

배수조건에 따른 실드터널 라이닝의 거동연구를 위한 모형실험

A Physical Model Test on Behavior of Shield-tunnel Lining according to Drain Conditions

최 규 문¹ Choi, Gou-Moon
윤 찬 영² Yune, Chan-Young
마 상 준³ Ma, Sang-Joon

Abstract

Most shield tunnels are designed based on the assumption of a undrained condition. But they are operated as drained tunnels in which underground water flows and passes through a drainage facility. Therefore, it is necessary that the drainage condition be considered in the shield tunnel design. In this research, new testing device which can simulate the underground tunnel located below ground water level, was developed. Total stress and pore water pressure were examined and an inflow water into an inner pipe was measured using the testing device. Test results showed that the total stress, which was the sum of effective stress and pore pressure, increased more in an undrained condition and an inflow water into an inner pipe was proportional to the water pressure but inversely proportional to the loading stress. Consequently, if the drainage is considered in the shield tunnel design, the more economical design can be expected because of the stress reduction of the lining.

요 지

대부분의 실드터널은 비배수조건으로 설계되지만 현장에서 터널 내부로 지하수가 유입되고 배수시설을 통하여 배출되는 배수터널처럼 작동하기 때문에 실드터널 설계에서 배수조건이 고려될 필요가 있다. 본 연구에서는 배수조건과 응력조건 조절을 통하여 지하수면 아래에 위치한 터널을 모사할 수 있는 실험장비를 개발하였다. 모형실험을 통하여 지중내에 작용하는 전응력 및 간극수압을 조사하였고 배수관관의 유입유량을 측정하였다. 실험결과 간극수압과 유효응력의 합으로 나타나는 전응력의 증가율이 비배수조건에서 더 크게 나타났고, 유입유량은 수압에 비례하고 재하응력에 반비례하였다. 결과적으로 실드터널에서 배수를 고려한다면 응력이 감소되기 때문에 보다 경제적인 설계가 가능할 것으로 예상된다.

Keywords : Shield tunnel design, Underground water, Total stress, Water pressure, Drain condition

1 정희원, 강릉원주대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Ph.D Student, Dept. of Civil Engrg., Gangneung-Wonju National Univ.)

2 정희원, 강릉원주대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Gangneung-Wonju National Univ., Tel: +82-33-640-2423, Fax: +82-33-646-1391, yune@gwnu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

3 정희원, 한국건설기술연구원 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 도심지 터널시공의 증가에 따라 굴착 시 소음 및 진동 최소화, 굴착에 따른 지반붕괴 대비, 시공 안정성 향상, 공기단축 및 인접구조물 영향 최소화 등을 목적으로 쉴드터널 적용이 확대되고 있다. 하지만 쉴드터널의 전체 공사비는 NATM 터널 전체 공사비의 110~120% 정도로 비싸고, 세그먼트 라이닝 공사비가 쉴드터널 전체 공사비의 25~40%를 차지하기 때문에 경제성이 우수한 세그먼트 개발이 요구되고 있다(Chang et al., 2011).

터널은 배수조건에 따라 비배수형 터널과 배수형 터널로 구분되며, 비배수형 터널은 지하수위가 저하되지 않으므로 정수압을 고려하여 응력계산이 이루어지고 배수형 터널은 시공 초기에는 수압이 작용하지 않으나 장기간에 걸쳐 사용 시 배수구 막힘이나 배수재 열화 등으로 배수가 원활하지 않을 수 있으므로 잔류수압을 적용한다.

쉴드터널 세그먼트 라이닝 설계는 지하수의 배수를 고려하지 않는 비배수조건으로 설계가 이루어지고 있다. 그러나 비배수조건의 설계임에도 불구하고 수평창 지수재의 기능상실 후에는 장기적인 누수관리가 불가능하여 누수방지를 위한 추가적인 비용이 소요되고, 내부 지하수 유입을 현실적으로 인정하여 기본적으로 배수시설을 추가적으로 설치하고 있다. 따라서 쉴드터널에서 세그먼트 라이닝에 지하수 유입을 고려하거나 혹은 보다 적극적으로 배수기능을 도입하면 지하수 배수로 인하여 라이닝에 작용하는 하중을 감소시킬 수 있고, 결과적으로 세그먼트 두께를 감소시켜 경제성이 우수한 설계가 가능할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 비배수 및 배수 조건하에서 쉴드터널 라이닝에 작용하는 압력을 분석하기 위하여 토압 및 수압을 자유롭게 변화시키며 쉴드터널 라이닝이 시공된 지반을 모사할 수 있는 장비를 개발하였다. 쉴드터널 라이닝에 작용하는 압력은 지중응력 및 배수조건에 따라 영향을 받을 수 있으므로, 이 연구에서는 지중응력 및 배수조건을 변화시키면서 쉴드터널 라이닝에 작용하는 압력특성을 분석하였다.

2. 실내터널모형실험

2.1 개발된 실험장비

배수조건에 따른 쉴드터널 라이닝에 작용하는 압력

을 분석하기 위하여 개발된 모형실험장치는 토조, 유압장치, 외관, 내관 및 계측장치로 구성되어 있다. 토조는 지중에 시공된 쉴드터널을 모사하기 위하여 시험사를 채우는 부분으로 지하수위 모사가 가능하고 폭 0.6m, 길이 0.6m, 높이 1.0m, 부피 0.36m³의 규모이며, 토조의 하단부에는 쉴드터널 모형을 삽입할 수 있는 구멍을 설치하였다(Photo 1). 토조의 상부판 중앙에는 심도에 따른 토압의 변화를 모사하고 시료에 가해지는 하중 측정 및 조절을 위하여 유압장치(펌프모터 1.5kW, 유압탱크 용량 80L)와 로드셀을 설치하였고, 로드셀 하부에는 시료에 고른 하중을 가할 수 있는 가압판을 설치하였다. 이 때 가압판에는 다수의 구멍을 천공하여 하중을 가하면서 지하수가 자유롭게 이동할 수 있도록 하여 토조 외부에서 지중 내에 작용하는 수압조절을 용이하도록 하였다. 또한 토조 옆면에는 수압의 변화를 측정하고 조절하기 위한 수동식 수압조절장치를 설치하였다(Photo 2).

외관은 쉴드터널 굴착 시 원지반과 라이닝 사이의 주변 지반 이완영역을 모사하기 위한 장치로서 외경 100mm, 내경 80mm로 설계되었고, 내관은 배수 및 비배수조건의 쉴드터널 라이닝을 모사하기 위한 장치로서 외경 75mm, 내경 60mm로 각각 설계되었다(Photo 3).

계측장치로는 토조 및 내관(배수 및 비배수조건)에

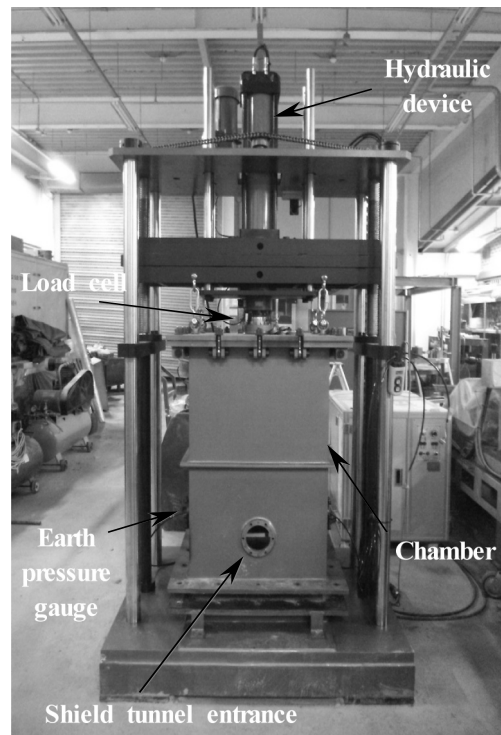


Photo 1. Tunnel model equipment

작용하는 토압을 측정하기 위한 토압계, 내관에 작용하는 간극수압을 측정하기 위한 간극수압계 및 내관의 거동을 측정하기 위한 변형률계로 구성되어 있다. 토압계는 쉘드터널 모형과 같은 높이로 쉘드터널 모형이 삽입되지 않는 측면 2개소에 설치하였고, 간극수압계는 배수구 및 집수장치가 쉘드터널 하단에 설치되는 것을 고려하여 내관 하면에 2개소 설치하였으며, 변형률계는

내관의 상면 중앙부 및 측면부에 각각 2개씩 설치하였다(Fig. 1). 터널모형실험 지반조성에 사용된 시료는 밀도 1.57g/cm^3 , 비중 2.63, 투수계수 $2.71\text{E-}4\text{m/sec}$, 균등계수 1.46이고 통일분류법상 SP에 해당하는 모래를 사용하였다.

2.2 실험 방법 및 조건

배수조건에 따른 터널모형실험 방법은 다음과 같다. 토조를 하부판과 볼트로 체결하고 측면에 외관을 삽입한 후 시험사를 높이 90cm까지 채웠다. 지반에 균등한 압력을 가하면서 지중응력을 모사하기 위하여 상부 가압판($60\text{cm} \times 60\text{cm}$)에 로드셀을 부착하고 하중을 재하였다. 본 실험에서 재하한 응력은 $0.0278 \sim 0.1390\text{MPa}$ 로서 지하 2.86~14.30m에서 지반이 받고 있는 압력을 모사하였다. 이후 외관을 제거하고 배수 및 비배수조건의 쉘드터널을 구현하기 위한 내관을 삽입한 후, 하중을 가한 상태에서 시료 상부에서 물을 주입하면서 지반을 포화시켜 지하수위 아래에 시공된 쉘드터널을 모사하였다. 토조의 수압을 0.05MPa 로 가압하고 유지한 상태에서 토압을 1분당 0.0278MPa 씩 증가시켜 0.139MPa 까지 가압하며 데이터를 측정하였다. 이후 수압을 0.10MPa , 0.15MPa , 0.20MPa 로 단계적으로 증가시키고 일정하게 유지한 상태에서 각각 토압을 0.139MPa 까지 증가시키며 데이터를 측정하였다. 실험은 비배수조건 내관을 이용하여 2회 실시하였고 배수조건 내관을 이용하여 6회를 실시하였다. 실험조건 및 횟수에 따라 실험종류를 구

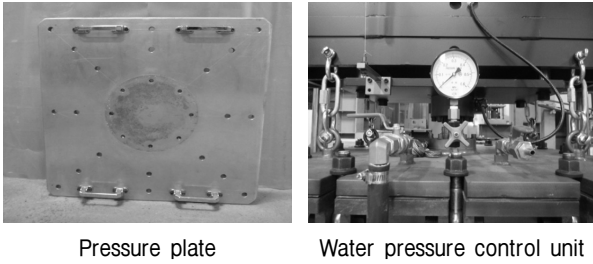


Photo 2. Pressure plate and water pressure control unit

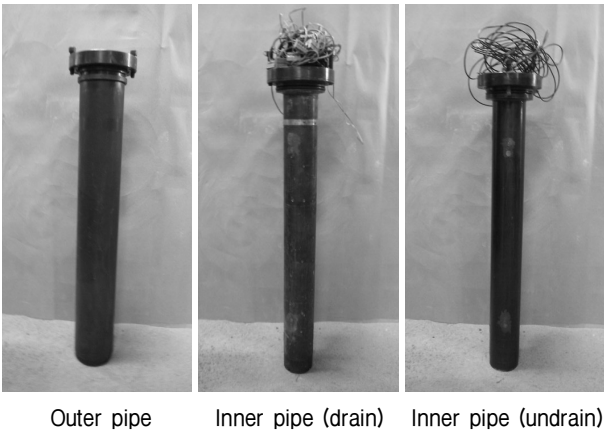


Photo 3. Outer and inner pipe

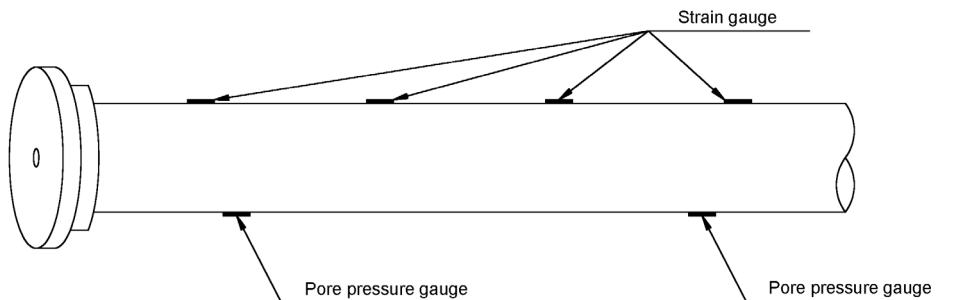


Fig. 1. Inner pipe and measurement device placement

Table 1. Specification of measuring devices

Category	Maximum load	Measuring range	Accuracy
Earth pressure gauge	0.45 MPa	0.30 MPa	0.5% RO
Pore pressure gauge	0.60 MPa	0.50 MPa	1.0% RO
Strain gauge		2,000 $\mu\epsilon$	0.1% FS

Table 2. Testing conditions for each measurement time

Measured time (sec)	Water pressure (MPa)	Earth pressure (MPa)	Measured time (sec)	Water pressure (MPa)	Earth pressure (MPa)	Remarks
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	Water pressure change interval
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	0.0000			0.0000	Water pressure change interval

분하였으며, 측정시간별 실험조건은 Table 2에 정리하였다.

3. 실험결과

3.1 전응력 변화

수압이 일정하게 유지된 상태에서 상부 재하 압력을 0.0278MPa씩 단계적으로 증가시켜 0.139MPa까지 증가시켰을 때, 전응력의 변화량은 다음과 같다. 비배수조건 1차 실험에서 수압을 0.05MPa로 유지한 상태에서 상부 재하 압력을 0.0MPa에서 0.139MPa로 증가시켰을 때, 측정압력은 0.0500MPa에서 0.0949MPa로 증가하였고 (Table 3), 측정된 압력증가량을 재하한 압력증가량으로 나눈 전응력 증가율로 나타내면 0.323으로 나타났다. 같은 방법으로 모든 실험조건에서 계산된 전응력 증가율은 Table 4와 같고, 비배수조건에서 평균 전응력 증가율은 각각 0.270과 0.263으로 나타났다. 반면 배수조건에서 계산된 평균 전응력 증가율은 0.237, 0.338, 0.172, 0.209, 0.206, 0.190로 각각 나타나, 배수 2차 실험을 제외한 다른 배수조건에서 비배수조건보다 전응력 증가율이 작게 나타났다. 다른 실험결과와 결과 값의 차이가 컸던 배수 2차 실험을 제외한 평균 전응력 증가율은 비배수조건에서 0.267, 배수조건에서 0.203으로 나타났다. 비배수 및 배수조건에 따른 전응력의 변화는 Fig. 2와 같이 도시하였다. Fig. 2에서 배수 2차 실험과 배수 5차

실험의 전응력 변화 거동이 비배수조건 실험과 유사하게 나온 것을 확인할 수 있었고, 특히 배수 5차 실험의 경우 유출량이 다른 배수조건 실험보다 많아 지하수 이동 속도가 증가하였기 때문에 유효응력 증가량이 커짐에 따른 전응력 증가율이 비배수 및 배수조건 실험 사이에 크지 않다는 것을 확인할 수 있었다.

전응력 검토 시 토압계에서 측정되는 압력은 토압과 수압의 합이며, 이론적으로는 배수조건에서 수압이 감소하는 만큼 지반의 유효응력이 증가하기 때문에(Lee et al., 1993) 비배수조건과 배수조건에서의 압력증가량이 같아야 하지만, 비배수조건에서 측정된 압력증가량이 배수조건보다 더 크게 나타나 실제로는 배수조건에서 수압이 감소한 만큼 유효응력이 증가하지 않은 것으로 나타났다. 측정된 응력이 상부에서 가한 응력보다 작게 나타난 이유는 토조 벽면마찰과 입자간의 아칭(arching)으로 인한 영향이 일부 있었던 것으로 판단되며, 더 중요한 이유는 토압계가 토조 벽면에 설치되어 횡방향 응력을 측정하였기 때문으로 고려된다. 일반적으로 지반에서 정지토압(K_0) 상태에서의 횡방향 토압은 마찰각에 좌우되며, Jacky의 공식에 따르면 마찰각이 증가할수록 토압계수는 감소하여 마찰각이 30° 이상인 경우 토압계수는 0.5이하로 감소하게 된다.

3.2 간극수압 변화

수압이 일정하게 유지된 상태에서 상부 재하 압력을

Table 3. Total stress change for drained and undrained conditions

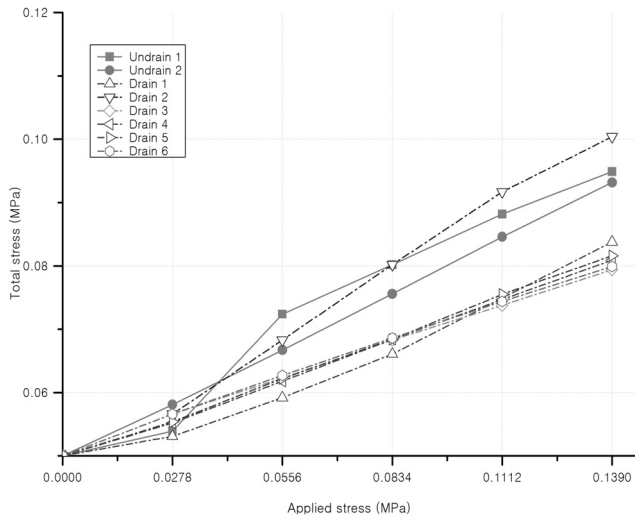
Water pressure (MPa)	Applied stress (MPa)	Undrain 1	Undrain 2	Drain 1	Drain 2	Drain 3	Drain 4	Drain 5	Drain 6
0.05	0.00	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500
	0.0278	0.0539	0.0581	0.0531	0.0566	0.0566	0.0552	0.0554	0.0566
	0.0556	0.0724	0.0667	0.0592	0.0683	0.0623	0.0618	0.0622	0.0627
	0.0834	0.0802	0.0756	0.0661	0.0802	0.0683	0.0684	0.0684	0.0686
	0.1112	0.0882	0.0846	0.0749	0.0917	0.0738	0.0747	0.0755	0.0744
	0.1390	0.0949	0.0932	0.0838	0.1004	0.0794	0.0809	0.0816	0.0799
0.10	0.00	0.1083	0.1021	0.0950	0.0928	0.1032	0.0984	0.1080	0.1013
	0.0278	0.1093	0.1053	0.0985	0.1000	0.1065	0.1035	0.1143	0.1064
	0.0556	0.1161	0.1128	0.1043	0.1093	0.1123	0.1100	0.1209	0.1124
	0.0834	0.1240	0.1212	0.1120	0.1209	0.1179	0.1163	0.1268	0.1183
	0.1112	0.1329	0.1296	0.1206	0.1323	0.1232	0.1222	0.1325	0.1238
	0.1390	0.1416	0.1377	0.1293	0.1431	0.1284	0.1279	0.1378	0.1298
0.15	0.00	0.1554	0.1481	0.1448	0.1480	0.1462	0.1484	0.1547	0.1454
	0.0278	0.1593	0.1505	0.1478	0.1536	0.1487	0.1533	0.1584	0.1504
	0.0556	0.1671	0.1571	0.1534	0.1629	0.1528	0.1595	0.1637	0.1554
	0.0834	0.1759	0.1652	0.1609	0.1731	0.1574	0.1656	0.1695	0.1606
	0.1112	0.1848	0.1731	0.1688	0.1829	0.1620	0.1712	0.1753	0.1651
	0.1390	0.1925	0.1802	0.1768	0.1904	0.1665	0.1766	0.1810	0.1695
0.20	0.00	0.2137	0.2017	0.1992	0.1990	0.2056	0.2014	0.2095	0.2049
	0.0278	0.2176	0.2071	0.2018	0.2074	0.2090	0.2070	0.2144	0.2094
	0.0556	0.2247	0.2140	0.2071	0.2165	0.2135	0.2132	0.2201	0.2145
	0.0834	0.2321	0.2217	0.2146	0.2266	0.2178	0.2189	0.2260	0.2190
	0.1112	0.2406	0.2295	0.2229	0.2361	0.2222	0.2242	0.2316	0.2239
	0.1390	0.2486	0.2368	0.2307	0.2435	0.2262	0.2292	0.2366	0.2281

Table 4. Total stress increase rates for drained and undrained conditions

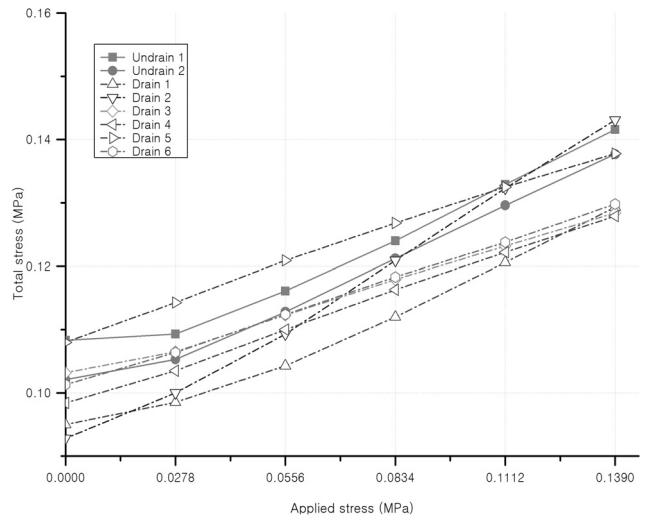
Water pressure (MPa)	Undrain 1	Undrain 2	Drain 1	Drain 2	Drain 3	Drain 4	Drain 5	Drain 6
0.05	0.323	0.311	0.243	0.363	0.212	0.222	0.227	0.215
0.10	0.240	0.256	0.247	0.362	0.181	0.212	0.214	0.205
0.15	0.267	0.231	0.230	0.305	0.146	0.203	0.189	0.173
0.20	0.251	0.253	0.227	0.320	0.148	0.200	0.195	0.167
Mean	0.270	0.263	0.237	0.338	0.172	0.209	0.206	0.190

0.0278MPa씩 단계적으로 증가시켜 0.139MPa까지 증가시켰을 때, 간극수압의 변화량은 다음과 같다. 비배수 조건 1차에서 수압이 0.05MPa이고 압력이 0.0MPa에서 0.139MPa로 증가 시 간극수압은 0.0500MPa에서 0.0535 MPa로 증가하였고(Table 5), 측정된 간극수압 증가량을 외부에서 가해진 수압으로 나눈 간극수압 증가율로 나타내면 0.025로 나타났다. 같은 방법으로 계산된 간극수압 증가율은 Table 6과 같고, 비배수조건에서 평균 간극수압 증가율은 비배수 1차와 2차 실험에서 각각 0.001

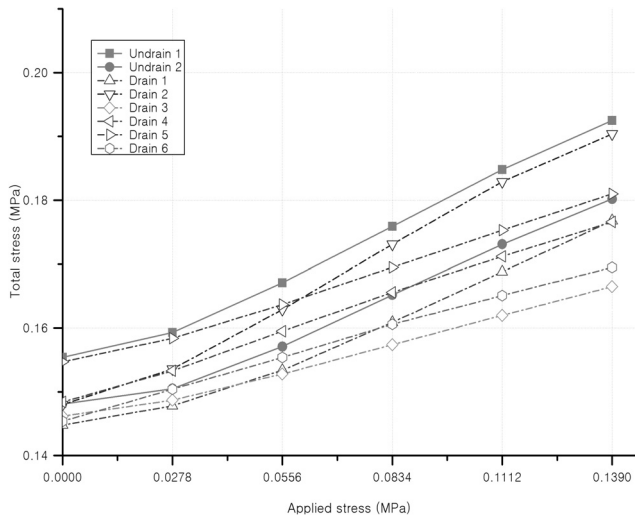
과 -0.008로 나타나 동일한 수압이 작용하는 조건에서 간극수압이 거의 일정하게 유지되면서 변화가 없는 것으로 나타났다. 반면에 배수조건에서 계산된 평균 간극수압 증가율은 6차례의 실험에서 각각 -0.025, 0.032, -0.033, -0.018, -0.027, -0.045로 나타나 배수조건 2차 실험을 제외한 대부분의 배수조건 실험에서 간극수 유출과 함께 수압이 점차 감소하였다. 단, 완전배수조건에서는 간극수압이 0으로 감소해야 하지만 이 실험에서의 배수조건은 완전배수가 아니고 적은 양만 유출되도록



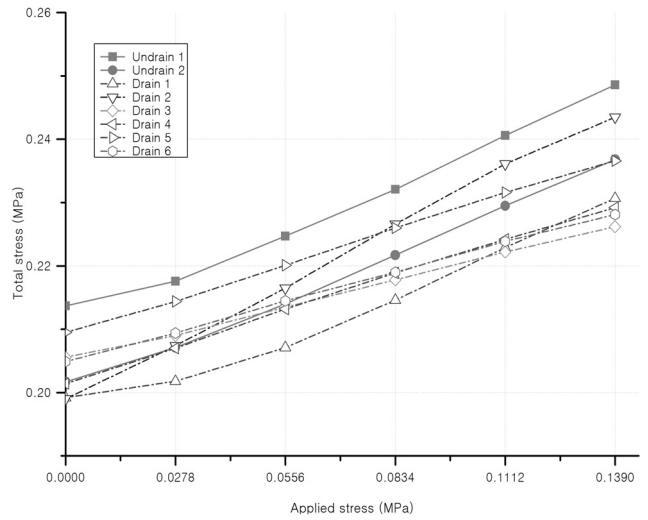
(a) Water pressure 0.05 MPa



(b) Water pressure 0.10 MPa



(c) Water pressure 0.15 MPa



(d) Water pressure 0.20 MPa

Fig. 2. Total stress change per applied stress

Table 5. Change in pore water pressure for drained and undrained conditions

Water pressure (MPa)	Applied stress (MPa)	Undrain 1	Undrain 2	Drain 1	Drain 2	Drain 3	Drain 4	Drain 5	Drain 6
0.05	0.00	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500
	0.0278	0.0499	0.0508	0.0499	0.0500	0.0487	0.0497	0.0490	0.0493
	0.0556	0.0541	0.0510	0.0496	0.0501	0.0477	0.0496	0.0483	0.0485
	0.0834	0.0581	0.0511	0.0492	0.0506	0.0469	0.0495	0.0478	0.0478
	0.1112	0.0542	0.0509	0.0486	0.0511	0.0466	0.0493	0.0472	0.0472
	0.1390	0.0535	0.0508	0.0476	0.0516	0.0462	0.0492	0.0469	0.0467
0.10	0.00	0.1036	0.0984	0.0832	0.0831	0.0923	0.0883	0.0938	0.0906
	0.0278	0.1009	0.0960	0.0830	0.0910	0.0907	0.0875	0.0923	0.0892
	0.0556	0.1005	0.0958	0.0825	0.0913	0.0895	0.0868	0.0913	0.0875
	0.0834	0.0997	0.0956	0.0818	0.0916	0.0886	0.0864	0.0905	0.0864
	0.1112	0.0997	0.0953	0.0810	0.0925	0.0882	0.0862	0.0903	0.0854
	0.1390	0.1003	0.0952	0.0800	0.0935	0.0877	0.0859	0.0899	0.0845

Table 5. Change in pore water pressure for drained and undrained conditions (continued)

Water pressure (MPa)	Applied stress (MPa)	Undrain 1	Undrain 2	Drain 1	Drain 2	Drain 3	Drain 4	Drain 5	Drain 6
0.15	0.00	0.1535	0.1455	0.1269	0.1325	0.1402	0.1342	0.1358	0.1292
	0.0278	0.1536	0.1434	0.1262	0.1309	0.1386	0.1330	0.1348	0.1267
	0.0556	0.1537	0.1435	0.1256	0.1312	0.1373	0.1322	0.1333	0.1247
	0.0834	0.1539	0.1434	0.1248	0.1319	0.1363	0.1318	0.1326	0.1236
	0.1112	0.1540	0.1432	0.1240	0.1330	0.1358	0.1314	0.1321	0.1225
	0.1390	0.1539	0.1430	0.1229	0.1338	0.1353	0.1314	0.1318	0.1217
0.20	0.00	0.2077	0.1949	0.1769	0.1807	0.1968	0.1839	0.1828	0.1828
	0.0278	0.2081	0.1961	0.1758	0.1816	0.1951	0.1825	0.1812	0.1805
	0.0556	0.2079	0.1964	0.1753	0.1820	0.1937	0.1814	0.1799	0.1782
	0.0834	0.2078	0.1961	0.1744	0.1830	0.1925	0.1806	0.1792	0.1765
	0.1112	0.2078	0.1958	0.1738	0.1840	0.1921	0.1803	0.1785	0.1760
	0.1390	0.2078	0.1955	0.1726	0.1852	0.1915	0.1799	0.1787	0.1749

Table 6. Increase rates in pore water pressure for drained and undrained conditions

Water pressure (MPa)	Undrain 1	Undrain 2	Drain 1	Drain 2	Drain 3	Drain 4	Drain 5	Drain 6
0.05	0.025	0.006	-0.017	0.012	-0.027	-0.006	-0.022	-0.024
0.10	-0.024	-0.023	-0.023	0.075	-0.033	-0.017	-0.028	-0.044
0.15	0.003	-0.018	-0.029	0.009	-0.035	-0.020	-0.029	-0.054
0.20	0.001	0.004	-0.031	0.032	-0.038	-0.029	-0.029	-0.057
Mean	0.001	-0.008	-0.025	0.032	-0.033	-0.018	-0.027	-0.045

배수조건을 조절하였기 때문에 간극수압의 감소량이 적었고, 완전히 0으로 감소하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 비배수 및 배수조건에 따른 간극수압의 변화는 Fig. 3과 같이 도시하였다.

3.3 변형률 변화

수압이 일정하게 유지된 상태에서 재하 압력 증가에 따른 내관 상부 외측부 및 중앙부 변형률 변화는 Table 7과 같이 나타났다. 표에서 내관 상부 외측부 및 중앙부 모두 비배수조건에서 변형률이 더 크게 나타났고, 외측부에서 변형률이 중앙부보다 더 크게 나타났다. 이 때 외측부 2개의 변형률계는 원통형 모형 터널의 둘레방향으로, 내측부 2개의 변형률계는 원통형 모형터널의 길이방향으로 설치하였다. 따라서, 외측부 변형률은 원주 방향의 변형이므로 터널 둘레에서 작용하는 토압 및 수압의 영향을 크게 받고, 내측부 변형률은 터널의 처짐과 모멘트의 영향을 반영할 것으로 예상된다. 하지만 수압과 토압변화에 따른 터널 작용응력과 모멘트 등의 변화를 분석하기 위해서는 이론적, 수치적 분석과 병행하여

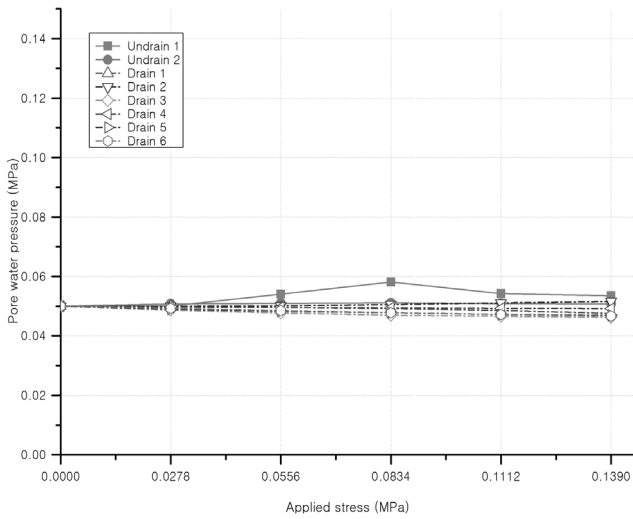
추후 심도 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3.4 유출량 변화

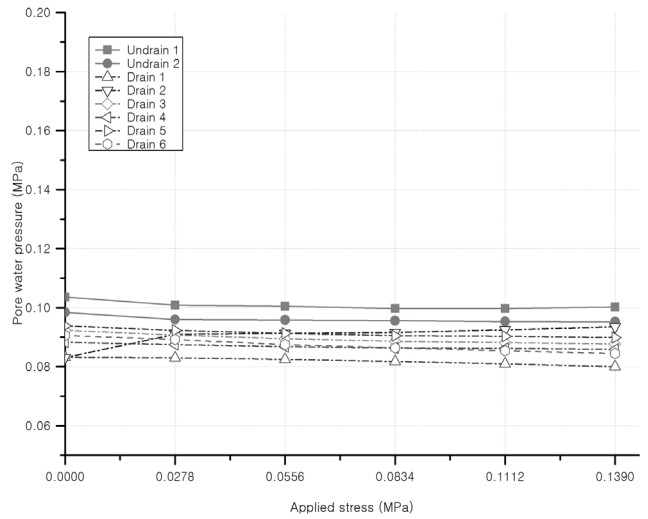
배수조건 내관에서 하중 증가에 따른 1분간 유출량 변화는 Table 8 및 Table 9와 같다. 토압이 0.139MPa로 동일한 경우 유출량은 배수 1차 실험 시 100cc → 220cc와 같이 대체적으로 증가하는 것으로 나타났고, 수압이 0.20MPa로 동일한 경우 유출량은 배수 1차 실험 시 250cc → 220cc와 같이 감소하는 것으로 나타났다. 상사 법칙을 적용하여 산정한 유출량($m^3/km/min$)은 Table 10과 같이 나타났다. Table 4와 Table 6을 이용해 유출량 별 전응력 및 간극수압 변화를 검토하면, 유출량이 증가할수록 평균 전응력 증가율은 0.226에서 0.182로 감소하였고 평균 간극수압 증가율은 -0.053에서 -0.012로 증가하는 것으로 나타났다(Table 11).

3.5 유효응력 변화

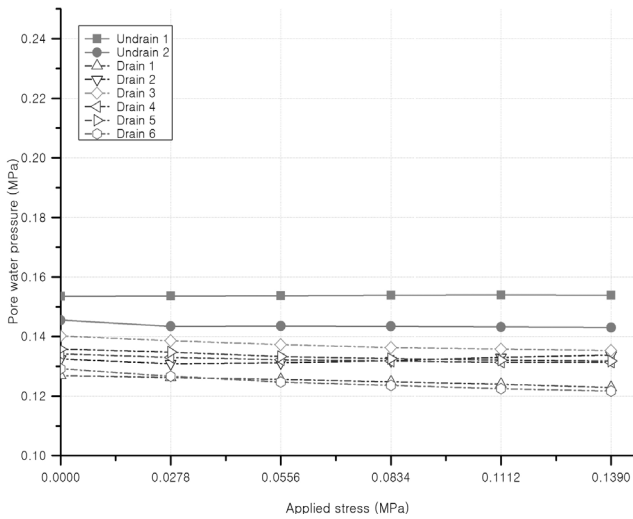
전응력과 간극수압의 변화에 따른 유효응력 값을 계



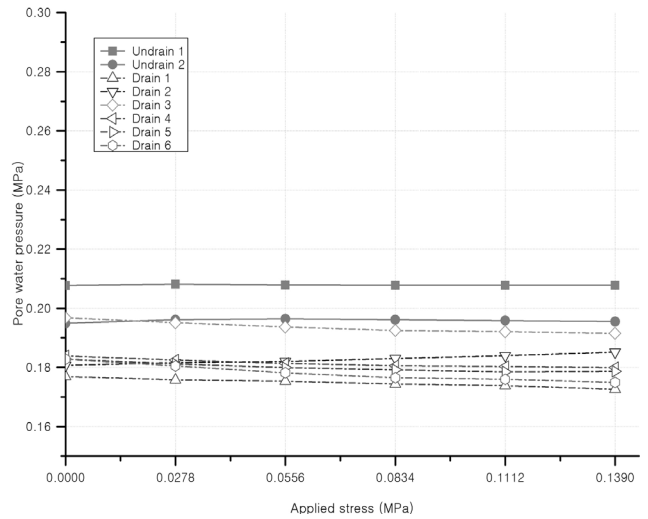
(a) Water pressure 0.05 MPa



(b) Water pressure 0.10 MPa



(c) Water pressure 0.15 MPa



(d) Water pressure 0.20 MPa

Fig. 3. Pore water pressure change per applied stress

Table 7. Change in strain rate of the inner pipe for drained and undrained conditions

Category		Undrain 1	Undrain 2	Drain 1	Drain 2	Drain 3	Drain 4	Drain 5	Drain 6
Outer	Min	-5.7	10.2	-0.2	-2.0	-3.2	-0.5	-1.0	-0.3
	Max	10.9	10.6	0.3	6.7	20.4	0.1	1.9	3.1
Center	Min	-14.9	4.2	-0.1	3.4	-0.2	-30.3	-3.4	-15.6
	Max	7.2	4.6	0.5	3.8	21.2	8.8	7.1	3.0

Table 8. Discharge (cm³) for 1 min at 0.1390 MPa earth pressure

Water pressure (MPa)	Drain 1	Drain 2	Drain 3	Drain 4	Drain 5	Drain 6
0.05	100	140	220	300	770	320
0.10	140	220	240	160	1,050	320
0.15	180	260	280	160	1,180	290
0.20	220	380	300	180	1,410	210

Table 9. Discharge (cm³) for 1 min at 0.20 MPa water pressure

Applied stress (MPa)	Drain 1	Drain 2	Drain 3	Drain 4	Drain 5	Drain 6
0.0278	250	400	360	420	1,480	250
0.0556	240	380	320	320	1,480	250
0.0834	240	380	310	230	1,460	240
0.1112	230	380	310	200	1,420	220
0.1390	220	380	300	180	1,410	210

Table 10. Estimated discharge rate (m³/km/min) using principle of similarity

Water pressure (MPa)	Drain 1	Drain 2	Drain 3	Drain 4	Drain 5	Drain 6
0.05	50.19	65.07	123.63	152.44	382.03	161.74
0.10	79.94	102.25	129.20	163.59	526.11	173.82
0.15	92.95	128.27	144.07	235.17	596.75	139.43
0.20	109.68	178.47	148.72	125.48	673.90	108.75

Table 11. Average total stress and pore water pressure increase rates per discharge rate

Discharge rate (m ³ /km/min)	Mean total pressure increase rate	Mean pore pressure increase rate	Remarks
below 100	0.226	-0.053	
100 ~ 200	0.207	-0.014	
over 200	0.182	-0.012	

Table 12. Effective stress change for drained and undrained conditions

Water pressure (MPa)	Applied stress (MPa)	Undrain 1	Undrain 2	Drain 1	Drain 2	Drain 3	Drain 4	Drain 5	Drain 6
0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.0278	0.0040	0.0073	0.0032	0.0066	0.0079	0.0055	0.0064	0.0073
	0.0556	0.0183	0.0157	0.0096	0.0182	0.0146	0.0122	0.0139	0.0142
	0.0834	0.0221	0.0245	0.0169	0.0296	0.0214	0.0189	0.0206	0.0208
	0.1112	0.0340	0.0337	0.0263	0.0406	0.0272	0.0254	0.0283	0.0272
	0.1390	0.0414	0.0424	0.0362	0.0488	0.0332	0.0317	0.0347	0.0332
0.10	0.00	0.0047	0.0037	0.0118	0.0097	0.0109	0.0101	0.0142	0.0107
	0.0278	0.0084	0.0093	0.0155	0.0090	0.0158	0.0160	0.0220	0.0172
	0.0556	0.0156	0.0170	0.0218	0.0180	0.0228	0.0232	0.0296	0.0249
	0.0834	0.0243	0.0256	0.0302	0.0293	0.0293	0.0299	0.0363	0.0319
	0.1112	0.0332	0.0343	0.0396	0.0398	0.0350	0.0360	0.0422	0.0384
	0.1390	0.0413	0.0425	0.0493	0.0496	0.0407	0.0420	0.0479	0.0453

산한 결과 Table 12와 같이 나타났다. Table 3에서 수압이 0.20MPa이고 토압이 0.139MPa일 때 전응력은 비배수조건에서 0.2486MPa, 0.2368MPa로 배수조건 결과값 0.2307MPa, 0.2435MPa, 0.2262MPa, 0.2292MPa, 0.2366MPa, 0.2281MPa 보다 대체로 크게 나타났다. 같은 조건에서 간극수압은 Table 5와 같이 비배수조건에서 0.2078MPa, 0.1955MPa이고, 배수조건에서는 배수로 인해 0.1726MPa, 0.1852MPa, 0.1915MPa, 0.1799MPa,

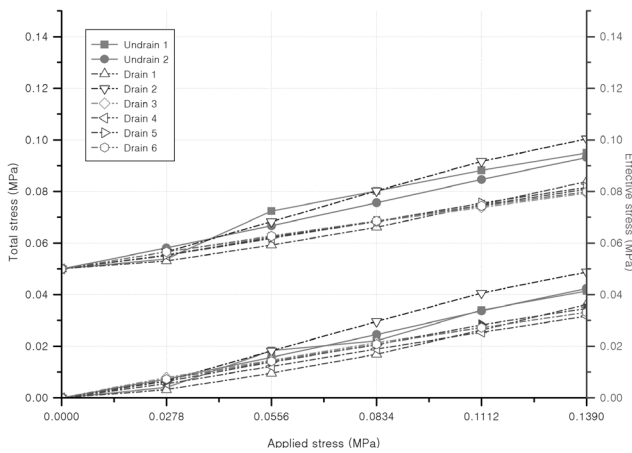
0.1787MPa, 0.1749MPa와 같이 나타나 전응력 값보다 차이가 크게 발생하였다. Table 3과 Table 5를 이용하여 유효응력을 계산하면 비배수조건에서 0.0408MPa, 0.0413MPa로 평균 0.0411MPa이고, 배수조건에서 0.0581MPa, 0.0583MPa, 0.0347MPa, 0.0493MPa, 0.0579MPa, 0.0532MPa로 평균 0.0519MPa으로 계산되었으며 배수조건 3차 실험을 제외한 다른 실험조건에서 배수조건일 때 비배수조건보다 유효응력이 큰 것으로 나타났다. 비배수

및 배수조건에 따른 전응력과 유효응력의 변화는 Fig. 4와 같으며, 위쪽의 그래프는 전응력을 아래쪽의 그래프는 유효응력을 도시하였다. 모든 그래프에서 재하응

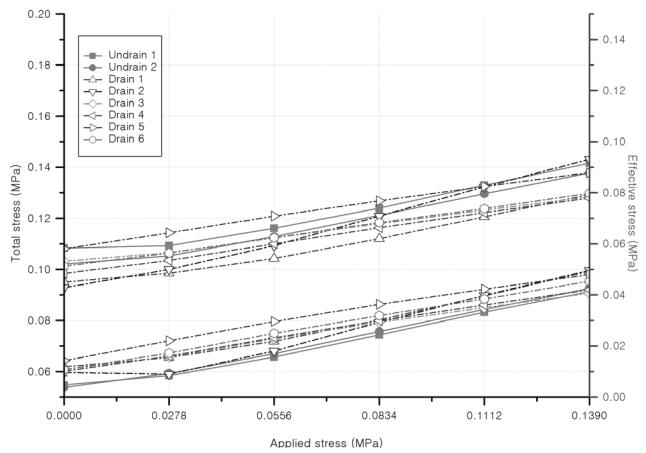
력 증가에 따른 전응력 증가량은 비배수조건 실험이 크고, 유효응력 증가량은 배수조건 실험이 큰 경향성을 보여주고 있다. 결국 터널에 작용하는 토압과 수압의 합인

Table 12. Effective stress change for drained and undrained conditions (continued)

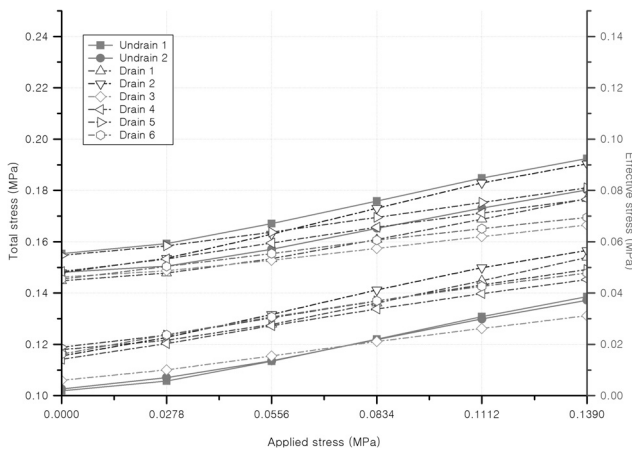
Water pressure (MPa)	Applied stress (MPa)	Undrain 1	Undrain 2	Drain 1	Drain 2	Drain 3	Drain 4	Drain 5	Drain 6
0.15	0.00	0.0019	0.0026	0.0179	0.0155	0.0060	0.0142	0.0189	0.0162
	0.0278	0.0057	0.0071	0.0216	0.0227	0.0101	0.0203	0.0236	0.0237
	0.0556	0.0134	0.0136	0.0278	0.0317	0.0155	0.0273	0.0304	0.0307
	0.0834	0.0220	0.0218	0.0361	0.0412	0.0211	0.0338	0.0369	0.0370
	0.1112	0.0308	0.0299	0.0448	0.0499	0.0262	0.0398	0.0432	0.0426
	0.1390	0.0386	0.0372	0.0539	0.0566	0.0312	0.0452	0.0492	0.0478
0.20	0.00	0.0060	0.0068	0.0223	0.0183	0.0088	0.0175	0.0267	0.0221
	0.0278	0.0095	0.0110	0.0260	0.0258	0.0139	0.0245	0.0332	0.0289
	0.0556	0.0168	0.0176	0.0318	0.0345	0.0198	0.0318	0.0402	0.0363
	0.0834	0.0243	0.0256	0.0402	0.0436	0.0253	0.0383	0.0468	0.0425
	0.1112	0.0328	0.0337	0.0491	0.0521	0.0301	0.0439	0.0531	0.0479
	0.1390	0.0408	0.0413	0.0581	0.0583	0.0347	0.0493	0.0579	0.0532



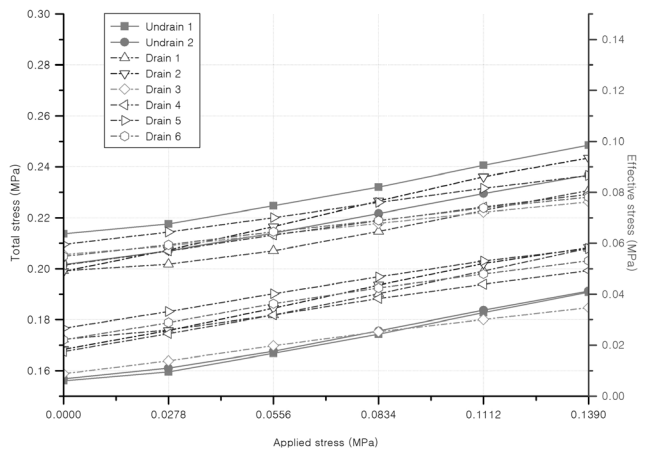
(a) Water pressure 0.05 MPa



(b) Water pressure 0.10 MPa



(c) Water pressure 0.15 MPa



(d) Water pressure 0.20 MPa

Fig. 4. Change in total and effective stress per applied stress

전응력은 비배수조건에서 배수조건보다 더 크며, 이러한 결과를 토대로 토압과 수압을 고려하는 터널 설계에서 터널의 배수조건을 고려하면 터널 작용 하중을 감소시킬 수 있으므로 보다 경제적인 터널 설계가 가능할 것으로 판단된다. 다만 본 실험은 제한된 토질 및 하중 조건에서 실시한 모형실험이므로, 추후 실제 설계에 적용하기 위해서는 다양한 조건을 고려한 심도 있는 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 배수조건에 따라 쉴드터널 라이닝에 작용하는 압력을 분석하기 위하여, 수압과 토압을 자유롭게 변화시킬 수 있고 쉴드터널 라이닝이 시공된 지반을 모사할 수 있는 터널실험모형장비를 구축하여 실내실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 터널모형 내관 상부의 변형률은 비배수조건에서 더 크게 나타났으며, 토조 측면에 강결되어 있는 외측부의 변형률이 중앙부보다 크게 나타났다.
- (2) 배수조건 내관에서 재하응력이 동일한 경우 수압이 증가할수록 유출량은 증가하였고, 수압이 동일한 경우 재하응력이 증가할수록 유출량은 감소하였다. 또한 유출량이 증가할수록 평균 전응력 증가율은 감소하였고 평균 간극수압 증가율은 증가하였다. 그러므로 배수용량을 설계기준 최대치에 근접하게 조절한다면 터널라이닝에 작용하는 응력의 감소가 가능할 것으로 판단된다.
- (3) 비배수조건에서 간극수압 증가율은 거의 일정하게 유지되고 유효응력 증가량은 평균 0.0411MPa로 나타났다. 배수조건에서 간극수압 증가율은 -0.030으로 감소하였고 유효응력 증가량은 평균 0.0519MPa로 나타났다. 간극수압과 유효응력의 합인 전응력은 비배수조건에서 평균 증가율이 0.267로 배수조

건의 평균 증가율 0.203보다 크게 나타나 토압과 수압을 고려하는 터널 설계에서 배수조건을 고려하면 터널의 작용하중을 감소시킬 수 있어 보다 경제적인 터널 설계가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 시행한 2012 건설기술혁신사업(과제명 : 배수 유로흡을 이용, 수압 저감을 통한 공사비 절감 슬립형 세그먼트 터널 라이닝 기술 개발)의 지원으로 수행되는 것으로 연구를 가능케 한 국토해양부에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Atkinson, J. H. and Mair, R. J. (1983), Loads on leaking and watertight tunnel linings, sewers and buried pipes due to groundwater, Technical note, *Geotechnique*, Vol.33, No.3, pp.341-344.
2. Chang, S. H., Lee, G. P., Choi, S. W., and Bae, G. J. (2011), State of the Art of Segment Lining in Shield Tunnel and Statistical Analysis of Its Key Design Parameters, *TUNNEL & UNDERGROUND SPACE*, Vol.21, No.6, pp.427-438.
3. Choi, G. M., Yune, C. Y., and Ma, S. J. (2013), An Experiment with a model to study action of shield-tunnel lining subject to drain condition. *KGS Fall National Conference 2013*, pp.1224-1229.
4. Dimitrios Kolymbas and Peter Wagner (2007), Groundwater ingress to tunnels - The exact analytical solution, *Tunnelling and Underground Space Technology* 22, pp.23-27.
5. Korean Tunnelling and Underground Space Association (2007), *Tunnel design standard*, Ministry of Construction and Transportation.
6. Korea expressway corporation (2009), *Road design criteria*, Vol.4.
7. Lee, I. M., Kim, Y. J., Lee, M. J., and Nam, S. W. (1993), Groundwater Considerations in Tunnel Design, *KGS Spring '93 National Conference/Geotechnical Engineering and Tunnelling Technology*. pp.1-8.
8. Shin, J. H., Ahn, S. R., and Shin, Y. S. (2005), Pore Water Pressure Development Mechanism and Sustainability of Tunnel Linings, *2005 Korean Society of Civil Engineers Annual Convention*, pp.2943-2950.

Received : February 10th, 2014

Revised : April 24th, 2014

Accepted : May 13th, 2014