

## 실내시험을 통한 양산점토의 투수특성 평가

### Evaluation of Permeability Characteristics of Yangsan Clay by Laboratory Tests

김 동 휘 <sup>*1</sup>	Kim, Dong-Hee	김 진 원 <sup>*2</sup>	Kim, Jin-Won
임 형 덕 <sup>*3</sup>	Lim, Hyung-Duk	김 대 규 <sup>*4</sup>	Kim, Dae-Kyu
이 우 진 <sup>*5</sup>	Lee, Woo-Jin		

#### Abstract

In this study, the permeability characteristics of Yangsan clay was investigated from the results of standard oedometer(IL<sub>CON</sub>) and constant rates of strain(CRS) consolidation tests. The relationship between permeability coefficient and void ratio was studied and compared with the well known pervious studies such as those by Kozeny(1927) and Carman(1956). The anisotropic characteristics of permeability coefficient was also analyzed from the results of CRS test conducted using the soil specimen vertically trimmed to measure the horizontal permeability coefficient. The permeability coefficient evaluated from CRS test was underestimated when compared with that from Rowe cell permeability test. The permeability coefficient with depth and influencing factors on Yangsan clay were investigated as well.

#### 요 지

본 논문에서는 경남 양산지역의 퇴적층에서 채취한 불교란 시료를 이용하여 표준압밀시험(IL<sub>CON</sub>)과 일정변형률(CRS, Constant Rates of Strain) 압밀시험을 수행한 후 각각의 시험결과를 분석하여 양산점토의 투수특성을 고찰하였다. 이를 위하여 투수계수와 간극비의 관계를 Kozeny(1927)와 Carman(1956) 이후 제안된 많은 연구결과와 비교, 검토하였으며, 시료를 연직방향으로 성형하여 CRS 시험을 수행한 후 횡방향투수계수를 산정하여 양산점토의 투수계수의 이방성을 살펴보았다. CRS 시험 결과, 직접적으로 정상류를 발생시켜 투수계수를 측정하는 Rowe cell 시험에 비하여 상대적으로 투수계수의 이방성이 과소평가되는 경향을 보였다. 또한 현장 투수계수에 영향을 미치는 요소들을 살펴보고, 깊이에 따른 투수계수를 고찰하였다.

**Keywords :** Anisotropy, Consolidation, CRS test, Permeability

#### 1. 서 론

최근 항만, 공항, 택지, 산업기지 등의 수요가 증대됨에 따라, 해안 인근 연약지반 상의 건설이 늘어나고 있다. 연약지반의 효과적인 이용을 위해서는 연약지반의 압밀특성을 정확하게 파악하는 것이 무엇보다 중요하다

다 하겠다. 특히 투수계수(permeability coefficient)는 연약지반의 압밀해석과 폐기물 처리장 등의 설계에 매우 중요한 역할을 하고 있으므로, 투수계수의 특성을 정확하게 평가하는 것이 중요한 과제가 되고 있다. Terzaghi의 1차원 압밀론 이후로, 다양한 실내 및 현장시험의 발달과 더불어 연약지반의 실제 압밀거동이 Terzaghi의

\*1 정회원, (주)바우컨설팅토 지반/터널부 연구원

\*2 정회원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 박사과정

\*3 정회원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 박사과정 수료

\*4 정회원, 고대 부설 방재과학기술연구소 선임연구원

\*5 정회원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 부교수

가정사항과 일치되지 않는 경우가 많이 발견되었으며, 이를 보완하는 압밀이론 등이 개발되어 왔다. Terzaghi 압밀이론에서는 투수계수가 일정하다고 가정하였으나 실제로 압밀이 진행됨에 따라 간극비의 감소로 인하여 투수계수는 감소하게 되며, 최근에는 수치해석을 이용한 압밀해석시 이를 고려하고 있다.

본 연구에서는 양산과 가덕도의 퇴적층에서 채취된 불교란 시료를 이용하여 표준압밀시험(IL<sub>CON</sub> test)과 일정변형률 압밀시험(CRS, Constant Rates of Strain test)을 수행한 후 각각의 시험결과를 분석하여 간극비에 따른 투수계수의 변화를 살펴보았다. 이를 위하여 Kozeny (1927)와 Carman(1956) 이후 제안되어 현재 외국에서 많이 사용되고 있는 (1)  $\log e - \log k(1+e)$ , (2)  $e - \log k$ , (3)  $\log e - \log k$  식들에 대한 양산점토의 적용성을 고찰하였다. 또한 양산점토의 횡방향투수계수( $k_h$ )를 CRS시험을 이용하여 산정하여 투수계수의 이방성에 대하여 살펴보았다. 마지막으로 점토의 투수성에 영향을 미치는 요소들을 살펴보고 투수계수와와의 관계를 고찰하였으며, 깊이에 따른 투수계수를 산정하여 평균투수계수를 제안하였다.

## 2. 간극비 - 투수계수 관계

흙과 같이 간극을 가지고 있는 매체의 투수계수는 흙 자체의 고유치가 아니며 흙을 구성하고 있는 점토광물의 영향을 받을 뿐만 아니라, 간극의 크기, 모양, 분포 그리고 물의 점성 등에 의하여 영향을 받는다. 그 중에서도 간극비가 투수계수에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 간극비와 투수계수의 관계를 규명하는 연구가 지속되어 왔다. 이러한 간극비와 투수계수와의 관계식은 사질토에 적용 가능한 Kozeny(1927)와 Carman(1956)의 제안 식 이후로 많은 연구가 이루어져 왔으며, 특히 점토에 적용시킬 수 있는 다음과 같은 식들이 제안되었다.

Samarasinghe 등(1982)은 정규압밀점토의 간극비와 투수계수의 관계를 다음 식 (1)과 같이 표현하였다.

$$k = C \frac{e^n}{1+e} \quad (1)$$

여기서 n 값은 일반적으로 4~5이고, C는 흙의 특성을 나타내주는 기준투수계수(reference permeability)이다. Taylor(1948)는 Kozeny(1927)와 Carman(1956)이 제안

한 식은 점토에 적용할 때 문제점이 있다고 지적하면서 다음 식 (2)와 같은  $e - \log k$ 의 경험적인 선형관계식을 제안하였다.

$$\log k = \log k_0 - \frac{e_0 - e}{C_k} \quad (2)$$

여기서  $C_k$ 는 투수계수지수(permeability change index)이고,  $k_0$ ,  $e_0$ 는 현장지반의 in-situ 상태의 투수계수와 간극비이다. 이 방법은 간극비의 변화에 따른 투수계수의 변화를 표현하는 가장 일반적인 방법으로, Mesri와 Rokhsar(1974)는 지반공학적인 변형률 범위, 즉, 현장에서 발생할 수 있는 변형률 범위 내에서 위의 식 (2)의 관계를 적용할 수 있다고 하였다.  $C_k$  값은 간극비에 따른 투수계수의 변화정도를 나타내는 지수이며, 초기간극비(initial void ratio,  $e_0$ )와 다음과 같은 경험적인 식으로 표현된다.

$$C_k = 0.5 e_0 \quad (3)$$

위의 식 (3)은 단지 투수계수지수와 초기간극비 사이의 경험적인 식이므로 이 식을 이용하여 직접적으로 투수계수지수를 구할 수는 없지만, 이 관계를 이용하여 대략적인 투수계수지수를 예측할 수 있다. Mesri와 Olson (1971)은 식 (2)는 현장에서 일반적으로 발생할 수 있는 간극비의 범위 내에서는 적용 가능하지만 변형률이 25%을 초과하는 대변형의 경우에는 간극비와 투수계수의 관계는  $\log e - \log k$ 의 관계식으로 표현된다고 하고, 다음 식 (4)를 제안하였다.

$$\log k = A \log e + B \quad (4)$$

여기서 A와 B는 흙의 성질에 따라서 결정되는 상수이다.

## 3. 투수계수 산정을 위한 실내시험

간극비의 변화에 따른 투수계수의 변화를 표준압밀 시험(IL<sub>CON</sub> test)과 일정변형률 압밀시험(CRS test)을 통하여 살펴보았다. 각각의 시험에 대한 투수계수 산정방법을 간단히 기술하면 다음과 같다.

### 3.1 표준압밀시험

Terzaghi는 압밀이 발생하는 동안에 투수계수(k), 구

속탄성계수(M), 그리고 압밀계수(C<sub>v</sub>)가 일정하다고 가정하고 다음과 같은 1차원 압밀이론을 유도하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (5)$$

여기서, c<sub>v</sub>는 압밀계수이고 다음과 같이 표현된다.

$$c_v = \frac{k(1+e)\sigma'}{0.434 \gamma_w C_c} = \frac{kM}{\gamma_w} \quad (6)$$

여기서 C<sub>c</sub>는 압축지수이다. 압밀계수는 일반적으로 간극수압을 측정하거나 도해법(logt 법 또는 √t 법)으로 산정되며, 투수계수는 식 (6)에 의해서 결정된다. Terzaghi의 1차원 압밀이론은 압밀계수를 구하기 위하여 여러 가지 가정을 사용하였기 때문에 이 방법을 이용하여 구한 투수계수는 신뢰성이 떨어진다 할 수 있으므로 다른 실내시험에서 구한 투수계수와 비교하여 사용하는 것이 바람직하다.

### 3.2 일정변형률시험(CRS Test)

CRS 압밀시험은 시간에 따른 변형률을 일정하게 유지하는 시험으로 기존의 표준압밀시험과는 달리 일면 배수 조건이며, 시료 하부에서 과잉간극수압을 측정한다. 따라서 시험과정 및 경계조건이 차이로 인하여 Terzaghi의 압밀이론 대신에 여러 학자들에 의해 CRS 압밀이론이 제안되었다. Wissa 등(1971)은 미소변형 이론에 근거하여 압밀계수는 일정하고 시료내의 간극수압의 분포를 포물선으로 가정하여 다음과 같은 기본방정식을 제안하였다.

$$c_v \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (7)$$

CRS 압밀이론의 무차원 변형률 식은 정상상태(steady condition)와 비정상상태(transient condition)로 구분되며, 정상상태에서의 선형거동의 경우 시료내의 평균유효응력과 압밀계수는 체적변화계수(m<sub>v</sub>)가 일정하다는 가정 하에서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma'_{v_{ave}} = \frac{1}{3} [2\sigma'_v(H, t) + \sigma'_v(0, t)] = \sigma'_v - \frac{2}{3} u_b \quad (8)$$

$$c_v = (H_0^2 / 2u_b) (\Delta\sigma / \Delta t) = \frac{r H^2}{2u_b m_v} \quad (9)$$

또한, 비선형거동의 경우 시료내의 평균유효응력과 압밀계수는 압축지수(C<sub>c</sub>)가 일정하다는 가정 하에서 다음과 같이 산정되며,

$$\sigma'_{v_{ave}} = [\sigma_v^3 - 2\sigma_v^2 u_b + \sigma_v u_b^2]^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

$$c_v = - \frac{H^2 \log [(\sigma_v + \Delta\sigma_v) / \sigma_v]}{2\Delta t \log [1 - (\frac{u_b}{\sigma_v})]} \\ = - \frac{0.434 r H^2}{2\sigma'_v m_v \log (1 - \frac{u_b}{\sigma_v})} \quad (11)$$

투수계수는 압밀계수와 체적변화계수를 이용하여 다음과 같이 산정된다.

$$k = c_v m_v \gamma_w \quad (12)$$

## 4. 시험대상지반의 특성 및 시험계획

Kim(1999)에 의하면 일반적으로 양산지역의 상부지반은 2 m 내외의 모래 또는 실트질 모래로 구성되어 있으며, 25~30 m 깊이까지 대체적으로 균질한 점토로 구성되어있고, 이 점토층은 15 m 정도의 심도를 경계로 지반공학적 성질이 상이한 두 층으로 분리된다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 양산지방의 압밀시험으로 산정한 선형 압밀하중은 10 m 이하에서 1 이하인 것을 볼 수 있다. 이것은 압밀해석에 있어서 상당한 논란이 되고 있는 문제이고, 많은 연구자들이 그 원인을 규명하기 위하여 현재까지 지속적으로 연구하고 있다. 그리고 전 심도에 대하여 자연함수비가 액성한계보다 큰 경향을 보이고 있기 때문에 예민비(sensitivity)가 크고, clay fraction(CF)의 경우에는 14~37 %정도로 실트 성분이 많이 포함되어 있다. 양산점토를 구성하고 있는 광물은 Kaolinite, Illite, 그리고 Montmorillonite 등이다. 그림 1은 양산점토의 일반적인 지반공학적 특성을 나타내고 있다.

양산지방의 투수계수지수 C<sub>k</sub>와 기준투수계수(reference permeability) C, 그리고 n 값을 구하기 위하여 다음 표 1과 같은 시험을 실시하였다. 그리고 CRS 시험으로 구한 현장의 투수계수를 검증하기 위하여 삼축압축 셀을 이용하여 직접적으로 정상류를 발생시킨 후 투수계수를 측정해 보았다. 또한 가덕도 시료에 대하여도 동일한 시험을 실시하여 양산시료의 결과와 비교해 보았다.

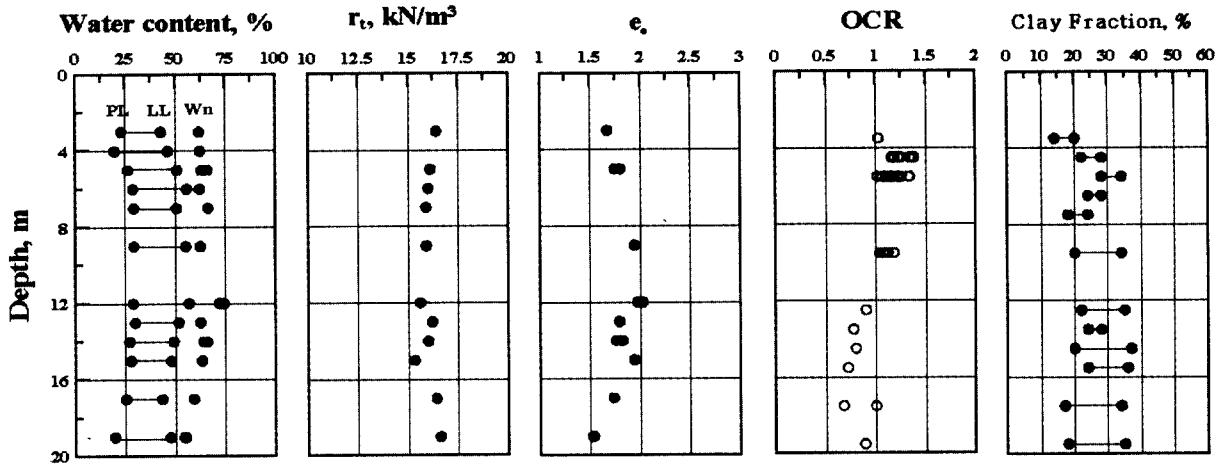


그림 1. 양산점토의 지반공학적 특성

표 1. 시험계획

Depth, m	시료위치	시험 종류(type of test)		
		CRS	ILCON	Triaxial
4~5	양산			
5~6	양산	V, H	V	
7~8	양산	V		V
9~10	양산		V	
12~13	양산	V, H		V
13~14	양산		V	
14~15	양산	V, H		V
15~16	양산		V	
17~18	양산	V		V
19~20	양산	V, H		
9~10	가덕도	V		
15~15.8	가덕도	V	V	
20~20.8	가덕도	V, H	V	
23~24	가덕도	V, H		

\* V : Vertical Specimen, H : Horizontal Specimen

## 5. 시험결과 및 분석

### 5.1 간극비-투수계수 관계 및 투수계수 지수

표준압밀시험은 하중증가비에 따른 단계 재하 시험으로 시험데이터가 한정되어 있으나, 일정변형률 압밀 시험(CRS test)은 연속적인 시험데이터를 얻을 수 있으므로 간극비의 감소에 따른 투수계수의 변화를 명확하게 볼 수 있다는 장점이 있다. 그림 2는 일정변형률 압밀시험으로 구한 압밀곡선과 간극비-투수계수의 관계를 보여주고 있다.

아래의 그림 2에서 볼 수 있듯이 CRS 시험결과와는 압

축초기에는 투수계수가 실제보다 크게 측정되는 경향이 있다. 그 이유는 압밀곡선의 재압축 구간에서는 시료의 교란, swelling 현상, 기계 오차, 그리고 작은 압축량 등에 의해서 시료 하부에서 수압이 제대로 발생되지 않기 때문에 압밀시험으로 산정된 재압축 구간 및 선형압밀하중 부근의 압밀정수는 상대적으로 신뢰성이 떨어진다고 할 수 있기 때문이다. 그러나 정규압밀 구간에서는 양산점토와 가덕도점토 모두  $e - \log k$ ,  $\log e - \log k(1+e)$  관계에서 선형적인 관계를 보이는 것으로 나타났다.

$e - \log k$  관계의 기울기인 투수계수지수(permeability change index,  $C_k$ )를 구하기 위해서는 일정한 변형률 범위 내에서 간극비와 투수계수의 관계가 선형적이어야 한다. 따라서 투수계수지수를 구하기 전에 변형률에 따른 투수계수의 변화, 즉  $e - \log k$  곡선을 살펴보고 선형적인 관계가 성립하는 부분을 선정하여야 한다. 시험결

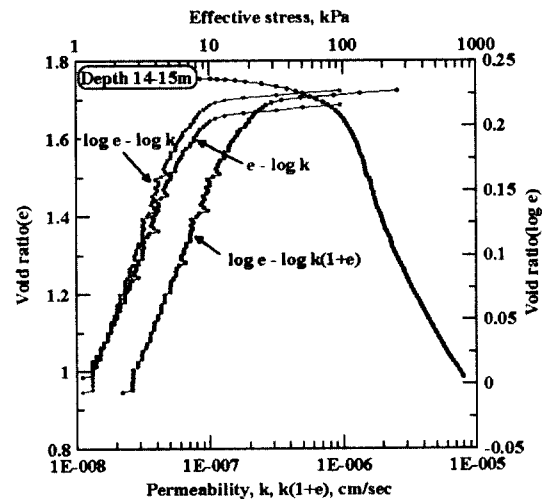


그림 2. 간극비와 투수계수 관계(CRS 시험)

표 2. 깊이에 따른 투수계수지수  $C_k$

Depth, m	Permeability change Index $C_k$		Average
	Yangsan	Gaduk-do	
4~16	0.880	0.917	0.899
16~24	0.690	0.686	0.688

과 변형률 25 %까지는 투수계수와 간극비의 관계가 선형적으로 변화하는 것을 관찰할 수 있었다. 따라서 변형률 25 %까지의 간극비 - 투수계수의 관계가 선형적으로 변화하는 구간에서 투수계수지수  $C_k$ 를 구하였다. 일반적으로 현장에서 발생할 수 있는 변형률 범위는 25 % 이하이므로,  $e - \log k$  곡선에서의 간극비와 투수계수 관계를 이용하여 양산점토와 가덕도점토의 투수계수지수와  $C_k=0.5e_0$ 의 경험적인 관계를 살펴보는 것이 가능하다고 판단된다. 따라서 표준압밀시험( $IL_{CON}$  test)과 일정변형률 압밀시험(CRS test)을 이용하여 양산점토와 가덕도점토의 투수계수지수를 산정하였다. 깊이에 따른 양산 시료와 가덕도 시료의 투수계수지수는 표 2와 같다. 전술한 바와 같이 일정변형률 압밀시험의 경우, 재압축구간과 선형압밀하중 부근에서는 시험 특성상 투수계수가 실제보다 크게 측정되므로 이 부분은 제외하고 투수계수지수를 산정하였다.

그림 3에서 볼 수 있듯이 CRS 시험결과는 양산시료와 가덕도 시료 모두에 있어서 투수계수지수가 작은 그룹과 상대적으로 투수계수지수가 큰 그룹으로  $e - \log k$  곡선을 나눌 수 있었고, 투수계수지수는 다른 요소보다 간극비에 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있다. 즉, 그림 1에서 볼 수 있었듯이 간극비가 상층에 비하여 깊은 16 m 이하의 심도에서는 투수계수지수 또한 작은 값이 산정되었다. 그리고 압축이 진행됨에 따라 같은 간극비에서 투수계수지수가 작아지기 때문에 두 개의 그룹이 각각 수렴함을 보여주고 있다.

표준압밀시험을 분석한 결과 CRS 시험에서와 같이 깊이에 따른 특정한 경향을 관찰할 수는 없었다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 표준압밀시험의 결과는 CRS 시험에 비하여 분산이 크기 때문에 기울기를 구할 때 오차가 발생할 수 있을 뿐만 아니라 완전한 선형적인 관계를 얻을 수 없었다. 그러나 표준압밀시험으로 구한 투수계수지수  $C_k$ 의 범위는 0.624~1.037로서 CRS 시험 결과와 유사한 범위를 나타내고 있음을 알 수 있다.

그림 5는 투수계수지수  $C_k$ 와 초기간극비  $e_0$ 의 관계를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 양산점토와 가덕도점토의 투수계수지수  $C_k$ 는 경험적인 관계식  $C_k=0.5e_0$

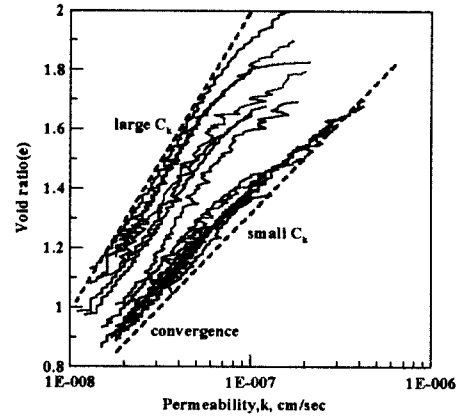


그림 3. CRS 시험으로 구한  $e - \log k$  관계

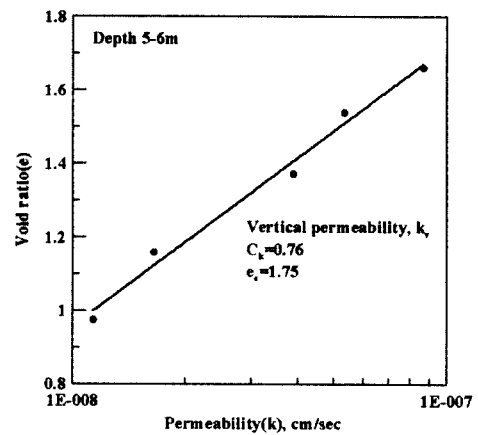


그림 4. 표준압밀시험으로 산정한 투수계수지수

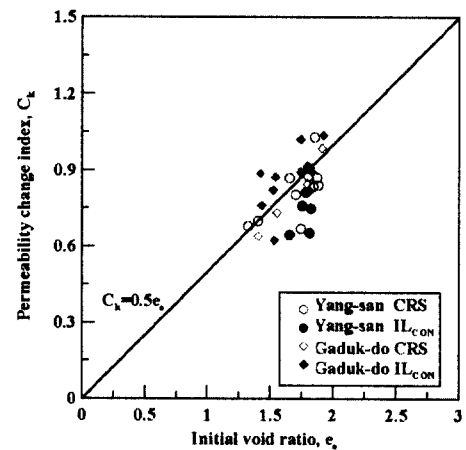


그림 5.  $e_0$ 와  $C_k$ 의 관계

직선 상에 분포함을 관찰할 수 있다. 그러나 시험결과가 간극비와 투수계수지수의 경험적인 관계식을 만족한다 하더라도, 이 식을 이용하여 정확한 투수계수를 예측하기에는 다소 무리가 있으므로, 사용 시 주의를 기울여야 한다고 판단된다.

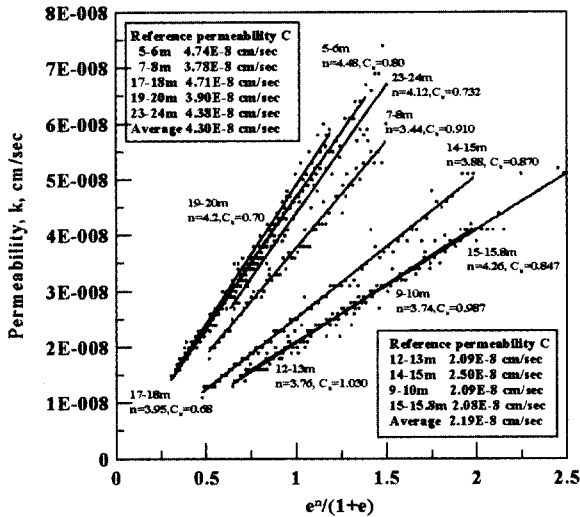


그림 6.  $\log e - \log k(1+e)$  관계

### 5.2 $\log e - \log k(1+e)$ 관계

전술한 바와 같이 양산점토와 가덕도점토의 투수계수와 간극비와의 관계는  $e - \log k$  관계뿐만 아니라  $\log e - \log k(1+e)$ 의 관계로도 표현되는 것으로 나타났으며, 그 결과는 그림 6과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 양산점토는 일반적인 변형을 내에서  $\log e - \log k(1+e)$  곡선이 선형의 관계를 보이는 것으로 나타났다.

분석결과 표준압밀시험으로 구한 기준투수계수 (reference permeability) C는  $0.58 \sim 7.56 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 의 범위를 보이고 CRS 시험에서 구한 기준투수계수(reference permeability)는  $2.09 \sim 4.38 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 의 범위를 보이고 있다. 그리고 CRS 시험결과는 그림 6에서 볼 수 있듯이 두 그룹으로 나눌 수 있다. 즉, 기준투수계수 C의 범위가  $2.08 \sim 2.50 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 이고 평균이  $2.19 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 인 한 그룹과, C 값의 범위가  $3.78 \sim 4.74 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 이고 평균이  $4.30 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 인 그룹으로 나눌 수 있다. 따라서 기준투수계수 C값은 시료뿐만 아니라 시험방법에 의해서도 상당한 영향을 받는다고 판단된다. 위의 그림 6에서 볼 수 있듯이 7~8 m의 경우를 제외하고는 일반적으로 작은 투수계수지수를 보이는 그룹은 큰 기준투수계수를 보이고, 큰 투수계수지수를 보이는 그룹은 작은 기준투수계수를 갖는 경향이 있는 것으로 나타났다.

시료와 시험방법에 따라서 상이한 결과를 보이는 기준투수계수와는 다르게 n 값은 표준압밀시험과 CRS 시험 모두 거의 동일한 범위를 보이고 있다. 즉, 표준압밀

시험의 경우에는 3.44~4.88의 범위를 보이고 있고, CRS 시험의 경우에는 3.75~4.88의 범위를 보이고 있다. 따라서 n 값은 시료와 시험방법에 따라서 그 값이 크게 변하지 않는다고 판단된다.

### 5.3 투수계수의 이방성

본 연구에서는 수평방향의 투수계수를 산정하기 위하여 시료를 수직방향으로 성형하여 CRS 시험을 실시하였다. 전술한 바와 같이 CRS 시험은 선행압밀하중 부근에서는 투수계수를 과대평가하는 경향을 보이므로, 본 연구에서는 현장의 투수계수를 산정할 경우,  $e - \log k$ 의 곡선의 직선부분의 연장선과 현장의 간극비가 만나는 부분의 투수계수를 현장의 투수계수로 결정하였다. 이 방법의 타당성을 검증하기 위하여 직접적으로 정상류를 발생시켜 투수계수를 측정하는 방법 중의 하나인 삼축압축 셀을 이용하여 구한 투수계수와 위의 방법으로 구한 투수계수와 비교하여 보았고, 그 결과는 다음 그림 7과 같다.

위의 그림 7에서 볼 수 있듯이 삼축압축 셀을 이용하여 구한 현장의 투수계수는 선행압밀하중 근처에서는 CRS 시험 결과에서 산정한 투수계수보다 작으며, CRS 시험의 결과인  $e - \log k$  곡선의 직선부분을 연장하여 구한 투수계수와 거의 일치함을 관찰할 수 있었다. 따라서 이 방법을 이용하여 현장의 투수계수를 구하는 것은 타당하다고 판단되며, CRS 시험으로 현장의 투수계수를 구할 경우에 유용하게 이용할 수 있는 방법으로 판단된다.

이와 같은 방법으로 연직투수계수와 수평투수계수를 결정하여 투수계수의 이방성을 평가한 결과는 그림 8과

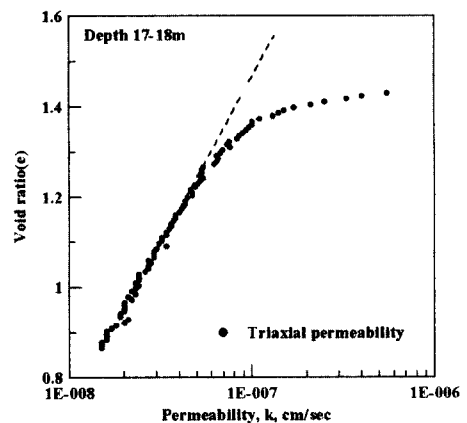


그림 7. 삼축압축 셀을 이용한 투수계수

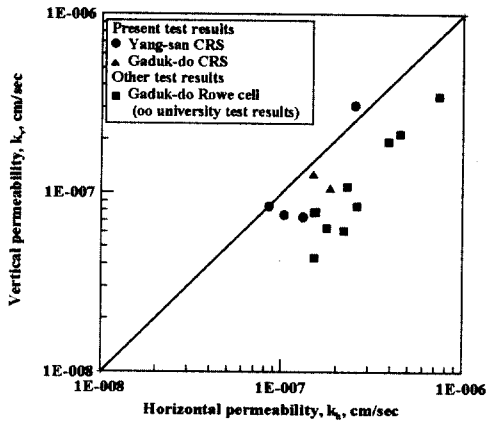


그림 8. 투수계수의 이방성

같다. 그림에서 볼 수 있듯이 CRS 시험으로 산정한 투수계수의 이방성은 0.81~1.78의 범위에 있고 평균값은 1.32로 평가되었다.

해성점토의 투수계수의 이방성은 최대 2를 넘지 않는 것이 일반적이다. 그러나 CRS 시험으로 산정한 투수계수의 이방성은 횡방향으로 정상류를 유발시키는 Rowe cell 시험으로 구한 값보다는 상대적으로 작은 값으로 평가되었다. 그 이유는 본 연구에서 사용한 압밀 셀이 Rowe cell보다 직경이 작았고, 횡방향으로 압축을 하여 투수계수를 측정한 CRS 시험은 연직방향으로 압축이 발생하면서 횡방향으로 투수가 발생하는 실제상황과는 상이한 조건이기 때문인 것으로 판단된다.

#### 5.4 현장투수계수

현장의 투수계수(in-situ permeability)에 영향을 미치는 요소로는 입도분포, clay fraction(CF), 소성지수, 그리고 간극비 등을 들 수 있다. 본 연구에서는 위와 같은

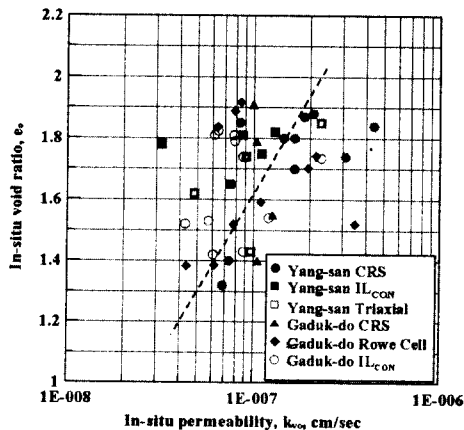


그림 9. 간극비와 투수계수 관계

요소들과 투수계수와의 관계를 고찰해 보았다.

투수계수에 가장 큰 영향을 미치는 간극비와 투수계수와의 관계를 그림 9에 나타내 보았다. 일반적으로는 간극비가 작으면 현장의 투수계수는 작지만, 그림 9에서 볼 수 있듯이 지반의 불균질한 특성으로 인하여 그러한 경향을 관찰하기는 어려웠다.

또한 투수계수에 영향을 미치는 요소로 clay fraction (CF)을 들 수 있다. 그림 10에서 보듯이 CF가 클수록 2 $\mu$ m이하의 점토성분이 많다는 것이므로 투수계수는 작아지는 경향을 관찰할 수 있었지만 분산정도가 크기 때문에 CF와 투수계수의 관계를 특정한 식으로 표현하지 않았다.

그림 9과 10에서 보듯이 어느 특정한 단독의 요소로는 투수계수의 특성을 정확하게 파악할 수 없다는 것을 알 수 있었다. 따라서 양산점토와 가덕도점토의 투수계수의 특성을 파악하기 위하여  $(e/CF)/(A_c+1)$ 와 같은 복합적인 요소를 사용하였고, 그 결과는 다음 그림 11과 같다. 그림 11에서 보듯이 투수계수와  $(e/CF)/(A_c+1)$ 의 관계를 특정 식으로 표현할 수 없었지만 Tavenas(1983a, 1983b)등이 제안한 곡선보다는 좌측에 위치하고 있다는 것을 관찰할 수 있었다.

Tavenas(1983a, 1983b)등이 시험한 점토들은 CF이 대략 55~80% 정도로 비교적 큰 값을 보이고 있는 반면, 양산점토의 경우에는 14~37%, 가덕도 시료의 경우에는 최대값이 50% 이하로 비교적 낮은 값을 보이고 있다. 여기서 특이한 것은 전술한 바와 같이 일반적으로는 clay fraction(CF)이 작으면 실트질 성분이 많이 포함되어 있기 때문에 투수계수가 큰 것이 일반적이라고 할 수 있다. 따라서 비교적 CF가 작은 양산과 가덕도점토의 투수계수가 Tavenas(1983a, 1983b) 등이 시험한 점토

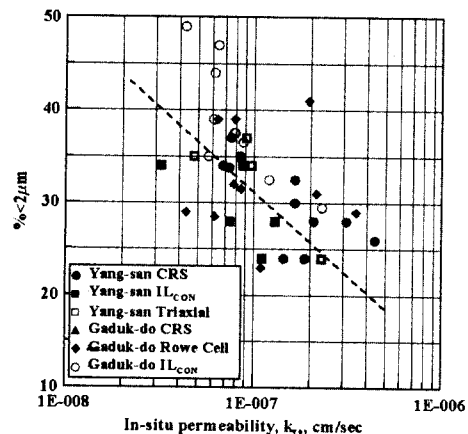


그림 10. CF과 투수계수 관계

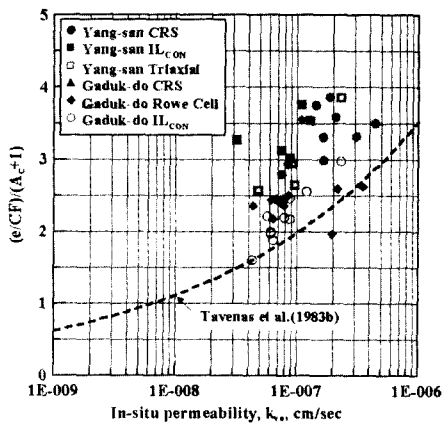


그림 11.  $(e/CF)/(A_c+1)$ 와 투수계수 관계

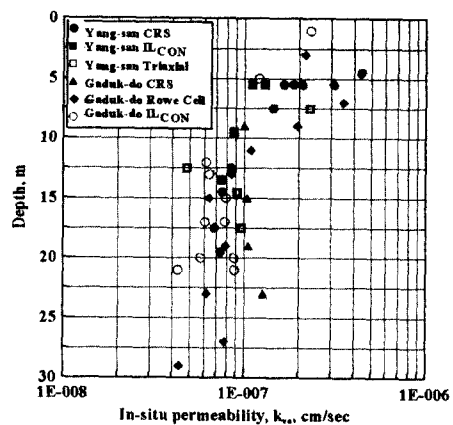


그림 12. 깊이에 따른 투수계수

보다 커야하나, 투수계수를  $(e/CF)/(A_c+1)$ 로 표현한 결과 양산점토와 가덕도점토가 CF이 작음에도 불구하고 Tavenas(1983a, 1983b) 등이 제안한 곡선보다 좌측에 있으므로 투수계수는 더 작다는 것을 알 수 있었다. 그 원인으로서는 상이한 점토광물과 퇴적조건 등을 들 수 있지만, 지속적인 연구를 통하여 정확한 원인을 파악할 필요가 있다고 사료된다.

앞의 내용에서 보았듯이 여러 요소들이 현장의 투수계수에 복합적인 영향을 미치고 있어서 각각의 영향성 연구만으로는 현장투수계수를 정확하게 파악하기가 어렵다는 것을 알 수 있었다. 그림 12는 깊이에 따른 투수계수이다.

그림 12에서 볼 수 있듯이 12 m 심도에서 투수계수가 급격하게 변하는 것을 관찰할 수 있었다. 즉, 지표면에서 12 m 까지는 평균투수계수가  $2.0 \times 10^{-7}$  cm/sec이고, 그 이하의 심도에서는 대략  $7.5 \times 10^{-8}$  cm/sec의 값을 보이고 있다. 이 결과에서 양산지역은 약 15 m를 기준으로 지층이 구별된다는 다른 연구내용이 타당성이 있음을 알 수 있다.

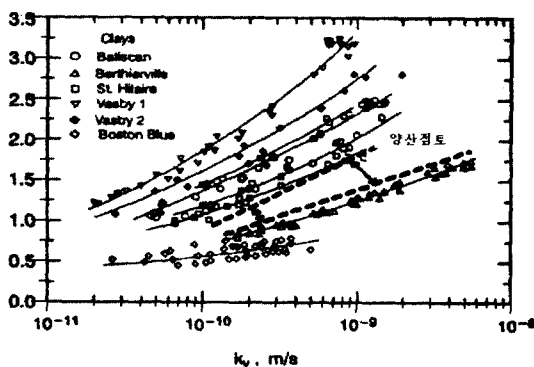


그림 13. 투수계수와 간극비 관계

### 5.5 다른 점토와의 비교

양산 지방과 가덕도 지방의 간극비와 투수계수와의 관계를 외국의 문헌을 참조로 비교한 결과는 그림13과 같다. 그림에서 보듯이 낙동강 하구에 형성된 양산점토는 비교적 간극비가 작은 편에 속한다는 것을 알 수 있고, 동일한 투수계수의 변화에 대하여 투수계수의 감소가 크다는 것을 알 수 있다.

### 6. 결론

본 연구에서는 양산점토의 퇴적층에서 채취된 불교란 시료를 이용하여 표준압밀시험(ILCON)과 일정변형률 압밀시험(CRS, Constant Rates of Strain test)을 수행하여 간극비와 투수계수와의 관계를 규명하였으며, 투수계수의 이방성과 깊이에 따른 투수계수를 고찰하였다. 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) CRS 시험은 재압축구간과 선행압밀하중 근처에서 투수계수를 과대평가하는 것으로 나타났으나, 연속적인 시험결과를 얻을 수 있기 때문에 상대적으로 표준압밀시험보다 간극비의 감소에 따른 투수계수의 변화특성을 쉽게 관찰 할 수 있는 것으로 나타났다.
- (2) 양산점토의 간극비와 투수계수와의 관계는  $e - \log k$ ,  $\log e - \log k$ , 그리고  $\log e - \log k(1 + e)$ 의 세 관계 모두 일정 변형률 범위 내에서 선형의 관계를 보이는 것으로 나타났으며 이들 관계식의 국내 연약점토에 대한 적용이 가능한 것으로 판단된다.
- (3) CRS 시험으로 산정한 투수계수지수는 4~16m 심도에서는 평균 0.899, 16m~24m의 심도에서는 0.688



의 값을 보였다. 표준압밀시험으로 산정한 투수계수 지수는 깊이에 따라서 특정한 경향을 관찰할 수는 없었지만, 0.624~1.037의 범위로 CRS 시험의 범위와 유사한 결과를 보였다. 그리고 초기간극비와 투수계수지수의 경험적인 관계식( $C_k=0.5e_0$ )이 유효한 것으로 나타났다.

- (4) n값은 시험의 종류와 시료에 관계없이 3.44~4.88의 범위를 보였다. CRS 시험으로 산정한 기준투수계수(reference permeability)의 값은 평균이 각각  $2.08 \times 10^{-8}$ cm/sec,  $4.30 \times 10^{-8}$ cm/sec인 두 그룹으로 나눌 수 있었다. 표준압밀시험으로 구한 기준투수계수는  $0.58 \sim 7.56 \times 10^{-8}$ cm/sec로 CRS 시험에 비하여 큰 범위를 보였다. 따라서 기준투수계수는 n 값에 비하여 시험방법과 시료에 영향을 많이 받는 것으로 판단된다.
- (5) CRS 시험으로 구한 투수계수의 이방성은 0.81~1.78의 범위를 보이고 평균값은 1.32로 평가되었다. 이 값은 Rowe cell 시험으로 구한 값보다 과소평가 되는 경향을 볼 수 있었다.
- (6) 양산과 가덕도점토의 현장 투수계수(in-situ permeability)의 특성은 간극비, clay fraction(CF)과 같은 단독의 요소로는 설명되어지지 못했고,  $(e/CF)/(A_c+1)$ 과 같은 요소로도 완전하게 설명되지 못했다. 그러나 Tavenas 등(1983a, 1983b)이 제안한 곡선과 비교해 보았을 때 양산과 가덕도점토는 특정 부분에 결과들이 분포되어있음을 관찰할 수 있었다.
- (7) 깊이에 따른 투수계수를 산정한 결과 대략 12 m를 전후로 투수계수를 나눌 수 있었다. 지표에서 12 m까지의 평균투수계수는  $2.0 \times 10^{-7}$ cm/sec이고, 12 m보다 깊은 심도에서는  $7.5 \times 10^{-8}$ cm/sec의 평균투수계수가 산정되었다.

## 참 고 문 헌

1. Carman, P. C. (1956), Flow of gases through porous media, Butterworths, London, pp.134.
2. Kim, S. K. (1999), "Large Consolidation Settlement Occurred during Reclamation Works in the Nakdong River Mouth", KGS '99 Dredging an Geoenvironmental Conference, Nov.2, pp.35-48.
3. Mesri, G. and Olson, R. E. (1971), "Mechanisms controlling the permeability of clays", Clays and Clay Minerals, Vol.19, pp. 151-158.
4. Mesri, G. and Rokhsar, A. (1974), "Theory of consolidation for clays", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.100, GT8, pp.889-904.
5. Samarasinghe, A. M., Huang, Y. H., and Drnevich, V. P. (1982), "Permeability and Consolidation of Normally Consolidated soils", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.108, GT6, pp.835-850.
6. Taylor, D. W. (1948), Fundamentals of soil mechanics, John Wiley & Sons Inc., New York, pp.700.
7. Tavenas, F., Jean, P., Leblond, P., and Leroueil, S. (1983a), "The permeability of natural soft clay. Part I : Method of laboratory measurement", Canadian Geotechnical Journal, Vol.20, pp.629- 644.
8. Tavenas, F., Jean, P., Leblond, P., and Leroueil, S. (1983b), "The permeability of natural soft clay. Part II : Permeability characteristics", Canadian Geotechnical Journal, Vol.20, pp.645-660.
9. Wissa, A. E. Z., Christian, J. T., Davis, E. H., and Heiberg, S. (1971), "Consolidation at Constant Rate of Strain", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.97, No. SM10, pp.1393-1413.
10. Kozeny, J. S. (1927), Uber Kapillare Leitung des wassers im Boden, Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien, Abteilung II a, pp.136.

(접수일자 2001. 4. 21)