

라이닝-지반 수리상호작용이 해저터널에 미치는 영향

신중호^{1*}, 박동인², 주은정³

Effect of hydraulic lining-ground interaction on subsea tunnels

Jong-Ho Shin, Dong-In Park, Eun-Jung Joo

Abstract One of the most important design concerns for undersea tunnels is to establish design water load and flow rate. These are greatly dependent on the hydraulic factors such as water head, cover depth, hydraulic boundary conditions. In this paper, the influence of the hydraulic design factors on the ground loading and the inflow rate was investigated using the coupled finite element method. A horse shoe-shaped tunnel constructed 30 m below sea bottom was adopted to evaluate the water head effect considering various water depth for varying hydraulic conditions and relative permeability between lining and ground. The effect of cover depth was analysed for varying cover depth with the water depth of 60 m. The results were considered in terms of pore water pressure, ground loading and flow rate. Ground loading increases with an increase in water head and cover depth without depending on hydraulic boundary conditions. This points out that in leaking tunnels an increase in water depth increases seepage force which consequently increases ground loading. Furthermore, it is identified that an increase in water head and cover depth increases the rate of inflow and a decrease in the permeability ratio reduces the rate of inflow considerably.

Keywords: Hydraulic boundary conditions, Cover depth, Water head, Subsea tunnel, Numerical analysis

요 지 라이닝 작용수압과 유입량은 지하수 수위 아래 혹은 하·해저터널 설계시 중요하게 고려되어야할 수리요소이다. 이 요소들은 수심, 심도, 수리경계조건의 영향을 받는다. 본 논문에서는 각 설계요소가 라이닝하중과 유입량에 미치는 영향을 수치해석적 도구를 이용하여 살펴보았다. 수심영향해석은 심도 30 m에 건설된 마제형 터널에 대하여 수심과 라이닝/지반 상대투수계수 비를 다양하게 변화시켜 조사하였고, 심도영향 해석은 수심 60 m의 터널에 대하여 심도 및 라이닝/지반 상대투수계수 비를 변화시켜 해석하였다. 해석결과 수리경계조건과 상관없이 수심 및 심도가 증가함에 따라 지반하중이 증가하였다. 이는 배수터널은 침투력의 영향으로, 비배수 터널은 정수압의 영향으로 수두가 증가함에 따라 지반하중이 증가함을 보여준 것이다. 수심, 심도의 증가에 따라 유입량은 선형적으로 증가하였으며, 라이닝/지반 상대투수계수비와 유입량관계는 펼쳐진 S자 곡선(stretched S-curve)형태로 나타남을 확인하였다.

주요어: 수심, 심도, 수리경계조건, 해저터널, 수치해석

1. 서 론

부족한 육상공간의 대체 혹은 대륙-대륙, 대륙-섬간을 연결하기 위해 해저터널에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 지하수의 영향을 받는 터널설계에 있어 물과 관련하여 다음 두 가지의 문제가 고려되어야 한다. 그 첫째는 터널내로 유입되는 물을 처리 혹은 배제할 수 있어야 하며, 둘째는 터널라이닝에 작용하는 수압을 지지할 수 있도록 라이닝을 설계함으로써 구조물의 안정성을 확보하여야 한다. 그러므로 터널내 유입량, 터널 라이닝 발생수압 이 두 가지 사항은 해저터널에서 주요

한 수리요소가 된다. 통상적으로 유입량을 최대한 허용하고 라이닝에 수압이 작용하지 않는 터널을 배수터널이라고 하며, 터널내로의 물의 유입을 허용하지 않고 정수압의 수압하중을 견딜 수 있게 라이닝을 설계하는 터널을 비배수 터널로 구분 짓는다.

터널공학에서 비배수 터널과 배수터널의 이점에 대한 논쟁이 지속되어오고 있다. Ward and Pender(1981)는 현장계측 데이터에 근거하여 방수조건으로 터널을 설계 하더라도 시간이 경과함에 따라 누수가 발생하여 대부분의 터널은 배수구처럼 거동한다고 하였다. 한편, Lee et al.(1996), Lee et al.(2002)과 Shin et al.(2002)은 배수조건으로 설계된 터널의 경우에도 배수재의 압착과 폐색으로 배수시스템의 수리기능저하가 발생하고, 이것으로 인해 터널 내 유입이 저해되고 있다고 보고하였다. 이러한 점을 미루어 볼 때, 비배수 및 배수 터널은 장기적으

¹정회원, 건국대학교 공과대학 토목공학과 조교수

²(주)남원건설 엔지니어링 해외사업부

³(주)삼안 철도구조부

*교신저자: 신중호 (jshshin@konkuk.ac.kr)

로 초기의 설계개념이 유지되지 않음을 확인할 수 있다. 또한 Curtis et al.(1976)와 Atkinson and Mair(1983)는 터널주변의 변형율이 무시할만하고 흐름이 방사형일 경우 침투력으로 인해 배수터널과 비배수터널 라이닝에 작용하는 하중이 동일하다고 하였다.

수면하의 터널건설은 주변 지반의 수리환경에 영향을 미치며, 터널내로의 침투력을 발생시킨다. 그림 1은 라이닝을 설치하지 않을 때와 라이닝을 설치할 때 해저터널의 주변에 분포하는 침투력의 개념도를 나타낸 것이다. 완전배수 흐름특성을 보이는 터널에서는 그림 1(a)와 같이 라이닝에 수압이 발생하지 않는다. 그러나 터널 내 유입으로 주변지반의 유효응력을 증가시키는 침투력이 발생하며, 라이닝에 추가응력을 발생시키는 변위가 발생한다. 그림 1(b)와 같이 터널 라이닝 설치 시, 라이닝에 수압이 발생하는 대신 주변 지반에 발생하는 침투력은 감소한다. 더 나아가 라이닝의 투수성이 주변 지반에 비하여 상대적으로 더 작아지면 라이닝은 완전방수와 같은 수리거동을 보인다. 완전방수조건과 같은 수리조건이 형성되면 터널의 주변지반에서 수두손실이 발생하지 않으며, 침투력은 라이닝에 집중되어 수압은 라이닝에 직접적으로 작용하게 된다.

이미 건설되어 운영 중인 세이칸터널이나 영불 해협터널의 경우 라이닝 하중저감을 위한 다양한 개념의 수리경계조건이 채택되었다. 그러나 건설 후 상당한 시간이 경과하면서 유입량 증가 등 여러 가지 문제점이 노정되는 사례도 있어, 이러한 현황여건을 고려하는 해저터널의 하중산

정기준에 대한 체계적 검토와 연구의 필요성이 제기되어 왔다. 해저터널은 지반조건 불확실성으로 인해 많은 어려움을 내포한다. 또한 라이닝 및 배수시스템은 부분배수 조건에 있는 경우도 많다. 따라서 발주자, 설계자, 계약자들은 라이닝을 설계함에 있어 배수조건에 따라 발생하는 이익에 많은 관심을 갖게 된다. 그러나 불행하게도 해저터널에서 복잡한 수리경계조건과 거동을 파악하기 위해서는 장기간의 시간이 필요하며, 모델시험도 용이치 않아 지반과 터널과의 수리상호작용 파악에 어려움이 있다.

본 논문에서는 변위-간극수압 연계 수치해석법(coupled finite element analysis)을 이용하여 다양한 수리경계조건에 대하여 터널과 지반의 수리-구조적 상호관계를 확인하여 해저터널의 거동 특성 및 설계개념 확립을 도모하고자 하였다.

2. 해석모델 및 해석케이스

본 논문에서는 터널과 지반의 수리 상호작용에 대하여 다양한 위치적 요소와 수리경계조건이 미치는 영향을 수치해석적 방법으로 알아보고자 하였다. 그림 2는 본 연구에 사용된 해저터널 및 지층의 형상을 나타낸 것이다. 터널은 폭과 높이가 7.2 m인 원형에 가까운 마제형터널로서 라이닝 두께는 0.2 m로 설정하였다. 모델 경계조건에 의한 영향을 배제하기 위해서 모델링의 폭은 터널 지름의 약 28배인 200 m로 하였다. 그림 2에 보이는 바와 같이 지반은 4가지 지층으로 이루어져 있으며, 지반

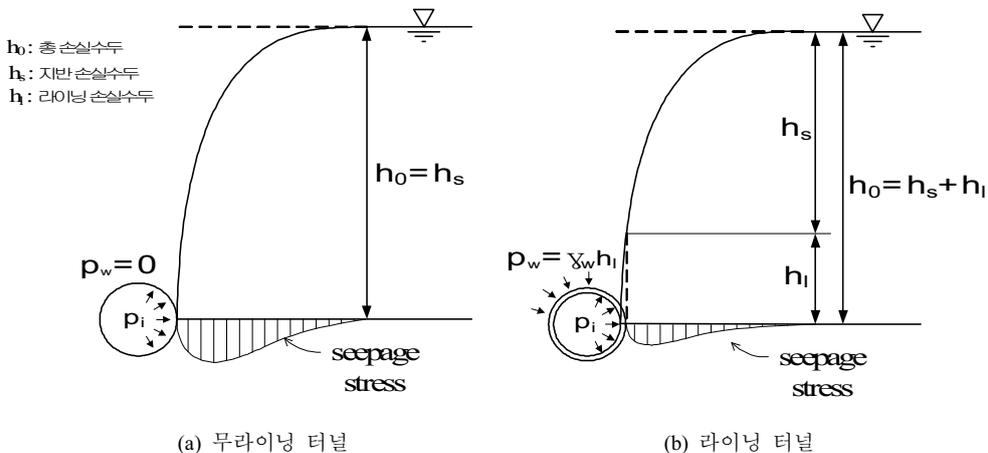


그림 1. 해저터널에서의 침투력 분포

의 구성모델은 선형 등방탄성과 비연합(non-associated) Mohr-Coulomb 모델을 사용하였고 투수모델은 등방 선형으로 가정하였다. 해석은 Biot's 압밀이론을 기초로 하는 변위-간극수압 연계 수치해석을 수행하였다(Potts and Zdravkovic, 1999). 라이닝과 지반의 수리상호작용을 모델링하기 위하여 구조적 거동과 수리거동을 하는 조합요소를 이용하였다(Shin et al., 2005).

해저터널의 거동을 분석하기 위해 수심(H_w), 심도(C), 수리경계조건을 달리하여 해석을 실시하였다. 그림 3(a)는 심도가 30 m인 터널에 대하여 수심을 20 m에서 80 m로 변화시켜 4가지의 수심에 대하여 모델링한 것이다.

또한 그림 3(b)는 대심도 조건하의 경암층에 건설되는 해저터널로 심도가 50 m~150 m로 변화하는 것으로 3가지의 해석 케이스를 설정하였으며 수심은 60 m로 고정하였다. 또한 수리경계조건의 영향을 조사하기 위하여, 2개의 극단적인 조건(완전배수, 비배수)과 3가지의 부분배수 조건에 대하여 해석을 수행하였다. 부분배수 조건은 라이닝의 투수계수 k_l 과 지반의 투수계수 k_s 의 상대투수계수 비(k_l/k_s)를 0.1, 0.01, 0.001로 변화시켜 모사화 하였다. 라이닝과 지반의 상대투수계수 비의 저하는 실제터널에서 배수시스템의 기능저하나 흐름의 제약으로 인한 영향을 반영한 것이다.

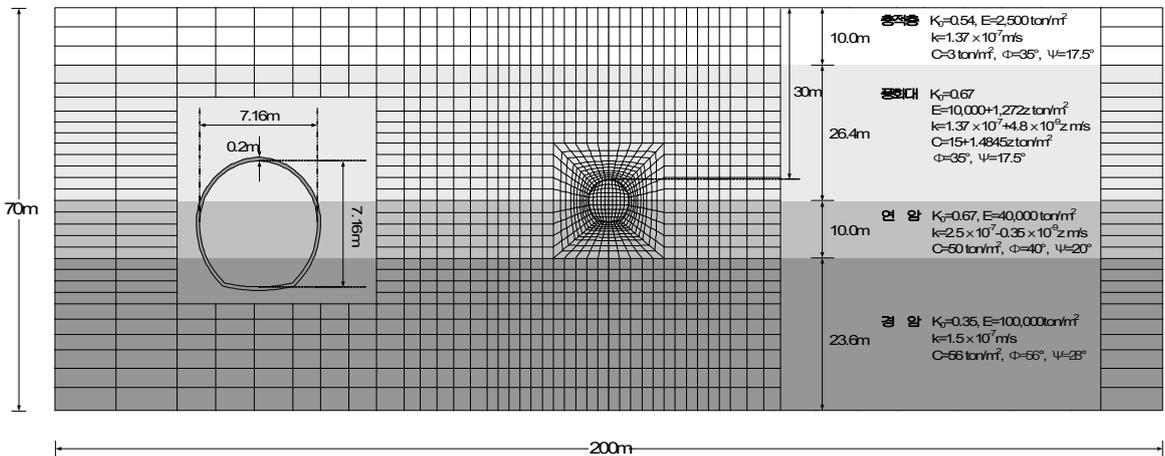


그림 2. 터널 및 지층구성도

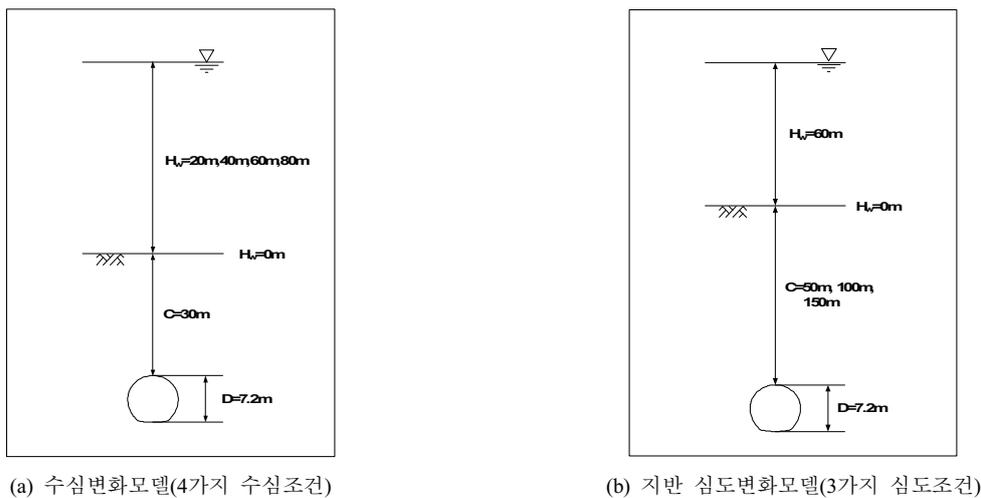


그림 3. 해석케이스

3. 해석결과 분석

3.1 간극수압분포

해저터널에서 주변지반의 흐름특성을 파악하기 위하여 간극수압분포를 확인하였다. 비배수터널의 간극수압 분포는 정수압을 보일 것이다. 그러나 배수터널의 주변 지반에서의 간극수압 분포는 수리경계조건에 따라 달라질 것이다. 그림 4는 수심이 60 m이고 완전배수 흐름 발생 시 다양한 침도에 따른 간극수압 분포를 보인 것이다. 침

도가 증가함에 따라 라이닝 주위의 간극수압 분포가 조밀 해지며 수압감소가 급격해지며 주변흐름은 방사형에 가까워짐을 알 수 있다. 간극수압의 변화가 급격한 곳은 동수경사가 크므로 입자의 유실이 발생할 가능성이 높다.

3.2 수리영향 범위(control volume)

수면하의 터널 건설은 터널 주변의 수리환경의 변화를 초래한다. 수리영향 범위는 “Control Volume”이라 하며 수리영향 범위의 설정은 매우 중요하다. 그 이유는

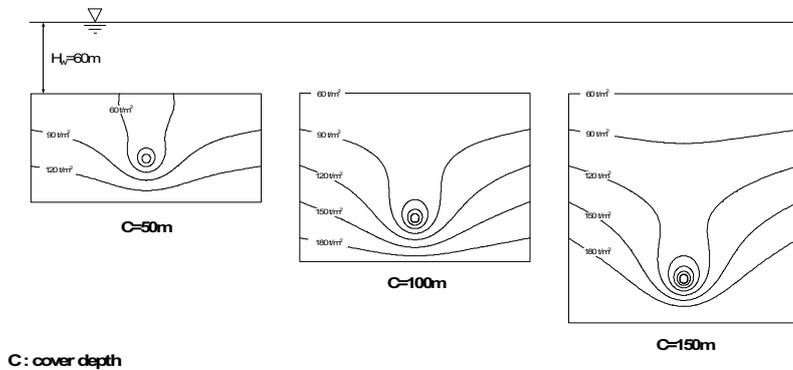
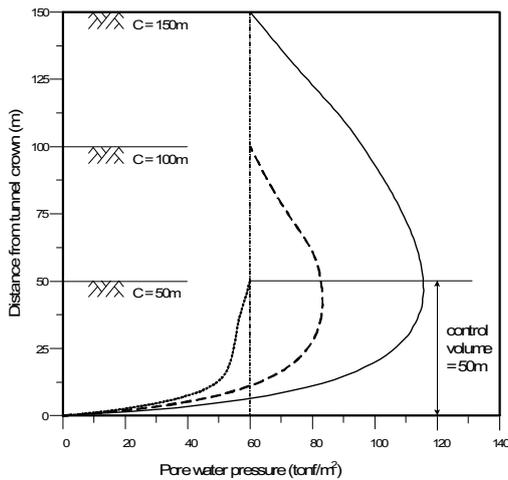
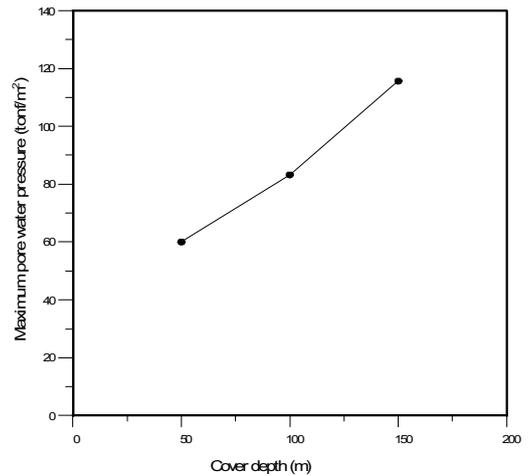


그림 4. 간극수압분포



(a) 간극수압분포



(b) 침도-최대수압

그림 5. 터널 천단-지표 간 간극수압분포

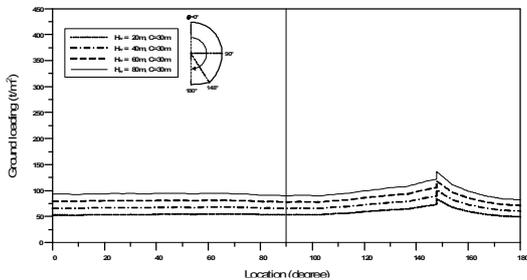
수리영향 범위 내 주변지반에 발생하는 침투력이 라이닝에 직접적인 하중으로 작용하기 때문이다. 그림 5(a)는 다양한 심도에 따라 터널 천단-지표 간 간극수압 분포를 나타낸 것이다. 초기의 정수압은 터널 천단에서 약 50 m 위에서부터 감소한다. 이것은 수리영향 범위를 형성하는 최소 심도가 본 논문에서 다룬 해석조건인 경우 약 50 m임을 보여준다. 그림 5(b)는 심도에 따른 수리영향 범위 내에 발생하는 최대 간극수압을 나타낸 것으로 심도가 커질수록 수압이 증가함을 볼 수 있다. 이것은 심도가 증가하더라도 수리영향 범위는 크게 변하지 않으나 최대 간극수압증가로 인해 침투력이 증가함을 확인할 수 있다.

3.3 지반하중(ground loading)

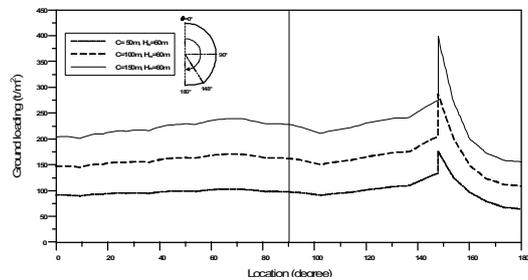
그림 6(a)는 비배수 터널에서 각각의 수심에 대한 지반하중을 나타낸 것으로, 여기서 지반하중이란 라이닝에 작용하는 전체하중을 의미한다. 수심이 증가할수록 지반하중이 확연히 증가함을 알 수 있다. 또한 수심의 변화와 상관없이 터널의 우각부에서 지반하중이 급격히

증가하여 최대 하중이 작용함을 확인할 수 있다. 그림 6(b)는 각각의 수심조건에서 비배수 터널의 지반하중이 배수터널의 지반하중에서 차지하는 비율을 나타낸 것이다. 비배수/배수조건의 지반하중 비는 수심의 영향을 거의 받지 않으며 스프링 라인에서 약 110%이내인 것으로 확인이 된다. 이는 해저터널에서 배수와 비배수 터널 간의 지반하중의 차이는 크지 않음을 시사한다.

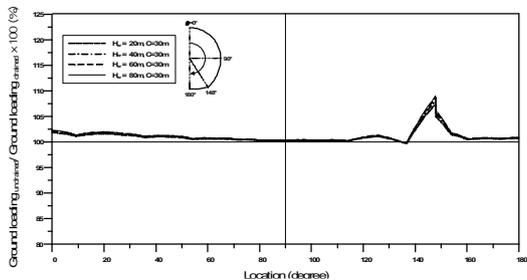
심도와 수리경계조건이 터널 지반하중에 미치는 영향을 확인하기 위하여 그림 7과 같이 심도에 따른 비배수 시 지반하중과 비배수/배수 지반하중 비를 확인하였다. 심도의 증가는 총 수두의 증가를 야기하므로 그림 7(a)와 같이 지반하중도 크게 변화함을 보였다. 반면, 비배수/배수조건의 지반하중 비는 심도의 영향을 거의 받지 않고 그림 7(b)와 같이 약 120% 이내로 나타남을 보였다. 위 두 가지 현상으로 미루어 볼 때 수리경계조건보다 총 수두가 지반하중 증가를 야기함을 알 수 있다. 이는 배수조건인 경우 라이닝 주변 지반에 발생하는 침투력의 영향으로, 비배수 조건인 경우는 정수압의 영향으로 수위 증가에 따라 라이닝에 작용하는 하중이 증가하기



(a) 비배수조건인 지반하중

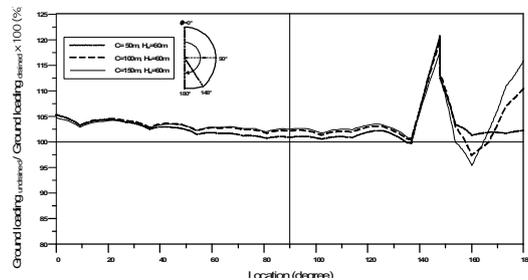


(a) 비배수조건인 지반하중



(b) 비배수/배수 지반하중 비

그림 6. 수심변화에 따른 지반하중 ($C=30$ m)



(b) 비배수/배수 지반하중 비

그림 7. 심도변화에 따른 지반하중 ($H_w=60$ m)

때문이다. 총 수두가 110 m일 때, 비배수/배수의 최대하중 비는 심도가 일정할 때(그림 6(b))는 110%인 반면 수심이 일정할 때(그림 7(b))는 120%인 것으로 나타났다. 이것은 총 수두가 같은 배수터널에서 침투력 발생에 수심 영향이 심도영향에 비해 더 큼을 보인 것이다.

3.4 수압의 지반하중 구성비

라이닝에 발생하는 간극수압은 터널내로의 유입을 발생시킨다. 그러므로 수리경계조건에 따른 지반하중의 차이가 확연하지 않더라도, 지반하중에 차지하는 간극수압의 구성비는 중요하게 고려되어야 한다. 배수조건인 경우 배면 간극수압이 0이므로 지반하중은 모두 유효응력이다. 하지만 비배수조건과 부분배수조건인 경우 작용하중은 유효응력과 수압의 합이다. 그림 8과 9는 상대투수계수 비(k_t/k_s)가 0.01일 때 수심 및 심도변화에 따른 수압과 수압/지반하중 비를 나타낸 것이다. 수압은 수심 및 심도가 증가함에 따라 증가하는 특성을 보였으나, 수압이 하중에 차지하는 비율은 수심은 증가할수록 심도는 감소할수록 커짐을 알 수 있다. 이는 심도증가로 인해 증가하는 수압의 크기보다 지반하중의 증가량이

더 크기 때문이라 판단된다. 또한 총 수두가 110 m 일 때 심도가 큰 터널에서 곡률반경이 큰 인버트부에서 부분적으로 수압의 하중구성비가 100%가 넘는 것을 확인할 수 있다. 이것은 라이닝과 주변 지반 간에 인장력이 발생함을 의미하는 것으로, 지반이 인장력에 대한 저항성이 적기 때문에 터널 라이닝과 지반의 분리가능성을 시사하는 것으로 이해할 수 있다. 그러나 라이닝과 지반 간 거동을 전면접착(full contact)으로 모델링함에 따른 인장력 발생인지 실제거동이 이와 같을지는 보다 심층적 연구가 필요하다.

그림 10은 수리경계조건에 따라 수압 및 지반하중에서 수압이 차지하는 구성비를 나타낸 것이다. 수심에 상관없이 라이닝 투수성이 증가함에 따라 수압의 하중구성비가 감소함을 알 수 있다. 그러나 그림 6, 7에서 설명한 바와 같이 수압의 하중구성비가 감소가 하중의 감소를 의미하지는 않는다. 다만 지반하중의 크기에는 큰 변화 없이 지반하중에서 수압이 차지하는 구성비만 변화함을 보였다.

또한 그림 10에서 라이닝이 불투수성이거나, 투수성이 작을 때는 수압의 하중구성비가 100%를 넘어 터널

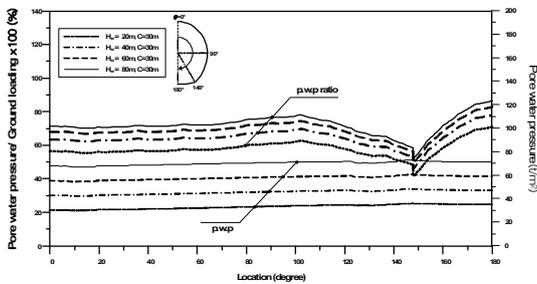


그림 8. 수심변화에 따른 수압/지반하중 비($C=30\text{ m}$, $k_t=0.01k_s$)

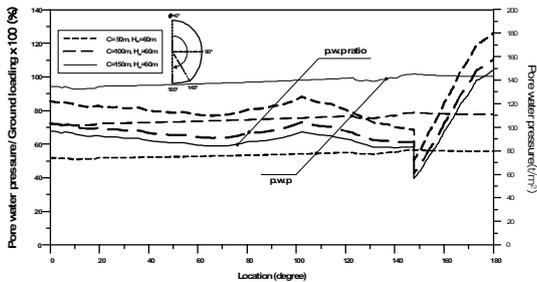
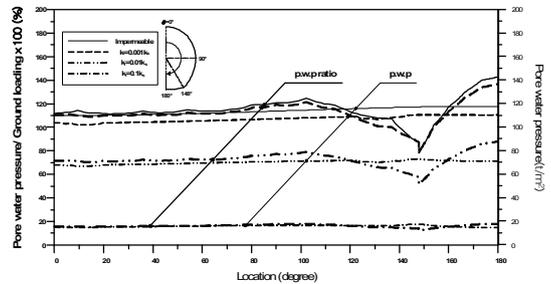
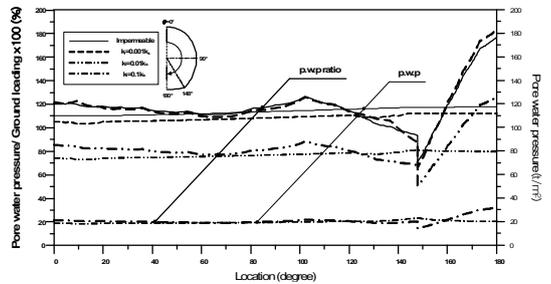


그림 9. 심도변화에 따른 수압/지반하중 비($H_w=60\text{ m}$, $k_t=0.01k_s$)



(a) $H_w=80\text{ m}$, $C=30\text{ m}$



(b) $H_w=60\text{ m}$, $C=50\text{ m}$

그림 10. 수리경계조건에 따른 수압 및 수압/지반하중 비

라이닝과 지반사이에서 인장상태가 발생함을 확인할 수 있다. 이러한 거동은 총 수두가 50~70 m이상의 터널에서 나타났다. 그러나 지반라이닝 상대투수계수 비가 0.1보다 큰 경우에는, 총 수두가 130 m 이상이 되어도 이러한 인장상태가 발생하지 않았다. 이것은 구조적으로 가능한 비배수터널 깊이가 60 m(Dimitrios, 2005) 임을 감안할 때 매우 흥미로운 결과다.

3.5 유입량

터널 내 유입량은 라이닝에 발생하는 수압과 반비례 관계에 있다. 유입량은 터널경계면의 수리경계조건에

따라 현저하게 달라진다. 그림 11은 다양한 수심과 심도에 따른 터널 내 유입량을 보인다. 터널 내 유입량은 총 수두에 따라 선형적으로 증가함을 나타내었다. 동일 전수두에 대하여 심도일정조건($C=30$ m)인 경우 더 큰 유입량을 보였다. 이는 지반 내 수두보다 직접수압으로 작용하는 수심영향이 더 크게 작용한 것으로 분석된다. 이 결과에 따르면 완전배수조건 가정 시 유입량은 전수두에 비례한다. 해저터널의 경우 전수두가 매우 크므로 완전배수형으로 설계하는 것은 타당하지 않다. 역학적으로 허용가능한 범위로 투수계수를 제어함으로써 수리구조적 최적배분을 하는 것이 중요하다.

라이닝 투수조건에 따른 유입특성을 조사하기 위하여, 부분투수성조건에 대한 영향특성을 조사하였다. 그림 12는 수리경계조건에 따라 수심 및 심도변화에 따른 유입량을 정규화 하여 나타낸 것이다. 그림 12(a)와 같이 심도가 일정할 때 수심변화와 상관없이 라이닝/지반 상대투수계수비-정규화 유입량 관계는 한 개의 펼쳐진 S자곡선(stretched S-curve)의 그래프로 나타났다. 또한 그림 12(b)와 같이 수심이 일정할 때에도 심도에 상관없이 한 개의 곡선이 형성되었다. 두 곡선에서 라이닝/지반 상대투수계수비가 0.1보다 커지면 유입변화는 완만해지며, 1.0에 접근해서는 큰 변화를 보이지 않는다. 이는 라이닝/지반 상대투수계수비가 0.1이상일 경우 지반을 통과한 만큼만의 유량이 유입되는 자유유입(free drainage) 상태와 유사해짐을 보인 것이다.

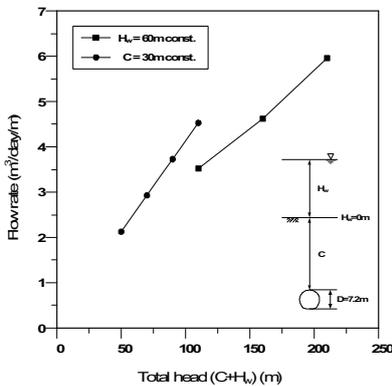
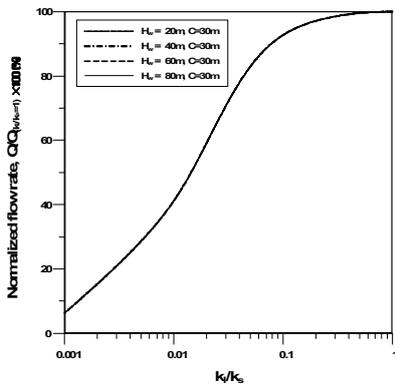
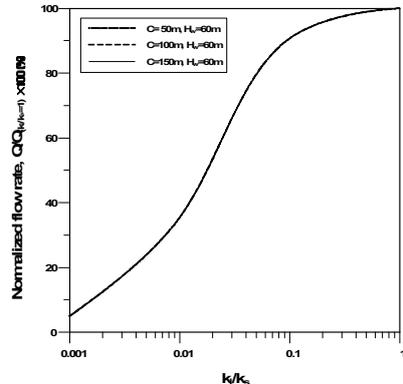


그림 11. 완전배수시 전수두에 따른 유입량 변화



(a) 수심-정규화 유입량



(b) 심도-정규화 유입량

그림 12. 수리경계조건에 따른 유입량

4. 결 론

본 연구에서는 수치해석적 도구를 이용하여 고수압 조건에 있는 해저터널에 대한 수리·구조적 거동특성을 살펴보았다. 이때 영향 인자로 수리경계조건, 침도, 수심이 고려되었다. 본 연구를 통해 확인된 라이닝과 지반의 수리·구조적 거동특성을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 침도가 증가함에 따라 방사형으로 터널 내 유입이 발생한다.
- 2) 본 논문에서 고려한 해석조건에 대하여 수리영향 범위는 터널 천단부로부터 50 m에 위치한다.
- 3) 지반하중은 수리경계조건보다 총 수두에 지배적인 영향을 받는다.
- 4) 지반하중에 대한 수압의 하중구성비는 상대투수계수 비의 영향을 받는다.
- 5) 터널의 총 수두 증가에 따라 유입량은 선형적으로 증가한다.
- 6) 해저터널의 경우 전수두가 매우 커 완전배수형으로 설계하는 것이 어려우므로 투수계수 제어를 통한 수리·구조적 최적배분의 설계개념이 필요하다.
- 7) 수리경계조건에 따른 지반하중의 차이는 미소하지만, 터널 내 유입량은 수리경계조건에 영향을 지배적으로 받는다.

따라서, 해저터널 설계 시 수리경계조건을 적절히 통제함으로써 수압하중과 유입량의 최적배분을 통한 경제적 설계를 추구할 필요가 있으며, 설계 시 수리학적 열화 와 같은 수리거동의 장기적인 영향을 조사하여야 한다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부의 첨단도시개발사업인 “해저시 설물 차폐기술 개발(과제번호: C105A 1080001-05A0508-00330)” 연구의 일환으로 수행되었으며, 건설교통부의 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Atkinson, J.H., 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. Curtis, D. J., Mott, Hay and Anderson (1976), “The circular tunnel in elastic ground”, Geotechnique, Vol. 26, No. 1, pp. 231-237.
3. Dimitrios, K. (2005), Tunnelling and tunnel mechanics, Springer, pp. 177-196.
4. Lee, I. M., Kim, J. H., Reddi, L. N. (2002), “Clogging phenomena of the residual soil-geotextile filter system”, Geotechnical Testing Journal, Vol. 25, No. 4.
5. Lee, Y.N., Byun, H.K., Shin, O.J. (1996), “Cracking of subway tunnel concrete and its repair”, Proc. Conf. on North American Tunnelling, pp. 325-329.
6. Potts, D.M., Zdravkovic, L. (1999), Finite element analysis in geotechnical engineering, Theory, Thomas Telford.
7. Shin, J.H., Addenbrooke, T.I., Potts, D.M. (2002), “A numerical study of the effect of ground water movement on long-term tunnel behaviour”, Geotechnique, Vol. 52, No. 6, pp. 391-403.
8. Shin, J.H., Potts, D.M., Zdravkovic, L. (2005), “The effect of pore-water pressure on NATM tunnel linings in decomposed granite soil”, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 42, pp. 1585-1599.
9. Ward, W. H., Pender, M. J. (1981), “Tunneling in soft ground-general report”, Proc. the 10th Intl. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Vol. 4, pp. 261-275.



신 중 호
건국대학교 공과대학
토목공학과
조교수
E-mail: jhshin@konkuk.ac.kr



박 동 인
(주)남원건설
엔지니어링 해외사업부
E-mail: camazie@nate.com



주 은 정
(주)삼안
철도구조부
E-mail: ejjoo@samaneng.com
