

## 풍화토의 침투 특성에 대한 실험적 고찰

### Experimental Investigation of Seepage Properties on Weathered Residual Soils

권 형 민<sup>1</sup> Kwon, Hyung-Min

김 창 엽<sup>2</sup> Kim, Chang-Youb

박 영 호<sup>3</sup> Park, Young-Ho

정 충 기<sup>4</sup> Chung, Choong-Ki

김 명 모<sup>5</sup> Kim, Myoung-Mo

#### Abstract

To evaluate the characteristics of permeability in weathered residual soil, flexible wall permeameter tests are performed using undisturbed samples. The Influence of hydraulic gradient and confining pressure on the permeability of weathered residual soil is analyzed. To compare the characteristics of permeability between weathered soil and sand, similar tests are performed using Jumoonjin sand. Also, piping model tests are performed to investigate the piping resistance of weathered residual soil. As a result, weathered residual soil shows very dependable permeability on hydraulic gradient and very large resisting ability against piping compared with sand.

#### 요 지

본 연구에서는 지지대상층이 아닌 투수 대상층으로서의 풍화토 지반에 초점을 맞추어 불교란 풍화토 시료를 이용해 다양한 구속압 조건에서 동수경사를 변화 시켜가면서 연성벽체 투수시험을 수행하였다. 동수경사 및 구속압이 풍화토의 투수특성에 미치는 영향을 투수계수를 이용하여 분석하였으며, 사질토에 대해서도 유사한 시험을 수행하여 사질토와는 구별되는 풍화토만의 침투 특성을 평가하였다. 또한 풍화토 지반의 파이프링 특성을 분석하기 위하여 모형 파이프링 시험을 수행하였다. 실험결과로부터 동수경사의 범위에 따라 풍화토는 서로 다른 투수특성을 보임을 알 수 있으며, 파이프링에 대하여 사질토에 비해 매우 높은 저항 능력을 가짐을 알 수 있었다.

**Keywords :** Permeability, Weathered residual soil, Flexible wall permeameter test, Hydraulic gradient, Piping, Seepage

#### 1. 서 론

암이 물리적, 화학적으로 풍화됨에 따라 형성되는 풍화토는 모암에 따라 그리고 풍화 환경과 시간에 따른 풍화 정도에 따라 그 특성이 매우 다르게 나타난다. 우리나라의 경우 화강암류를 모암으로 하여 물리적 풍화

가 지배적으로 작용하기 때문에 일반적으로 풍화토는 입도분포를 위주로 고려할 경우 사질토로 분류된다. 그러나 풍화토는 일부 세립 성분이 포함되어 있고, 모암의 결합구조가 부분적으로 남아있기 때문에 일반 사질토와는 강도 및 변형 뿐만 아니라 투수 특성이 다를 수 있다(권형민, 2002).

1 정회원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사과정 (Member, Ph.D. Candidate, School of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul National Univ., kkwons2@snu.ac.kr)

2 정회원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사과정 (Member, Ph.D. Candidate, School of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul National Univ.)

3 정회원, 현대건설 기술연구소 수석연구원 (Member, Principal Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology)

4 정회원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul National Univ.)

5 정회원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul National Univ.)

많은 국내외 학자들은 일반 사질토와 차별되는 이러한 풍화토의 역학적 특성에 관심을 갖고 실험적 방법과 지질학적 고찰 등을 통하여 연구하였다(유태성, 2002). 구조물 또는 도로의 지지 대상층으로서 풍화토층의 기능을 파악하기 위한 강도 및 변형 그리고 다짐 특성이 중점 연구 대상이었다. 그러나 풍화토층은 지지층으로서 뿐만 아니라 지하수가 침투하는 대상층으로서도 매우 중요하다. 깊은 굴착, 터널, 댐 등의 구조물에서 지하수 흐름은 안정성과 기능 수행에 매우 중요한 영향 인자이며, 많은 경우에 풍화토층은 중요한 침투 대상층이다. 그러나 풍화토의 침투 및 투수 특성 연구는 매우 미흡한 실정이라서 제한적으로 현장 투수시험이 수행되기도 하였지만, 투수 특성은 거의 알려진 바가 없으며, 침투 해석은 대부분의 경우 풍화토를 사질토로 가정한 경험적 방법에 의하여 이루어지고 있다. 그러나 모암의 결합 구조가 남아 있고 풍화에 따른 세립분이 일부 포함되어 있는 현장 풍화토는 투수성과 침투 저항성 등이 일반 사질토와는 크게 다르기 때문에 이러한 방법은 크게 잘못된 결과를 도출할 수 있다.

이 논문에서는 불교란 상태로 채취한 화강 풍화토 시료를 대상으로 다양한 구속압 상태에서 동수경사의 크기를 변화시켜가면서 연성벽체 투수시험을 실시하였다. 비교를 위하여 주문진 표준사에 대하여 다양한 동수경사에 대한 시험을 수행하였으며, 아울러 침투가 풍화토의 강도 및 강성에 미치는 영향을 조사하기 위해 다양한 구속압 하에서 침투 전후 각각의 조건에 대하여 배수 압밀 삼축압축 시험을 수행하였다. 정량적인 파이핑 강도 평가를 위한 모형 파이핑 시험 또한 수행되었다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 사용시료

본 연구에 사용된 시료는 심도 50m 내외의 인천에 위치한 대형 굴착 현장의 굴착 바닥면에서 길이 18cm의 NX 크기 황동관을 타입하여 얻어진 불교란 풍화토 시료이다. 채취된 시료는 자연상태에서 보관되었으며, 실험 24시간 전 -3℃에서 동결시킨 후, 시료 추출기를 이용하여 황동관에서 추출한 뒤, 실험에 사용하였다. 비교 목적으로 대표적인 사질토인 주문진 표준사를 사용하였으며 사용된 시료들의 기본 물성치와 강도는 표 1과 같다.

본 연구에 사용된 풍화토는 20%를 약간 넘는 200번체

표 1. 시료의 기본 물성치

	풍화토	주문진 표준사
통일분류	SM	SP
평균 200번체 통과량	21.6	0
건조단위중량 ( $t/m^3$ )	1.82	1.82
초기 함수비 (%)	10	10
비중	2.66	2.64
내부마찰각 (°)	29.2	38.3
점착력 (kPa)	57.56	8.4

표 2. 풍화토 시료의 XRD 분석 결과

구성성분	중량비 (%)
Quartz (석영)	30.6
Albite (조장석)	14.5
Microline (마사장석)	52.8
Kaolin (카올린)	1.5
Muscovite (백운모)	0.0
Biotite (흑운모)	0.0
Illite (일라이트)	0.5

통과 세립분을 갖고 있다. 기존 연구된 우리나라의 평균적 풍화토의 기본 물성치(세립분, 건조단위중량)와 비교할 때 (권오순, 1998), 세립분은 다소 많지만, 평균적 밀도를 갖는 것으로 판단된다. 또한 육안 관찰한 바에 따르면, 본 연구에서 사용한 불교란 상태의 풍화토는 모암의 결합구조를 일부 보유하고 있어서, 손망치 등의 충격으로 부서지는 정도의 강도를 갖고 있다. 사용된 풍화토 시료의 정확한 광물 성분 분석을 위하여 XRD 분석을 수행한 결과 표 2에 나타난 바와 같이 장석과 석영이 주된 성분을 이루며 기타 점토광물들은 미량 포함된 것으로 나타났다.

위의 여러 시험 결과를 고려할 때, 본 연구에서 사용한 풍화토는 세립 성분이 다소 많지만, 우리나라 평균적 풍화토의 기본 물성과 강도 그리고 광물 구성을 갖고 있는 것으로 판단된다.

### 2.2 실험계획

본 연구를 위하여 수행된 전체적인 실험계획은 표 3에 요약되어 있으며, 풍화토에 대하여 총 14회의 연성벽체투수시험을 수행하였다.

투수시험은 삼축시험기를 개량하여 연구의 목적에 맞게 제작된 연성벽체 투수시험기를 이용하였고, 동수경사와 구속압을 실험 조건의 주된 인자로 채택하였다. 풍화토 침투의 극한 상황이라 할 수 있는 대심도 굴착

표 3. 전체 실험계획

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
구속압 (kPa)	10 (등방)	70 (등방)	200 (등방)	0/20* (이방)
동수경사	5 10 (20)**	5 10 20 30	5 10 20 30	1 2 3
전단시험	투수시험이 끝난 후 동일 구속압 조건에서 전단시험 수행			

\* 시료 상부 연직 구속압은 0kPa, 수평구속압은 20kPa  
 \*\* 동수경사 20에서 파이핑 유사현상이 발생하여 불완전한 시험이 수행됨

저면에 노출된 풍화토에 침투가 작용하는 상황을 모사하기 위하여 수평방향의 구속압(20kPa)을 유지한 채 연직방향의 구속압이 제거된 이방적인 구속압 조건에서도 투수 시험을 수행하였다. 한편 비교 목적으로 주문진 표준사에 대하여 정수 투수 시험을 실시하였다.

침투에 의한 강도특성의 변화를 보기 위하여 침투 시험을 수행한 시료 그리고 수행하지 않은 시료에 대하여 배수 압밀 삼축시험을 구속압 10kPa를 제외한 3가지 구속압 상태에서 시행하였다. 그리고 파이핑 발생 여부를 파악하기 위하여 별도의 시험 방법을 개발하여 수행하였으며, 구체적인 시험 방법은 다음 절에 설명하였다.

### 2.3 실험 방법

본 연구에서는 ASTM 규정에 맞게 기존의 삼축시험기를 개량한 형태의 연성벽체 투수시험기가 사용되었으며 개략도는 그림 1과 같다(ASTM).

연구에 사용된 연성벽체 투수시험기는 일반적인 삼축시험기의 셀 및 가압장치를 이용하여 삼축시험과 같은 방법으로 포화 및 압밀의 과정을 거친다. 압밀 과정 후 시료

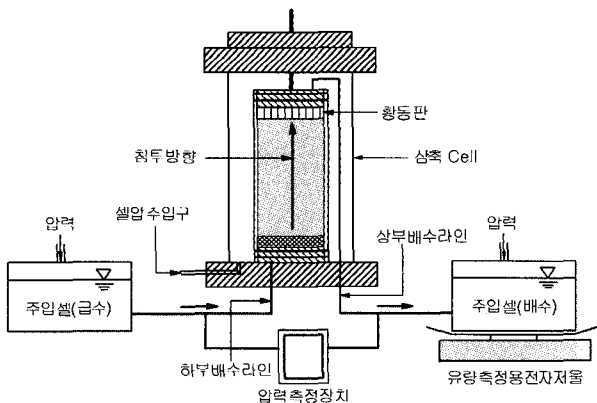


그림 1. 연성벽체 투수시험기의 개략도

에 연결된 상하 배수라인을 분리하여 2개의 주입셀(급수셀과 배수셀)에 연결하고 이 셀들 간의 압력차로 동수경사를 가하는 방식이다. 주입셀은 직경 30cm의 원통형으로 수위변화에 의한 주입압의 변화를 최소화 하였다. 또한 주입셀에서 시료로 들어가기 직전의 압력을 측정하여 주입셀의 수위변화에 의한 압력변화를 보정할 수 있으므로 정확한 동수경사를 유지할 수 있다. 투수 도중 발생할 수 있는 미세입자의 유출 및 집적이 가능하게 하기 위하여, 시료 상부와 다공질 석판 사이에 직경 2mm의 많은 구멍이 뚫리고 흡이 파인 황동판을 설치하였다(그림 2).

동결추출 방법에 의해 추출된 시료는 삼축셀에 거치시킨 후, 상온에서 24시간 동안 방치하여 완전 용해시켜 사용하였다. 시료는 일단 내부에 진공압을 가하고, 이후 200kPa 내외의 배압을 가하여 포화시켰으며, 간극수압 계수 B값을 측정하여 0.95를 포화 상태의 하한값으로 설정하고, 그 이상이 되는지 확인하였다. 투수시험은 대상 시료에 대하여 원하는 구속압까지 압밀과정을 거친 후, 동수경사를 변화시켜 가며 수행하였다. 각 동수경사 단계에서 60시간정도 투수시험을 수행한 후, 동수경사를 증가시켜 다음 단계의 동수경사로 진행하였다. 시간에 따른 유량의 변화는 전자저울을 이용한 주입셀의 중량 변화를 측정하여 부피로 환산된 값을 이용하였다. 하나의 구속압에 대하여 투수시험이 끝난 후, 구속압을 그대로 유지시킨 채 배수 전단 시험을 수행하였다. 한편 침투가 풍화토의 전단 거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 동일 구속압 조건에서 투수 없이 행해지는 전단 시험을 별도로 수행하였다. 전단조건은 변형을 제어방식을 채택하였다.

침투에 따른 중요한 지반공학적 문제중의 하나는 파이핑 현상이다. 간극수압 증가로 인해 지반의 전단강도가 소실로 나타나는 파이핑 현상은 적절한 평가 실험방법이 없어 아래와 같은 침투압 작용시 철제봉의 지지력 붕괴 여부를 이용한 간략한 모형 장치를 고안하여 활용

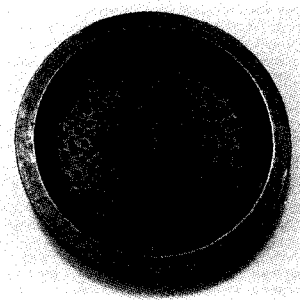


그림 2. 황동판

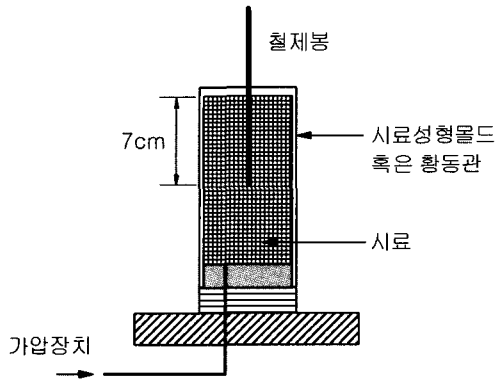


그림 3. 파이핑 시험 장치

하였다. 파이핑 시험 장치의 개략도는 그림 3과 같다.

우선 압력을 공급할 수 있는 하부 판 위에 다공석판과 거름종이를 놓고 시료를 거치한다. 사질토의 경우 삼축시험기의 시료성형 몰드를 이용하여 원하는 단위 중량에 맞추어 지반을 조성하며 풍화토의 경우에는 황동관 시료를 시료의 추출과정 없이 바로 거치하여 이용한다. 지반 조성 과정 후, 직경 7mm의 철제봉을 조성된 지반 높이의 1/2 깊이까지 타입한다. 타입된 철제봉은 말뚝과 유사한 거동을 보일 것으로 예상된다. 설치 후 시료하부에 수압을 점차로 증가시키면서 가하면서(즉 동수경사를 증가시키면서) 시험을 실시한다. 파이핑은 시료의 전단강도 손실로 발생하는 철제봉의 과도한 유키 또는 쓰러짐으로 판별한다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 파이핑 저항 능력

철제봉 붕괴 여부에 의한 파이핑 실험 결과, 이 연구

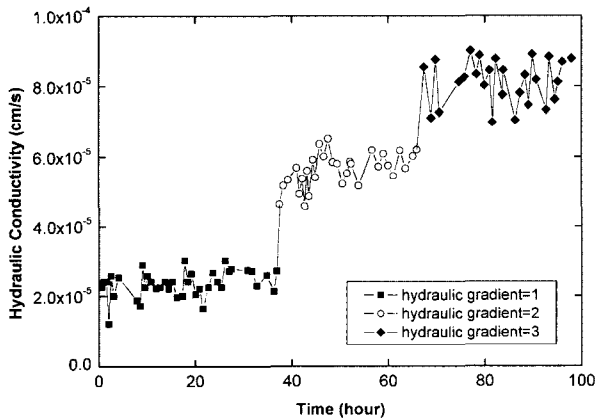


그림 4. 낮은 동수경사 단계에서의 풍화토의 투수계수 변화(연성벽체 시험, 연직 구속압 0kPa, 수평 구속압 20kPa)

에서 사용된 불교란 풍화토는 동수경사 25에 이를 때까지, 파이핑으로 판단할 수 있는 어떠한 징후도 관찰되지 않았다. 즉, 동수경사 25의 침투시에도 철제봉은 지반에 견고히 지지되어있는 것이 관찰되었다. 동수경사는 시료하부에 수압을 가하는 방법을 이용하였는데, 시료상부에 배수가 일어나기 때문에 최대 25까지의 동수경사만 가할 수 있었다. 반면에 사용된 풍화토의 건조 단위 중량에 맞추어 조성된 주문진 표준사의 경우 동수경사 1.3~1.4에서 파이핑에 상응하는 현상, 즉 조성된 지반에 향타한 철제봉의 지지력 파괴에 의한 붕괴가 관찰되었다. 시험된 불교란 풍화토의 높은 파이핑 저항 능력은 시료에 포함되어 있는 20%가 넘는 세립분 그리고 시험 시료에 남아있는 모암의 결합구조에 의한 침투 저항 능력에서 비롯된다. 따라서 풍화토의 파이핑 저항 능력은 일반 깨끗한 사질토 보다 훨씬 크게 나타나며, 그 크기는 세립분의 양과 잔류 결합구조, 즉 모암의 특성과 풍화정도에 의해 결정된다고 할 수 있다.

#### 3.2 동수경사의 변화에 따른 투수 특성의 변화

입자들 간의 결합구조가 남아있으며, 상당량의 세립 성분을 포함하는(이 연구 대상 시료의 경우 20% 정도를 포함하는) 풍화토는 일반 사질토와 투수 특성이 다르게 나타날 것으로 예상된다. 동수경사로 표시되는 침투압의 변화는 풍화토의 이러한 특성 때문에 투수 특성에 크게 영향을 미칠 수 있다.

그림 4는 5 미만의 낮은 동수경사 범위에서 행해진 풍화토의 연성벽체 투수시험 결과를, 그리고 그림 5는 비교를 위하여 수행된 정수두 시험에 의한 주문진 표준

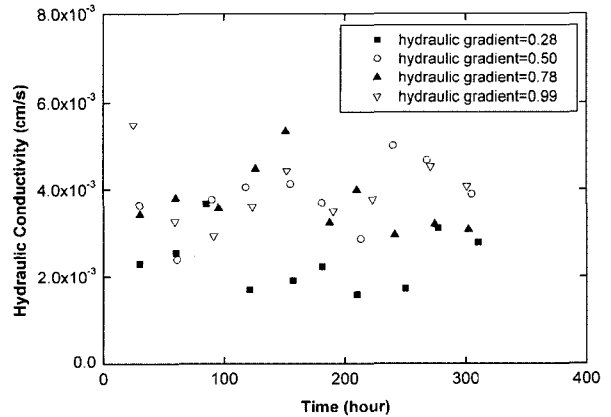


그림 5. 사질토의 투수계수 변화(정수두 시험)

사에 대한 투수시험 결과를 산정된 투수계수 값으로 나타낸 것이다.

풍화토의 경우 연성벽체시험 시 사용한 가압장치와 압력 측정 transducer의 정밀도 한계로 동수경사 1을 최소값으로 사용하였으며, 1보다 작은 동수경사 적용이 가능한 정수두 또는 변수두를 이용한 투수시험 역시 풍화토의 낮은 투수성으로 적용하지 못하였다. 시험 결과를 보면, 함유된 세립토의 영향으로 풍화토의 투수계수가 주문진 표준사 보다 100배 정도 작다. 시간 경과에 따른 투수성의 변화는 두 시료 모두 나타나지 않지만, 동수경사의 변화에 따른 영향은 크게 다르다. 풍화토의 경우 동수경사의 증가에 따라 투수계수의 증가가 확연히 나타나는 반면, 주문진 표준사에서는 동수경사에 무관하게 분산된 투수계수 값을 보여 주고 있다. 두 가지 일련의 시험 결과들의 차이는 적용된 동수경사의 크기에서 비롯된 것으로 보인다. 동수경사가 1보다 큰 경우, 이에 따른 침투압의 영향으로 시료 내의 유로가 확장되거나, 또는 세립성분이 부분 유출될 수 있다. 그리고 이 현상은 동수경사의 증가와 더불어 심화되기 때문에 결국 동수 경사의 증가와 함께 투수계수가 증가한 것으로 판단된다. 그림 6의 투수시험 후 시험기로부터 분리한 유공 황동캡으로부터 미세 입자의 유출을 확인하였다. 반면 동수경사가 1보다 작은 낮은 침투압에서는 유로 확장이나 세립토의 부분 유출의 가능성이 작으므로 주문진 표준사와 같이 투수성이 변화하지 않거나, 작게 변화할 가능성이 있다.

그림 7은 풍화토 시료에 대하여 5 이상의 높은 동수경사가 가해질 때, 세 가지 구속압 조건에서 행해진 투수시험의 결과를 보여준다. 시험결과에서 직접적으로 파악할 수 있는 것은 시간에 따른 투수계수의 감소이다. 또한 구속압 200kPa에서는 동수경사 증가에 따라 일시적으로 투수계수가 증가하지만, 시간 경과와 함께 동수

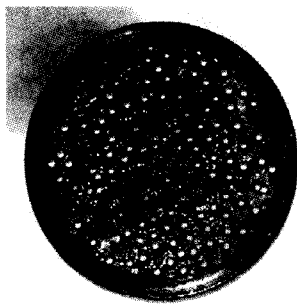
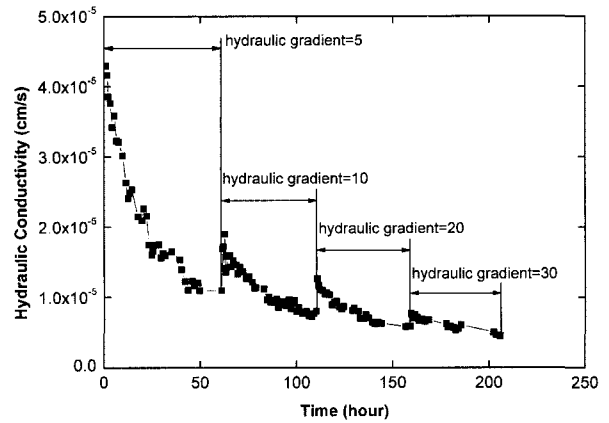
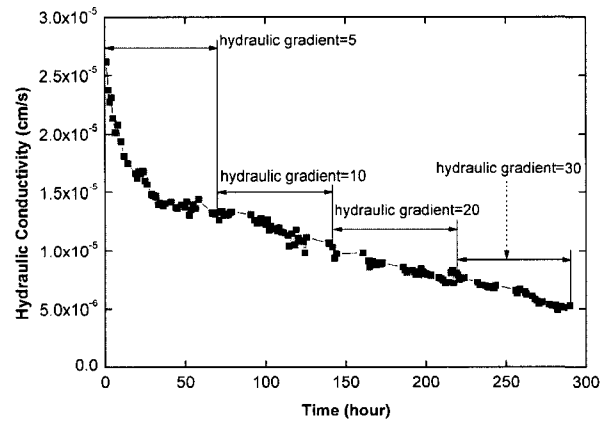


그림 6. 황동캡(투수시험 후)

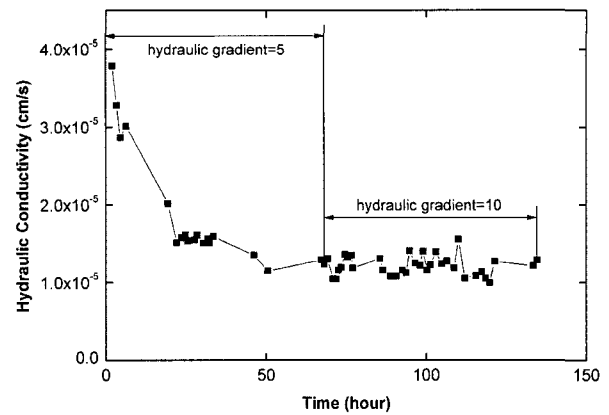
경사의 증가는 투수계수의 감소를 유발하는 것으로 나타났다. 즉 앞서 1 이상 5 미만의 동수경사 시험과는 상반된 결과를 보여주고 있다. 이는 앞서 설명한 침투압에 의한 유로 확장과 세립자의 이동으로 설명할 수 있다. 높은 동수경사 범위에서 시간 경과 그리고 동수경사에 따라 투수계수가 감소하는 것은 풍화토에 포함되어 있는 세립성분과 관련이 있는 것으로 판단된다. 즉 앞서



(a) 구속압 = 200kPa

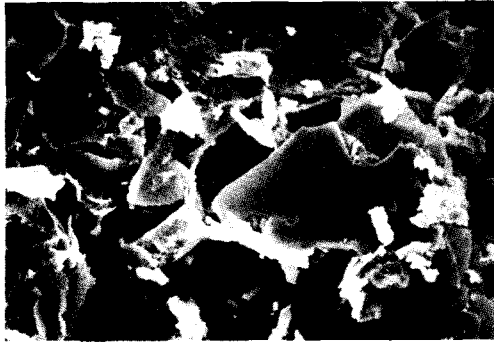


(b) 구속압 = 70kPa

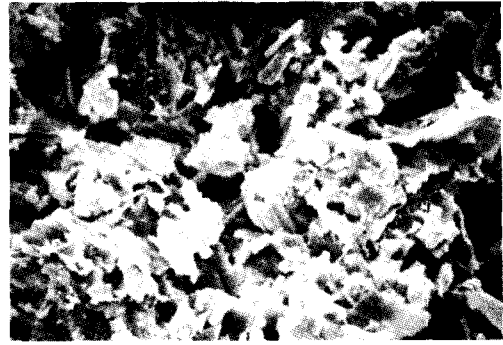


(c) 구속압 = 10kPa

그림 7. 높은 동수경사 단계에서의 풍화토의 투수계수 변화



(a) 시험 전



(b) 시험 후

그림 8. 투수 시험 전 후의 시료에 대한 SEM 사진(200배)

표 4. 동수경사에 따른 투수특성의 변화(풍화토)

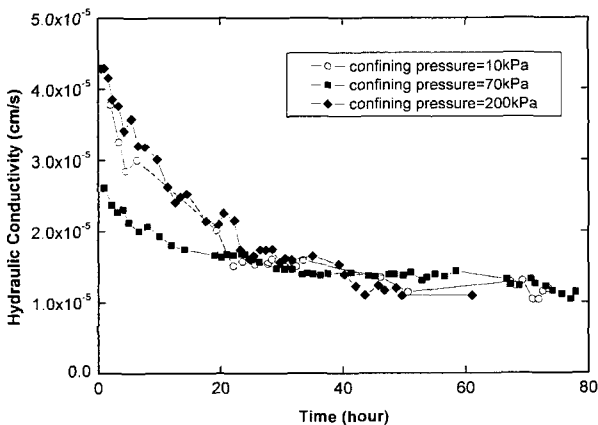
	투수계수
낮은 동수경사 범위 (1미만)	동수경사의 무관하게 일정함
중간 동수경사 범위 (1-5)	동수경사의 증가에 따라 증가
높은 동수경사 범위 (5이상)	동수경사의 증가에 따라 감소

1 이상 5 미만의 동수경사 범위에서는 작은 량의 세립 성분이 유로를 통해 부분 유출되면서 투수성이 증가하지만, 5 이상의 높은 동수경사가 작용하면 많은 세립 성분이 동시에 이동하려하고 이에 따라 시료 내에 유로가 부분적으로 막히는 클로깅(Clogging) 현상이 발생하게 되므로 투수계수는 감소한다. 즉, 동수경사 증가에 따라 유로가 막히는 클로깅 현상이 심화될 것이므로 투수계수는 동수경사 증가와 더불어 감소하게 된다. 또한 클로깅은 시간 경과에 따라 증가하므로 그림 7에 나타난 바와 같이 투수계수는 시간 경과에 따라 감소하게 된다. 그림 8은 투수 전후의 시료 상태를 보여주는 200배 확대한 SEM(Scanning Electron Microscopy) 사진이다. 투

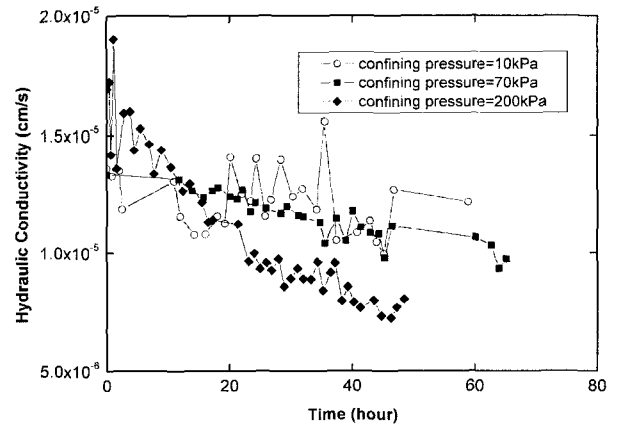
수시험 전에는 세립 성분들이 시료 내에 흩어져 있으나, 투수시험 후에는 세립 성분이 밀집되어 있는 모습을 보여주고 있으며, 따라서 높은 동수경사의 영향으로 시료 내에 간극의 연결 통로인 유로가 부분적으로 막히는 클로깅 현상을 확인할 수 있다. 다만, 그림 7(a)에 나타난 바와 같이 동수경사를 증가시킨 직후에는 유로 확장과 일시적인 세립 성분의 부분 유출로 투수계수가 증가할 수도 있다. 따라서 풍화토의 투수특성은 포함된 세립 성분의 영향으로 동수경사의 크기에 따라 표 4와 같이 3단계로 구분할 수 있다. 다만 각 단계의 경계값은 풍화토의 특성 특히 함유된 세립 성분에 따라 달라질 수 있다.

### 3.3 구속압의 변화에 따른 투수 특성의 변화

그림 9는 동수경사 5와 10에서 적용 구속압에 대하여 경과 시간에 따른 투수계수의 변화를 도시한 것이다. 투수 특성이 구속압에 영향을 받는 경향성은 전혀 보이지 않고 있다. 동수경사 5와 10 그리고 경과 시간에 따라서



(a) 동수경사 = 5



(b) 동수경사 = 10

그림 9. 구속압에 따른 투수특성의 변화

표 5. 일차원 변형 압밀 시험을 통한 구속압과 간극비의 관계

유효구속압 (kPa)	간극비 (e)	$\frac{e^3}{1+e}$	$\frac{k_{10}}{k_{200}}$
10	0.534	0.0993	1.07
200	0.521	0.0930	

도 구속압의 영향을 관찰하기는 어렵다.

이는 가해진 구속압에 따른 시료의 간극비 변화와 밀접한 관계가 있다. 즉, 간극비(e)는 투수계수를 결정하는 중요한 요인 중의 하나로서 아래의 Kozeny-Carman 식(Carman, 1956)에서 알 수 있듯이 투수계수는 간극비에 비례하는 것으로 나타낼 수 있다.

$$k = \frac{1}{k_0 S^2} \frac{\gamma}{\mu} \frac{e^3}{1+e} \quad (1)$$

여기서,  $k_0$ : 간극의 형상과 실제 유로의 길에 따른 계수

$S$ : 비표면적

$\mu$ : 통과 유체의 점성

$\gamma$ : 통과 유체의 단위중량

$e$ : 간극비

구속압의 변화에 따른 간극비의 변화를 일차원 변형 압밀시험을 통해 구하고, 이로부터 투수계수의 변화를 그 비의 값으로 평가하여 표 5에 나타내었다. 구속압이 10kPa에서 200kPa로 증가 시, 간극비는 풍화토의 낮은 압축성 때문에 단지 2.4% 정도만 감소하며, 따라서 투수계수의 감소는 10% 미만에 불과하다는 것을 알 수 있다. 즉, 그림 9에서 풍화토의 투수 특성에 대한 구속압 효과가 불분명한 것은 사용된 풍화토의 낮은 압축성에서 비롯된 것으로 판단된다.

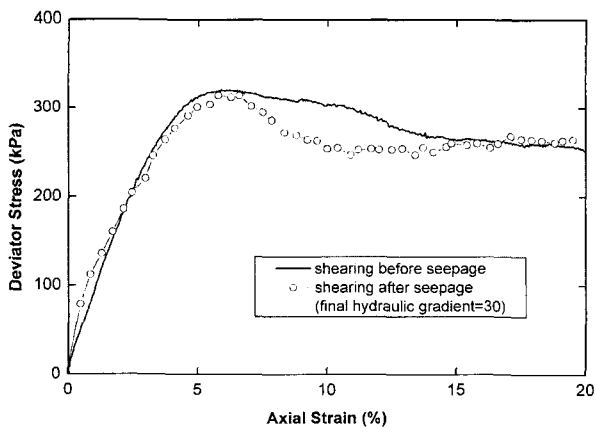


그림 10. CD Test 결과(구속압 70kPa)

### 3.4 침투에 따른 강도 및 강성의 변화

침투압, 특히 높은 침투압이 풍화토 시료에 가해질 경우, 앞서 설명한 바와 같이 시료내의 미세 입자 유출 및 유로 확장과 함께 입자들간의 결합구조 변화가 발생할 수 있다. 이 요인들은 결국 시료의 강도 및 강성에 직접적인 영향을 미칠 수 있으며, 이에 대한 평가를 위한 실험이 서로 다른 구속압 상태에서 수행되었다. 그림 10 및 11은 비교적 높은 구속압인 200kPa, 70kPa에서 투수 시험을 수행한 경우와 수행하지 않은 경우에 대한 배수 압밀 삼축시험의 결과를 보여주고 있다.

위의 그림에서 보는 바와 같이 70kPa 이상의 비교적 큰 구속압 상태에서는 동수경사 30의 높은 침투압에도 불구하고, 침투에 따른 강도 및 강성의 변화가 거의 보이지 않는다. 클로깅 현상과 미세입자의 유출 등의 관찰된 현상에서 나타나듯이, 내부 입자들의 이동은 있지만 높은 구속압으로 인하여 강도 및 강성에 직접적으로 관련이 되는 풍화토의 잔류결합구조와 간극비는 영향을 받지 않은 것으로 판단된다.

그러나 구속압이 작은 경우에는 다른 결과를 보여주고 있다. 그림 12는 수평방향 구속압만 20kPa를 갖고 연직 방향의 구속압은 0인 경우에 대한 투수 시험 여부에 따른 압밀 배수 삼축시험의 결과이다.

앞서의 높은 구속압일 때와는 달리 동수경사 3의 매우 작은 침투압이 작용하였는데도 불구하고, 전단 거동은 매우 다르게 나타난다. 즉, 침투를 경험하지 않은 경우에는 일반적인 조밀한 모래의 전단 거동에 일치하여 침투강도와 함께 변형을 연화가 발생하는데 반하여, 침투 이후에는 유사한 잔류강도를 갖지만, 침투강도와 변형률 연화는 전혀 관찰되지 않는다. 즉, 침투에 의해 최

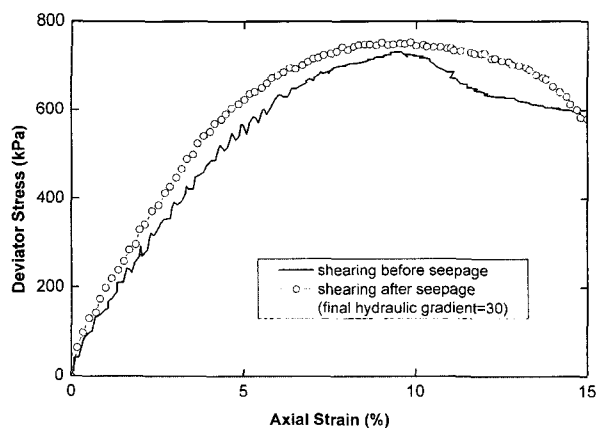


그림 11. CD Test 결과(구속압 200kPa)

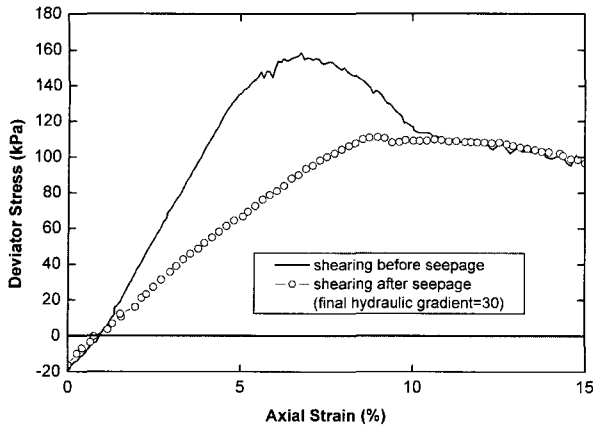


그림 12. CD Test 결과(구속압 0/20kPa)

대전단강도와 강성이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 작은 구속압 상태에서는 침투압에 의해 풍화토의 잔류 결합구조가 영향을 받았기 때문으로 추정된다. 즉 높은 구속압에서는 침투압으로 적용 구속압의 역제를 극복하고 시료 내부의 구조적 변형(즉 잔류결합구조의 손실)이 이루어지기 어렵지만, 구속압이 작을 경우 침투압이 잔류결합구조를 파괴하여 시료의 역학적 특성을 변화시키기가 상대적으로 용이하기 때문으로 판단된다. 따라서 낮은 구속압 하에서 높은 침투압을 받을 때, 즉 한 예로서 대심도 굴착 현장에서 굴착 저면에 노출된 풍화토에 굴착벽체 배면의 지하수위로 인하여 침투압이 매우 크게 작용할 경우에는, 파이핑이 설혹 발생하지 않는 다해도 지하수 침투로 인해 강도 및 강성이 크게 저하될 수 있으므로 매우 유의해야 한다.

#### 4. 결론 및 요약

본 연구에서는 우리나라의 중요한 지반 구성 재료임에도 불구하고, 지하수 침투에 대한 특성이 불분명하였던 풍화토의 특성을 불교란 시료를 대상으로 연성벽체 시험을 중심으로 한 투수 및 강도 등의 실내시험을 이용하여 규명하였다. 사용된 풍화토는 20% 정도의 세립성분을 갖고 있고 부분적으로 모암의 결합구조가 잔류된 상태이며, 그 투수 특성과 침투에 따른 강도 변화 그리고 파이핑 저항 특성을 실험적으로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 풍화토는 함유된 세립분 때문에 투수계수 값이 일반 깨끗한 사질토 보다 100배 정도 작을 뿐만 아니라 적용된 동수경사의 범위에 따라 투수 특성이 매우 다르

게 나타난다. 1보다 작은 낮은 동수경사 범위에서는 일반 사질토와 마찬가지로 투수계수는 동수경사의 크기에 무관하지만, 1보다 크고 5보다 작은 범위에서는 다소 큰 동수경사, 즉 침투압의 영향으로 유로가 확장되거나 세립토가 간극수 유로로부터 부분 유출되고 이 현상이 동수경사의 증가와 더불어 심화되기 때문에 동수경사의 증가와 함께 투수계수는 증가한다. 그리고 5보다 큰 동수경사 범위에서는 침투압이 매우 크기 때문에 많은 세립 성분이 좁은 유로를 통해 동시에 이동하려 하고, 따라서 세립성분이 유출되기 보다는 유로를 부분적으로 막는 클로킹 현상이 발생한다. 이러한 클로킹은 동수경사의 증가 그리고 시간 경과에 따라 심화되기 때문에 동수경사 증가 그리고 시간경과에 따라 투수계수는 감소한다.

- (2) 풍화토의 투수성에 구속압이 미치는 효과는 매우 작으며, 이는 풍화토의 압축성이 매우 작기 때문이다.
- (3) 구속압이 높은 경우 높은 침투압이 작용하더라도, 풍화토의 강도 및 강성은 거의 변화하지 않는다. 반면에 구속압이 낮은 경우에는 침투압은 강도 및 강성을 감소시킬 수 있다.
- (4) 풍화토의 파이핑 저항 능력은 일반 사질토에 비해서 매우 크며, 한계동수경사는 25 이상인 것으로 나타났다. 이는 풍화토에 함유된 세립토와 모암의 잔류 결합구조에서 비롯된다.

#### 감사의 글

본 연구는 현대건설기술연구소의 지원으로 이루어졌으며, 이에 심심한 감사의 뜻을 전합니다.

#### 참고 문헌

1. 권형민 (2002), "깊은 굴착이 풍화토 지반의 공학적 특성에 미치는 영향", 서울대, 석사학위논문.
2. 권오순 (1998), "풍화토의 전단 강도-변형 특성에 관한 실험적 연구", 서울대, 박사학위논문.
3. 유태성 (2002), "우리나라 주요 특월 댐의 지반공학특성", 2002 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집.
4. ASTM; Designation D 5084-90, "Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated materials using flexible wall permeameter".
5. Carman, P.E., Flow of gases through porous media, Academic, New York, 1956.

(접수일자 2003. 9. 29, 심사완료일 2003. 12. 17)