

화강풍화토 지반에서 배수조건에 따른 실드터널 라이닝의 거동연구를 위한 모형실험

A Physical Model Test on the Behavior of Shield-tunnel Lining According to Drainage Conditions in Weathered Granite Soil

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

Abstract

Recently, due to the expansion of urban infrastructure for the citizen convenience, the shield tunnel construction has increased considering the civil complaints minimization and construction stability. Most shield tunnels are designed based on the assumption of the undrained condition that underground water does not inflow, but they are operated in the field as drained tunnels with drainage facility to drain underground water. Therefore, the drained condition needs to be considered in the shield tunnel design. It is also necessary to consider the weathered granite soil that is widely distributed throughout the country and consequently is encountered in most of construction sites. In this paper, the model test which can control total stress and pore water pressure and simulate the underground tunnel located in the weathered granite soil below ground water level is conducted. Total stress, pore water pressure and an inflow water into an inner pipe were measured using the testing device. Test results showed that the total stress in a drained condition was lower than in an undrained condition because pore water pressure decreased in a drained condition and an inflow water into an inner pipe was proportional to the loading stress in a drained condition. As a result, if a drained condition is considered in the shield tunnel design, the more economical design can be expected because of the stress reduction of the lining.

요 지

최근 시민편의를 위한 도심지 사회기반시설의 확충으로 인하여 민원최소화와 시공안정성을 고려한 실드터널 시공이 증가하고 있다. 대부분의 실드터널은 지하수가 유입되지 않는 비배수조건으로 가정하여 설계되지만 현장에서는 배수시설을 설치하여 지하수를 배출하는 배수터널처럼 운영되므로 설계 시 배수조건이 고려될 필요가 있다. 또한 우리나라 전역에 넓게 분포하고 가장 많이 이용되는 화강풍화토 지반에 대한 고려도 필요하다. 본 논문은 배수 및 응력조건을 조절할 수 있고 지하수면 아래 화강풍화토 지반에 위치한 터널을 모사할 수 있는 실험장비를 이용하여 실험하였으며, 전응력, 간극수압 및 배수내관의 유입유량을 측정하였다. 실험결과 배수조건 시 간극수압 감소로 인하여

1 정희원, 강릉원주대학교 토목공학과 박사수료 (Member, Ph. D Candidate, Dept. of Civil Eng., Gangneung-Wonju National Univ.)

2 정희원, 강릉원주대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Eng., 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 2015년 12월 31일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

여 전응력이 비배수조건보다 작게 나타났고, 유입유량은 재하응력에 비례하였다. 결과적으로 쉴드터널 설계 시 배수조건이 고려된다면 라이닝 작용 응력이 감소되기 때문에 경제성 높은 설계가 가능할 것으로 예상된다.

Keywords : Shield tunnel design, Total stress, Weathered granite soil, Water pressure, Drained condition

1. 서론

최근 대도시에서는 시민편의를 위한 도로, 철도, 전력구, 통신구 및 상하수도 등의 사회기반시설 확충으로 인하여 쉴드 TBM을 이용한 터널시공이 증가하고 있다. 쉴드 TBM을 이용한 기계화 터널굴착은 기존 발파에 의한 터널굴착과 비교하여 소음, 진동 등의 환경 피해가 최소화되고 노동력을 절감할 수 있으며, 장대터널에서 급속 시공을 할 수 있어 경제적인 터널 시공이 가능하다는 점에서 비중이 더욱 증대되고 있다(Korean Tunnelling Association, 2008). 또한 Chang et al.(2011)에 따르면, 세그먼트 라이닝은 쉴드터널 직접공사비의 약 25~40%로서 가장 큰 비중을 차지하며 시공 연장이 길어지고 단면이 커질수록 그 비중이 더욱 증가하게 되므로, 합리적이고 경제적인 세그먼트 라이닝의 설계가 쉴드터널에서 중요한 사항이라고 하였다.

일반적으로 터널은 배수조건에 따라 배수터널과 비배수터널로 분류할 수 있는데, 터널 내 지하수 유입을 최대한 허용하고 라이닝에 작용하는 수압을 0으로 가정하여 설계하는 터널을 배수터널이라고 하며, 터널 내 지하수 유입을 허용하지 않고 정수압 하중을 견딜 수 있게 설계하는 터널을 비배수터널이라고 한다. 하지만, 비배수조건으로 터널을 설계하여 시공하더라도 장기적으로 시간이 경과함에 따라 누수가 발생하여 대부분의 터널은 배수구처럼 거동한다(Jung et al., 2011). 현재 쉴드터널은 비배수조건을 고려하여 설계가 이루어지며, 터널에 작용하는 토압과 수압을 모두 고려하여 세그먼트 라이닝의 단면이 결정된다. 하지만 장기적인 관점에서는 수평창지수재 등이 그 기능을 상실하는 경우에 지하수 유입이 이루어질 수 있고, 실제 시공에서도 지하수 유입을 고려한 배수시설을 추가적으로 설치하고 있다. 이론적으로는 원형 터널의 라이닝에 지하수 유입이 자유롭게 발생하는 경우, 터널 주위로 원형의 방사방향 유선망이 형성되고 터널천단부에서 수압이 0이 되지만 감소한 수압만큼 침투압이 증가하므로 실제 터널에 작용하는 응력은 배수터널과 비배수터널이 동일

하다(Atkinson et al., 1983). 그러나 현장에서 실측된 결과에 의하면 터널에 작용하는 응력은 이론적으로 계산된 토압과 수압의 합에 비하여 40~50% 정도로 매우 작게 나타나며(Mashimo and Ishimura, 2003), 특히 배수조건을 고려하는 경우에는 감소한 수압만큼 유효응력이 증가하지 않는 것으로 나타난다(Choi et al., 2014). 따라서 배수조건이 고려된 실제 터널에서는 터널에 작용하는 응력이 이론적인 계산 결과에 비하여 매우 작다는 것을 예상할 수 있으며, 이에 대한 정량적 연구가 이루어진다면 보다 경제적인 설계와 시공이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 터널 상부 토층두께 및 지하수위 변화에 따라 작용하는 토압 및 수압의 변화와 터널의 배수조건을 고려할 수 있는 실험장비를 이용하여, 국내에 광범위하게 분포하고 있는 화강풍화토 지반에 시공된 터널에 대한 모형실험을 실시하였다. 지중응력 및 배수조건을 변화시키며 터널에 작용하는 전응력, 간극수압, 터널의 유입유량을 측정하여 쉴드터널 라이닝에 작용하는 하중 특성을 분석하였다.

2. 실내터널모형실험

2.1 실험장비 및 시료

본 연구에 이용된 터널모형 실험장비는 터널에 작용하는 토압, 수압 및 터널의 배수조건 등 다양한 조건에서 터널에 작용하는 하중 및 터널의 거동을 분석하기 위하여 개발되었다. 터널모형실험장비는 Photo 1에서 보는 바와 같이 유압 재하장치, 배수 및 비배수 터널 설치 가능한 토조, 수압 측정장치 등으로 구성되어 있다. 유압 재하장치(펌프모터 1.5kW, 유압탱크 용량 80ℓ, 유압실린더 출력 2,473.94MPa)는 쉴드 터널이 설치되는 다양한 심도에서의 토압을 모사하기 위한 장치이며, 하부에 로드셀을 부착하여 토조에 가해지는 하중을 측정하고 조절할 수 있도록 하였다. 토조는 다양한 지중의 상황을 모사하기 위한 장치로서, 상부덮개, 본체 및 하부판으로 분리할 수 있도록 하여 화강풍화토를 채우고 지하수위

를 모사하기 용이하도록 하였다. 토조는 폭 0.60m, 길이 0.60m, 높이 1.00m의 규모로 제작되었으며, 토조 본체의 하단부에는 섀드터널모형을 삽입할 수 있는 구멍을 설치하였다(Photo 1(a)). 토조의 상부덮개 중앙부에는 유압 재하장치를 이용하여 하중을 가할 수 있도록 가압판과 유압 실린더를 연결하는 가압봉이 자유롭게 위아래로 이동할 수 있는 구멍이 설치되어 있으며, 구멍안에 베어링과 고무링을 설치하여 다양한 토압과 수압조건에서도 물이 새지 않도록 하였다. 또한 상부덮개에는 수압펌프를 이용하여 공급되는 물을 토조에 넣을 수 있도록 하는 밸브와 과도하게 공급된 물을 밖으로 뺄 수 있도록 하는 밸브를 설치하였다. 이때 토조에 가해지는 수압을 측정하기 위하여 밸브사이에 수압 측정장치를 설치하였다. 유압 재하장치와 연결된 가압봉 하부에는 토조에 조성된 지반에 하중을 고르게 가하기 위하여 가압판(폭 0.59m, 길이 0.59m)이 위치할 수 있도록 하였으며, 가압판에는 지하수가 자유롭게 이동하도록 20개의 구멍을 천공하였다(Photo 1(b), 사진에서 중앙부 8개의 구멍은 가압봉과 연결하기 위한 별도의 너트구멍). 따라서 가압판은 수압

의 영향을 받지 않으며, 이를 통하여 재하되는 하중은 수압과는 별도로 시료의 유효응력만을 변화시킬 수 있도록 하였다. 지반에 시공된 섀드터널을 모사하기 위하여 외관과 내관을 제작하였다. 외관은 섀드 TBM 장비를 이용하여 지반굴착 시 원지반과 터널 라이닝 사이에 발생하는 이완영역을 모사하기 위하여 제작된 장치로서 외경 100mm, 내경 80mm의 크기이며, 내관은 배수조건에 따른 터널 라이닝을 모사하기 위하여 제작된 장치로서 외관을 설치한 상태에서 교체가 가능하도록 외경 75mm, 내경 60mm의 크기로 설계되었다(Photo 1(c)).

또한 계측장치로는 토압계 및 간극수압계가 사용되었다. 토압계는 토조 내부 및 내관에 작용하는 압력을 측정하기 위하여 최대 0.45MPa까지 측정이 가능하고 정확도가 0.5% RO(Read out)인 장치를 사용하였으며, 간극수압계는 내관에 작용하는 간극수압을 측정하기 위하여 최대 0.60MPa까지 측정이 가능하고 정확도가 1.0% RO(Read out)인 장치를 사용하였다.

본 실험에서는 화강풍화토를 이용하여 지반을 모사하였다. 화강풍화토(Weathered granite soil)는 화강암질

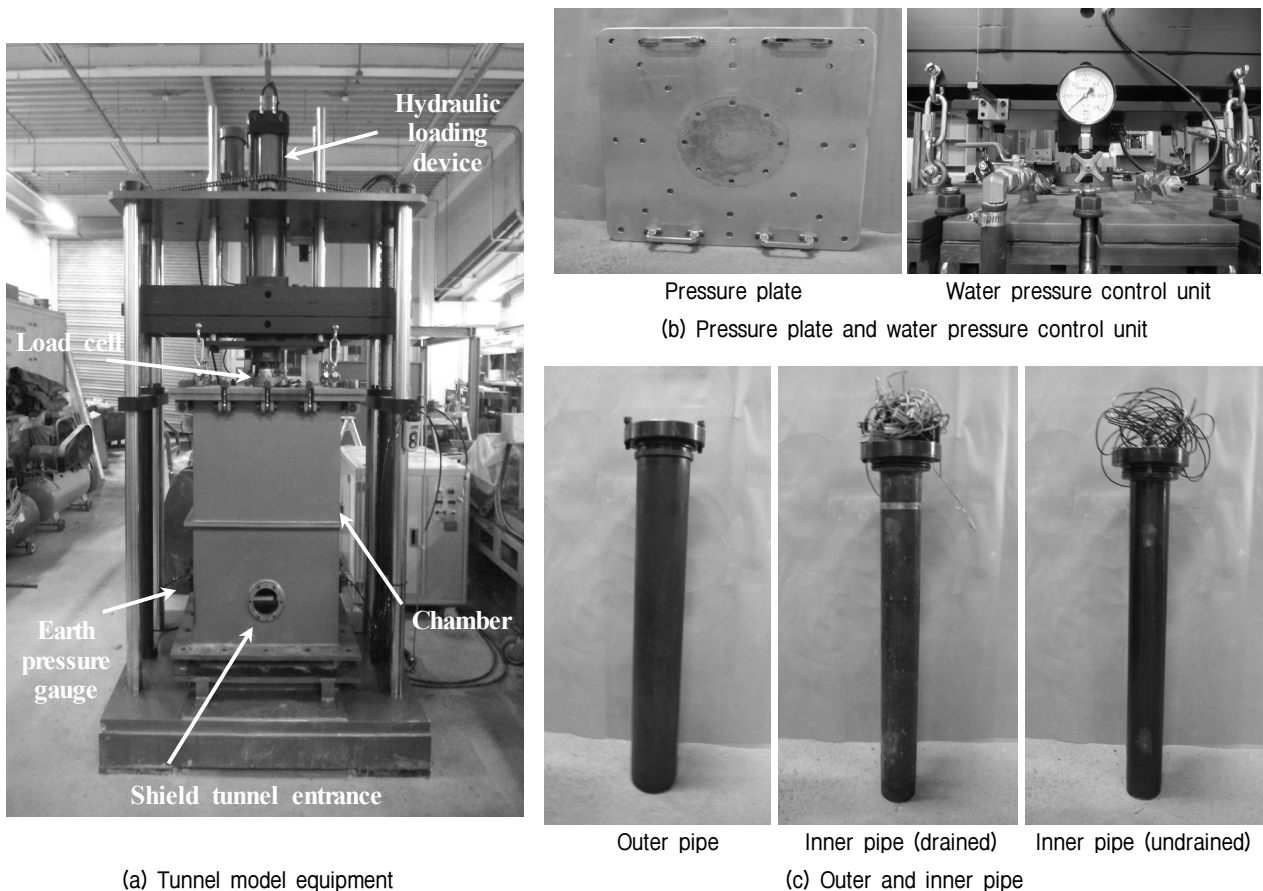


Photo 1. Tunnel model equipment (Choi et al., 2014)

암석의 풍화토, 조립의 석영모래가 섞여 있고 모암인 화성암 조직이 그대로 남아있으나 인력으로 쉽게 굴착이 될 정도로 풍화를 받은 흙으로 정의할 수 있다(Korean Society of Civil Engineers). 또한 우리나라 전역에 가장 넓게 분포하고 있을 뿐만 아니라 건설현장에서 쉽게 접하는 흙으로서, 풍화의 진행 정도에 따라 흙 입자내의 간극이 잘 발달되어 있어 하중을 받으면 큰 변형이 발생되며, 변형량은 간극비에 크게 의존하는 특징을 가지고 있다(Lee et al., 2014). 그리고 물에 접촉하면 안정성이 저하되어 함수비가 높아짐에 따라 전단강도가 급격히 저하되고 압축성이 증가하는 경향이 있다(Choi, 2000). Shin(2002)과 Kim(2014)은 시료를 포화시킨 상태에서 다짐에너지를 변화시키며 화강풍화토를 실험한 결과, 다짐도가 증가함에 따라 초기 간극비와 투수계수가 감소한다고 하였다. 지반모사에 이용된 시료는 강원도 강릉지역에서 채취하였으며, 공학적 특성으로는 밀도 18.80kN/m^3 ,

비중 2.68, 투수계수 $5.64 \times 10^{-5}\text{m/sec}$, 균등계수 6.56로 나타났다. 또한 입도분포는 Fig 1과 같으며 통일분류법상 SW에 해당하였고, No. 200번체 통과량이 1.26%로 나타났다.

2.2 실험 방법 및 조건

상부 재하응력 변화 및 배수조건을 고려한 터널모형 실험 방법은 다음과 같다. 하부관과 토조 본체를 볼트로 연결한 후에 외관을 쉘드터널모형 삼입구에 설치하였다. 토조에 화강풍화토를 0.30m 채우고 다짐판을 이용하여 15회 다짐을 실시하며, 3회 반복하여 높이 0.90m 까지 채웠다. 이때, 화강풍화토의 작은 입자들이 배수조건 내관을 통해 유실되는 것을 방지하기 위하여 외관 주위에는 표준사를 채우고 내관의 배수구멍에는 가는 철제망을 부착하였다. 유압 재하장치 하부에 가압판을 연결하고 토조 본체와 상부덮개를 조립한 후, 화강풍화토에 일정 압력을 가하면서 장비의 작동을 확인하고 초기조건을 일정하게 조절하였다. 그 후 상부하중을 제거한 상태에서 터널모형 외관을 제거하고 내관을 삼입하여 터널 주변의 이완영역을 모사하였다. 지하수위 아래에 시공된 터널을 모사하기 위하여 지반을 포화시키고 수압을 가하였다. 사질토에 비하여 작은 입자가 많고 투수성이 낮은 화강풍화토의 특성을 고려하여 토조 하단에 설치된 밸브를 통하여 하부에서부터 물을 채우고 넘치면서 42시간 동안 물을 공급하여 시료의 포화가 이루어지도록 하였다. 터널모형실험은 먼저 토조내에 수압을

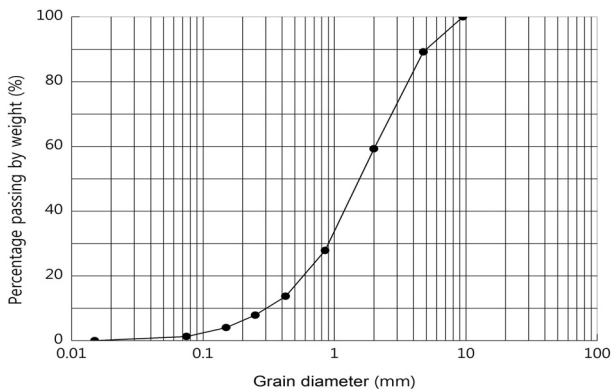


Fig. 1. Grain size distribution of weathered granite soil

Table 1. Testing conditions for each measurement time

Measured time (s)	Water pressure (MPa)	Applied stress (MPa)	Measured time (s)	Water pressure (MPa)	Applied stress (MPa)	Remarks
0 ~ 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

0.05MPa까지 가압하여 유지시킨 상태에서 유압 재하장치를 이용하여 상부 가압판으로 0.0278MPa의 압력을 1분간 재하하였다. 그 후에 상부 가압판으로 동일한 크기의 압력을 5단계까지 증가시키면서 매 단계마다 1분간 압력을 유지하면서 계측을 실시하였다. 이후 상부 재하응력을 제거하고 수압을 0.10MPa까지 가압하여 유지시킨 상태에서 같은 방법으로 상부 재하응력을 증가시키며 데이터를 측정하였고, 수압이 0.15MPa, 0.20MPa 인 조건에 대해서도 실험을 수행하였다. 실험은 비배수조건 내관으로 2회, 배수조건 내관으로 2회 수행하였으며, 배수조건 및 실험횟수에 따라 실험종류를 구분하였다. 측정시간별 실험조건은 Table 1과 같다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 전응력 변화

수압을 0.05MPa에서 0.20MPa까지 증가시키며 각 수압단계에서 수압을 일정하게 유지한 채 상부 재하응력

을 0.1390MPa까지 단계적으로 증가시켰을 때, 토조 벽면에서 토압계를 이용하여 측정된 응력은 Table 2 및 Fig. 2와 같다. 이때 토압계를 이용하여 측정된 응력은 수압과 토압을 포함하는 결과이므로 지반의 전응력을 나타낸다. Table 2에서 비배수조건(Undrained) 1차 실험결과를 보면, 수압이 0.05MPa이고 상부 재하응력이 0.00MPa일 때에는 전응력이 0.0396MPa로 나타났고, 상부 재하응력을 점차 증가시켜 최대 0.1390MPa까지 증가시켰을 때는 전응력이 0.0747MPa로 나타났다. 그러므로 수압이 0.05MPa인 단계에서 전응력 증가량을 상부 재하응력 증가량으로 나누어 전응력 증가율을 계산하면 0.253으로 나타난다. 같은 방법으로 각 수압단계에서 전응력 증가율을 계산하면 Table 3과 같으며, 비배수조건(Undrained)의 두 실험에서 평균 전응력 증가율은 각각 0.177과 0.241로 나타났고 배수조건(Drained)의 두 실험에서 평균 전응력 증가율은 각각 0.268과 0.200으로 나타났다.

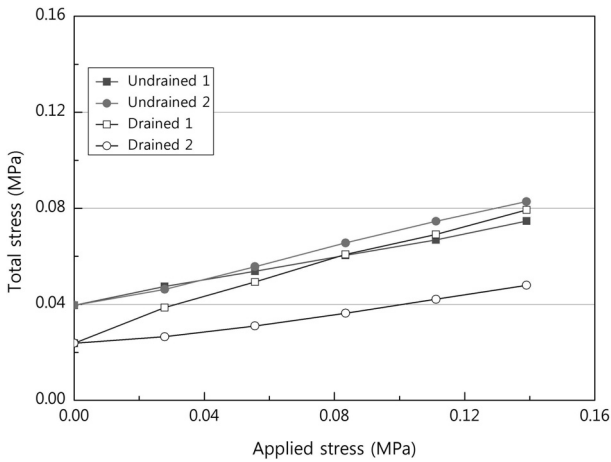
앞서 2.1절에서 설명한 바와 같이 상부 재하응력은 시료의 유효응력만을 증가시킨다. 따라서 Table 2와 Fig.

Table 2. Total stress (MPa) change for drained and undrained condition

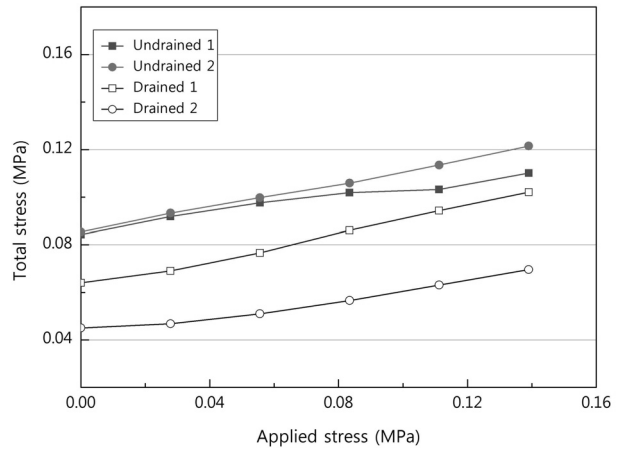
Water pressure	Applied stress	Undrained 1	Undrained 2	Drained 1	Drained 2
0.05	0.0000	0.0396	0.0396	0.0238	0.0238
	0.0278	0.0474	0.0462	0.0386	0.0265
	0.0556	0.0538	0.0557	0.0493	0.0310
	0.0834	0.0604	0.0656	0.0608	0.0363
	0.1112	0.0668	0.0746	0.0691	0.0421
	0.1390	0.0747	0.0828	0.0793	0.0479
0.10	0.0000	0.0843	0.0854	0.0640	0.0450
	0.0278	0.0918	0.0933	0.0690	0.0468
	0.0556	0.0976	0.0998	0.0766	0.0510
	0.0834	0.1019	0.1059	0.0861	0.0566
	0.1112	0.1032	0.1135	0.0943	0.0631
	0.1390	0.1101	0.1215	0.1021	0.0696
0.15	0.0000	0.1329	0.1370	0.0879	0.0660
	0.0278	0.1387	0.1408	0.0902	0.0687
	0.0556	0.1385	0.1449	0.0951	0.0740
	0.0834	0.1428	0.1502	0.1009	0.0816
	0.1112	0.1479	0.1563	0.1082	0.0898
	0.1390	0.1539	0.1627	0.1147	0.0992
0.20	0.0000	0.1872	0.1885	0.1108	0.1005
	0.0278	0.1923	0.1948	0.1135	0.1023
	0.0556	0.1950	0.1999	0.1192	0.1062
	0.0834	0.1973	0.2042	0.1254	0.1130
	0.1112	0.2006	0.2105	0.1325	0.1206
	0.1390	0.2033	0.2174	0.1392	0.1295

2의 결과는 지반에 수압과 유효응력이 가해졌을 때, 터널 근처에서의 전응력 변화양상을 보여준다. 실험결과, 각 수압단계의 최대 하중상태에서 토조 벽면에서 측정된 응력은 실제로 가해진 수압과 토압의 합에 비하여 비배수조건에서 60~64%, 배수조건에서 38~41% 정도로 나타났는데, 이는 현장 실측 결과(Mashimo and Ishimura, 2003) 및 사질토를 대상으로 한 기존의 실험(Choi et al., 2014)과 유사한 결과이다. 터널에 작용하는 응력의 실제 측정값이 이론적인 값에 비하여 작게 나타나는 이유는

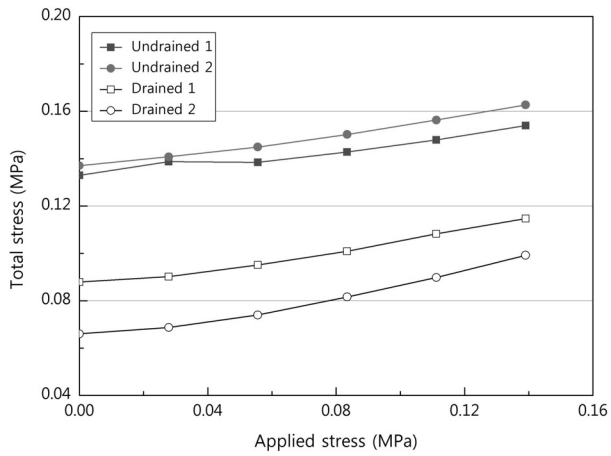
아직까지 명확히 밝혀지지 않았으나, 입자간의 아칭에 의한 영향에 더하여 토조 벽면 마찰 등이 영향을 준 것으로 판단된다. 또한 비배수조건에서 매 하중단계의 초기, 즉 수압만 작용하고 상부 재하응력이 없는 경우에는, 가해진 수압과 비교하여 80~94% 정도의 응력이 토압계에서 측정되어 가해진 수압과 거의 동일한 응력이 토압계에서 측정된 것을 확인할 수 있으며, 이때 발생한 약간의 오차는 아날로그식 수압 측정장치를 통하여 수동으로 수압을 증가시켜 주었기 때문에 발생한 오차로



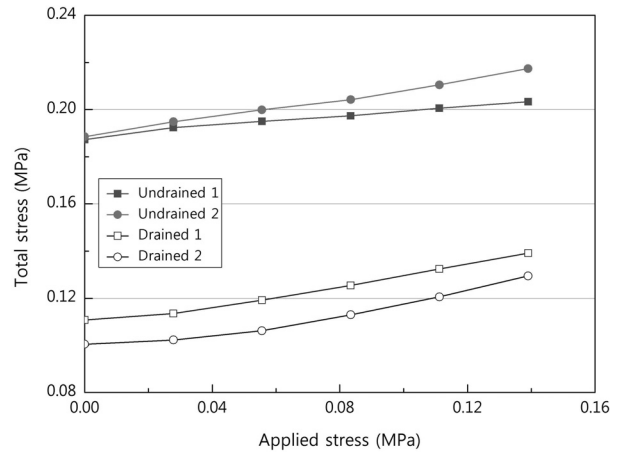
(a) Water pressure 0.05 MPa



(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 3. Total stress increase ratio for drained and undrained condition

Water pressure (MPa)	Undrained 1	Undrained 2	Drained 1	Drained 2
0.05	0.253	0.311	0.399	0.173
0.10	0.186	0.260	0.274	0.177
0.15	0.151	0.185	0.193	0.239
0.20	0.116	0.208	0.204	0.209
Mean	0.177	0.241	0.268	0.200

판단된다. 반면에 배수조건에서 매 하중단계의 초기에 토압계에서 측정된 압력은 가해진 수압의 44~64% 정도의 압력만이 측정되어 내관을 통한 배수로 인하여 간극수압이 감소하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

배수조건에 따른 응력변화 양상을 더욱 자세히 살펴 보면, 수압이 0.05MPa로 작을 때는 비배수조건과 배수 조건의 전응력 차이가 0.0158MPa로 나타났고 수압이 증가할수록 비배수조건에 비하여 배수조건에서 측정된 전 응력이 더 작게 나타나며, 그 차이는 두 실험의 평균값으로 비교하였을 때 최대 0.0865MPa까지 증가하였다. 따라서 배수조건에서 측정된 전응력은 비배수조건에서의 측정응력 대비 약 44%까지 감소하였다는 것을 확인할 수 있다. Atkinson et al.(1983)이 가정하였던 이상적인 조건에서는 터널을 통한 배수가 발생하여 수압이 감소 하는 경우에는 수압이 감소한 만큼 침투압이 증가하므로 배수터널과 비배수터널 간에 전응력 차이가 없어야 하지만, 실제 실험에서는 배수조건에 따른 전응력 차이가 측정되었다. 반면에 동일한 수압하에서 상부 재하하중 대비 전응력 변화율을 정리한 Table 3을 보면 0.116으

로 특이하게 작은 값을 보인 비배수조건(Undrained) 1차 의 최종 단계를 제외하고는, 모든 실험에서 배수조건과 관계없이 평균 증가율의 차이가 5% 정도로 작게 나타나 배수조건에 따른 유의미한 경향성이 관찰되지 않았다.

이상의 결과를 정리하면, 터널에 작용하는 실제 응력은 이론적으로 계산된 응력에 비하여 매우 작으며, 터널 을 통한 배수가 발생하면 터널에 작용하는 전응력이 감 소하고 그 차이는 수압이 클수록 커지는 것으로 나타났 다. 또한 상부에서의 연직방향 유효응력 증가로 인한 터 널 근처에서의 전응력 증가량은 배수조건과 관계없이 유사하다는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 간극수압 변화

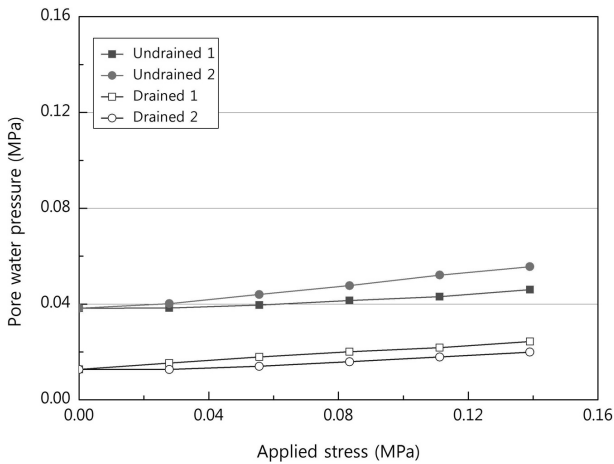
수압을 0.05MPa에서 0.20MPa까지 증가시키며 각 수 압단계에서 수압을 일정하게 유지한 채 상부 재하응력 을 0.1390MPa까지 단계적으로 증가시켰을 때, 터널모형 하부에서 간극수압계를 이용하여 측정된 응력은 Table 4와 같다. 비배수조건(Undrained) 1차 실험에서 수압이

Table 4. Pore water pressure (MPa) change for drained and undrained condition

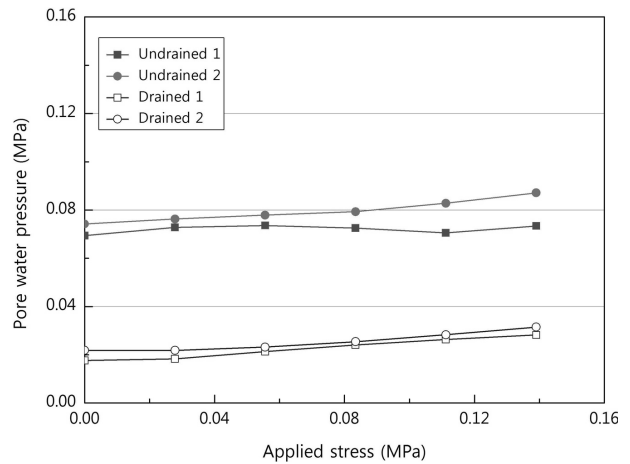
Water pressure	Applied stress	Undrained 1	Undrained 2	Drained 1	Drained 2
0.05	0.0000	0.0383	0.0383	0.0127	0.0127
	0.0278	0.0384	0.0402	0.0154	0.0127
	0.0556	0.0396	0.0440	0.0179	0.0140
	0.0834	0.0415	0.0477	0.0201	0.0159
	0.1112	0.0431	0.0521	0.0218	0.0179
	0.1390	0.0460	0.0556	0.0243	0.0199
0.10	0.0000	0.0694	0.0742	0.0176	0.0218
	0.0278	0.0728	0.0763	0.0183	0.0218
	0.0556	0.0736	0.0779	0.0213	0.0232
	0.0834	0.0725	0.0793	0.0241	0.0254
	0.1112	0.0705	0.0828	0.0263	0.0283
	0.1390	0.0734	0.0871	0.0282	0.0315
0.15	0.0000	0.1157	0.1195	0.0209	0.0333
	0.0278	0.1167	0.1198	0.0205	0.0340
	0.0556	0.1125	0.1199	0.0221	0.0364
	0.0834	0.1118	0.1203	0.0249	0.0408
	0.1112	0.1118	0.1221	0.0273	0.0459
	0.1390	0.1134	0.1250	0.0297	0.0523
0.20	0.0000	0.1656	0.1673	0.0304	0.0590
	0.0278	0.1667	0.1694	0.0308	0.0603
	0.0556	0.1651	0.1705	0.0339	0.0620
	0.0834	0.1628	0.1707	0.0369	0.0655
	0.1112	0.1609	0.1719	0.0404	0.0705
	0.1390	0.1598	0.1747	0.0439	0.0764

0.05MPa이고 상부 재하응력이 0.00MPa일 때에는 간극수압이 0.0383MPa로 나타났고, 수압이 0.05 MPa이고 상부 재하응력이 0.1390MPa일 때에는 간극수압이 0.0460MPa로 나타났다. 그러므로 수압이 0.05MPa인 단계에서 간극수압 증가량을 상부 재하응력 증가량으로 나누어 간극수압 증가율을 계산하면 0.055로 나타난다. 같은 방법으로 각 수압단계에서 간극수압 증가율을 계산하면 Table 5와 같으며, 비배수조건(Undrained)에서 평균 간극수압 증가율은 0.006과 0.0078로 나타났고, 배수조건(Drained)에서 평균 간극수압 증가율은 0.080과 0.096으

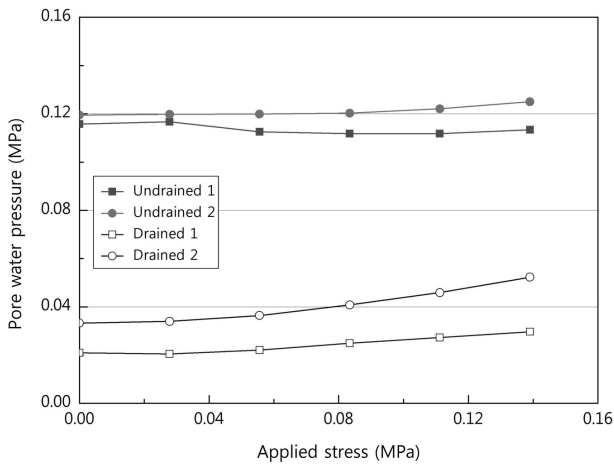
로 나타났다. 즉, 모든 실험에서 상부 재하하중을 증가시켜도 재하응력 대비 10% 이내의 작은 간극수압 증가를 측정할 수 있었다. 기술한 바와 같이 상부 가압판을 이용한 하중재하는 시료의 유효응력만을 변화시키기 때문에 간극수압에는 큰 영향을 주지 않았다. 다만 기존에 사질토를 대상으로 했던 실험(Choi et al., 2014)에서는 간극수압 변화율이 비배수조건에서 평균 -0.8~0.1% 이하, 배수조건에서 평균 -4.5~3.2% 이하였던 것과 비교하면, 상부 가압판을 이용한 하중재하가 간극수압 증가에도 약간의 영향을 주고 있다는 것을 확인할 수 있다.



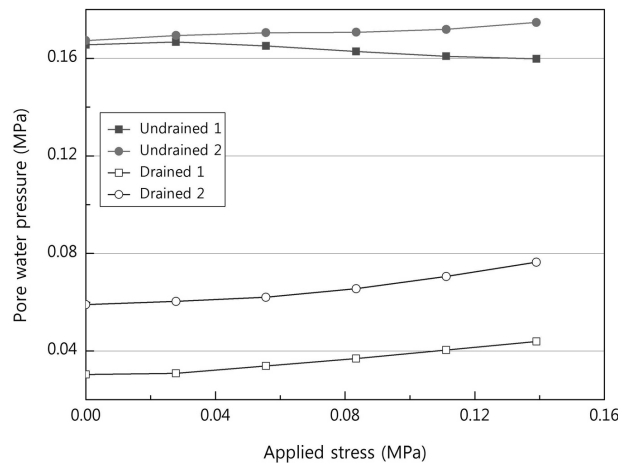
(a) Water pressure 0.05 MPa



(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 5. Pore water pressure increase ratio for drained and undrained condition

Water pressure (MPa)	Undrained 1	Undrained 2	Drained 1	Drained 2
0.05	0.055	0.124	0.083	0.052
0.10	0.029	0.093	0.076	0.070
0.15	-0.017	0.040	0.063	0.137
0.20	-0.042	0.053	0.097	0.125
Mean	0.006	0.078	0.080	0.096

이는 화강풍화토의 투수계수가 사질토에 비해 작기 때문에 상부에서 하중재하와 동시에 간극수압이 완전히 소산되는 사질토와 달리 하중재하에 따른 과잉간극수압이 일부 발생하고 그 소산에도 시간이 소요되기 때문인 것으로 판단된다.

Table 4에서 측정된 간극수압의 크기를 배수조건별로 비교하여 보면, 비배수조건에서 측정된 간극수압의 평균값이 배수조건에서 측정된 값보다 약 2.3~4.3배까지 크게 나타났다. 각 수압단계에서 재하하중 변화에 따른 간극수압 변화를 그래프로 도시하면 Fig. 3과 같다. Fig. 3의 모든 수압단계에서 비배수조건(Undrained)에서의 간극수압 값이 배수조건(Drained)보다 크게 나타났으며, 수압이 증가함에 따라 그 차이가 커지는 것으로 나타났다. 다만 배수조건임에도 측정된 간극수압이 완전히 0으로 감소하지는 않았으며, 이는 화강풍화토의 낮은 투수계수와 배수구멍 조정으로 소량의 수량이 배수됨으로 인해 잔류수압이 발생하여 간극수압이 0으로 감소되지 않는 것으로 나타났다.

3.3 유출량 변화

배수조건(Drained)의 내관에서 수압 및 상부 재하응력

증가에 따른 30초간 유출량은 Table 6과 같다. 배수조건 내관에는 유출량을 조절하기 위한 지름 4mm의 구멍이 30개 있으며, 각 구멍은 육각민머리볼트를 이용하여 개폐가 가능하도록 하여 내관으로 유입되는 유량을 조절하였다. 본 실험에서는 열린 구멍의 개수를 8개로 하여 실험을 수행하였다. 유출량에 대한 실험결과, 수압이 0.05MPa인 경우를 제외하고는 동일한 수압조건에서 상부 재하응력 증가에 따른 유출량은 7~30% 정도 증가했으나, 유출량의 측정 정밀도를 고려하면 상부 재하응력에 따른 유출량의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다. 또한 수압이 0.05MPa인 경우를 제외하고는 수압의 증가도 유출량에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

3.4 유효응력 변화

전응력과 간극수압 변화량을 이용하여 유효응력을 계산하면 Table 7과 같다. 수압이 0.20MPa이고 상부 재하응력이 0.1390MPa일 때 간극수압 값은 비배수조건(Undrained)에서 평균 0.1673MPa로 나타났고, 배수조건(Drained)에서 평균 0.0602MPa로 나타나 비배수조건(Undrained)에서의 간극수압 값이 배수조건(Drained)보다 178% 큰 것으로 나타났다. 또한 유효응력 값은 비배수

Table 6. Discharge (m³) for 30 seconds in inner pipe

Water pressure (MPa)	Applied stress (MPa)	Drained 1	Drained 2
0.05	0.0278	2.20×10^{-4}	0.70×10^{-4}
	0.0556	1.70×10^{-4}	0.80×10^{-4}
	0.0834	1.80×10^{-4}	0.90×10^{-4}
	0.1112	1.80×10^{-4}	0.90×10^{-4}
	0.1390	1.90×10^{-4}	1.00×10^{-4}
0.10	0.0278	1.50×10^{-4}	1.00×10^{-4}
	0.0556	1.50×10^{-4}	1.05×10^{-4}
	0.0834	1.50×10^{-4}	1.10×10^{-4}
	0.1112	1.50×10^{-4}	1.15×10^{-4}
	0.1390	1.60×10^{-4}	1.30×10^{-4}
0.15	0.0278	1.50×10^{-4}	1.10×10^{-4}
	0.0556	1.50×10^{-4}	1.10×10^{-4}
	0.0834	1.50×10^{-4}	1.20×10^{-4}
	0.1112	1.50×10^{-4}	1.20×10^{-4}
	0.1390	1.50×10^{-4}	1.20×10^{-4}
0.20	0.0278	1.50×10^{-4}	1.10×10^{-4}
	0.0556	1.50×10^{-4}	1.10×10^{-4}
	0.0834	1.60×10^{-4}	1.10×10^{-4}
	0.1112	1.60×10^{-4}	1.20×10^{-4}
	0.1390	1.60×10^{-4}	1.20×10^{-4}

조건(Undrained)에서 평균 0.0431MPa로 나타났고, 배수 조건(Drained)에서 평균 0.0742MPa로 나타나 배수조건(Drained)에서의 유효응력이 비배수조건(Undrained)보다 72% 큰 것으로 나타났다(Table 8 참고). Table 8에서 터널에 작용하는 유효응력과 간극수압의 합인 전응력은 비배수조건(Undrained)에서 큰 것으로 나타났으며, 유효응력은 배수조건(Drained)에서 더 큰 것으로 나타났다. 이것은 간극수압의 감소량이 유효응력 증가량과 이론적으로 같아야 하지만 실험에서는 배수조건(Drained) 시 간극수압 감소로 인한 전응력의 감소가 크게 나타나, 터널 설계에서 배수조건을 고려한다면 터널의 응력이 감

소되어 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단된다. Fig. 4와 같이 비배수 및 배수조건에서 전응력과 유효응력의 변화를 도시해 보면, 수압의 크기에 관계없이 전응력은 비배수조건에서 더 크게 나타났고 유효응력은 배수조건에서 더 크게 나타났다. 다만 본 실험에서는 강릉지역의 화강풍화토를 이용한 제한된 하중조건에서 실시한 터널 모형실험이므로, 실제 설계에서 적용하기 위해서는 배수조건(Drained)에서 유효응력 증가로 인한 간극률의 변화로 야기되는 지반의 변형 등과 같은 심도 있는 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

Table 7. Effective stress (MPa) change for drained and undrained condition

Water pressure	Applied stress	Undrained 1	Undrained 2	Drained 1	Drained 2
0.05	0.0000	0.0013	0.0013	0.0111	0.0111
	0.0278	0.0090	0.0060	0.0232	0.0138
	0.0556	0.0142	0.0117	0.0314	0.0170
	0.0834	0.0189	0.0179	0.0407	0.0204
	0.1112	0.0237	0.0225	0.0473	0.0242
	0.1390	0.0287	0.0272	0.0550	0.0280
0.10	0.0000	0.0149	0.0112	0.0464	0.0232
	0.0278	0.0190	0.0170	0.0507	0.0250
	0.0556	0.0240	0.0219	0.0563	0.0278
	0.0834	0.0294	0.0266	0.0620	0.0312
	0.1112	0.0327	0.0307	0.0680	0.0348
	0.1390	0.0367	0.0344	0.0739	0.0381
0.15	0.0000	0.0172	0.0175	0.0670	0.0327
	0.0278	0.0220	0.0210	0.0697	0.0347
	0.0556	0.0260	0.0250	0.0730	0.0376
	0.0834	0.0310	0.0299	0.0760	0.0408
	0.1112	0.0361	0.0342	0.0809	0.0439
	0.1390	0.0405	0.0377	0.0850	0.0469
0.20	0.0000	0.0216	0.0212	0.0804	0.0415
	0.0278	0.0256	0.0254	0.0827	0.0420
	0.0556	0.0299	0.0294	0.0853	0.0442
	0.0834	0.0345	0.0335	0.0885	0.0475
	0.1112	0.0397	0.0386	0.0921	0.0501
	0.1390	0.0435	0.0427	0.0953	0.0531

Table 8. Mean stress (MPa) for drained and undrained condition

Classification		Weathered granite soil
Undrained condition	Total stress	0.2104
	Pore water pressure	0.1673
	Effective stress	0.0431
Drained condition	Total stress	0.1344
	Pore water pressure	0.0602
	Effective stress	0.0742

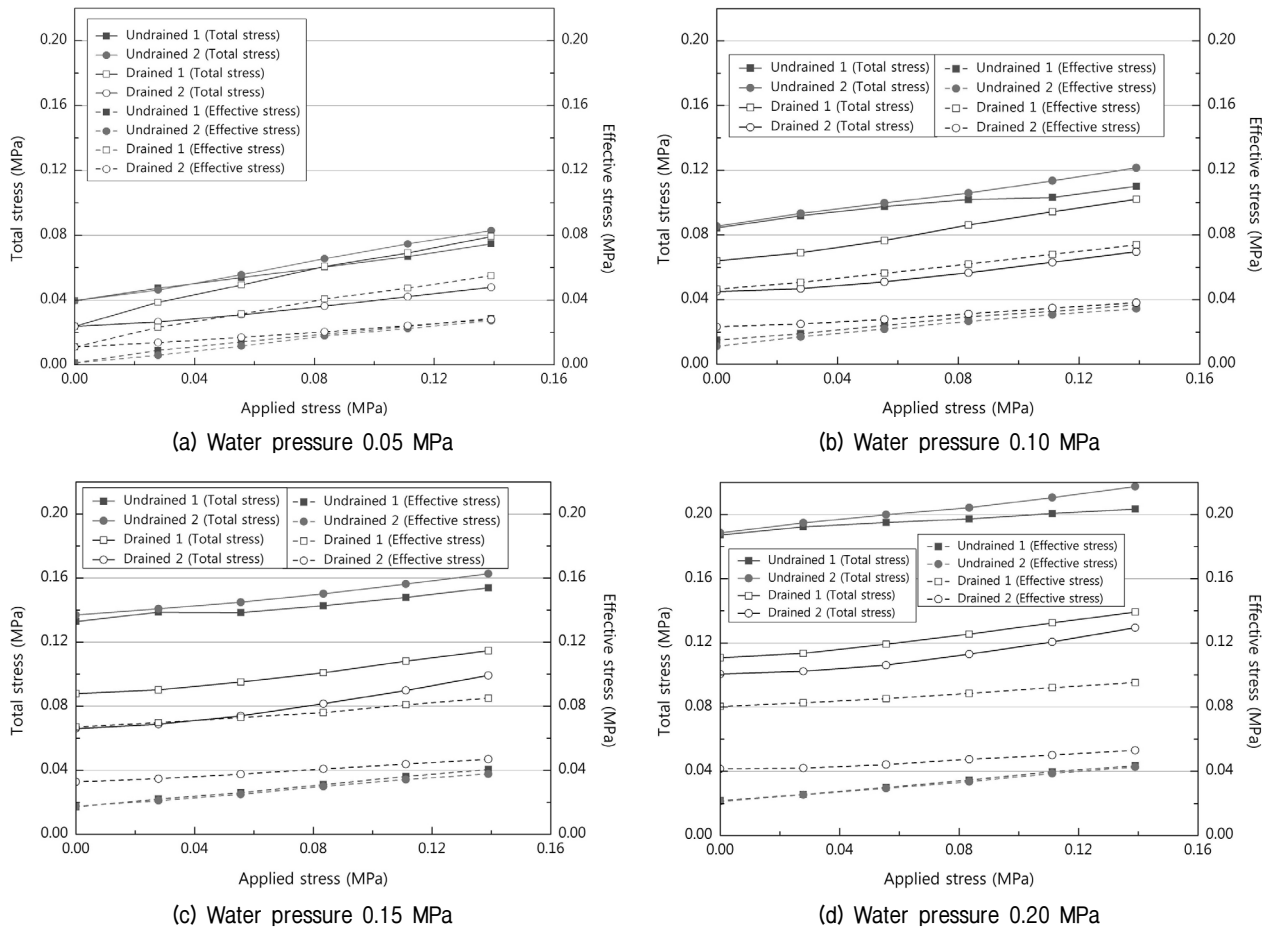


Fig. 4. Change in total and effective stress per applied stress

4. 결론

본 연구에서는 배수조건을 변화시키며 실드터널 라이닝에 작용하는 압력의 변화를 분석하였다. 터널모형실험장비를 이용하여 화강풍화토 지반을 모사하고 수압 및 재하응력을 변화시키며 실내 모형실험을 수행하였으며, 연구결론은 다음과 같다.

(1) 최대 하중상태에서 전응력은 실제로 가해진 수압과 토압의 합에 비하여 비배수조건에서 60~64%, 배수조건에서 38~41% 작게 나타났다. 또한 수압이 0.05 MPa일 때는 비배수조건과 배수조건의 평균 전응력 차이가 0.0158MPa로 나타났고 수압이 증가할수록 비배수조건에 비하여 배수조건에서 측정된 전응력이 더 작게 나타났으며, 그 차이는 두 실험의 평균값으로 비교하였을 때 최대 0.0865MPa까지 증가하였다. 이와 같이 터널에 작용하는 실제 응력은 이론적으로 계산된 응력에 비하여 매우 작으며, 터널을 통

한 배수가 이루어진다면 터널에 작용하는 전응력이 감소하고 그 차이는 수압이 클수록 커지는 것으로 나타났다. 그러므로 터널 설계에서 배수조건을 고려한다면 터널의 설계 응력이 감소되어 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

- (2) 비배수조건인 두 실험에서 평균 간극수압 증가율은 0.006과 0.078로 나타났고, 배수조건인 두 실험에서 평균 간극수압 증가율은 0.080과 0.096으로 나타났다. 즉, 모든 실험에서 상부 재하하중을 증가시켜도 재하응력 대비 10% 이내의 작은 간극수압 증가를 측정할 수 있었다. 이는 다공 가압판을 통한 상부 하중이 시료의 유효응력만을 변화시키기 때문이며, 그럼에도 불구하고 약간의 간극수압이 증가한 것은 화강풍화토의 투수계수가 작아 발생한 간극수압의 소산에 시간이 소요되기 때문인 것으로 판단된다.
- (3) 최대 하중상태에서 간극수압 값은 비배수조건에서 평균 0.1673MPa로 나타났고 배수조건에서 0.0602MPa로 나타나, 비배수조건에서의 간극수압 값이 배수조건

보다 178% 큰 것으로 나타났다. 또한 유효응력 값은 비배수조건에서 평균 0.0431MPa로 나타났고 배수조건에서 평균 0.0742MPa로 나타나, 배수조건에서의 유효응력이 비배수조건보다 72% 큰 것으로 나타났다. 이론적으로는 터널 배수로 간극수압이 감소한 만큼 유효응력이 증가하여 전응력의 변화가 없어야 하지만, 실제로는 간극수압 감소로 인한 전응력 감소가 측정되었다.

- (4) 터널모형 내관으로 유입되는 유출량은 동일한 수압 조건에서 상부 재하응력이 증가함에 따라 7~30% 가량 증가하는 것으로 나타났으나, 유출량의 측정 정밀도를 고려하였을 때 상부 재하응력 증가에 따른 유출량의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다.
- (5) 국내에 널리 존재하고 있는 화강풍화토에 대한 쉴드 터널의 모형실험 결과, 선행 연구(Choi et al., 2014)에 서와 같이 배수조건 고려 시 쉴드터널에 작용하는 전응력이 감소하는 것으로 나타났다. 그러므로 쉴드 터널 설계 시 배수로 인한 터널 라이닝 작용 응력 변화가 반영된다면 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술 평가원에서 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. (2014), "A Physical Model Test on Behavior of Shield tunnel Lining according to Drain Conditions", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.30, No.5, pp.55-65.
4. Choi, Y. H. (2000), "Shear Strength Characteristics of Undisturbed Decomposed Granite Soil under Variations of Normal Stress", *Master's thesis*.
5. Jung, K. Y., Kim, J. Y., Kim, J. H., and Moon, H. K. (2011), "A Study for Application Plan of Rational Residual Water Pressure on the Tunnel Linings", *Journal of Korean Tunnelling Association*, Vol.13, No.6, pp.463-499.
6. Kim, H. U. (2014), "Shear Strength Characteristics by the Particle Crushing in the Decomposed Pocheon Granite Soil", *Master's thesis*.
7. Korea expressway corporation (2009), *Road design criteria*, Vol.4.
8. Korean Society of Civil Engineers, <http://www.ksce.or.kr/contents/journal/dic.asp>
9. Korean Tunnelling Association (2008), *Series of Tunnel Engineering 3 - Tunnel Mechanized Construction Design*, CIR, pp.3-6.
10. Lee, J. S., Lee, K. I., and Kim, K. J. (2014), "Dynamic Characteristics of Decomposed Granite Soils by Changing Geoenvironment", *J. Korean Geosynthetics Society*, Vol.13, No.1, pp.41-52.
11. Mashimo, H. and Ishimura, T. (2003), "Evaluation of the Load on Shield Tunnel Lining in Gravel", *Tunnelling and Underground Space Technology 18*, pp.233-241.
12. Shin, T. W. (2002), "Mechanical Characteristics of Remolding Weathered Granite Soil by degree of Compaction", *Master's thesis*.

Received : May 12th, 2015

Revised : May 28th, 2015

Accepted : June 2nd, 2015