류법상 SP에 속하는 모래로서 물성치는 Table 1과 같다.

3.2 모형실험 수행

Table 2는 모형실험에서 측정시간별 실험조건을 나타낸 것이다. 토조를 하부판과 볼트로 체결하고 측면에 외관을 삽입한 후 시험사를 높이 90 cm까지

Table 1. Material property of sand

density (g/cm ³)	specific gravity	coefficient of permeability (m/sec)	coefficient of uniformity	unified soil classification system
1.57	2.63	2.71E-4	1.46	SP

Table 2. Measuring time by test case

measuring time (sec)	hydraulic pressure (MPa)	earth pressure (MPa)	measuring time (sec)	hydraulic pressure (MPa)	earth pressure (MPa)
00~60	0.05	0.0278	721~780	0.15	0.0278
61~120		0.0556	781~840		0.0556
121~180		0.0834	841~900		0.0834
181~240		0.1112	901~960		0.1112
241~300		0.1390	961~1,020		0.1390
301~360	0.05 → 0.10	0.0000	1,021~1,080	0.15 → 0.20	0.0000
361~420	0.10	0.0278	1,081~1,140	0.20	0.0278
421~480		0.0556	1,141~1,200		0.0556
481~540		0.0834	1,201~1,260		0.0834
541~600		0.1112	1,261~1,320		0.1112
601~660		0.1390	1,321~1,380		0.1390
661~720	0.10 → 0.15				

채웠다. 지반에 균등한 압력을 가하면서 지중응력을 모사하기 위하여 상부 가압판(60 cm×60 cm)에 로드 셀을 부착하고 하중을 재하하였다. 모형실험에서 재하한 응력은 0.0278~0.1390 MPa로서 지표 아래 2.86~14.30 m에서 터널이 받고 있는 압력을 모사하였다. 이 후 외관을 제거하고 배수 및 비배수 조건의 쉘드터널 모형 내관을 삽입한 후, 하중을 가한 상태에서 시험사 상부에서 물을 주입하면서 지반을 포화시켜 지하수위 아래에 시공된 쉘드터널을 모사하였다.

토조의 수압은 0.05 MPa로 가압하고 유지한 상태에서 토압을 1분당 0.0278 MPa 씩 증가시켜 0.139 MPa까지 가압하며 데이터를 측정하였다. 이 후 수압을 0.10 MPa, 0.15 MPa, 0.20 MPa로 단계적으로 증가시키고 일정하게 유지한 상태에서 각각 토압을 0.139 MPa 까지 증가 시키면서 데이터를 측정하였다.

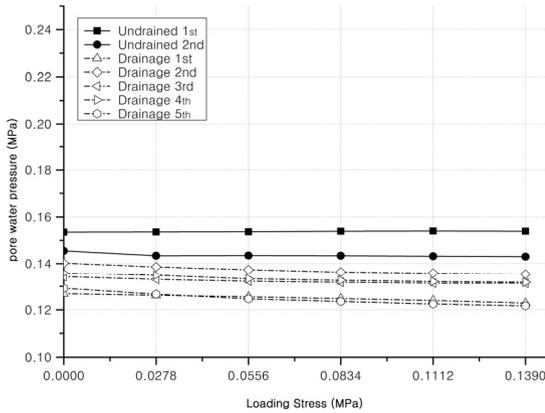
모형실험은 Table 2와 같은 4가지 수압조건(0.05, 0.10, 0.15, 0.20 MPa)에 대해 각각 배수 조건 5회, 비배수 조건 2회를 실시하였다.

3.3 모형실험 결과

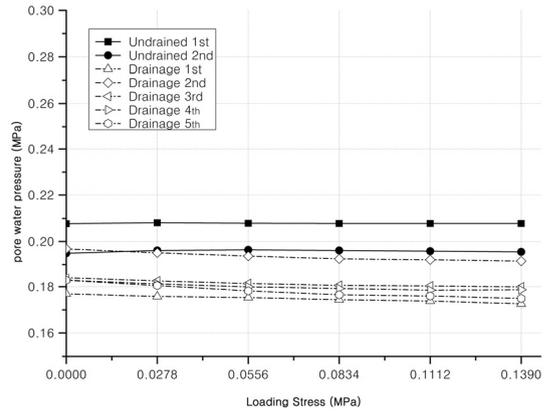
Fig. 6은 배수 및 비배수 조건에서 간극수압의 변화를 나타낸 것이다. 2회 수행된 비배수 조건 실험에서 재하압력이 증가할 경우 평균 간극수압 증가율은 0.001, -0.008로 나타나 동일한 수압이 작용하는 조건에서 간극수압은 변화없이 일정하게 유지되었다. 반면 5회 수행된 배수 조건 실험에서는 평균 간극수압 증가율은 각각 -0.025, -0.033, -0.018, -0.027, -0.045로 나타나, 간극수 유출과 함께 수압이 점차 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 7은 배수 및 비배수 조건에 따른 전응력과 유효응력의 변화를 나타낸 것이다. 그래프에서 위쪽에 도시된 것은 전응력을 나타내며, 아래쪽에 도시된 것은 유효응력을 나타내고 있다.

모든 수압 조건에서 재하응력 증가에 따른 전응력의 증가량은 비배수 조건이 배수 조건보다 더 크게 나타났다. 전응력은 토압과 수압의 합으로서 지반 아래 동일한 위치(동일한 토압)의 모형터널에서, 비배수 조건보다 배수 조건의 전응력이 작다는 것은 배수

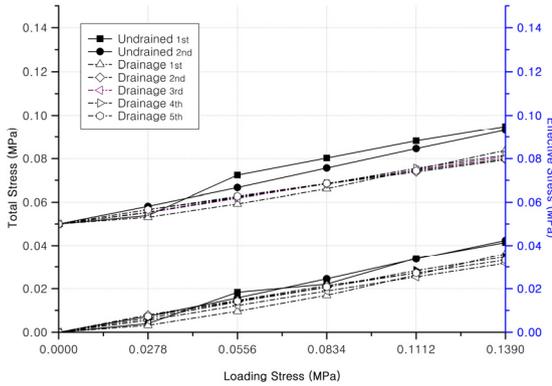


(a) hydraulic pressure 0.15MPa

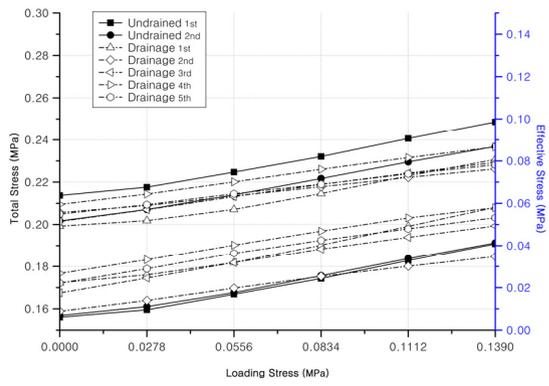


(b) hydraulic pressure 0.20MPa

Fig. 6. Pore water pressure by loading stress



(a) hydraulic pressure 0.05MPa



(b) hydraulic pressure 0.20MPa

Fig. 7. Total stress and effective stress by loading stress

조건의 수압이 배수 조건보다 작다는 것을 의미하며, 모형터널 내 지하수 유입에 의해 작용 수압이 저감되는 것으로 판단된다.

된 수압 (y)과의 관계식 구하면 식 (1)과 같다.

$$y = -0.0179x^2 + 8.8125x - 0.0057 \quad (1)$$

3.4 수압 저감 평가

모형실험 결과를 통해 얻어진 수압 저감 효과를 평가하기 위해 배수조건 실험에서의 수압 감소비율을 산정하였다. Table 3은 지하수위에 따른 정수압 (hydrostatic pressure), 수압 감소비율, 감소된 수압을 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 8은 Table 3의 결과를 그래프로 나타낸 것인데, 지하수위 (x)와 그때의 감소

Table 3. Reduction of hydraulic pressure

groundwater level (m)	reduction ratio of hydraulic pressure	hydrostatic pressure (kPa)	reduced hydraulic pressure (kPa)
2.8	-11.8%	28	24.696
5.6	-12.7%	56	48.888
8.4	-13.4%	84	72.444
11.2	-13.8%	112	96.544
14.0	-14.3%	140	119.980

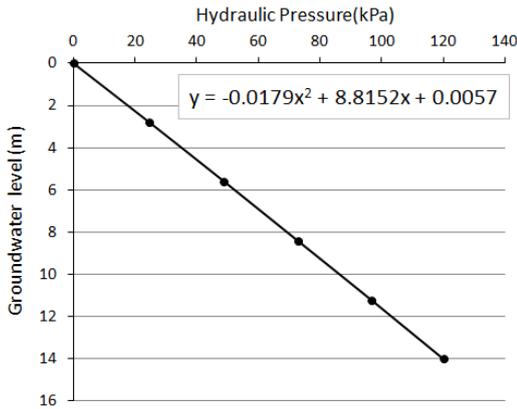


Fig. 8. Hydraulic pressure by reduction ratio

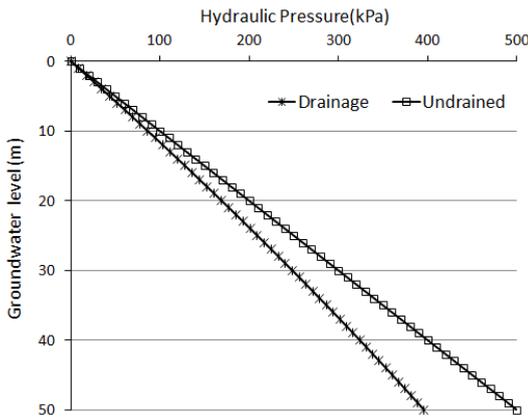


Fig. 9. Hydraulic pressure of drainage and undrained condition

식 (1)을 이용하여 지하수위 50 m까지 비배수 및 배수 조건에서의 수압을 도시하면 Fig. 9와 같다. 지하수위가 커질수록 정수압과 배수 조건에서의 수압 차이는 커져서 지하수위 18 m부터 수압 저감율이 15%를 넘게 되고, 지하수위 46 m부터는 20%를 넘어서는 것으로 나타났다.

Lee (1996)는 배수 개념의 터널 설계시 지하수위 저하가 크지 않을 경우 침투압을 고려하여 작용수압을 0으로 보는 것은 적절하지 않다고 평가하였다. 이와 동일하게 배수 개념의 터널 설계시 작용수압을 비배수 조건과 똑같이 적용하는 것도 합리적인 설계는 아니라고 판단된다. 본 모형실험에서는 투수계수

가 상대적으로 큰 사질토로 지반을 조성하여 실험을 수행하였기 때문에, 투수계수가 작은 지반에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 그러나 합리적인 터널 설계를 위해서는 배수 개념이 적용될 경우에는 비배수 조건과 다른 수압을 고려하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

4. 쉘드터널 배면 수압 현장계측

4.1 현장 개요

현재 국내의 쉘드터널은 비배수 개념으로 설계 및 시공되고 있기 때문에, 배수형 쉘드터널에서 지하수의 유입 및 흐름으로 나타나는 수압 저감을 현장계측으로 평가하는 것은 불가능한 상황이다. 비배수 개념에서 세그먼트 설계시 단면 두께는 토압과 수압을 모두 고려하여 산정되는데, 여기서 고려되는 수압은 쉘드 세그먼트면에 작용하는 수압을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 세그먼트면이 아닌 지반 내 지하수의 흐름이 자유로운 위치에서의 수압이 비배수 개념에서 산정되는 수압($r_w \cdot H$)과 유사한지 현장계측을 통해 평가하고자 하였다.

현장계측은 동해○○화력발전소 전력구 쉘드터널 시공현장에서 수행되었는데, Fig. 10은 쉘드터널에서 계측기를 설치한 지점을 나타낸 것이다. A, B지점에 간극수압계를 설치하였는데, 설치지점의 지하수위는 각각 12.34 m, 13.98 m이다.

계측 지점의 지반은 매립층과 퇴적층으로 구성되어 있는데 정확한 투수계수는 산정하지 못하였으나, 모형실험에서 사용한 사질토에 비해서는 투수계수가 더 작을 것으로 예상된다.

4.2 계측기 설치

쉘드터널과 관련된 국내의 연구 중 현장계측과 관련된 내용은 세그먼트 내부에 계측기를 설치한 경우

가 대부분인데(Koh et al., 2012), 세그먼트 내부에 설치된 계측기는 실제 지반 응력을 백퍼센트 반영하는데 한계가 있다. 특히, 세그먼트 배면에 토압계를 설치한 경우는 뒤채움재가 충전되어 토압계를 덮게 되어 실제 지반에 접할 수가 없고, 뒤채움재 양생 후에는 세그먼트 배면에 토압을 지지하는 하나의 지지층이 생성되는 결과를 가져온다. 따라서, 본 연구에서는 실제 실드터널 배면 지반 내에 작용하는 수압을 최대한 정확히 측정하기 위해 새로운 방법을 고안하였다.

Fig. 11은 세그먼트 주입홀을 이용한 간극수압계를 설치하는 방법을 나타낸 것인데, 간극수압계를 설치한 강관을 주입홀을 관통시켜 지반 내에 설치하는 방법이다. 먼저 주입홀과 세트로 설치되는 역류방지마개(backwater stopper)를 설치하여 주입홀 마개(plastic cap)를 관통했을 때 지반 내 지하수가 터널 내부로 과도하게 유입되는 것을 방지한다. 스틸바(steel bar)를 이용하여 주입홀 마개를 관통시키고, 곧바로 간극수압계(piezometer)가 설치된 강관(steel pipe)을 실드터널 배면 지반 내에 깊숙이 밀어 넣는다. 주입홀 마개(plug)를 설치하여 뒤채움 시공시 강관이 움직이거나 터널 내부로 밀리는 것을 방지하고, 주입홀 내부에 지수 그라우팅을 실시하여 지하수의 누수를 완전히 차단할 수 있도록 하였다.

Fig. 11과 같은 방법으로 간극수압계를 설치하는 이유는 계측기가 지반 내에 완전히 삽입되게 하기 위해서이다. 따라서, 뒤채움재 주입시 간극수압계가

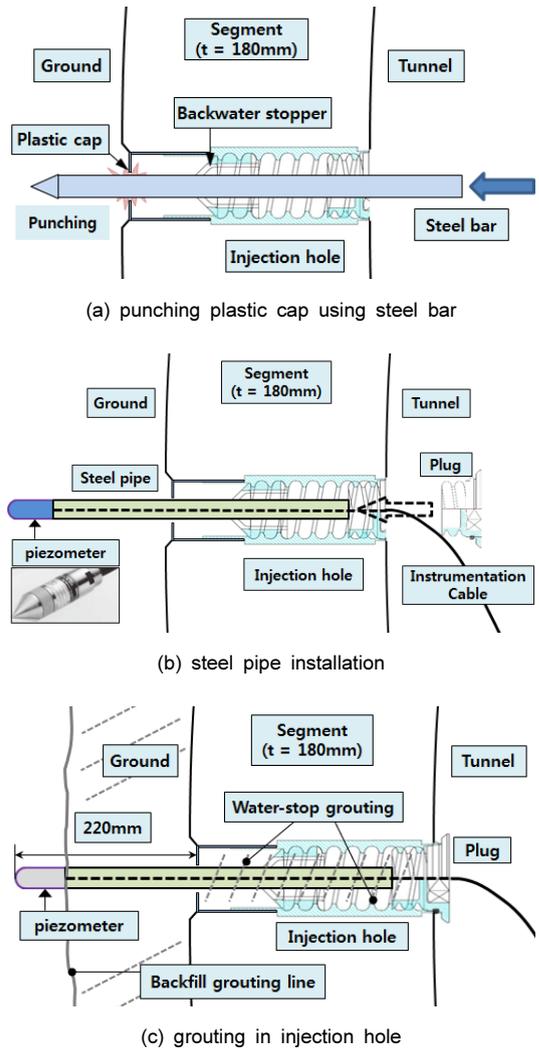


Fig. 11. Piezometer installation using injection hole

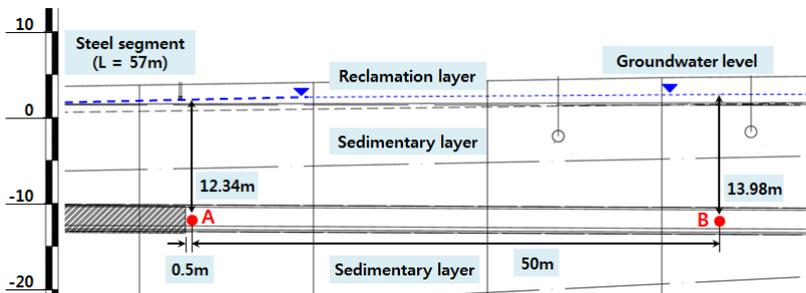


Fig. 10. Measuring point of site



Fig. 12. Installation process of piezometer

묻히지 않도록 현장 의견을 수렴하여 강관 길이를 세그먼트 배면에서 200 mm 이상 충분히 떨어지도록 길이를 확보하였다. 계측기를 지반 내에 삽입시에도 배면 빈 공간을 통과한 강관이 흙 속에 들어가는 느낌이 들때까지 삽입하였다. 그리고 간극수압계가 설치되는 주입홀 위치 선정은 설치 작업의 난이도를 고려하여 터널 단면에서 수평 방향으로 결정하였다.

Fig. 12는 간극수압계를 설치하는 과정을 보여 주고 있다. 계측기점 A에서 뒤채움재를 충전하기 전 주입홀 마개를 관통시켰을 때 Fig. 12(b)처럼 상당량의 지하수가 터널 내로 유입되는 상황이 발생하였다. 본

시공현장이 바다에 인접해 있고 Fig. 10에서처럼 지하수위가 높기 때문에 지하수 차수방안 없이 주입홀을 관통할 경우 터널 내로 유입되는 지하수로 인해 계측기 설치 작업에 상당한 어려움이 있었다.

특히, 터널 내 과도한 지하수 유입으로 작업인부의 안전문제, 감리단의 점검, 시공사의 요청 등의 이유로 계측기점 B에서는 뒤채움재 충전 후 뒤채움재 내부에 간극수압계를 설치하기로 하였다. 따라서 B 지점에 설치되는 강관은 세그먼트면에서 150 mm를 제작하여 계측기를 설치하였다.

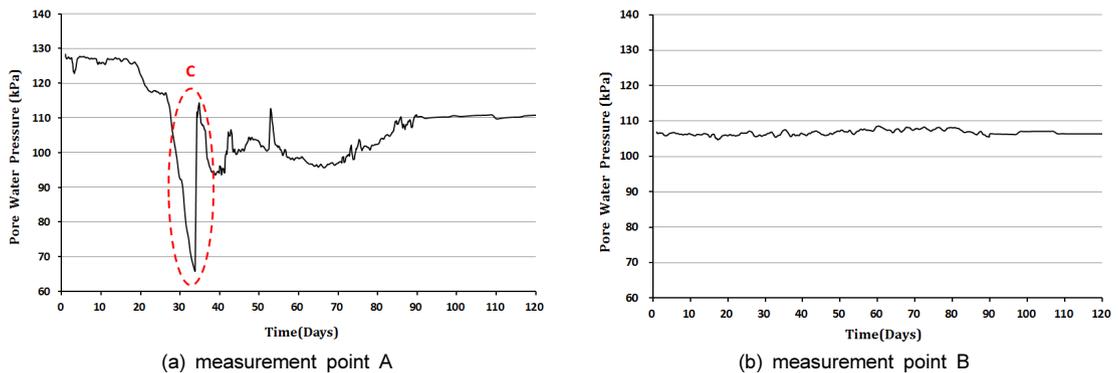


Fig. 13. Measurement results of pore water pressure

4.3 계측 결과

셸드터널 배면 지반의 간극수압 계측은 120일 동안 진행되었고, Fig. 13은 계측 기점 A, B에서의 간극수압 계측결과를 나타낸 것이다.

A 지점의 경우 뒤채움재 충전 전 간극수압계가 설치되었는데 Fig. 13(a)의 C 구간은 설치 후 약 30일 정도 경과 후이며, 이때 현장에서는 셸드터널 배면 뒤채움 시공이 실시되었다. 뒤채움재 주입과 함께 수압이 일시적으로 급격히 감소한 후 다시 증가하였고, 이후부터 넓은 범위가 변동되다가 수렴하는 것으로 나타났다. C 구간은 뒤채움재의 주입압의 영향으로 배면 지반까지 뒤채움재가 침투하면서 일시적으로 계측기에 영향을 미친 것으로 판단된다. 그리고 수압이 급격히 감소한 후 3~4일 안에 다시 증가하면서 지반 내 지하수의 흐름이 원상태로 회복된 것으로 판단된다.

A 지점에서 측정된 수압은 설치 경과 90일 이후부터 110 kPa 전후로 수렴되는 것으로 나타났는데, A 지점의 지하수위는 Fig. 10에서 약 12.34 m (123.4 kPa)로서 계측된 결과와 이론적인 수압($r_w \cdot H$)을 비교할 때 약 11% 정도 차이가 있는 것을 나타났다.

B 지점의 경우는 현장 상황으로 인해 뒤채움재가 충전된 직후 뒤채움재 내부에 간극수압계를 설치한 지점인데, Fig. 13(b)에서와 같이 계측 초기부터 108 kPa 정도의 수압이 측정되었다. B 지점의 지하수위는 Fig. 10에서 약 13.98 m (139.8 kPa)로서 계측된 결과와 이론적인 수압($r_w \cdot H$)을 비교할 때 약 22% 정도 차이가 있는 것을 나타났다.

뒤채움재 내부에 간극수압계가 설치되었기 때문에 계측된 수압이 거의 없거나 상당히 낮을 것으로 예상하였으나, A 지점과 유사한 결과를 나타내었다. 또한, 뒤채움재가 양생되면서 지하수의 유입을 차단할 경우 수압이 점차 감소할 것으로 예상하였으나, 계측 종료 시점까지 일정하게 유지되고 있는 것으로 나타났다. 일반적으로 배면 뒤채움재는 셸드TBM의 외벽으로

발생되는 공간을 채우는 역할과 함께, 비배수 공법인 셸드터널의 1차적인 지하수 차수 방안으로 알려져 있다. 그러나 현장계측 결과에서는 균열, 충전상태 등의 원인을 고려하더라도 뒤채움재 내부에 지하수가 지속적으로 존재하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 셸드터널에서 세그먼트 결합력 및 지수재만이 유일한 차수 대책이라는 것을 보여주는 것이라 판단된다. 또한, 시공 오차, 장기적인 지수재 기능 상실 등이 발생할 경우 완전한 비배수 터널로서의 운영이 불가능할 수도 있다고 예상된다.

본 연구에서 계측기가 설치된 지점은 앞에서 언급하였듯이 세그먼트면이 아닌 지반 내 지하수의 흐름이 자유로운 지점이다. 배수 및 비배수라는 용어는 구조물에 대한 개념으로 지반 내 지하수 상태를 표현하는 것은 아니지만, 지하수의 흐름이 자유롭다는 의미에서 터널 내부로 배수되는 조건으로 고려해 볼 수 있다. 현장계측 결과 지반 내 지하수의 흐름이 자유로운 지점에서의 작용수압은 이론적인 설계 수압보다 11~22% 정도 작은 것으로 나타났다.

모형실험 결과 배수 및 비배수 조건에서 지하수위에 따른 작용수압을 나타낸 Fig. 9에서 지하수위 12 m에서의 수압 감소율은 약 14%로 나타났다. 모형실험에서 지반을 조성한 사질토와 시공현장의 지반이 종류 및 투수계수 등은 차이가 있지만, 현장계측과 유사한 결과를 보이고 있다고 판단된다.

본 연구는 배수 및 비배수 조건에서 셸드터널에 작용하는 수압의 변화에 대한 초기연구로서 더 다양한 지반 종류, 유효응력 증가량 등에 대한 추가적인 연구가 필요할 것을 판단된다. 그러나 배수 조건에서의 작용수압이 비배수 조건과는 분명한 차이가 있음을 확인할 수 있으며, 비배수 셸드터널을 배수 조건으로 변경할 경우 기존 설계 수압과는 다른 수압을 적용하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 수압 감소를 통해 세그먼트 단면 축소도 충분히 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 배수형 쉴드터널 적용시 수압 감소를 평가하기 위해 모형실험장치를 개발하였고, 배수 및 비배수 조건에서의 작용수압 차이를 실험하였다. 그리고 현장계측을 통해 모형실험에서 얻은 결과를 비교 평가하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 배수 및 비배수 조건에서 쉴드터널에 작용하는 압력을 평가하기 위해 모형실험장치를 개발하여 실험을 수행하였는데, 비배수 조건에서는 재하압력이 증가할 경우 간극수압은 변화 없이 일정하게 유지되었으나, 배수 조건에서는 간극수압 증가율이 -0.025 , -0.033 , -0.018 , -0.027 , -0.045 로 점차 감소하는 경향을 보였다.
- (2) 모형실험 수행 결과 모든 수압 조건에서 재하응력 증가에 따른 전응력의 증가량은 비배수 조건이 배수 조건보다 더 크게 나타났다. 전응력은 토압과 수압의 합으로서 비배수 조건보다 배수 조건의 전응력이 작다는 것은 배수 조건의 수압이 비배수 조건보다 작다는 것을 의미하며, 모형터널 내 지하수 유입에 의해 작용수압이 저감되는 것으로 판단된다.
- (3) 모형실험 결과를 통해 지하수위 (x)와 그때의 감소된 수압 (y)과의 관계식을 도출하였고, 지하수위 50 m까지 비배수 및 배수 조건에서의 수압을 검토한 결과 지하수위가 커질수록 정수압과 배수 조건에서의 수압 차이는 커져서 지하수위 18 m에서 수압 저감율이 15%, 지하수위 46 m부터는 20%를 넘는 것으로 나타났다.
- (4) 쉴드터널 배면 지반 내의 수압을 측정하기 위해 현장계측을 실시하였는데, 지하수위 12.34 m의 위치에서 계측된 수압은 약 110 kPa로 이론적인 수압($r_w \cdot H$) 123.4 kPa 보다 약 11% 정도 적게 나타났고, 지하수위 13.98 m의 위치에서 계측된

수압은 약 108 kPa로 이론적인 수압($r_w \cdot H$) 139.8 kPa 보다 약 22% 정도 적게 나타났다.

- (5) 모형실험 및 현장계측 결과에서 배수 및 비배수 조건의 이론적인 설계수압과 작용수압의 차이가 나타났는데, 배수형 쉴드터널 적용시 기존 설계수압보다 감소된 수압을 적용하는 것이 가능할 것으로 판단되며, 수압 감소를 통해 세그먼트 단면 축소도 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 전담하는 건설교통기술촉진연구사업(과제명 : 배수 유로흡을 이용 수압 저감을 통한 공사비 절감 슬림형 세그먼트 터널 라이닝 기술 개발)의 지원으로 수행된 것으로 연구를 가능케 한 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

1. Chang, S.H., Lee, G.P., Choi, S.W., Bae, G.J. (2011), "State of the art of segment lining in shield tunnel and statistical analysis of its key design parameters", J. of the Korean Society for Rock Mechanics, Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 21, No. 6, pp. 424-438.
2. Jue, K.S., Sim, D.H., Kim, K.C., Jang, S.J., Choi, C.R., Han, S.H. (2012), "A study of key items on the shield tunnel design for passing through under the han-river", Proc. of 2012 Spring Conf. on Korean Society for Railway, Korean Society for Railway, pp. 1101-1106.
3. Kim, D.M., Ma, S.J., Gil, H.J. (2012), "Study on application possibility for partial drain concept of shield tunnel using drainage hole", Proc. of 2012 Conf. on Korean Society of Civil Engineers, KSCE, pp. 1346-1349.
4. Kim, D.M., Ma, S.J. (2013), "An assessment study on the optimal size of the drainage furrow

- in the partial drain shield tunnel”, Proc. of 2013 Conf. on Korean Society of Civil Engineers, KSCE.
5. Koh, S.Y., Choo, S.Y., Roh, B.K. (2012), “Study on stress and load condition changes using shield TBM measured value”, Proc. of 2012 Spring Conf. on Korean Society for Railway, Korean Society for Railway, pp. 919-925.
 6. Lee, I.M. (1996), “A study of underground water problem in tunneling”, J. of the Korean Society of Explosives and Blasting Engineering, KSEE, Vol. 14, No. 3, pp. 19-31.
 7. Lee, Y.S., Ma, S.J., Kim, D.M. (2015), “An evaluation of backfilling materials of partial drainage shield-tunnel”, Proc. of 2015 Annual Conference on Korea Tunnelling and Underground Space Association, KTA, Seoul, Korea.
 8. Ma, S.J., Gil, H.J., Kim, D.M. (2013), “A study on the improvement of connection for segment tunnel lining using prestressed steel cable by real-scale test”, J. of the Korean Geotechnical Society, KGS, Vol. 29, No. 6, pp. 33-54.
 9. Ma, S.J., Lee, Y.S., Kim, D.M. (2015), “Evaluation of reducing cross section of the partial drainage shield tunnel segment using the model experiments”, J. of Korean Society of Civil Engineers, KSCE, Vol. 35, No. 2, pp. 387-396.
 10. Shin, J.H., An, S.R., Shin, Y.S. (2005), “Pore water pressure development mechanism and sustainability of tunnel linings”, Proc. of 2005 Conf. on Korean Society of Civil Engineers, KSCE, pp. 2958-2965.
 11. Ward, W.H., Pender, M.J. (1981), “Tunnelling in soft ground-general report”, Proc. the 10th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Vol. 4, pp. 261-275.