

NATM 터널의 배수시스템 수리기능저하가 터널 라이닝에 미치는 영향

An Experimental Study on the Effect of Malfunctioning of Drainage System on NATM Tunnel Linings

신 중 호¹ Shin, Jong-Ho

권 오 엽² Kwon, Oh-Yeob

신 용 석³ Shin, Yong-Suk

양 유 홍⁴ Yang, Yu-Hong

Abstract

One of the most sensitive design specifications to be considered is infiltration and external pore-water pressures on underground structure construction. Development of pore-water pressure may accelerate leakage and consequently cause deterioration of the lining. In this paper, the development of pore-water pressure due to malfunctioning of drainage system and its potential effect on the linings are investigated using physical model tests. The deterioration procedure was simulated by controlling both permeability and flow rate. Development of pore-water pressure was monitored on the lining using pore pressure measurement cells. Test results identified the mechanism of pore-water pressure development on the tunnel lining. In addition, they showed that controlling flow rate is more effective method for simulating deterioration procedure than permeability control. The laboratory model tests were reproduced using coupled numerical method, and showed that the effect of deterioration of drainage system can be theoretically expected using coupled numerical modeling method.

요 지

유입량과 라이닝에 작용하는 간극수압은 터널 설계시 고려해야 할 중요한 요소 중 하나이다. 간극수압의 발생은 누수를 가속화시키며 라이닝 열화를 초래한다. 본 논문에서는 모형실험을 통하여 배수시스템 기능저하로 인한 간극수압의 발생과 그 영향을 조사하였다. 배수시스템 기능저하거동은 배수재의 투수계수제어법과 유량 조절법으로 모사화하여 터널 라이닝의 잔류수압발생 메커니즘을 확인하였다. 또한, 유량제어법이 배수시스템 기능저하현상을 모사하기에 보다 더 효과적인 방법임을 알 수 있었다. 모형실험을 수치해석으로 재현한 결과, 배수시스템 기능저하로 인한 영향을 Coupled 수치 모델링을 통해 이론적으로 예측 가능함을 확인할 수 있었다.

Keywords : Coupled numerical analysis, Drainage system, Model test, Pore pressure, Tunnel

1. 서 론

국내에서 1980년대 초반 지하철 3, 4호선부터 건설되기 시작한 NATM터널의 대부분은 배수형 터널개념으

로 설계되었다. 그 중 1990년대 전반기 이전에 건설된 터널은 라이닝에 수압이 작용하지 않는다고 보고 대부분 무근의 복공 콘크리트로 설계·시공 하였다. 그러나 배수시스템 기능저하현상으로 설계시 고려하지 않았던

1 정회원, 건국대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Konkuk Univ., jhshin@konkuk.ac.kr)

2 정회원, 건국대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Konkuk Univ.)

3 정회원, 한국시설안전기술공단 진단1본부 지하시설실 실장 (Member, Chief, Dept. of Underground Facility, KISTC.)

4 정회원, (주)삼안 토질부 (Member, Geotechnical Dept., Saman Co.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

잔류수압이 발생하여 무근 복공라이닝의 장기적 안정성이 저해되고 있다. 배수시스템 기능저하의 주원인은 Lee *et al.*(2002)이 보고한 바와 같이 배수재의 압착 및 폐색 등으로 알려져 있다.

Shin *et al.*(2002) 및 Shin *et al.*(2005)은 배수시스템 수리기능 저하로 인한 잔류수압 발생메카니즘을 ‘지반-1차라이닝-배수재-2차라이닝’의 상대적 투수성을 적용한 Coupled 수치해석모델을 이용하여 설명하였다. 배수재 기능저하에 따른 지반과 라이닝 수리상호작용에 대하여, 배수시스템의 투수계수가 지반보다 작은 경우 라이닝 작용수압이 배수시스템과 지반의 상대투수성(k_f/k_s , k_f :배수시스템 투수계수, k_s :지반투수계수)에 의존하여 달라진다고 하였다. 위 사실에 착안하여 k_f/k_s 를 1.0에서 0.001까지 변화시키는 Coupled 수치해석을 수행하여 그림 1과 같은 결과를 얻었다. 위 연구 결과에 따르면

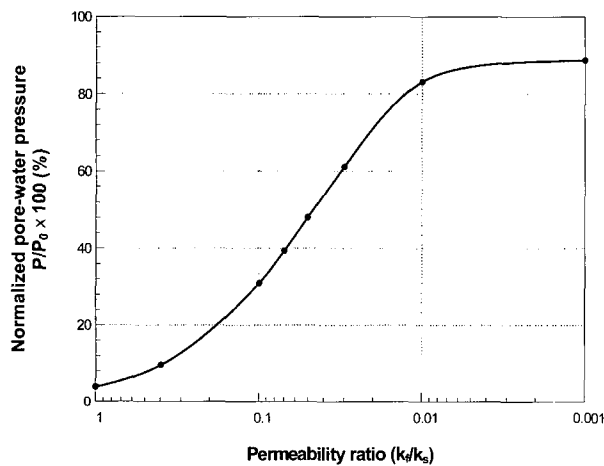


그림 1. 배수시스템 투수계수에 따른 간극수압의 변화(Shin *et al.* 2002)

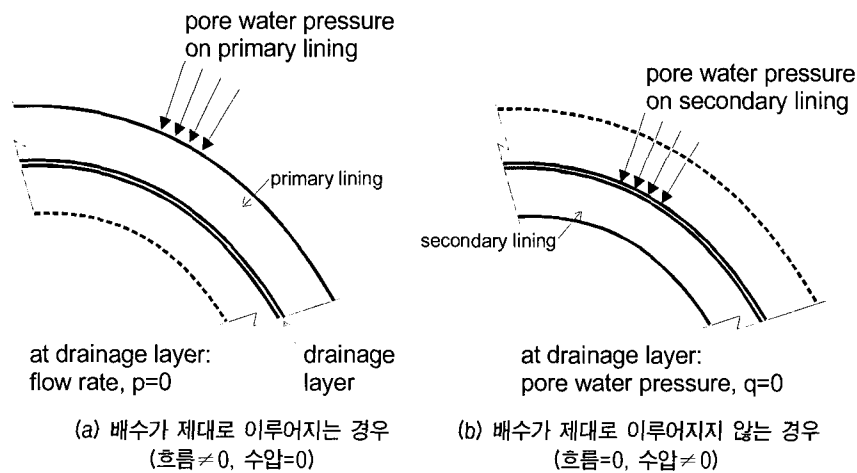


그림 2. 복공(2차) 라이닝에 작용하는 간극수압

배수시스템의 투수계수가 지반보다 1000분의 1만큼 작은 경우 라이닝에 걸리는 수압은 정수압의 90%에 이르며, k_f/k_s 가 0.1인 경우라도 정수압의 30%에 해당하는 잔류수압이 발생하게 된다. 그러나, 간극수압이 정수압의 90%까지 증가하더라도 라이닝 작용압력은 상재하중의 20%만 증가한다. 이 결론을 바탕으로 신종호(2003), 신종호 등(2005)은 1차라이닝의 간극수압 증가는 심각한 문제가 되지 않을 수 있으나 2차라이닝(복공라이닝)에 증가된 수압은 설계 시 고려대상임을 지적하였다. 그림 2와 같이 배수재의 투수성이 1차 라이닝보다 작아지는 경우, 이때 발생하는 간극수압은 2차라이닝에 작용하게 되기 때문이라고 보고하였다.

이에 본 논문에서는 그동안 수치해석적으로만 다루어졌던 배수시스템 수리기능 저하로 야기되는 잔류수압 발생메카니즘을 모형실험을 통해 규명하고 ‘지반-배수재-구조물’ 수리상호작용을 고려하는 수치해석을 통해 배수시스템의 수리기능 저하예측 모델링의 타당성을 확인하고자 하였다.

2. 배수기능저하 메카니즘에 대한 실내 모형실험

2.1 실험개요

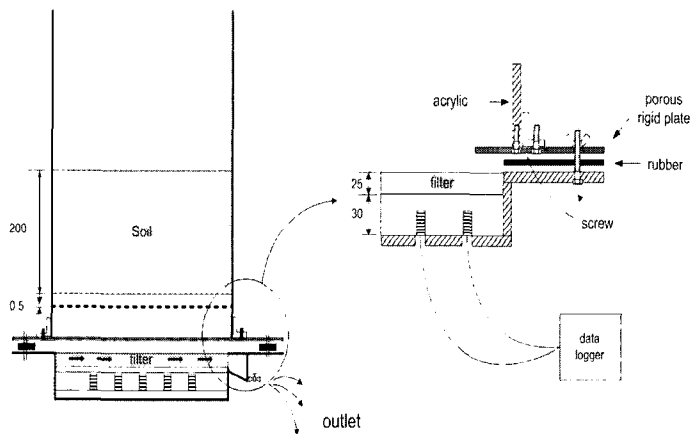
배수형 터널의 배수시스템이 압착이나 폐색 등의 원인으로 인해 배수가 원활하게 이루어지지 못하면 상대투수성의 변화에 따라 라이닝에 잔류수압이 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 배수시스템의 투수성 저하에 따라 발생하는 수압 메카니즘을 알아보기 위해 그림 3과 같은 모형실험장치를 고안하여 터널 내 지하수의

흐름을 모사화 하고자 하였다.

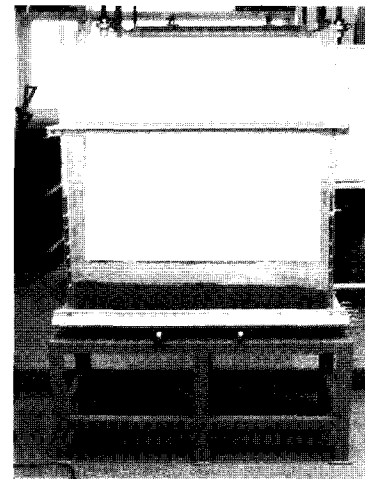
실험장치는 부직포의 교체가 가능하도록 상하부로 분리가 용이한 구조로 제작하였다. 상부는 단면이 40cm×80cm×120cm인 아크릴 박스를 두께 15mm 아크릴판으로 제작하였고, 하부는 3mm두께의 스테인리스를 절곡하여 제작하였다. 아크릴 박스의 하단에는 시료와 물의 하중에 저항하고 원활한 배수가 가능하게 하기 위해 강성의 2mm 다공판을 사용하였고, 상부의 시료가 부직포로 이동하는 것을 막기 위해 200번체를 시료와 다공판 사이에 두었다. 상하부는 육각 렌치볼트와 너트의 결합으로 연결하였으며 Sealing을 위해 2.4mm 고무 패드를 두었으며 사이에는 투명 실리콘을 사용하여 누수를 방지하였다. 하부의 필터층은 25mm의 공간을 두어 배수재를 압착할 수 있게 하였다. 간극수압계는 필터에 맞닿은 위치에 정착시키기 위해 불투수성 재료인 폼보드(아이소핑크)에 관입시키고 선은 하부로 연결하여

데이터 저장장치와 연결하였다. 그리고 측부의 배수밸브 부위에서 배수가 지연이 되어 수압이 발생하는 것을 방지하기 위해 단면을 확대하여 원활한 배수를 유도하였다. 상하부의 연결부위에 대한 상세는 그림 3에 나타내었다.

본 실험에서는 200번체로 걸러진 주문진 표준사를 12시간 수침하여 포화시킨 후 수두차 40cm에 흐름을 유지시켜 물의 흐름이 정상상태가 되도록 초기조건을 설정하였다. 시료의 물리적 특성을 파악하기 위해 흙의 기본 물성시험 및 실내 정투수시험을 실시하여 NO.200체 (0.075mm) 통과량 2%, 건조단위중량(γ_d) 1.648g/cm³, 간극비(e) 0.602, 투수계수(k) 1.83×10^{-3} cm/sec의 값을 얻었다. 배수재는 단위중량 1.40t/m³, 수직투수계수 1.64×10^{-1} cm/sec인 25mm, 50mm, 100mm 3가지 두께의 배수재를 사용하였다. 수두 조절을 위해서 실험장치 우측부에 20cm 간격으로 배수밸브를 설치하여 40cm부터



(a) 모형실험 상세 개념도



(b) 모형실험장치 사진

그림 3. 모형실험장치 개념도 및 사진

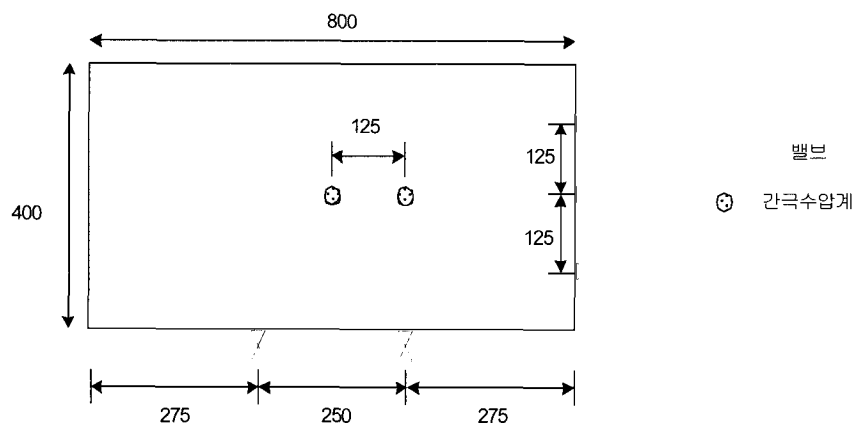


그림 4. 간극수압계와 밸브의 위치

100cm 까지 수위를 변화시킬 수 있도록 하였다. 수압은 그림 4와 같이 최고 측정값이 1kgf/cm²인 간극수압계를 중앙부에 2개를 설치하여 측정하였다.

본 연구에서 투수계수제어와 유량제어로 배수시스템 기능저하를 재현하여 표 1에 보인바와 같이 총 12경우의 실험을 실시하였다.

투수계수 제어실험은 3가지 두께의 배수재를 25mm 공간에 압착시켜 배수시스템의 투수성 저하를 유사화하여 간극수압을 측정하였다. 또한, 동수경사의 영향을 고찰하기 위해 수위(h)를 각각 40cm에서 100cm까지 20cm

표 1. 모형실험 Cases

투수계수 제어실험	수위	Symbols		
	40cm	P-H40KV		
	60cm	P-H60KV		
	80cm	P-H80KV		
	100cm	P-H100KV		
유량 제어실험	수위	Symbols		
		k_1	k_2	k_3
	40cm	P-H40K1	P-H40K2	P-H40K3
	100cm	P-H100K1	P-H100K2	P-H100K3

간격으로 변화시켰다. 그림 5의 실험에 사용된 배수재의 두께에 따른 수직투수계수는 $k_1=1.64 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$, $k_2=1.31 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$, $k_3=1.10 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ 로 산정되었다.

유량 제어실험은 3가지의 다른 투수성을 갖는 배수재에 대하여 수위(h)를 각각 40cm, 100cm로 유지시킨 채 밸브를 완전히 열어 잔류수압이 발생하지 않도록 한 후, 밸브를 점차 닫아 유량을 감소시켜 배수시스템 기능저하를 모사화 하였다. 최종적으로 밸브를 완전히 잠근 상태에서 수압을 측정하여 비배수인 조건을 확인하였다. 이때 측정된 정수압으로 비배수수압에 대한 각 단계별 수압의 구성비를 산정하여 해석결과를 비교 분석하였다.

2.2 실험 결과 및 분석

실험은 투수계수 제어실험 그리고 유량제어 실험으로 2가지 형식으로 수행되었다. 유량제어실험의 경우 배수재의 투수성이 미치는 영향을 조사하기 위해 배수재의 다른 3가지 투수계수에 대해서도 각각 유량제어 실험을 실시하였다.

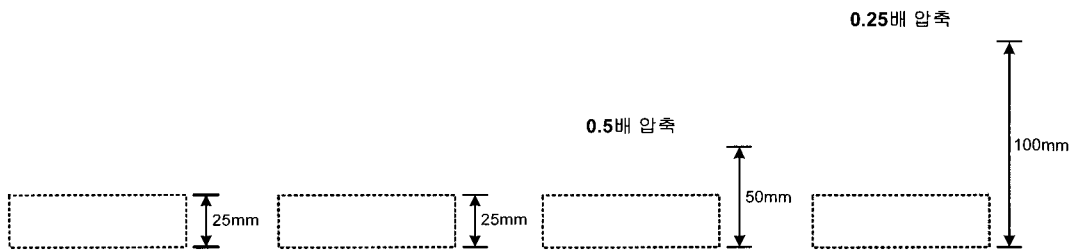
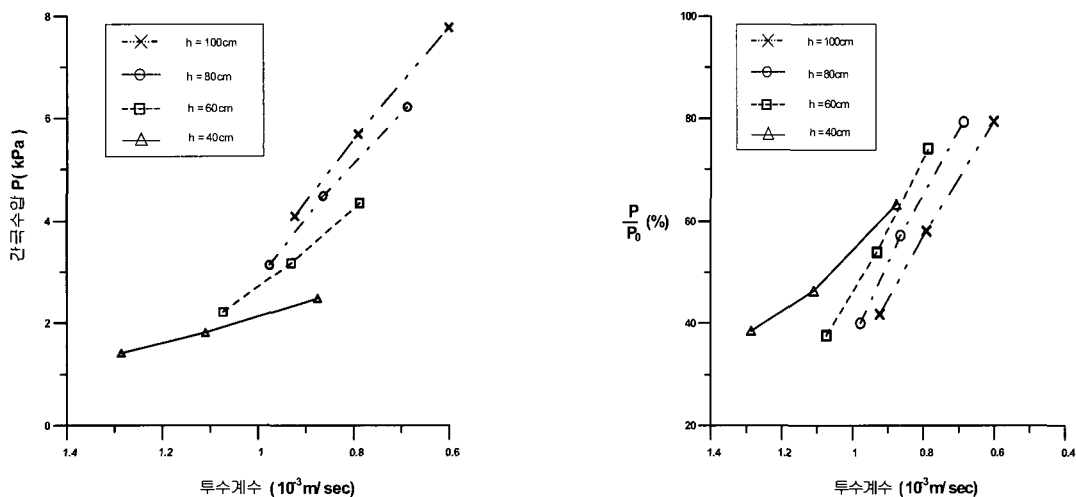


그림 5. 실험에 사용된 배수재



(a) 간극수압 - 투수계수

(b) 정규화 간극수압 - 투수계수

그림 6. 투수계수 제어실험 결과

그림 6은 투수계수 제어실험 결과로 투수계수에 따른 간극수압의 크기를 보인 것이다. 이때의 투수계수는 배수재를 통하여 유출되는 유량으로부터 역산하여 얻은 배수시스템의 대표투수계수 값이다. 그래프 각 직선의 가장 좌측은 배수재 투수계수가 k_1 (case I)일 때의 배수시스템의 대표투수계수 값이며 우측으로 각각 k_2 (case II), k_3 (case III) 일 때의 값이다. 배수재의 두께가 1/2, 1/4로 감소하는 경우 배수시스템의 투수성이 각각 80%, 67% 정도로 감소하였다. 정규화 간극수압(p/p_0)은 유량이 0인 비배수상태(p_0)에 측정된 간극수압에 대한 각 단계 간극수압(p)의 구성비를 나타낸 것이다. 투수계수 제어실험 결과 그림 6과 같이 배수시스템의 투수성이 감소할수록 간극수압이 증가하며, 수두가 클수록 그래프의 경사가 급해진다. 이는 동수경사가 클수록 배수시스템의 투수성 감소로 인해 발생하는 잔류수압이 증가함을 의미한다.

실험실에서 특정투수계수 값을 갖는 배수재를 만들기 어렵고 또한 막힘(Clogging)과 압착(Squeezing) 등의 영향을 배제 할 수 없어 투수계수실험은 현실적으로 많은 제약이 따른다. 이의 대안으로 유량제어 방식을 채택하면 투수계수 제어 효과와 같은 효과를 얻을 수 있고, 투수계수 제어법보다 더 작은 투수계수조건을 유사화할 수 있다. 유량제어로 인한 배수시스템의 투수계수는 측정된 유량으로부터 역계산 함으로써 산정할 수 있다.

그림 7은 유량제어실험 결과를 보인 것이다. 그림 7(a)와 (b)는 수두(h)가 각각 100cm, 40cm일 때 투수성 감소에 따른 정규화 간극수압크기를 나타낸 그래프이

다. 위 두 그래프를 비교한 결과 배수재 투수성의 영향은 수두가 클수록 무시 할 만큼 작아지나, 수두가 작은 경우 그 영향이 크게 나타남을 보였다. 이는 수두가 작아 유속이 느릴수록 유체점성 등에 의한 영향 때문인 것으로 판단되며 통상적인 실제수두에서는 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. 따라서 수두가 충분히 큰 경우에는 유량제어실험이 라이닝에 발생하는 간극수압조사에 보다 유용함을 알 수 있다.

본 실험으로부터 배수재열화가 구조물 배면에 작용하는 간극수압 증가를 야기함을 확인하였다. 이러한 특성은 동수경사가 클수록 명확히 나타났다. 두 실험법 모두 배수시스템 기능저하현상을 모사하는데 타당하나, 인위적인 투수계수 제어가 한계가 있음을 감안할 때 유량제어실험이 지반의 특성에 관계없이 광범위하게 적용 가능한 실험법으로 판단된다.

3. 실내모형실험의 수치모형해석

3.1 모델링

본 논문에서는 수리거동에 대한 수치해석의 적용 타당성을 판단하기 위하여 실제 모형실험장치를 수치해석법을 사용하여 모델링하였다. 수치해석은 유한요소해석(Finite element method) 프로그램인 ICFEP(Imperial College Finite Element Program, Potts and Zdravkovic, 1999)을 사용하였으며 그림 8은 본 해석에 사용된 유한요소 Mesh 및 해석개념을 보인 것이다. 시간 의존적 특성을

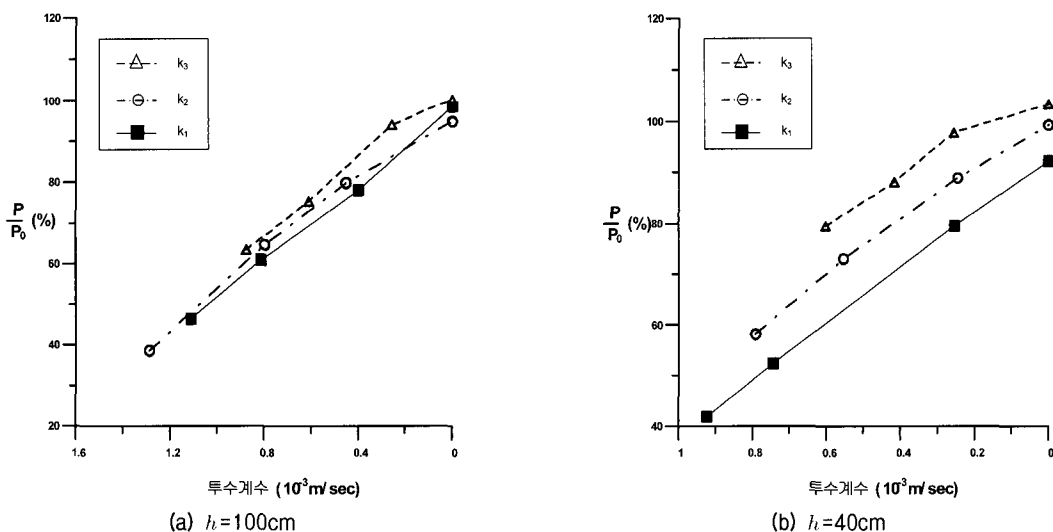


그림 7. 유량 제어실험 결과

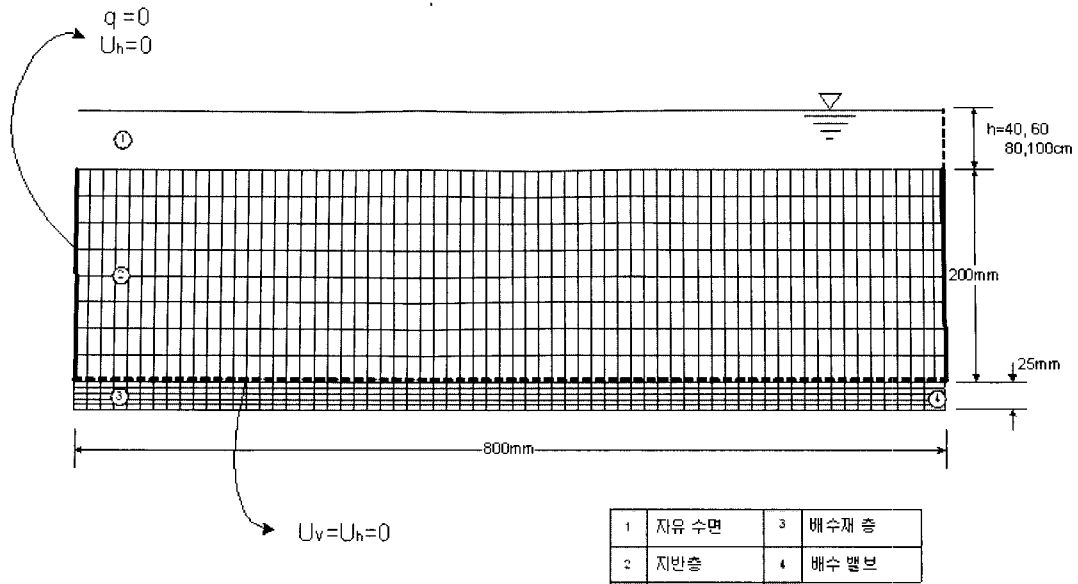


그림 8. 유한요소망 및 경계조건

표 2. 수치해석에 사용된 재료의 물성

Description	지반	배수재
Unit Weight (t/m ³)	2.10	1.40
Coefficient of permeability(m/sec)	1.83×10^{-5}	1.64×10^{-3}
Poisson's Ratio	0.3	0.3
Elastic Modulus (kg/cm ²)	3.0×10^4	3.0×10^3

보이는 수리거동 및 응력-간극수압 상호작용을 적절히 표현하기 위하여 Biot의 이론식을 기초로 하는 연계해석 (Coupled-analysis)을 수행하였다. 배수재 및 지반은 선형탄성모델을 적용하였고 지반의 탄소성해석을 위하여 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였으며 투수계수는 선형 모델을 사용하였다. 지반특성은 실제 모형실험에 사용된 재료의 값을 적용하였으며 표 2에 나타내었다. 지반 및 배수재는 8절점의 Isoparametric 요소, 간극수압은 4절점 요소로 모델링 하였다. 모델의 좌·우측 경계 및 모델 바닥의 수리 경계조건은 간극수압의 변화가 없는 것으로 설정하였고 배수구에 해당하는 경계면은 간극수압을 0으로 하여 배수상태를 유지하였다. 자유수면은 실제모형실험과 동일하게 구속흐름을 가정하였으며 해석은 정적평형상태가 유지되는 시점까지 수행하였다.

3.2 해석 결과 비교

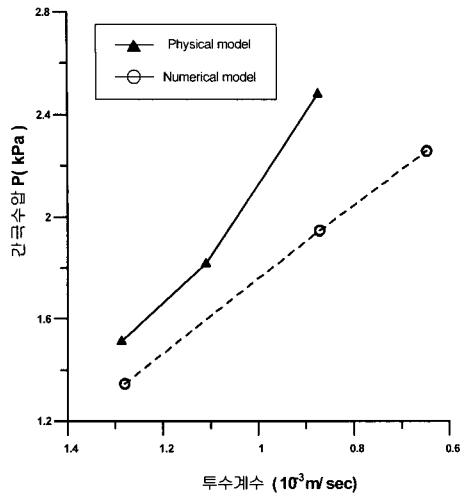
그림 9는 모형실험의 투수계수 제어실험결과와 수치 모형실험결과를 비교한 것이다. 동수경사가 작은 경우

모형실험결과와 차이를 보였지만 동수경사가 커질수록 거의 비슷한 값을 보였다. 이 실험의 경우 모형실험의 투수계수-간극수압그래프의 기울기가 수치해석결과보다 더 급함을 볼 수 있는데, 이것은 모형실험의 간극수압 증가량이 더 큼을 의미한다. 이는 밸브의 용량보다 배수재의 투수성이 커 즉시 배수가 되지 못해 그에 따른 잔류수압이 추가로 발생했기 때문이라고 판단된다.

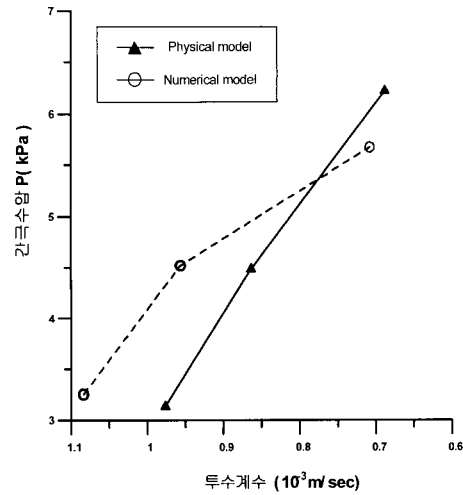
유량 제어실험은 유량을 기준으로 배수시스템의 평균투수계수를 시행착오법(trial and error)을 사용하여 역해석을 실시해 유출수량과 근사한 값을 나타낼 때의 투수계수를 배수시스템의 대표 투수계수로 산정하여 이를 측정결과와 비교하였다.

그림 10(a), (b)는 수두가 100cm이고 배수재 투수계수가 각각 k_1 , k_3 일때 모형실험과 수치해석의 결과값을 비교한 것이고, 그림 10(c), (d)는 수두가 40cm일때 비교결과이다. 위 그림에 보인바와 같이 실험값과 해석값이 일치하며, 동일 수두하의 배수재 투수계수가 감소하면 두 값의 차이가 커지는 것을 알 수 있다. 또한 수두가 큰 경우 수치모형실험의 재현성이 좋음을 확인 할 수 있다. 모형실험에서 유량제어법이 투수계수 제어법보다 투수성저하에 따른 간극수압 변화가 확연히 나타났는데, 수치해석에서도 유량제어법의 재현성이 투수계수 제어법보다 더 좋은 결과를 나타내었다.

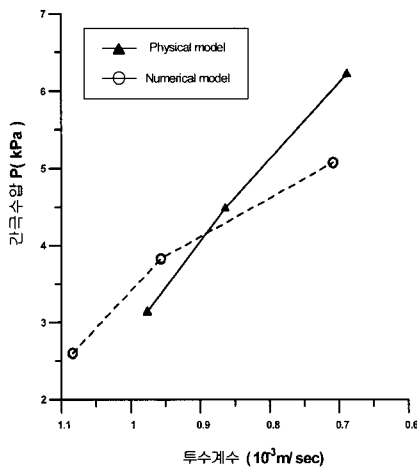
모형실험의 수치해석적 재현가능성을 확인하기 위해 수치해석법을 수행한 결과 투수계수 제어실험의 경우 동수경사가 작고 투수성이 작은 부분에서 약간의 차이



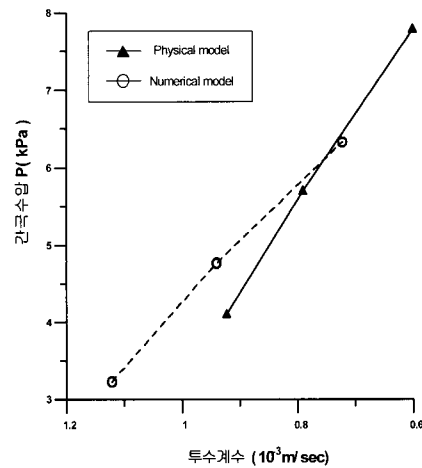
(a) $h=40\text{cm}$



(b) $h=60\text{cm}$



(c) $h=80\text{cm}$



(d) $h=100\text{cm}$

그림 9. 투수계수 제어실험 결과비교

를 나타기도 했으나 대체적으로 실험값과 일치하였다. 또한, 유량제어 실험의 경우에도 배수재 투수계수가 감소할수록 실험값과 해석값의 차이가 커졌으나 투수계수 제어실험보다 더 일치하는 경향을 보였다. 이로써 ‘지반-배수재-구조물’의 상호작용을 고려하는 수치해석을 통해 배수시스템의 수리가능저하를 이론적으로 예측 가능함을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 배수재 투수계수 제어법 및 유량 제어 실험법을 통하여 배수시스템의 수리가능저하를 유사화하는 모형실험을 실시하고, 수치해석을 통하여 이의 재현가능성을 조사하였다. 본 연구를 통해 배수시스템의 장기적인 기능저하에 따른 투수성 저하와 이로 인한 수

압증가 메커니즘을 확인 할 수 있었으며 이를 통해 얻은 세부 결론은 다음과 같다.

- (1) 배수재의 투수성 감소에 따른 간극수압 증가특성을 투수계수 제어 및 유량 제어 실험장치로 재현 가능함을 입증하였다.
- (2) 투수계수 제어실험결과 투수계수가 감소함에 따라 간극수압이 증가하며, 이러한 경향은 동수경사가 커질수록 현저해 짐을 보였으며, 유량제어 실험결과 배수재 투수성의 영향은 수두가 클수록 무시할 만큼 작아짐을 보였다.
- (3) 투수계수제어법과 유량제어법 모두 배수시스템 기능저하현상을 모사하는데 적절하였으나, 인위적인 투수계수 제어가 한계가 있음을 감안할 때 유량제어실험이 지반의 특성에 관계없이 광범위하게 적용

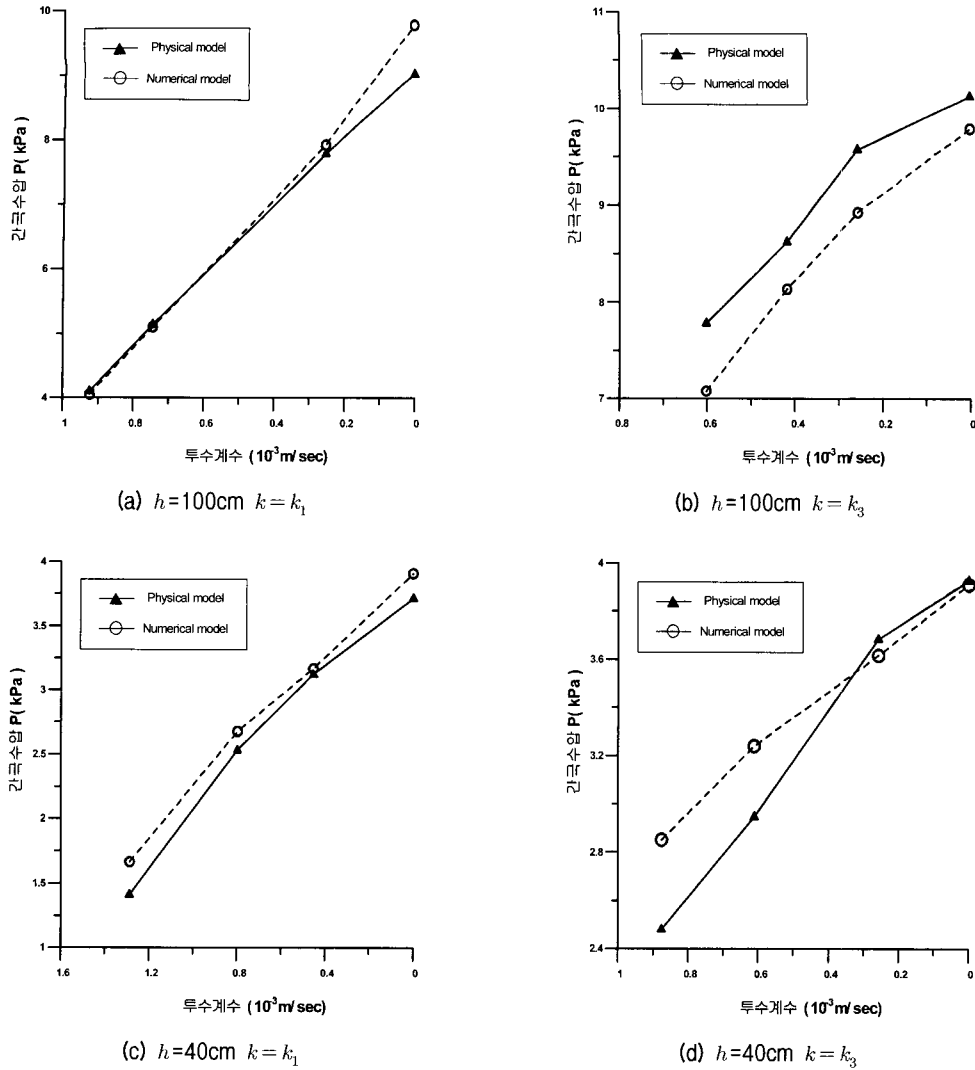


그림 10. 유량 제어실험 비교

가능함을 확인하였다.

- (4) ‘지반-배수재-구조물’의 상호작용을 고려하는 수치 해석을 통해 배수시스템의 수리기능저하메카니즘을 이론적으로 재현가능함을 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부의 건설핵심기술연구개발사업인 “해저시설물 차폐기술개발(과제번호: C105A1080001-05A0508-00330)” 연구의 일환으로 수행되었으며, 건설교통부의 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 신중호 (2003), 터널해석에 있어 지하수 거동의 중요성, *한국지반공학회 분학술발표회*, pp.247-264.

2. 신중호, 안상로, 신용석 (2005), 배수형터널의 수압작용메카니즘과 지속가능한 터널설계, *대한토목학회 정기학술대회 논문집*, pp.2973-2950.

3. Lee, I.M., Park, Y.J., and Reddi, Lakshmi N. (2002), Particle transport characteristics and filtration of granitic soils from the Korean peninsula, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.39, pp.472-482.

4. Potts, D.M. and Zdravkovic, L. (1999), *Finite element analysis in geotechnical engineering theory*, Thomas Telford, Imperial college of science, Technology and Medicine.

5. Potts, D.M. and Zdravkovic, L. (1999), *Finite element analysis in geotechnical engineering application*, Thomas Telford, Imperial college of science, Technology and Medicine.

6. Shin, J.H., Addenbrooke, T.I. and 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.

7. Shin, J.H., Potts, D.M., and 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.

(접수일자 2006. 12. 11, 심사완료일 2007. 6. 19)