J of Korean Tunn Undergr Sp Assoc 18(6)581-591(2016)
https://doi.org/10.9711/KTAJ.2016.18.6.581
eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

다목적 복층터널의 기능전환과 지하수위 변화에 따른 거동분석

박노현[1] · 김호종[2] · 신종호[3]*
[1]학생회원, 건국대학교 공과대학 토목공학과 석사과정
[2]학생회원, 건국대학교 공과대학 토목공학과 박사과정
[3]정회원, 건국대학교 공과대학 토목공학과 정교수

Behavior of double deck tunnel due to feature change and variation of ground water table

No-Hyeon Park[1], Ho-Jong Kim[2], Jong-Ho Shin[3]*
[1]Graduate Student, Dept. of Civil Engr., Konkuk University
[2]Ph.D Student, Dept. of Civil Engr., Konkuk University
[3]Professor, Dept. of Civil Engr., Konkuk University

ABSTRACT: Several attempts to construct multi-purpose tunnel for both road and waterway have been made. The multi-purpose tunnel is mainly used as a road tunnel, however it is transferred to waterway to control flood during rainy season. The planning of the multi-purpose tunnel is recognized as cost-effective way of infrastructure construction. In case of the multi-purpose tunnel constructed beneath groundwater table, seasonal fluctuation of groundwater table and repeated flow in the tunnel may cause long-term deterioration of the tunnel system. In this study, the behavior of multi-purpose tunnel in view of groundwater table or flow in the tunnel is investigated using model test and numerical modeling method. The results have shown that rising of groundwater table caused buoyant force to the tunnel and the fluctuation of rainwater in the tunnel generated loosening of surrounding ground. It is recommended to evaluate the effect of the long-term water pressure variation in the design of a multi-purpose tunnel.

Keywords: Multi-purpose tunnel, Fluctuation of water level, Inner water pressure, Long-term deterioration

초 록: 최근 사회기반시설의 투자효율성을 높이기 위하여 평상 시 도로터널로 운영되지만 홍수 시 수로로 이용되는 수로·도로 다목적 터널의 계획이 시도되고 있다. 이러한 다목적 터널은 수로터널로의 이용이 한시적이기 때문에 내수압과 지하수위가 일정하지 않아 터널 내부와 외부의 압력변화가 상당할 수 있다. 특히 지하수위 아래에 건설 된 다목적 터널의 경우 장기간 운영 중에 발생하는 계절적 압력변화는 터널에 반복하중으로 작용하여 구조물과 인접지반의 열화로 이어질 가능성이 있다. 본 연구에서는 다목적 터널의 외부 및 내부 수위조건에 따라 발생할 수 있는 구조물의 거동특성을 모형실험 및 수치해석을 통하여 조사하였다. 그 결과 수위변화로 인한 터널 거동의 주 원인은 부력이며, 터널 내부 및 외부의 반복적인 수위변화는 터널 주변지반의 이완영역을 확대시키는 것으로 나타났다. 따라서 다목적 터널의 설계 시 수위변화에 따른 영향검토가 필요하며 경우에 따라 저항성을 유지시킬 수 있는 대책의 검토가 필요하다.

주요어: 다목적 터널, 반복수위, 내수압, 장기 열화

1. 서 론

최근 국내 도심지에는 안정적이지 못한 수자원 관리로 인하여 빈번한 수해가 일어나고 있다. 이에 따라 추가적인 수자원 관리시설의 건설이 요구되고 있지만 용지확보의 한계, 경제성 등의 이유로 개발에 어려움을 겪고 있다. 주요 범람지역의 홍수를 방지하기 위해서 수로터널의 설치가 시급할지라도 단일목적의 수로터널은 사용빈도가 낮아 투자효율성이 떨어진다. 이

***Corresponding author:** Jong-Ho Shin
E-mail: jhshin@konkuk.ac.kr

Received November 14, 2016; **Revised** November 24, 2016; **Accepted** November 28, 2016

Copyright ⓒ2016, Korean Tunnelling and Underground Space Association
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativescommons.org/license/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

러한 이유로 최근에는 교통체증완화와 홍수대비기능을 동시에 충족하는 수로·도로 다목적 터널의 필요성이 제기되고 있다.

수로·도로 다목적 터널은 평상 시 도로터널로 운영되지만 비상 시 수로로 이용된다. 수로터널로의 이용이 한시적이기 때문에 내수압이 일정하지 않고 반복적으로 작용함으로써 터널 내부와 외부의 압력차 변동이 심하다. 지하수위가 상승하여 터널 구조물에 수압이 작용하고 있는 상황이라면 압력차에 의한 양압력 때문에 구조물의 수직변위가 발생한다. 때문에 다목적 터널의 장기간 운영으로 인한 반복적인 내수압은 터널에 반복하중으로 작용하여 인접지반의 열화로 이어질 가능성이 크다.

지하수위가 지하구조물 위치보다 높을 경우 수두차에 의하여 구조물의 하부에 양압력, 즉 부력이 작용하게 된다. 이 때 구조물의 부력에 대한 저항력이 충분하지 않을 경우 구조물이 부상하여 구조물에 큰 손상이 발생 할 가능성이 있다. 부력에 대한 대비책으로는 구조물의 자중 증가, 전단키 및 앵커시공 등이 적용되고 있다. 하지만 일정시간 경과 후 지하수위가 복원되거나 기상변동으로 인하여 지하수위가 급상승한다면 설계수위보다 높아져 상당한 부력을 받는 상황에 놓일 수 있다. 국내에서는 서울지하철 2호선 터널의 건설 시 부력을 적절히 고려하지 않아 피해가 발생한 사례가 있다(Choi, 2006). 구조물의 부상으로 인한 손상은 피해가 크고 복구가 어려운 경우가 많아 이에 대한 안정검토와 명확한 대책마련이 필요하다.

일반적으로 지하구조물의 부력에 대한 안정성은 구조물의 자중과 상재하중, 구조물과 인접지반과의 마찰력 등을 고려한다. 국내에서는 박스구조물에 대한 부력 검토기준이 있으며(Railway design standard for roadbed, 2013) 시공 중 및 시공 후의 부력에 대한 안전율을 제시하고 있다. 하지만 터널에 대한 부력 검토기준 및 연구는 미흡한 실정이다(Kim et al., 2015).

원형터널의 경우 구조물의 변위에 의한 지반의 파괴형식 및 파괴면을 정의하기 어려워 일반적인 부력 검토에 사용하는 한계평형조건을 적용하기가 용이하지 않다. 기존 터널 구조물의 상향거동관련 연구는 주로 관로의 좌굴에 의한 상향거동으로 발생하는 상부지반의 파괴형식과 저항력에 대한 분석이 수행되어 왔다. Cheuk et al. (2008)은 지중의 관을 들어올리는 모형실험을 통하여 관의 상향거동에 의한 사질지반 파괴 메커니즘을 규명하였으며 Firouzian et al. (2009)은 지반의 지하수위를 증가시키는 모형실험을 통하여 지하수의 양압력에 의한 관의 상향거동을 분석하였다. Liu and Yuan (2015)은 White et al. (2001)와 Cheuk et al. (2008)의 연구 결과를 바탕으로 관의 상향력에 의한 지반거동을 이론적으로 분석하였으며 얕은 심도를 가지는 하저터널의 부력 안정성 검토에 적용하였다.

일반적으로 터널 구조물과 지반 경계면에서의 결합력이 충분하고 일정 심도에 의한 지반 상재하중이 존재한다면 부력에 대한 안정성은 유지된다(Kim et al., 2015). 하지만 수로·도로 다목적 터널의 경우 기능전환에 따른 내부수위와 외부수위의 반복적 변화 때문에 일반 도로터널에 비하여 부력영향을 크게 받을 가능성이 있다. 수로·도로 다목적 터널은 기능전환이라는 특수성 때문에 수로터널과 도로터널의 설계기준을 동시에 만족해야 한다. 하지만 터널의 반복적인 기능전환과 수압변화에 따른 터널거동에 대한 연구는 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 수로·도로 다목적 터널의 수명기간 동안에 반복적인 기능전환과 수위변화가 터널에 미치는 영향을 조사하였다

2. 수위변화 거동특성의 실험적 고찰

2.1 개요

지하수위 아래에 건설되는 터널은 수리영향에 대하여 안정성이 유지되어야 한다. 유입량이 충분하지 않은 비구속 흐름일 경우 터널 굴착과정이나 시공 후에 지하수위가 일정하지 않기 때문에 설계 시 수위변화

를 고려한 지반-구조물-수리 상호작용의 고려가 필요하다. Shin et al. (2006)은 수치해석을 통해 수위와 배수조건을 단순화하는 Monotonic 수위조건과 수위변화를 고려한 Recovery 해석조건을 비교하여 터널 주변지반의 전응력을 분석하였으며 Monotonic 수위조건이 실제 라이닝에 작용하는 토압을 과소평가 할 수 있음을 밝힌 바 있다. Fig. 1은 수위조건에 따른 터널 주변의 전응력 차이를 나타낸 것이다.

일반적인 도로터널과 달리 수로·도로 다목적 터널은 수리기능 및 교통기능을 동시에 만족하여야 한다. 터널에 내수압이 작용한다면 그 거동이 일반 도로터널과 상이하다. Brekke and Ripley (1987)는 기존 수로터널의 손상 및 원인을 조사하여 대표적 손상형태로 과도한 누수, 인접지반의 이완, 라이닝 변형 및 파괴를 제시하였다. 하지만 이는 주로 과도한 내수압을 받는 압력터널에서 발생하기 때문에 상대적으로 적은 내수압을 받는 개수로 형태로 운용되는 다목적 터널에서 발생할 가능성은 적다.

수로·도로 다목적 터널은 반복적인 기능전환에 따라 발생하는 하중변화에 대해 안정성을 유지하여야 한다. 하지만 현재 수로·도로 다목적 터널의 건설사례는 말레이시아 SMART Tunnel이 유일하고 운용기간도 길지 않아 터널의 반복 기능전환에 관련한 연구가 부족한 실정이다(Kim and Kim, 2012; Kwon et al., 2015). 또한 터널의 외부 및 내부의 반복적인 수위 상승·하강에 대한 영향분석도 미흡하여 추가적인 검토가 필요하다.

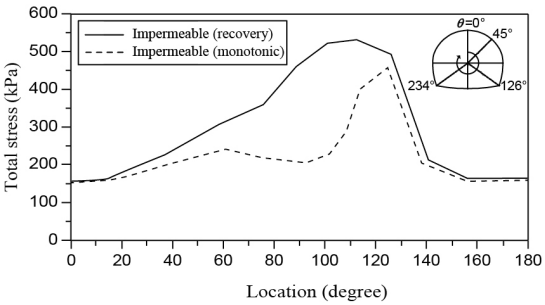


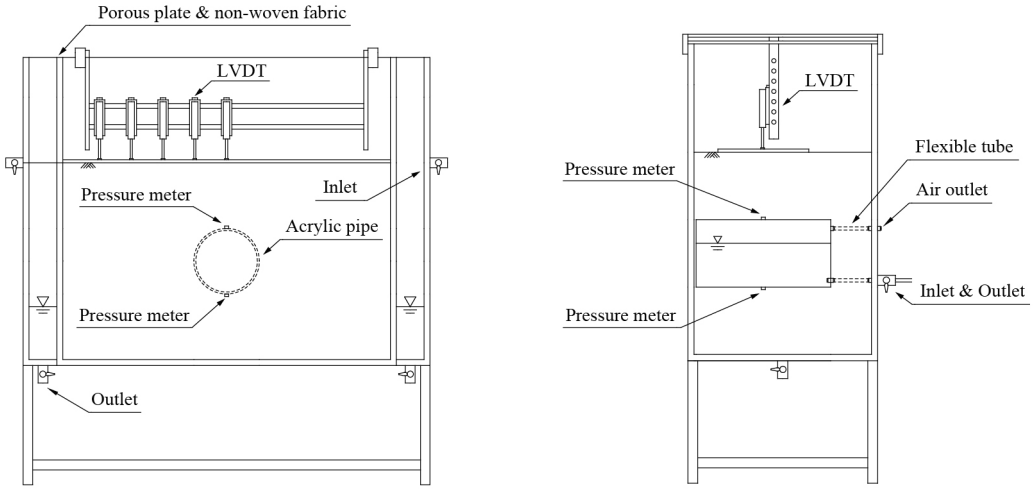
Fig. 1. Comparison of total stress between monotonic condition and recovery condition of ground water (Shin, 2006)

본 실험에서는 토사지반에 건설된 수로·도로 다목적 터널의 내부 및 외부 수위변화가 터널 거동에 미치는 영향을 모형실험을 통해 확인하고자 하였다. 실험에서 고려한 영향인자는 부력으로 인한 상향수압, 내수압, 그리고 지반에 의한 상재하중이다.

2.2 실험장치 및 실험방법

기능전환과 지하수위 변화에 의한 수로·도로 다목적 터널의 거동특성을 분석하기 위해 가로 800 mm, 세로 450 mm, 높이 800 mm의 토조와 직경 160 mm, 길이 290 mm의 관을 제작하였다. 토조와 모형관의 재질은 아크릴이며 토조 좌측 및 우측에는 토사유출 방지와 외부수위조절이 가능하도록 알루미늄 다공판과 부직포를 설치하였다. 수위변화에 의한 터널의 거동이 구속되지 않도록 모형관을 지중에 삽입하는 형식이며 모형관 내에 물의 유출과 유입을 자유롭게 하기 위하여 관 후면과 토조 후면에 휘팅을 설치하고 연성호스로 관과 토조 외부를 연결하였다. 모형실험 장치는 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 모형실험에는 주문진 표준사를 사용하였으며 물성시험 결과는 Fig. 4와 같다.

지반조성은 상대밀도 70%로 물다짐을 하였으며 하부지반 조성 및 모형관 설치 후 나머지 상부지반을 조성하는 형식으로 진행하였다. 토피고는 터널직경의 1배로 적용하였다. 관 내부로의 물 공급은 일정수두를 유지할 수 있는 수조를 사용하였고 수조와 관 내부의 수두차는 1.5 m를 유지하였다. 관 천단부, 인버트부에 토압계 설치 후 관 외부에 부직포를 부착했으며 상부지반에는 LVDT를 설치하여 수위변화에 따른 전응력 변화와 지표변위를 측정하였다. 라이닝의 부재력을 파악하기 위해서는 휨강성비를 고려한 상사율을 적용해야 하지만 본 실험에서는 거동의 경향성 파악이 목적이므로 라이닝의 휨강성비를 고려하지 않고 길이비만을 적용하여 정성적 분석을 수행하였다. 실험은



(a) Lateral section (b) Longitudinal section

Fig. 2. Schematic diagram of laboratory setup

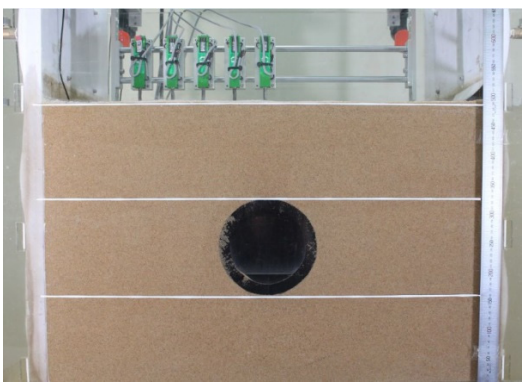


Fig. 3. Full test set up

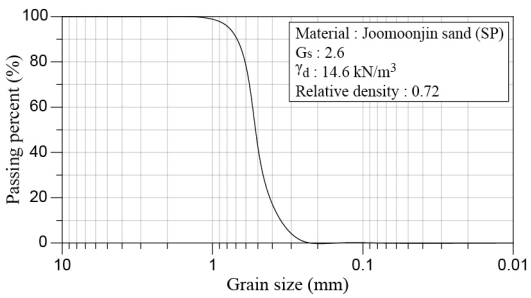
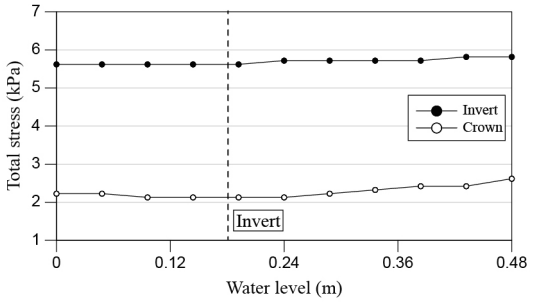


Fig. 4. Grain size distribution curve and Material property

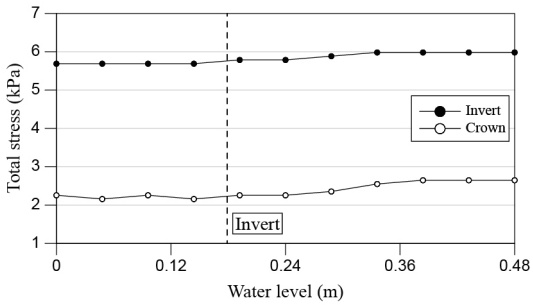
지하수위 변화와 내부수위 변화로 나누어 수행하였다. 지하수위 변화는 관 내부수위가 없는 상태에서 외부수위를 토조 하부로부터 지표까지 증가시켰으며 내부수위 변화는 외부수위를 지표면에 유지시킨 후 관 내부에 물을 반복적으로 유입·유출시켰다. 또한 자연적 요인 및 인위적 요인으로 인한 지하수위의 상승·하강에 대한 영향을 조사하기 위하여 외부수위 반복변화 실험도 추가로 실시하였다. 관은 거동이 구속되지 않도록 별도의 고정장치 없이 지중에 삽입하여 수압으로 인한 부력이 작용했을 때 터널의 부상이 가능한 조건을 재현하였다.

2.3 지하수위 변화 영향

물을 토조 좌·우측에 일정하게 공급하였고 수위가 토조 하부에서 지표까지 상승함에 따라 발생하는 관의 천단과 인버트에 작용하는 토압 및 지표변위의 변화를 측정하였다. Fig. 5에 배수형 관과 비배수형 관의 각 위치(Crown, Invert)에서 수위가 상승함에 따라 작용하는 토압의 계측결과를 나타내었다. 수위가 토조 하부에서 관의 인버트까지 상승하였을 때를 기점으로 천단과 인버트에 작용하는 전응력은 수위가 상승함에 따라 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 인버트의 토압 상승은 수압이 작용하여 전응력이 증



(a) Drained condition



(b) Undrained condition

Fig. 5. Total stress change due to rising of ground water table

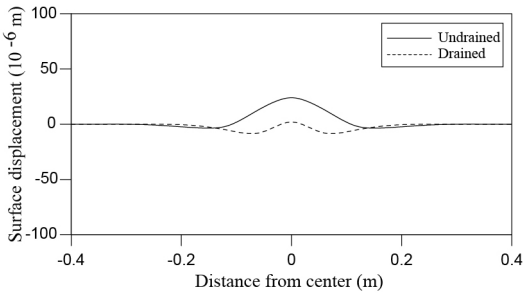
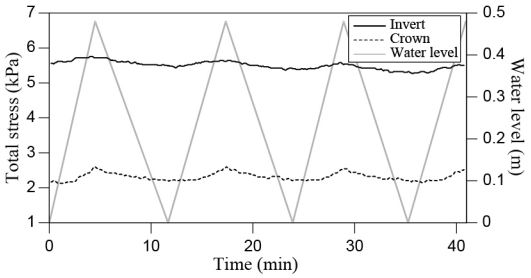


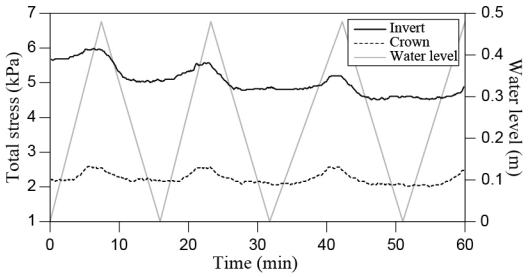
Fig. 6. Displacement of ground surface due to rising of ground water table

가하기 때문이며 천단의 토압이 수위의 영향을 받지 않음에도 상승하는 이유는 관이 부력의 영향으로 부상하면서 압력을 받기 때문으로 분석된다. 이러한 경향은 배수형 관에도 나타났는데, 측정 결과 배수량은 약 26 cm^3/s, 토조로의 유입량은 약 700 cm^3/s로 수위 상승속도에 비하여 배수량이 작았기 때문으로 판단된다.

Fig. 6은 외부수위가 지표면까지 상승하였을 때



(a) Drained condition



(b) Undrained condition

Fig. 7. Total stress change due to fluctuation of ground water table

지표변위 형상을 나타낸 것이다. 수위상승에 따라 지표면은 융기하였다. 이는 부력영향으로 관의 상향변위가 발생하였기 때문으로 판단된다. 지표변위는 관 중심을 기준으로 양측 1.5D거리 이내에서 발생하였다.

배수형 관은 인버트의 토압 증가량과 지표변위가 비배수형에 비해 작게 계측되었다. 이는 배수형 관은 물의 유입으로 인하여 비배수형에 비해 인버트에 작용하는 수압이 작아 부력영향이 감소하여 관의 상향거동이 적게 나타났기 때문으로 판단된다.

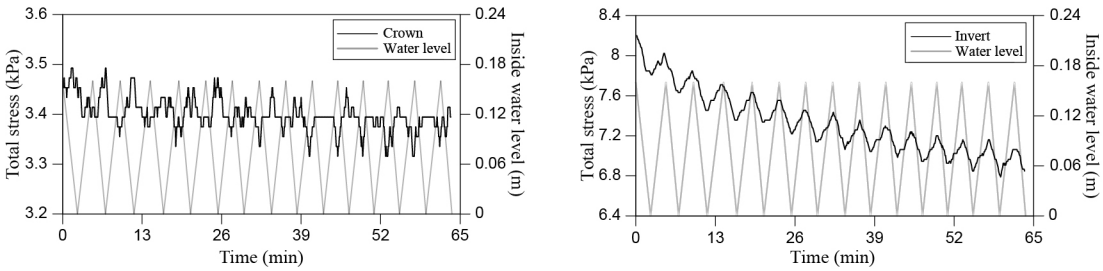
실제 지반의 지하수위는 일정하지 않고 자연적 혹은 인위적 요인에 의해 변화한다. 본 실험에서는 터널 외부수위를 반복적으로 상승·하강시키는 추가실험을 수행하여 반복적인 외부수위 변화가 터널 거동에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 7에 외부수위 반복변화에 따른 관의 천단과 인버트에 작용하는 토압의 계측 결과를 나타내었다. 배수형식에 관계없이 수위가 상승할 때 천단과 인버트에 작용하는 토압은 증가하였으며 수위가 하강함에 따라 토압은 감소하였다. 외부수위를 반복적으로 변화시켰을 때 천단에 작용하는

토압은 큰 변화가 없으나 인버트의 토압은 감소하는 경향을 보였다. 인버트의 토압 감소량은 배수형이 비배수형에 비해 작았다. 인버트의 경우 하부지반은 중력방향으로 힘이 작용하나 관은 수압에 의해 상향력을 받기 때문에 구조물과 지반의 상대거동이 천단에 비해 크게 발생하므로 토압감소량이 크게 나타난 것으로 판단된다.

실험결과를 종합하면 외부수위의 증가는 구조물의 상향거동을 발생시키고 수압의 반복작용은 터널 인접 지반의 이완영역을 확대시켜 토압을 감소시키는 것으로 분석된다. 또한 외부수위의 반복변화에 따른 수압의 영향은 배수형 터널보다 비배수형 터널에서 크게 나타났다. 특히 터널 천단보다 인버트에서 그 영향이 크게 발생하였다.

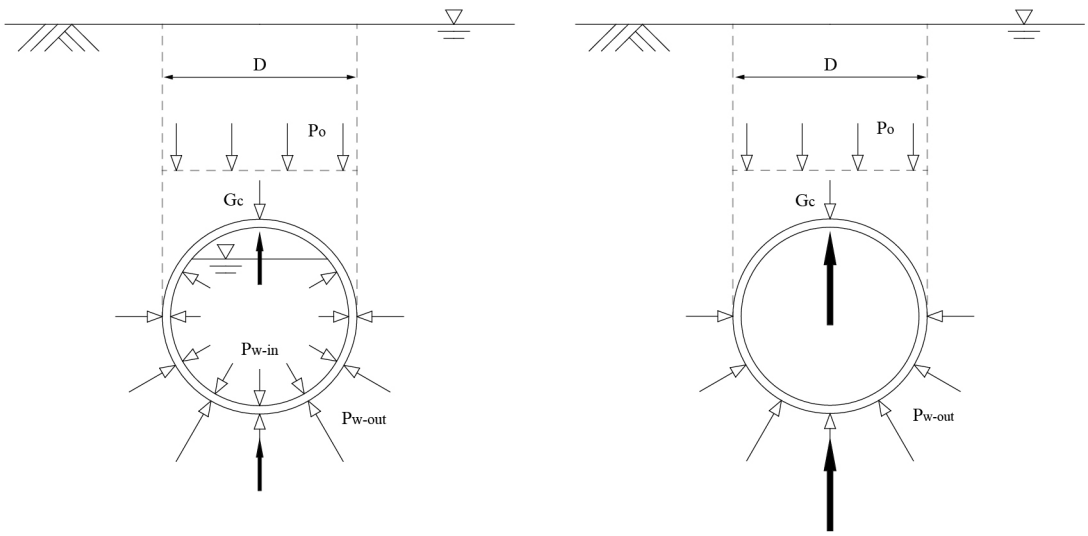
2.4 터널 내수위 변화 영향

지하수위 아래에 건설된 수로·도로 다목적 터널의 장기적 거동을 조사하기 위한 실험으로 외부수위는 유지한 상태에서 관 내부에 반복적으로 물을 유입·유출시켜 다목적 터널의 기능전환을 모사하였다. 터널의 배수형태는 비배수형으로 고려하였으며 유입·유출은 총 15회 반복하였다. 모형관 내부수위 변화에 따른 천단과 인버트의 토압계측 결과는 Fig. 8과 같다.



(a) Crown (b) Invert

Fig. 8. Total stress change due to repeated flow in tunnel (Undrained condition)



(a) Inner water pressure loading (b) Inner water pressure unloading

Fig. 9. Tunnel behavior due to repeated flow in tunnel

내부수위 하강 시 천단에 작용하는 토압은 증가하고 인버트는 감소하였다. 반대로 수위 상승 시 천단에 작용하는 토압은 감소하고 인버트는 증가하였다.

Fig. 9와 같이 지하수위 아래 건설된 다목적 터널에는 지반 상재하중 P_0, 구조물의 자중 G_c, 내수압 P_{w-In}, 외수압 P_{w-out}이 작용한다. 수로터널에서 도로터널로 기능전환이 이루어짐에 따라 내수압이 제거되면 외수압에 의한 부력영향이 증가하여 구조물이 부상한다. 이 때 천단에는 압축력이 작용하여 응력이 증가하고 인버트는 인장력이 작용하여 응력이 감소한다.

내부수위를 반복적으로 상승·하강시켰을 때 천단과 인버트에 작용하는 토압은 외부수위를 반복적으로 변화시켰을 때와 마찬가지로 감소하는 경향을 보였으며 그 영향은 인버트에서 더 크게 나타났다.

Fig. 10은 내부수위 반복변화에 따른 지표변위를 나타낸 그림이다. 반복횟수가 증가할수록 지표변위는 더 크게 계측되었다.

Kim et al. (2015)은 장기적인 시간이 경과하면 지반과 터널 구조물의 결합력이 감소한다는 사실에 기초하여 이를 터널 주변지반의 강성을 저하시키는 수치해석 모델링을 채용하여 분석하였다. 터널 외부수위 및 내부수위의 반복변화 실험결과를 종합하였을 때 반복 수위변화에 의한 토압 감소는 주변지반의 이완영역 증가로 발생하는 강성저하로 볼 수 있고 수치해석의 모델링 조건은 적합하다고 판단할 수 있다.

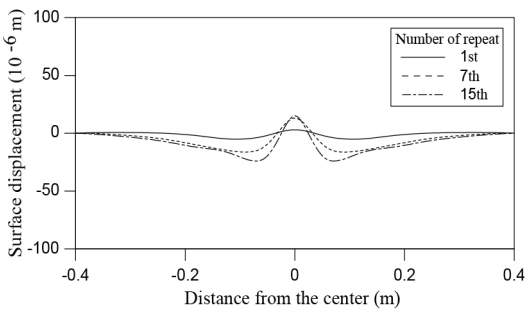


Fig. 10. Displacement of ground surface due to repeated flow in tunnel

3. 수치해석

모형실험은 현장조건의 다양한 경계조건 및 물성변화를 재현하기에 한계가 있다. 단순화한 모형실험을 통하여 분석한 수로·도로 다목적 터널의 수위변화에 따른 거동특성의 정당성을 확인하기 위해 수치해석을 수행하였다. 수위변화에 따른 토압변화와 지표변위를 비교하여 경향의 유사성을 검토하고 실제규모 터널에 대한 부력거동을 수치해석적으로 조사하였다. 또한 모형실험에서 계측하지 못한 수압 및 유효응력 변화를 분석하여 보다 다양한 거동 영향특성을 파악하고자 하였다.

3.1 모델링

해석모델은 토사지반에서의 직경 14 m 원형터널을 가정하였다. 터널 심도는 천단부를 기준으로 14 m로 설정하였으며 수리영향을 최소화하기 위해 모델경계는 측면부 15D (D=터널직경), 하부 10D로 설정하였다(Shin, 2015). 지반물성은 풍화토 지반을 가정하였으며 지반 거동을 Mohr-Coulomb 모델로 표현하였다. 경계조건은 좌우측 수평방향 변위구속, 하부는 수평방향과 연직방향 변위구속 조건을 적용하였다. 터널의 배수조건 모델링은 배수공 위치의 절점에 간극수압 0 조건을 적용하여 모사하였다. 외부수위 증가는 외부경계의 절점수두를 선형적으로 증가시켰으며, 해석모델 최하부로부터 지표면까지의 수위상승을 고려하였다. 내부수위 변화는 라이닝 내부에 압력하중을 재하·제거하는 방식으로 모사하였다. 응력-간극수압 연계해석을 수행하기 위하여 유한요소 해석프로그램인 MIDAS GTS를 사용하였다. 해석모델은 폭 420 m, 높이 168 m를 적용하였으며 Fig. 11에 나타내었다.

3.2 수치해석 결과

Fig. 12에 외부수위 증가에 따라 터널 천단 및 인버

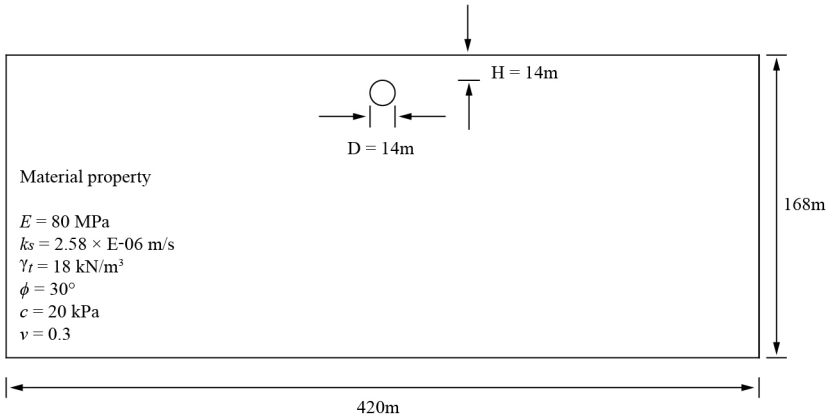
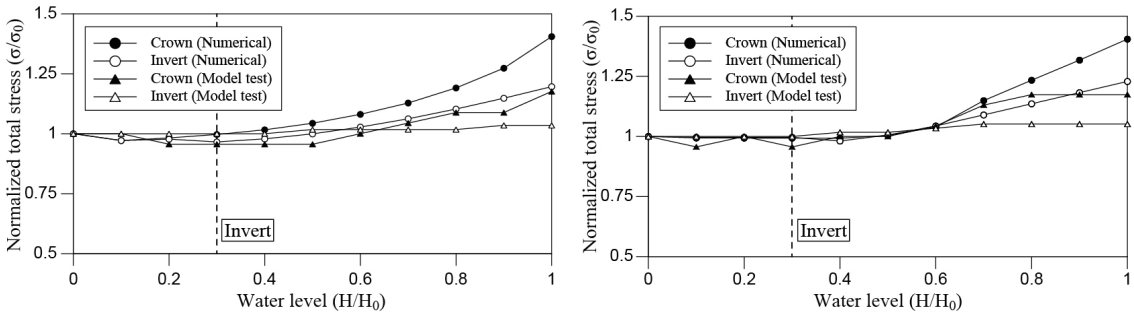


Fig. 11. Analysis model



(a) Drained condition (b) Undrained condition

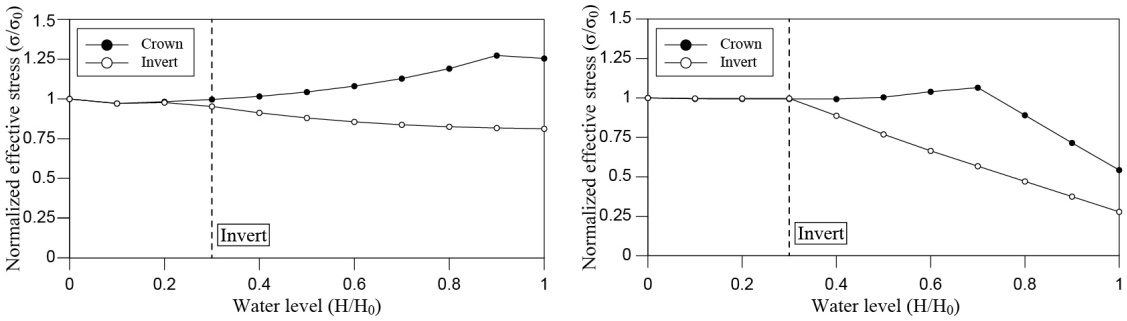
Fig. 12. Total stress change due to rising of ground water table

트에 작용하는 토압변화를 모형실험 결과와 비교하여 나타내었다. 터널에 작용하는 토압과 지하수위를 정규화하여 모형실험결과와 수치해석 결과를 비교하였다. 여기서 H_0는 지표면을 기준으로 3D 심도에 위치한 지하수위, σ_0는 지하수위가 H_0일 때 터널에 작용하는 응력이다. $H/H_0=0$은 지하수위가 지표면을 기준으로 3D 심도, $H/H_0=1$은 지표면에 위치하고 있음을 나타낸다.

수치해석 결과 증감량에서 차이가 발생했지만 모형실험 결과와 마찬가지로 인버트까지 수위가 상승했을 때를 기점으로 인버트와 천단에 작용하는 토압이 증가하는 경향을 보였다. Fig. 13의 유효응력 변화를 보면 천단에 작용하는 전응력이 증가하기 시작했을 때 유효응력도 같이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 천단에 수위영향이 없음에도 부력영향으로 인한 구조물의 상향거동으로 천단의 응력이 증가했음을 알 수 있다. 수위가 지표면까지 상승했을 때 비배수형 터널의 인버트에 작용하는 유효응력은 수압의 영향으로 천단에 작용하는 유효응력보다 작게 나타났다.

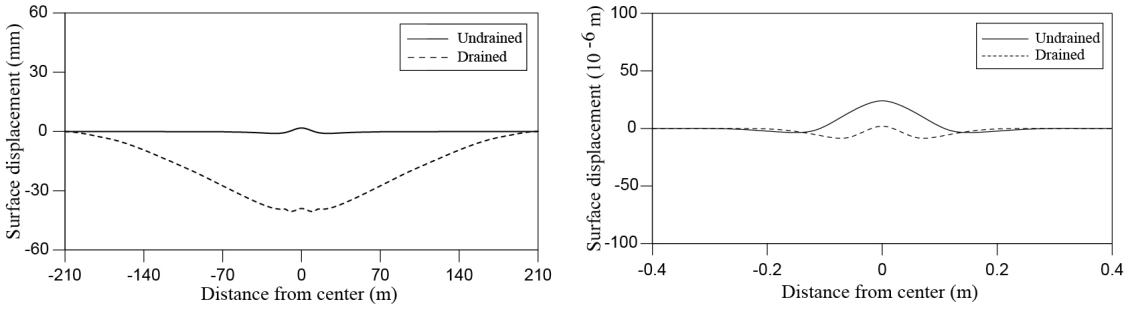
터널 인버트와 천단에 작용하는 수압의 차가 구조물에 부력으로 작용하게 되며 터널 상부지반의 자중에 의한 유효응력이 부력에 대해 저항하게 된다. 비배수형의 경우 배수형에 비해 부력영향이 크고 상재하중이 작아 부력에 대한 안정성이 작다고 판단된다.

Fig. 14에 지하수위가 지표면까지 상승했을 때 배수형 터널과 비배수형 터널의 지표변위를 비교하여 나타내었다. 수치해석 결과 배수조건에 관계없이 터널의 상향거동으로 인해 지표 중앙부에서 융기가 나타



(a) Drained condition (b) Undrained condition

Fig. 13. Effective stress change due to rising of ground water table (Numerical analysis)



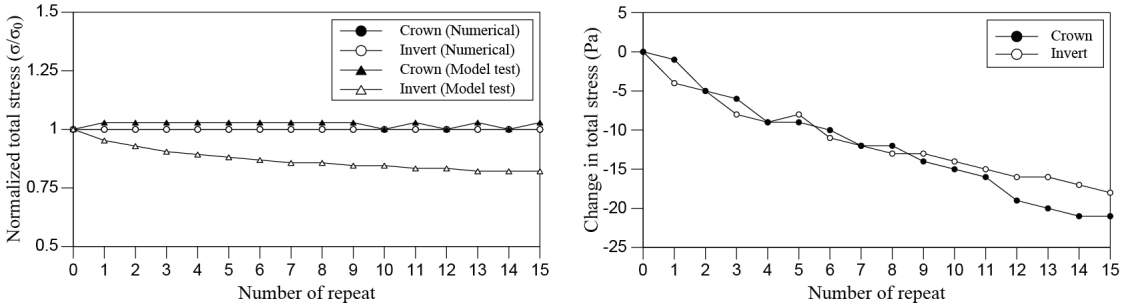
(a) Numerical analysis (b) Model test

Fig. 14. Displacement of ground surface due to rising of ground water table

났다. 하지만 배수형 터널의 경우 모형실험에서 관찰한 터널부가 주변부보다 덜 침하한 경향은 동일하였으나 터널 규모증가에 따라 배수에 따른 지반의 단위중량 증가효과가 침하를 야기하여 전반적인 융기가 아닌 침하거동을 보였다.

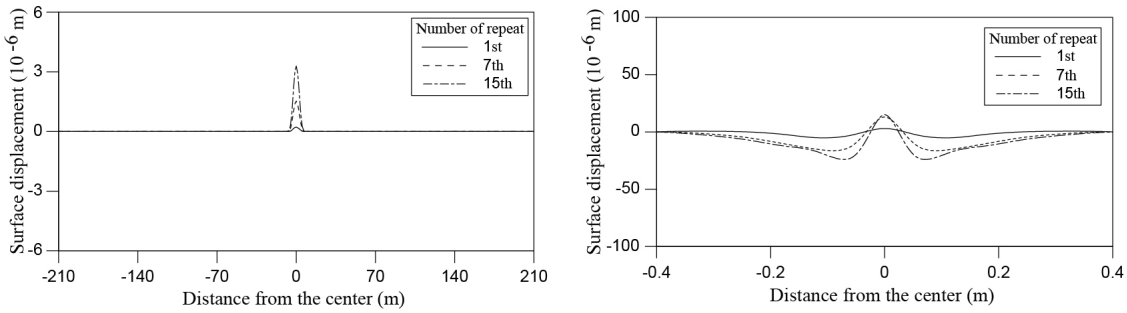
수치해석의 경우 수위변화에 따른 지반의 유효응력 저감영향이 과대하게 예측되었다. 이러한 거동은 균질·등방의 연속해 거동을 전제로 한 수치해석 결과로 나타난 거동으로서 실제 거동과 유사한 거동으로 추론할 수 있다.

비배수형 터널에서 지하수위가 지표면에 위치하고 있을 때 터널 내부에 반복적으로 압력하중을 재하·제거함에 따라 발생하는 천단 및 인버트에 작용하는 토압변화와 지표변위 변화를 Fig. 15와 Fig. 16에 나타내었다. 수치해석 결과 내수압이 제거되었을 때 천단의 토압은 증가하고 인버트의 토압은 감소하는 경향과 내수압의 반복횟수가 증가할수록 지표변위가 증가하는 경향은 모형실험과 동일하게 나타났다. 하지만 내수압이 반복됨에 따라 발생하는 천단과 인버트의 토압 감소량과 지표변위 증가량은 수치해석에서 매우 미소하게 나타났다. 부력영향으로 터널 구조물이 상향거동을 하면 천단의 경우 지속적으로 압축력이 작용하지만 인버트의 경우 하부지반은 중력방향으로 힘이 작용하고 구조물은 수압에 의해 상향력을 받기 때문에 구조물과 지반의 상대거동 영향이 천단에 비해 크다. 종래의 유한요소법을 이용한 수치해석의 특성 상 구조물과 지반의 상대거동을 유사하게 모사할 수 없고 지반거동을 탄성-완전소성 모델로 표현하였기 때문에 모형실험 결과와 차이를 보인 것으로 판단된다.



(a) Effect of repeated inner water pressure (b) Numerical analysis

Fig. 15. Total stress change due to repeated flow in tunnel



(a) Numerical analysis (b) Model test

Fig. 16. Displacement of ground surface due to repeated flow in tunnel

4. 결 론

모형실험 및 수치해석을 통하여 토사지반에 건설된 수로·도로 다목적 터널의 기능전환과 지하수위 변화에 따른 거동을 조사하였다. 터널의 거동을 구속하지 않고 터널 내에 유입·유출이 가능하게 모형을 제작하여 수위변화에 따른 터널거동을 조사하였으며 모형실험 결과를 수치해석적으로 재현하여 다양한 수리-구조적 터널 거동특성을 분석하였다.

연구결과 터널은 외부지하수위가 증가함에 따라 부력영향을 받게 되고 구조물은 상향거동이 발생하여 천단과 인버트에 작용하는 토압(전응력)이 증가하였다. 또한 지하수위 아래에 건설된 터널의 반복적인 내부수위 변화는 터널에 반복하중으로 작용하여 터널 인접지반의 이완영역을 확대시키고 구조물과 지반의 결합력 저하를 야기할 수 있음을 확인하였다. 반복적인 터널 내부 및 외부 수위변화에 따른 수압의 영향은 비배수형 터널이 배수형 터널에 비해 크며, 특히 터널 천단보다 인버트에서 그 영향이 크게 나타났다. 하지만 지반거동을 탄성-완전소성 모델로 표현하였고 유한요소법을 이용한 수치해석의 특성 상 구조물과 지반의 상대거동을 정확하게 모사할 수 없었다.

모형실험과 수치해석을 통하여 확인된 터널에 작용하는 토압과 지표변위의 수위변화에 따른 변화량은 미소하게 나타났다. 하지만 수로·도로 다목적 터널의 장기적 운영 중 구조물에 반복적으로 발생하는 수압변화는 지반과 구조물의 열화로 이어질 가능성이 있음을 확인하였다. 따라서 다목적 터널의 설계는 수위변화에 대한 영향검토가 필요하며 경우에 따라 저항성을 유지시킬 수 있는 대책의 검토가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2014년 건설기술연구사업의 '대심도 복층터널 설계 및 시공 기술개발(16SCIP-B089409-03)' 연구단과 National Research Foundation of Korea under Research Project 2015R1A2A1A05001627의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. Brekke, T.L., Ripley, B.D.. (1987), "Design guidelines for pressure tunnels and shafts", EPRI Report, AP-5273 Research Project 1745-17.
2. Cheuk, C.Y., White, D.J., Bolton, M.D. (2008), "Uplift mechanisms of pipes buried in sand", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 134, No. 2, pp. 154-163.
3. Choi, C.U. (2006), "A study on the design of underground structures in the consideration of the uplift pressure", Master's dissertation, University of Seoul, Graduate School.
4. Firouzian, S., Vahdatirad, M.J., Barari, A., Rezaei, D. (2009), "Modeling of the uplift response of buried pipelines", Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 14, pp. 1-15.
5. Kim, H.J., Kim, H.A., Joo, E.J., Shin, J.H. (2015), "Review the buoyancy effect of the double deck tunnels during operation", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 17, No. 6, pp. 301-314.
6. Kim, N.Y., Kim, H.J. (2012), "Overseas case study regarding underground roads", Geoenvironmental Engineering, Vol. 13, No. 5, pp. 13-21.
7. Korea Rail Network Authority (2013), "Railway design standard for roadbed".
8. Kwon, S.H., Kim, J.H., Chung, G.H. (2015), "Prorosal of design criteria on multi-functional tunnel for the urban traffic tunnel to flooding bypass", Journal of the Korea Academia-Industrial, Vol. 16, No. 5, pp. 3518-3524.
9. Liu, X.Y., Yuan, D.J. (2015), "Mechanical analysis of anti-buoyancy safety for a shield tunnel under water in sands", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 47, pp. 153-161.
10. Shin, J.H. (2015), Geomechanics & Engineering Ⅱ, pp. 301-314.
11. Shin, J.H., Shin, Y.S., Ahn, S.R., Park, D.I. (2006), "A study on the long-term behavior due to the hydraulic interaction between ground water and tunnel", Korean Geotechnical Society Spring Conference 2006, pp. 239-248.
12. White, D.J., Barefoot, A.J., Bolton, M.D. (2001), "Centrifuge modelling of upheaval buckling in sand", International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, Vol. 2, No. 1, pp. 19-28.