

배수시스템 수리기능저하가 터널구조물에 미치는 영향에 대한 실험적 연구 An experimental study on the effect of deterioration of drainage system on tunnel structures

권오엽¹⁾, Oh-Yeob Kwon, 신종호²⁾, Jong-Ho Shin, 양유홍³⁾, Yu-Hong Yang, 주은정⁴⁾ Eun-Jung Joo

¹⁾ 건국대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Konkuk Univ.

²⁾ 건국대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Konkuk Univ.
oykwon@konkuk.ac.kr

³⁾ (주)삼안엔지니어링 지반부, Saman Engineering Co. Geotechnical Dept.

⁴⁾ 건국대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Konkuk Univ.

SYNOPSIS : Construction of underground structure requires higher standard of planning and design specifications than in surface construction. However, high construction cost and difficult working environment limit design level and construction quality. One of the most sensitive factors to be considered are infiltration and external pore-water pressures. Development of pore-water pressure may accelerate leakage and cause deterioration of the lining. In this paper, the development of pore-water pressure and its potential effect on the linings are investigated using physical model tests. A simple physical equipment model with well-defined hydraulic boundary conditions was devised. The deterioration procedure was simulated by controlling both the permeability of filters and flowrate. 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 which is the effect of deterioration of drainage system. The laboratory tests were simulated using coupled numerical method, and shown that the deterioration mechanism can be reproduced using coupled numerical modelling method.

Key words : Tunnel, Drainage system, Model test, Coupled numerical analysis

1. 서 론

터널은 대부분 철도, 지하철, 도로, 고속도로 등 많은 사람들이 이용하는 시설물의 일부를 구성하므로 터널구조물의 장기적 안전성은 시민생명과 관련하여 매우 중요하다. 국내 터널시공역사를 살펴보면 1980년대 초반 지하철 3,4호선부터 NATM터널이 건설되기 시작하였으며 대부분이 배수형 터널개념으로 설계되었다. 그 중 1990년대 전반기 이전에 건설된 터널은 라이닝에 작용하는 수압이 없는 것으로 보고 대부분의 복공 콘크리트를 무근으로 설계·시공 하였다. 그러나 배수시스템의 열화는 잔류수압의 크기를 증가시켜 터널라이닝의 장기적 안정성을 저해하는 사례가 자주 보고되고 있다. (신종호, 2003) 배수시스템열화의 원인은 주로 등으로 인해 제 기능이 원활하게 발휘되지 못하기 때문인 것으로 알려져 왔다. (Lee et al, 2002) 이러한 여건을 종합해 볼 때, 최근 보고되는 운영중인 터널라이닝 손상의 대부분이 잔류수압 작용에 따라 발생되는 문제임을 감안, 이용시민의 안전을 위해 이에대한 정확한 원인규명, 유지관리 대책 및 안전 평가시설 등의 제반대책이 요구되고 있다.

본 논문은 배수시스템의 수리기능 저하로 야기되는 잔류수압 발생메카니즘을 모형실험을 통해 고찰하고 ‘지반-배수재-구조물’ 수리상호작용을 고려하는 수치해석을 통해 시스템 수리기능저하를 이론적으로 모델링이 가능한지 확인해보고자 한다.

2. 잔류수압 발생 메카니즘

일반적으로 배수형 터널은 터널 주변의 지하수를 터널 라이닝 배면의 부직포를 통하여 터널 내부의 배수공으로 유도하여 처리한다. 배수형터널의 경우 라이닝에 작용하는 수압을 통상적으로 영으로 보고 설계한다. 그러나 Lee *et al.*(2002)은 라이닝과 쇠크리트 사이에 설치된 부직포에 외부응력이 가해져 압착되는 경우나 주변지반 토립자의 유동 및 폐색으로 인해 장기적으로 통수능이 저하가 되어 설계시 고려하지 않았던 간극수압이 발달하여 라이닝 구조체를 손상시키거나 누수가 일어남을 보고하였다. 한편 Shin *et al.*(2002)는 Coupled 수치해석을 통해 라이닝이 유한한 투수성을 가지며 이는 라이닝에 잔류수압을 발생시켜 구조적 안정성을 저해 할 수 있음을 지적하였다. 특히 터널내부로 유입되는 유량과 라이닝에 작용하는 간극수압은 라이닝과 인접지반의 상대투수계수에 따라 달라지며 그렇기 때문에 라이닝의 상대투수계수가 중요하다고 밝혔다. 또한 배수가 제대로 이루어지는 경우 간극수압은 1차라이닝에 작용을 하게 되지만 배수가 제대로 이루어지지 않는 경우 간극수압은 2차라이닝에 예 작용함을 지적하였다. (shin *et al.* 2002)

배수시스템에 수리기능 저하로 인해 라이닝에 발생하는 잔류수압 발생 메카니즘은 다음과 같이 ‘지반-1차라이닝-배수재-2차라이닝’의 상대적 투수성으로 설명 할 수 있다. 먼저 지반과 1차라이닝간의 수리 상호작용에 대해서 살펴보기로 한다. 라이닝 투수계수가 지반보다 크면 라이닝에 작용하는 수압은 영, 즉 완전배수(fully permeable) 조건에 해당한다. 그러나 1차라이닝 투수계수가 지반보다 작은 경우 수압은 k_l/k_s 에 비례하여 달라진다. 이를 위하여 k_l/k_s 를 1.0에서 0.001까지 변화시켜 수압변화를 살펴본 결과 그림 1에서와 같이 라이닝 투수계수가 지반보다 1000분의 1만큼 작은 경우 라이닝에 걸리는 수압은 정수압의 90%에 이르고 라이닝 투수계수의 감소에 따라 수압이 급격히 증가하다가, k_l/k_s 가 0.01 깜에 이르면 둔화되는 경향을 보인다. 배수기능이 크게 저하되는 경우($k_l/k_s=0.01$) 정수압의 85%를 잔류수압을 고려하여야 하며, k_l/k_s 가 0.1인 경우라도 정수압의 30%에 해당하는 잔류수압이 발생함을 알 수 있다. 여기서 흥미로운 것은 간극수압이 증가한 만큼 1차라이닝 작용압력이 증가하지 않는다는 사실이다. 그 이유는 간극수압의 상승이 라이닝 작용수압의 구성비를 유효응력에서 간극수압으로 전이시키기 때문이다. 간극수압이 정수압의 90%까지 증가할 때 라이닝 작용압력은 상재하중의 20%만 증가하는 것으로 확인되었다. 그러나 간극수압의 구성비가 높아질수록 누수 및 손상의 리스크는 증가할 것이므로 간극수압이 증가한다는 것은 구조적으로 바람직한 상태는 아닐 것이다.

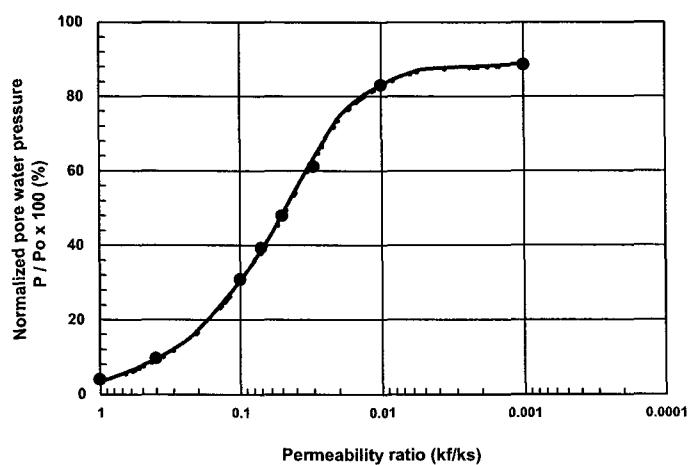
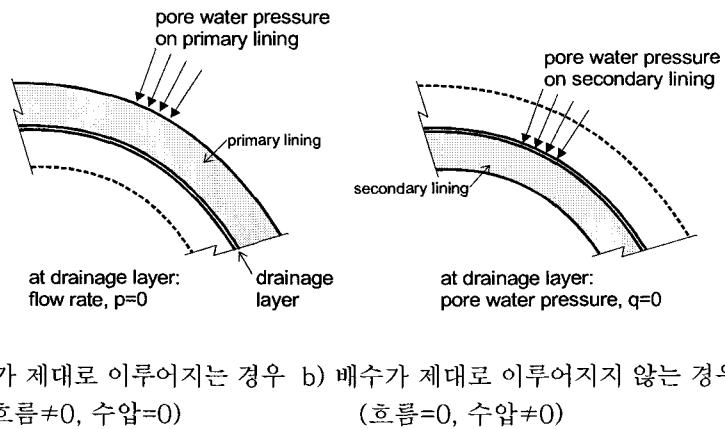


그림 1. 라이닝 투수계수에 따른 간극수압의 변화 (Shin *et al.* 2005)

그러나 2차라이닝(복공라이닝)에 증가된 수압에 삼각한 문제가 될 수 있다. 그럼 2와 같이 배수기능이 열화된 상황에 대한 '1차라이닝-배수재-2차라이닝(복공라이닝)' 간 수리상호작용을 개념적으로 살펴보면 다음과 같다. 배수재의 투수성이 1차 라이닝보다 작아지는 경우, 이때 발생하는 간극수압은 배수재 즉, 방수막으로 덮혀있는 2차라이닝에 작용하게 된다. 배수재 막힘으로 원활한 배수가 되지 않는다는 것은 배수재 투수계수 k_t 가 1차라이닝 투수계수 k_l 보다 작다는 의미로 해석할 수 있다. 다만 차이는 그림 1의 간극수압증가는 1차라이닝에 대해서는 극히 일부만 하중 증가로 나타나나, 2차라이닝의 경우 전체간극수압이 하중으로 작용하게 된다.



(a) 배수가 제대로 이루어지는 경우 b) 배수가 제대로 이루어지지 않는 경우
(흐름≠0, 수압=0) (흐름=0, 수압≠0)

그림 2. 복공(2차) 라이닝에 작용하는 간극수압

본 연구에서는 이러한 가설이 성립하는가를 모형시험을 이용하여 확인하고자 하며, 또한 수치해석으로 이러한 수압발생 메카니즘이 예측가능한가를 살펴보고자 한다.

3. 배수기능저하 메카니즘에 대한 실내 모형실험

3.1 실험개요 및 장비

일반적으로 배수형 터널에서 터널 내로 유입된 지하수는 콘크리트층을 거쳐 필터재를 따라 흘러 배수구로 유출된다. 터널 내 배수시스템이 정상적으로 작동을 하다가 압착이나 폐색 등의 원인으로 인해 배수가 원활하게 이루어지지 못하고 따라서 상대투수성의 변화에 따라 잔류수압이 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 터널주변에서의 흐름을 파악하고 배수시스템의 투수성 저하에 따라 발생하는 수압 메카니즘을 알아보기 위해 모형실험장치를 고안하여 터널 내 지하수의 흐름을 제작하고자 하였다.

실험장치는 부직포의 교체가 가능하도록 하기 위해 상하부로 나누어 제작하였다. 상부는 단면이 40cm×80cm×120cm인 아크릴 박스를 두께 15mm 아크릴판을 이용하여 제작했고 하부는 3mm두께의 스테인리스를 절곡하여 제작했다. 아크릴 박스의 하단에는 원활한 배수와 (시료+물)의 하중에 저항하기 위해 2mm 다공판을 사용했고 상부의 시료가 부직포로 이동하는 것을 막기 위해 200번체를 시료와 다공판 사이에 두었다. 상하부는 육각 렌치볼트와 너트의 결합으로 연결하였으며 Sealing을 위해 2.4mm 고무패드를 두었으며 사이에는 투명 실리콘을 사용하였다. 하부의 필터층은 25mm의 공간을 두어 배수재를 압착시킬 수 있게 하였으며 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 상세도는 아래의 그림 3에 나타내었다.

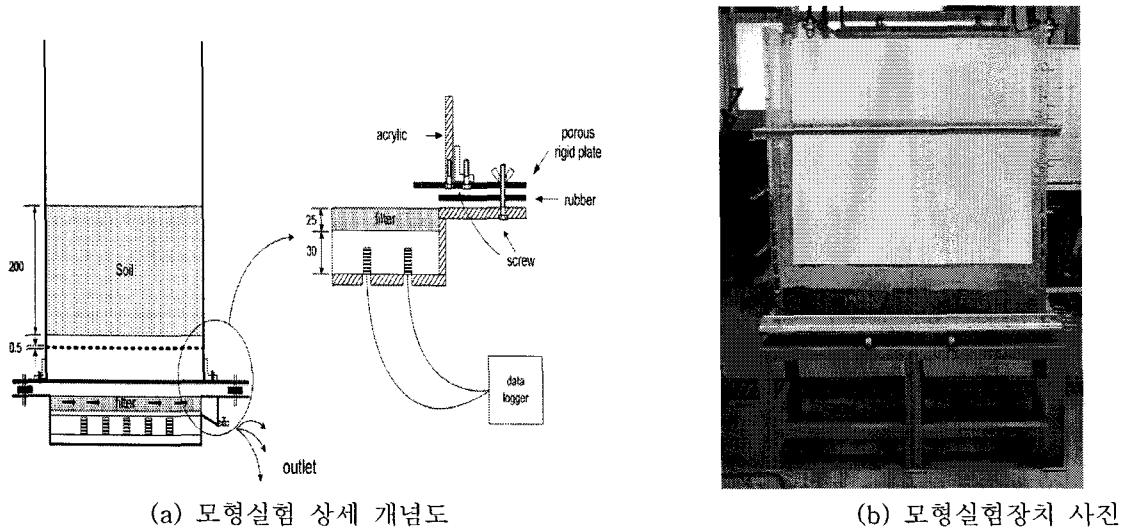


그림 3. 모형실험장치 개념도 및 사진

3.2 실험조건 및 방법

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) 1.648 g/cm^3 , 간극비(e) 0.602, 투수계수(k) $1.83 \times 10^{-3} cm/sec$ 의 값을 얻었다. 배수재는 단위중량 1.40 t/cm^3 , 수직투수계수 $1.64 \times 10^{-3} cm/sec$ 인 25mm, 50mm, 100mm 세가지 두께의 배수재를 사용하였다. 수두 조절을 위해서 실험장치 우측부에 20cm 간격으로 배수밸브를 설치하여 40cm부터 100cm 까지 수위를 변화시킬 수 있도록 하였다. 배수시스템 열화특성은 투수계수제어와 유량제어로 재현가능하다.

3.2.1 시험방법

투수계수 제어시험은 실험을 실시하기 전에 두께가 다른 3개의 배수재를 저판의 크기에 맞추어 미리 준비해 둔다. 일정한 정수두에서 배수재의 투수계수를 k_1 , k_2 , k_3 로 변화시켜 간극수압을 측정하였다. 또한 수위를 각각 40cm에서 100cm 까지 20cm 간격으로 변화시킴으로서 동수경사에 따른 투수계수 감소영향도 고찰 하였다. 그림 4에서 실험에 사용된 배수재의 두께에 따른 환산투수계수는 $k_1 = 1.83 \times 10^{-3} cm/sec$, $k_2 = 1.46 \times 10^{-3} cm/sec$, $k_3 = 1.23 \times 10^{-3} cm/sec$ 로 측정되었다.

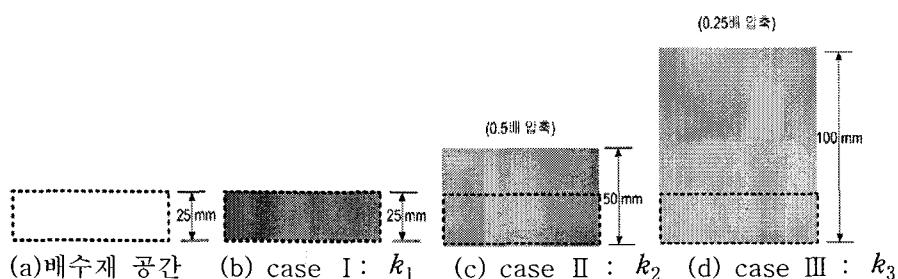


그림 4. 실험에 사용된 배수재

유량 제어시험은 3가지의 다른 투수성을 갖는 배수재를 사용하여 각각 40cm, 100cm 수위를 유지시킨 채 밸브를 완전히 열어 잔류수압이 발생하지 않을 정도로 원활히 되도록 하였다. 이 후 터널 배수시스템의 투수성 감소를 모사하기 위해 밸브를 닫아 점차 유량을 감소시켜 투수계수를 임의로 감소시켰다. 마지막에는 밸브를 잠근 상태에서 수압을 측정하여 비배수인 경우를 시뮬레이션 하여 각 단계별 수압을 비교하여 배수성에 따른 수압을 비교 분석해 보았다.

3.2.2 수압측정

수압의 측정은 데이터 저장장치를 이용해 최고 측정값이 $1kgf/cm^2$ 인 간극수압계를 중앙부에 2개를 설치하였으나 수압계 2의 손상으로 본 논문에서는 수압계 1의 값만을 분석하였다. 간극수압계와 밸브 위치는 그림 5에 나타내었다.

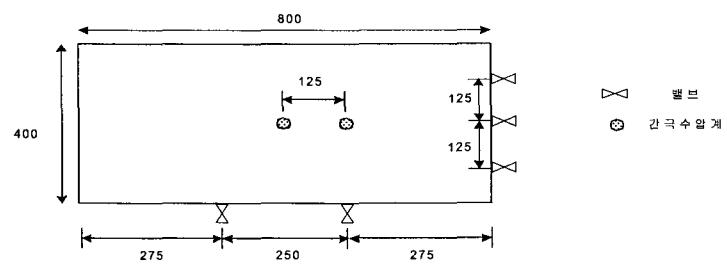


그림 5. 간극수압계와 밸브의 위치

3.2.3 실험 Cases

총 12경우에 대한 모형시험을 실시하였으며, Case별 시험 조건은 아래의 표 2 와 같다.

표 2. 모형실험 Cases

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

3.3 실험 결과 및 분석

실험은 투수계수 제어시험 그리고 유량제어 시험으로 2가지 형식으로 수행되었다. 유량제어시험의 경우 흐름의 제어인자가 유량이므로 이론적으로 투수계수차이는 의미가 없으나 실제 유량제어에도 불구하고 배수재의 투수성이 미치는 영향을 조사하기 위해 투수계수 제어시험의 3경우를 모두 고려하여 시험하였다.

3.3.1 투수계수 제어에 따른 간극수압 변화

그림 6은 투수계수에 따른 측정한 간극수압의 크기를 보인 것이다. 각 선의 가장 왼쪽의 점이 환산투

수계수가 k_1 일 때 측정된 간극수압이며 우측으로 갈수록 환산투수계수 k_2 , k_3 일 때의 측정값이다. 배수재의 두께가 $1/2$, $1/4$ 로 감소하는 경우 투수성이 각각 80%, 67% 정도로 감소했으며, 이에 따라 간극수압도 크게 증가함을 나타내었다. 그림 6 (a)에서 수두가 증가할수록 그래프의 경사가 급해짐을 알 수 있으며 이는 동수경사가 클수록 간극수압이 크게 증가함을 알 수 있다.

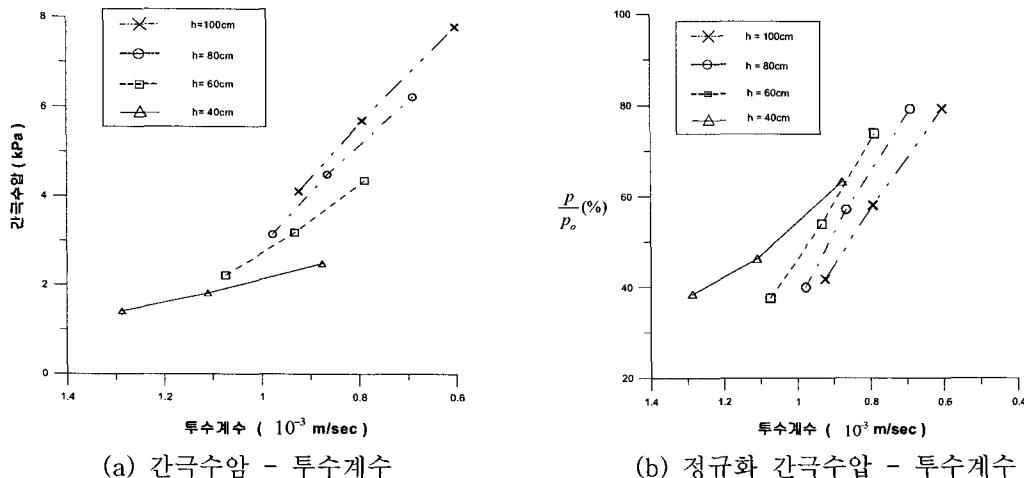


그림 6. 투수계수 제어시험 결과

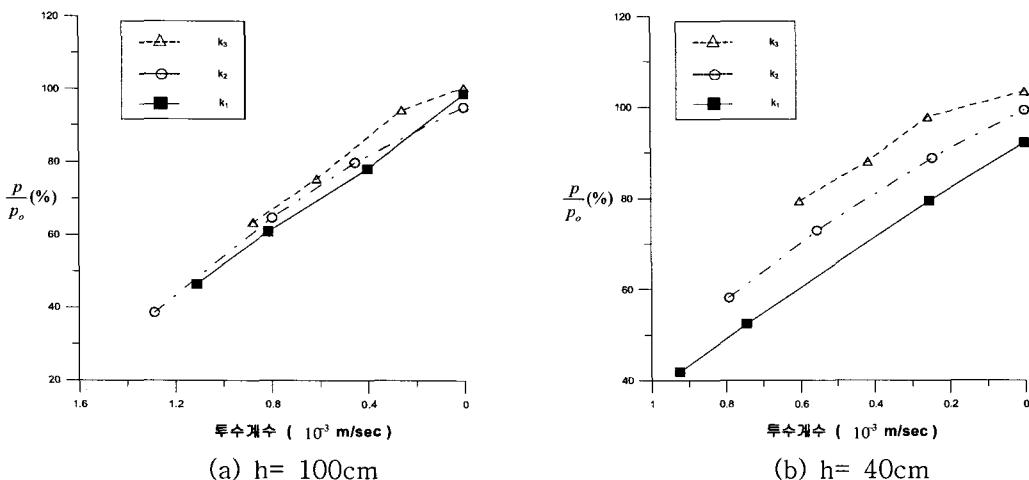


그림 7. 유량 제어시험 결과

3.3.2 유량제어 따른 간극수압 변화

실험실에서 특정투수계수 값을 갖는 배수재를 만들기 어렵고 또한 막힘과 압착 등의 영향을 배제 할 수 없어 투수계수시험은 현실적으로 많은 제약이 따른다. 이를 극복하기 위하여 흘러나오는 유량을 제어 함으로써 투수계수 제어 효과를 재현하고자 유량을 제어하여 간극수압을 변화를 측정하는 방법을 실시하였다. 이때 투수계수는 정수두 흐름조건으로 가정하여 측정된 유량으로부터 역계산 함으로써 구할

수 있다. 그림 7(a)는 배수재 투수계수 변화에 따른 간극수압의 차이가 적은 것에 비해 배수시스템의 투수성감소에 따른 간극수압은 현저한 차이가 남을 보여준다. 이는 배수재 투수계수 제어시험 보다는 유량을 제어하는 방법이 배수능의 저하를 확연히 재현할 수 있음을 입증해 준다. 그림 7(a)와 (b)를 비교한 결과 배수재 투수성의 영향은 수두가 클수록 무시 할 만큼 작아지나, 수두가 작은 경우 그 영향이 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 수두가 작아 유속이 느릴수록 유체점성 등에 의한 영향 때문인 것으로 판단되며 통상적인 실제수두에서는 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. 따라서 수두가 충분히 큰 경우에는 유량제어시험에 간극수압영향조사에 보다 유용함을 보인다.

3.3.3 실내모형 시험 결론

위 두 시험으로부터 배수재열화가 구조물 배면에 작용하는 간극수압 증가를 야기함을 확인 할 수 있다. 이러한 특성은 동수경사가 큰 경우 일수록 명확히 나타났다. 두 시험법 모두 배수시스템 열화현상을 모사하는데 타당하였으나, 인위적인 투수계수 제어가 한계가 있음을 감안할 때 유량제어시험이 지반의 특성에 관계없이 광범위하게 적용 가능한 시험법으로 판단된다.

4. 실내모형실험의 수치모형해석

본 논문에서는 수리거동에 대한 수치해석의 적용 타당성을 판단하기 위하여 실제 모형실험장치를 수치해석법을 사용하여 모델링하였다. 수치해석에는 유한요소해석(Finite element method) 프로그램을 사용하였으며 그림 8은 본 해석에 사용된 유한요소 Mesh 및 해석개념을 보인 것이다. 시간 의존적 특성을 보이는 수리거동 및 응력-간극수압 상호작용을 적절히 표현하기 위하여 Biot's equation을 기초로 하는 시간-연계해석(Coupled-analysis)을 수행하였다. 배수재 및 지반은 선형탄성모델을 적용하였고 지반의 탄소성해석을 위하여 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였으며 투수모델은 선형모델을 사용하였다. 물성치는 표 3의 실제 모형실험에 사용된 재료의 값과 동일하게 적용하였으며 지반 및 배수재는 8절점의 Isoparametric 요소, 간극수압은 4절점 요소를 사용하여 모델링 하였다. 모델의 좌·우측 경계는 횡방향 변위를 구속한 룰러로 구성하였고 모델의 바닥은 수직변위를 구속하였다. 모델의 좌·우측 경계 및 모델 바닥의 수리 경계조건은 간극수압의 변화가 없는 것으로 설정하였고 배수구에 해당하는 경계면의 간극수압을 0으로 하여 배수상태를 가정하였다. 자유수면은 실제모형실험과 동일하게 구속흐름을 가정하였으며 해석은 정적평형상태가 유지되는 시점까지 수행하였다.

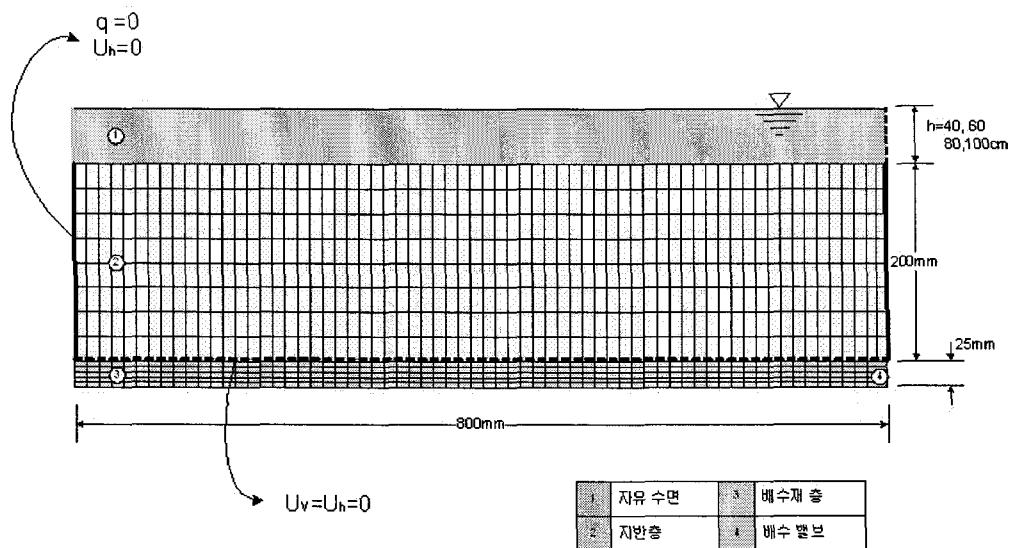


그림 8. 유한요소망 및 경계조건

표 3. 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

4.1 해석 결과 비교

그림 9는 모형시험의 투수계수 제어시험결과와 수치모형시험결과를 비교한 것이다. 동수경사가 작은 경우 모형실험결과와 차이를 보였지만 동수경사가 커질수록 거의 비슷한 값을 보였다. 이 시험의 경우 모형시험의 투수계수-간극수압그래프의 기울기가 수치해석결과보다 더 급함을 볼 수 있는데, 이것은 모형시험의 간극수압의 증가량이 더 큼을 의미한다. 이는 벨브의 용량보다 배수재의 투수성이 커 즉시 배수가 되지 못해 그에 따른 잔류수압이 추가로 발생했기 때문이라고 생각된다.

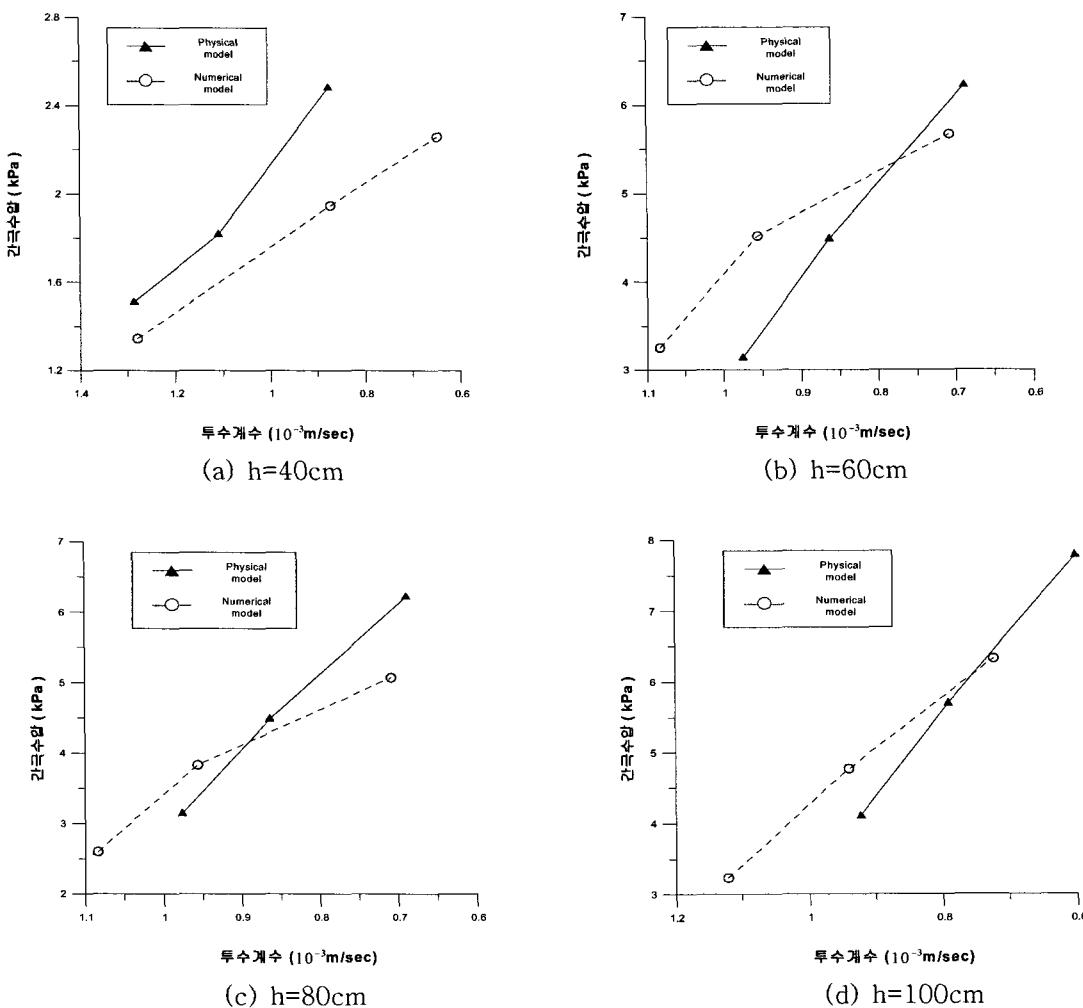


그림 9. 투수계수 제어시험 결과비교

유량 제어시험은 유량을 기준으로 배수재의 평균투수계수를 시행착오법(trial and error)을 사용하여 역해석을 실시해 유출수량과 근사한 값을 나타낼 때의 투수계수를 배수재의 평균 투수계수로 산정하여 이를 측정결과와 비교하였다. 그럼 10에 보인바와 같이 실험값과 해석값이 일치하며 동일 수두하의 배수재 투수성이 감소하면 두 값의 차이가 커지는 것을 알 수 있다. 또한 수두가 커질수록 수치모형시험으로의 재현성이 좋아짐을 보여준다. 유량제어법은 투수계수 제어시험보다 투수성저하에 따른 변화가 확연히 나타났으며, 수치해석을 통한 재현성도 커서 배수재 투수계수를 제어하는 것 보다 더 유용함을 보여준다.

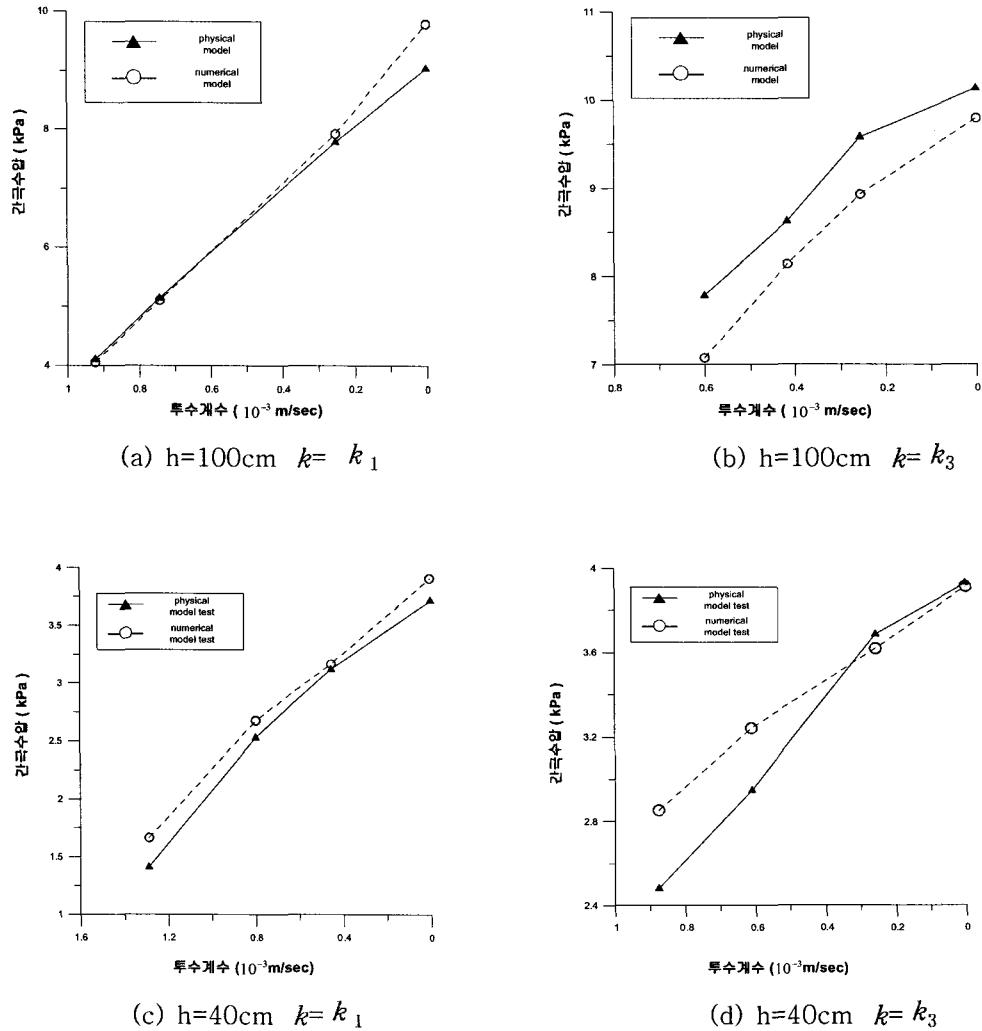


그림 10. 유량 제어시험 비교

4.2 수치해석결론

모형시험의 이론적 재현가능성을 확인하기 위해 수치해석법을 적용한 결과 투수계수 제어시험의 경우 동수경사가 작고 투수성이 작은 부분에서 약간의 차이를 나타기도 했으나 대체적으로 실험값과 일치하였다. 유량제어시험의 경우 배수재의 투수성이 감소하면 실험값과 차이가 커졌으나 투수계수 제어시험보다 해석 값과 실험값의 차이가 작아 재현성이 큼을 보였다. 이를 통해 투수계수 저하시험법과 유량조절법 모두 배수성능저하를 모델링하는 방법으로 적절함을 확인하였고 더 나아가 ‘지반-배수재-구조물’의

상호작용을 고려하는 수치해석을 통해 배수시스템의 수리기능저하를 이론적으로 모델링 가능함을 확인하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 배수재의 투수계수 저하시키는 시험법과 유량 제어시험법을 통하여 배수시스템의 수리기능저하를 유사화하는 모형실험을 실시하였고 수치해석을 통하여 비교 분석 및 재현가능성을 평가하였다. 본 연구를 통해 배수시스템의 장기적 열화에 따른 투수성 저하와 이로 인한 수압증가를 확인 할 수 있었다. 본 연구를 통해 얻은 세부 결론은 다음과 같다.

- 1) 배수재의 투수성 감소에 따른 간극수압 증가특성을 투수계수 제어 및 유량 제어 실험장치로 재현가능함을 입증하였다.
- 2) 투수계수 제어시험결과 투수계수가 감소함에 따라 간극수압이 증가하며, 이러한 경향은 동수경사가 커질수록 현저해 짐을 보였으며, 유량제어 시험결과 배수재 투수성의 영향은 수두가 클수록 무시 할 만큼 작아짐을 보였다.
- 3) 두 시험법 모두 배수시스템 열화현상을 모사하는데 타당하였으나, 인위적인 투수계수 제어가 한계가 있음을 감안할 때 유량제어시험의 지반의 특성에 관계없이 광범위하게 적용 가능한 시험법으로 판단된다.
- 4) 수치해석 결과는 모형실험에서 얻은 데이터와 대체로 일치되는 경향을 보였다. 이는 '지반-배수재-구조물'의 상호작용을 고려하는 수치해석을 통해 배수시스템의 수리기능저하를 이론적으로 예측가능함을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 신종호(2003), “터널해석에 있어 지하수 거동의 중요성”, 지반공학회 봄학술발표회, pp.257~264
2. 신종호, 안상로, 신용식(2005), “배수형터널의 수압작용메카니즘과 지속가능한 터널설계”, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.2943~2950
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. Shin, J.H., Addenbrooke, T.I. and Potts, D.M.(2002), "A numerical study of the effect of groundwater movement on long-term tunnel behaviour, Geotechnique Vol.52, No.6, pp.391~403
5. J.H. Shin, D.M. Potts, and L. Zdravkovic.(2005), "The effect of pore-water pressure on NATM tunnel linings in decomposed granite soil, Canadian Geotechnical Journal, Vol.42, pp.1585~1599