

재성형된 이암풍화토를 이용한 정규압밀영역의 압밀 및 투수특성

The Characteristics of Consolidation and Permeability in Normally Consolidated Region Using a Remolded Decomposed Mudstone Soil

김 영 수*¹ Kim, Young-Su

김 기 영*² Kim, Ki-Young

이 상 웅*³ Lee, Sang-Woong

Abstract

When clay foundations of embankments are treated with vertical drain, essentially, the strain occurs to vertical direction but the water flow is radial. The initial horizontal permeability and its variation with the vertical compression are key parameters for the choice of the type of drains, their spacing, and affect to the cost of the project. In this study, CRS consolidation test is performed to investigate the anisotropic characteristics of decomposed mudstone soil and direct permeability test is performed on the same specimens. The results of testing show that C_h is larger than C_v . Specially, the $C_v - \sigma_v'$ relationship for a soil sample is viewed from three different curve segments corresponding to overconsolidated, transition and normally consolidated states. The anisotropic ratio, $r_k (k_h/k_v)$ is 2.19. Coefficient of permeability in normally consolidated state is related to its void ratio and permeability parameter n . C can be determined from a linear plot of $\log[k(1+e)]$ versus $\log e$. The slope, n , of graphs is the same, whereas the vertical intercept, $\log C$, seems to vary somewhat for anisotropic.

요 지

점성토 지반의 성토시 사용되는 수직배수제에 의한 지반의 침하는 대부분 수직방향으로 일어나지만 압밀에 의한 간극수의 흐름은 횡방향으로 일어난다. 따라서 정확한 횡방향투수계수 및 압밀계수의 산정은 배수제의 종류 및 간격 뿐 아니라 공사비의 증감에 커다란 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 CRS(Constant Rates of Strain)시험을 이용한 이암풍화토의 압밀 및 투수의 이방성을 연구하고 그 결과를 동일시료에 대한 직접투수시험과 비교하였다. 시험결과 횡방향 압밀계수가 수직방향 압밀계수보다 크게 나타났으며, 압밀계수와 유효응력과의 관계에서 유효응력에 따라 압밀계수가 과압밀부분, 전이부분 그리고 정규압밀부분으로 구분됨을 알 수 있었다. 또한 투수계수의 이방성비(r_k)는 약 2.19로 나타났고 정규압밀 영역에서의 투수계수(k)와 간극비(e)와의 관계에서 $\log[k(1+e)]$ 와 $\log e$ 의 관계가 선형적임을 알 수 있었다. 그리고 이 결과로부터 얻어진 투수상수 n 값은 이방성에 상관없이 비슷하게 나타났으나, C 값은 이방성에 따라 다소 차이가 있음을 알 수 있었다.

Keywords : Anisotropy, Permeability, Consolidation, Constant rates of strain, Decomposed mudstone soil.

*1 정희원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

*2 정희원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 박사과정 수료

*3 정희원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 박사과정 수료

1. 서론

점성토의 압밀 및 투수문제는 산업발전과 더불어 지반 공학에 있어 매우 중요한 문제로 부각되고 있다. 따라서 점성토 지반의 수직 및 수평방향에 대한 정확한 투수계수의 확보는 공기의 단축 뿐 아니라 경제적인 효과면에서도 상당히 중요하다고 할 수 있다. 국내의 경우 점성토 지반의 압밀특성을 연구하기 위한 실내시험으로는 Terzaghi의 해석이론에 따른 표준압밀시험이 주로 이용되고 있다. 그러나, 장시간의 시험기간, 연속적인 시험·데이터의 부족 그리고 현장 재현성의 어려움과 같은 시험방법상의 문제가 야기되었을 뿐 아니라 횡방향 압밀시험을 수행할 수 없어 정확한 횡방향 압밀 및 투수계수의 확보가 어려운 실정이다. 최근에 이러한 표준압밀시험의 단점을 보완할 수 있는 CRS 압밀시험방법이 개발되어 일부 선진국에서는 이미 실용화 단계에 있는 실정이다. 본 연구에서는 로우셀을 이용한 이암풍화토의 수직, 수평방향의 CRS 압밀시험을 실시하므로써 이방성에 따른 선형압밀하중의 차이점 및 C_v , k_v 의 차이점을 알아보고자 한다. 또한 이방성에 따른 투수특성을 파악하고 그 결과를 기존에 제안된 경험식에 적용하므로써 정규압밀영역에서 이암풍화토에 가장 적합한 간극비(e)와 투수계수(k)의 관계식을 제안하고자 한다. 끝으로 이 결과를 동일시료에 대한 직접투수시험 결과와 비교함으로써 CRS시험의 유효성 및 타당성을 검증하였다.

2. 해석방법

2.1 일정변형률 압밀이론

CRS시험은 표준압밀시험과는 시험과정 및 경계조건이 다르므로 기존의 Terzaghi의 해석방법을 대신할 수 있는 새로운 압밀이론을 필요로 하게 되었다. Smith와 Wahls(1969)은 유효수직응력(σ_v')과 수직변형률(ϵ_v)의 관계를 직선적으로 가정하여 평균유효응력(σ_v')과 압밀계수(C_v), 투수계수(k_v)와의 관계를 규정하는 관계식을 발표하였다. 이 후 Wissa et al. (1971)는 평균유효응력(σ_v')과 압밀계수(C_v), 투수계수(k_v)의 관계가 비선형($d\epsilon_v/d\log \sigma_v' = \text{constant}$)이라는데 기초를 둔 새로운 관계식을 제안하였다. 즉, 응력분포 상태가 일정하고 무차원 시간계수(T)가 일정하다는 정상 침투류 상태와, 빠른 하

중변형에 의해 하중초기 발생하는 비정상류 침투상태를 고려한 식이다. 이 2가지 조건을 구분하기 위해 Wissa et al.는 무차원 시간계수(T)를 도입했다. 여기서 시간계수(T)는 시료내 응력분포의 전이정도를 나타내는 상수로써, 임의시간 동안의 함수인(F_3)를 이용해 구할 수 있다. F_3 과 무차원 시간계수(T)는 식 (1), (2)와 같다.

$$F_3 = \frac{\log(\sigma_v - \Delta u_b) - \log(\sigma_{vt=0})}{\log \sigma_v - \log(\sigma_{vt=0})} \quad (1)$$

$$T = 4.78(F_3)^3 - 3.21(F_3)^2 + 1.65F_3 + 0.0356 \quad (2)$$

여기서, 식 (2)의 $T > 0.5$ 이면 정상 침투류 상태라고 가정할 수 있으며, Wissa et al.(1971)의 정상 침투류 조건을 고려한 해석방법은 ASTM D4186-89 기준(Cell 중앙 바닥면에서 발생하는 과잉 간극수압이 총 수직응력의 30%을 초과할 수 없다)을 만족하는 즉, CRS 시험중 발생 할 수 있는 전이조건을 제한하기 위한 시도이다. 가정한 비선형 거동은 응력이 깊이에 따라 포물선형태를 이루며, 정상 침투류 상태인 경우 평균유효응력(σ_v'), C_v 그리고 k_v 와의 관계를 식 (3), (4), (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_v' = (\sigma_v^3 - 2\sigma_v^2 \Delta u_b + \sigma_v \Delta u_b^2)^{1/3} \quad (3)$$

$$C_v = \frac{-H^2 \log \frac{\sigma_{v2}}{\sigma_{v1}}}{2\Delta t \log(1 - \frac{\Delta u_b}{\sigma_v})} \quad (4)$$

$$k_v = \frac{-0.434 \gamma H^2 \gamma_w}{2\sigma_v' \log(\frac{\sigma_v - \Delta u_b}{\sigma_v})} \quad (5)$$

여기서; H : 시료의 높이,

γ : 변형률

γ_w : 물의 단위중량

σ_{v1}, σ_{v2} : Δt 동안 가해지는 전응력

σ_v' : 식 (3)에서 구한 Δt 동안의 전응력

Δu_b ; Δt 동안 변화한 간극수압

$T < 0.5$ 인 비정상 침투류 조건에서의 C_v 와 k_v 는 식 (2)에서 구해진 시간계수(T)와 Terzaghi이론에서 구할 수 있다.

$$C_v = \frac{TH^2}{t} \quad (6)$$

$$k_v = \frac{0.434 C_v \gamma_w \gamma \Delta t}{\sigma_v' \log \frac{\sigma_{v2}}{\sigma_{v1}}} \quad (7)$$

위에서 처럼 CRS 이론의 합리성에도 불구하고 흙 요소의 변형분포에 대한 정확한 설명의 부재와 변형률에 따른 압밀특성의 변화 그리고 빠른 변형률에 의해 발생한 과잉 간극수압이 총 가해진 수직응력의 30%를 초과할 경우 위 공식의 적용성 유무, CRS 시험시 변형률의 영향이 기존에 사용되고 있는 표준압밀시험의 결과 및 현장 거동과 비교 시 얼마나 차이가 있는지에 대한 연구는 중요한 과제로 남아 있다.

2.2 횡방향 직접투수계수 산정방법

횡방향 투수시험은 그림 1과 같이 수압차에 의하여 흐름이 발생할 경우, 반경 r 인 지점의 미소부분 dr 에 대한 유량은 Darcy의 법칙을 적용하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} q &= kiA \\ A &= 2\pi rH \\ i &= \frac{dh}{dr} \\ \therefore q &= 2\pi rH \frac{dh}{dr} k_r \end{aligned}$$

여기서, dh/dr 은 동수경사, H 는 시료의 높이를 나타내며, 이를 반경 r 과 수두 h 에 대해 적분하면 식 (8)과 같다.

$$k_r(h_2 - h_1) = \frac{q}{2\pi H} \log_e \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (8)$$

여기서, r_1, r_2 는 모래기둥과 시료의 반경, h_1, h_2 는 r_1, r_2 일때의 수두를 의미한다. 압력차와 수두차의 관계

표 1. 간극비(e)와 투수계수(k)에 관한 경험식

Samarasinghe et. al (1982)	Casagrand	Amer & Awad (1974)	Kozeny & Carman (1983)	Shahabi, Das & Tarquin (1984)	Mitsuharu et.al (1997)
$k = C_3 \frac{e^n}{1+e}$	$k = 1.4e^2 k_{0.85}$	$k = C_2 D_{10}^{2.32} C_u^{0.6} \frac{e^3}{1+e}$	$k = C_1 \frac{e^3}{1+e}$	$k = 1.2 C_u^{0.745} D_{10}^{0.89} \frac{e^3}{1+e}$	$\log k = 2.87(1 + \log h)$
C_3 : 경험적인상수 n : 경험적인상수 e : 간극비 적용범위 : clay	$k_{0.85}$: 간극비 0.85 일때의 투수계수 e : 간극비 적용범위 : Medium to Clean sand	D_{10} : 유효입경(mm) C_u : 균등계수 C_2 : 상수 e : 간극비 적용범위 : sand	C_1 : 상수 e : 간극비 적용범위 : Sand	C_u : 균등계수 D_{10} : 유효입경(mm) 적용범위 : Medium to fine sand	$k = \frac{0.3d_{90}}{\exp(0.5(0.484 + 0.42 \ln C_u)^2)} G_s \frac{e}{G_s}$ G_s : 비중 적용범위 : Clay

는 식 (9)와 같고 이를 식 (8)에 대입하면 식 (10)과 같은 수평방향 투수계수 산정식이 유도된다.

$$\Delta p = \Delta h \rho g = (h_2 - h_1) \rho g \quad (9)$$

$$k_r (m/sec) = 0.26 \left(\frac{q}{H \Delta p} \right) \log_e \left(\frac{D}{d} \right) \times 10^{-4} \quad (10)$$

여기서; $q = ml/minute$

$H \ \& \ \Delta h = mm$

$\Delta p = kN/m^2$

$D =$ 시료의 직경

$d =$ well의 직경

$\rho =$ 물의 단위중량(Mg/m^3)

$g = 9.81m/sec^2$

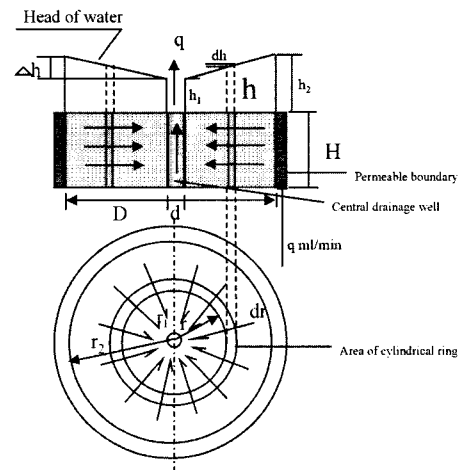


그림 1. 횡방향 직접투수시험 개요도

2.3 투수계수에 대한 경험식

지금까지 투수계수에 대한 경험식이 많은 학자들에 의해 제안되어 왔으며, 그 중 많이 쓰이고 있는 몇 가지 경험식을 요약해 보면 표 1과 같다.

3. 실내시험

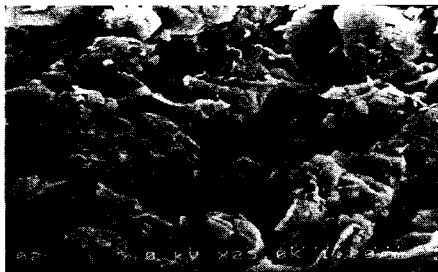
본 연구에서는 CRS 압밀장치를 이용한 수직, 횡방향 압밀시험 및 동일시료에 대한 수직, 횡방향 직접투수시험을 실시하였다.

3.1 시료성형

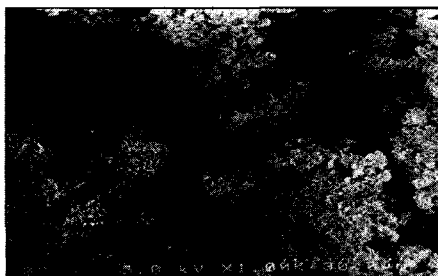
포항지역 이암은 퇴적암중 쇄설성 퇴적암으로 분류할 수 있으며, 미고결 퇴적암에 속한다. 이러한 미고결된 이암은 공기 및 물에 접촉시 급격한 풍화를 일으키는 것으로 알려져 있다. 본 연구에 사용된 시료는 포항두호동 현장에서 채취한 것을 자연 건조후 증류수에 1~2달 방치한 후 No. 40번 체로 거른 다음 진공장치가 연결된 토조에서 교반과 동시에 시료속의 공기를 제거하였다. 그리고 0.037, 0.075, 0.15, 0.3, 0.6kg/cm² 로 예비압밀시킨 후 하중을 제거하고 시료를 일정크기로 절단한 다음 응력해방과 함수비의 변화를 막기 위해 파라핀으로 밀봉하여 보관하였다. 이암풍화트의 물성치 및 SEM 사진을 10000~25000 배율로 확대한 사진은 표 2, 그림 2와 같다.

표 2. 이암풍화토의 물성치

Gs	D ₅₀ (mm)	D ₁₀ (mm)	C _u	C _c	LL(%)	PL(%)	PI
2.595	0.032	0.009	4.275	0.575	48.25	23.7	24.55



(a) 25000배율 확대



(b) 10000배율 확대

그림 2. 이암풍화토의 전자현미경 사진

3.2 시험장치

본 시험에 사용된 장치는 미국 GEOCOMP사에서 제작한 제품으로 CRS 시험, 표준압밀시험, 일정동수경사 압밀시험 (Controlled gradient test) 및 일정하중률 압밀시험 (Constant rate of loading test) 등을 수행할 수 있는 다기능 시험기이다. 세부 시험장치로는 로드셀(최대 2000lb), 간극수압계, 직류 모터, LVDT(최대 5cm) 및 컴퓨터 제어장치로 구성되어 있으며, 사용된 압밀장치는 로우셀(직경 7.5cm)를 사용하였다. 시험준비 완료 후의 모습은 그림 3과 같다.

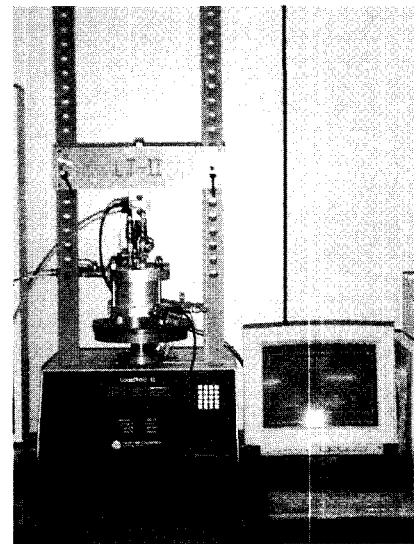


그림 3. 일정변형률 압밀시험의 setting후 모습

3.3 시험방법

3.3.1 CRS를 이용한 수직 및 횡방향압밀시험

CRS 압밀시험은 로우셀(7.5cm)을 이용해 실시하였으며, 사용된 시료의 크기는 이방성에 상관없이 직경 7.5cm, 높이 3cm의 시료를 사용하였다. 수직압밀시험의 시험절차는 표준압밀시험과 비슷하나 배압을 이용한 시료의 포화 및 시료 하단부에서의 간극수압측정 그리고 점증하중 대신 일정변형률이 이용되는 점이 표준압밀시험과 다르다. 또한 표준압밀시험기와는 달리 로우셀은 압력수두를 이용함으로써 재하시 시료에 균등한 응력을 줄 수 있으며, 압밀링과 시료와의 마찰을 최소화 할 수 있다. 먼저 시험전 다공판을 꿰여 다공판 사이의 공기를 제거하였으며, 준비된 시료를 성형하여 로우셀을 조립하고 시료의 포화를 위해 배압을 50kpa 단위로 300kpa까지 점증시켜 B 값이 0.98 이상이 되도록 한 후 미리 결정된 변형률을 컴퓨터에 입력

하여 일정변형률이 가해지도록 하였다. 시험중 하중과 변위는 각각 로드셀과 변위측정계를 이용하여 측정하고 간극수압은 로우셀 하부에 간극수압계를 설치하여 컴퓨터에서 자동 저장되도록 하였다. 횡방향 압밀시험인 경우엔 먼저 시료의 중앙부위를 직경=1.1cm의 원형으로 제거한 후 이부분에 포화된 모래를 주입하고 배수재료와의 마찰 영향 및 시료의 균일성을 검증하기 위해 중앙부분에서 제거한 시료를 일정높이로 잘라 각 높이별 함수비를 측정하였다. 이후 수직압밀과 동일한 방법으로 시료를 포화시키고 일정변형률로 하중을 재하하였으며, 제거한 시료 중앙부위에 대한 간극수압은 측정이 곤란한 관계로 하단부 반경의 0.55배 지점에서 간극수압을 측정하였다. 압밀시간 동안 배압은 일정하게 유지시켰으며, 시험후 시료를 다시 일정 높이로 잘라 시험후의 함수비를 측정하였다.

3.3.2 변형률 속도

변형률 속도는 CRS시험에 매우 중요한 요소로서 산정 방법은 일반적으로 최대 간극수압비(U_b/σ_v)_{max}가 제한치를 초과하지 않는 범위에서 결정된다. 지금까지 연구된 방법에는 Smith와 Wahls(1969), Armour과 Drnevich(1986), 그리고 ASTM(1982)기준이 주로 사용되어 왔다. 참고로 여러 학자들에 의해 제시된 최대간극수압비의 제한치(Feng,1991)와 ASTM(D41 86 - 82)에서 제안한 변형률 속도는 표 3과 같다. 본 연구에 사용된 이암풍화토의 액성한계는 48.25%로 이 범위에 해당하는 ASTM의 추천 변형률 속도는 0.01%/min이다. 그러나 이 기준은 과잉간극수압이 총 가해진 수직응력의 30%를 초과하는 것을 방지하기 위한 것으로 대상지반의 액성한계가 60%를 초과하는 경우 변형률 속도가 너무 느리게 산정되는 단점이 있다. 실제 ASTM의 추천속도인 0.01%/min로 예비시험을 실시한 결과 변형률 속도가 너무느려 간극수압이 발생하지 않

표 3. 최대간극수압비의 제한치 및 액성한계에 따른 변형률 추천치

$(U_b/\sigma_v)_{max}$ 제한치(%)	제안자	액성한계 (%)	변형률 속도(%/min)
50	Smith & Wahls(1969)		
5	Wissa et al.(1971)	0-40	0.04
50	Gorman et al.(1978)	40-60	0.01
70	Janbu et al.(1981)	60-80	0.004
40-50	Armour & Drnevich(1986)	80-100	0.001
3-30	ASTM D 4186(1989)	100-120	0.0004
15	Larsson & Sallfors(1986)	120-140	0.0001
5-10	Sandbaekken et al.(1986)		
30-50	Znidaricic(1989)		

* U_b : 간극수압, σ_v : 가해진 총 수직응력

았다. 따라서 본 시험에 사용된 변형률 속도는 김영수 등(2000), "일정변형률 압밀시험에 따른 이암풍화토의 압밀특성" 연구에서 얻어진 결과를 토대로 과잉간극수압이 발생하면서도 가해진 총 수직응력의 30%를 초과하지 않은 0.1%/min의 변형률 속도를 이용해 시험을 실시하였다.

3.3.3 CRS를 이용한 직접투수시험

수직배수조건을 이용한 동일시료에 대한 직접투수시험의 절차는 다음과 같다. CRS 압밀시험 중 원하는 수직변형률(2.5, 5, 10, 15, 20, 25%)에 도달한 경우 모터를 정지시키고 발생한 과잉간극수압이 소산될 때까지 기다린 다음 상하 약 5kpa 정도의 배압차로 위에서 아래 방향으로 투수가 이루어지도록 한 후 약 6시간 정도 투수시험을 실시하였다. 첫 단계에서의 투수시험이 끝나면 다시 모터를 가동시키고 소정의 수직 변형률에 도달한 경우 위의 과정을 반복하여 투수시험을 실시하였다. 수평방향 직접투수시험은 시료 중앙부분을 직경 1.1cm로 제거한 후 이부분을 포화된 모래로 채우고 수직압밀시험과 동일한 방법으로 포화시켜 소정의 수직 변형률(2.5, 5, 10, 15, 20, 25%)에 도달하면 수직압밀에서의 방법과 동일하게 과잉간극수압이 소산될 때까지 기다린 다음 약 5kpa의 배압차로 안쪽에서 바깥쪽으로 투수가 이루어지게 한 후 6시간 정도 투수시험을 실시하였다. 자세한 시험절차 및 시험방법은 Bergeorn(1987) 및 Leroueil et al.(1990)을 참조하였다.

4. 시험결과 및 고찰

4.1 선행압밀응력

CRS 시험은 연속적인 데이터를 얻을 수 있기 때문에 표준압밀시험보다 선행압밀하중을 산정하는 과정에서 발생할 수 있는 개인적인 오차를 줄일 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서 구해진 수직 및 수평방향압밀에 대한 선행압밀응력을 살펴본 결과는 그림 4와 같다. 수직압밀 및 횡방향압밀 조건에서 구해진 선행압밀하중은 각각 0.6, 0.59kg/cm²으로 비슷하게 나타났으나, 표준압밀시험에서 구해진 선행압밀하중은 이보다 작은 0.55kg/cm²으로 나타났다. 다시 말해 선행압밀하중비($P'_{c(crs)}/P'_{c(oed)}$)는 1.07-1.09로 나타났다. 이러한 경향은 김영수와 김기영(2000) "일정변형률 압밀시험에 따른 이암풍화토의 압밀특성" 연구결과 및 이송 등(1999) "CRS 시험의 적정 변형속도 산정에 관한 연구" 결과에서도 발표된 바 있다. 참고로 이

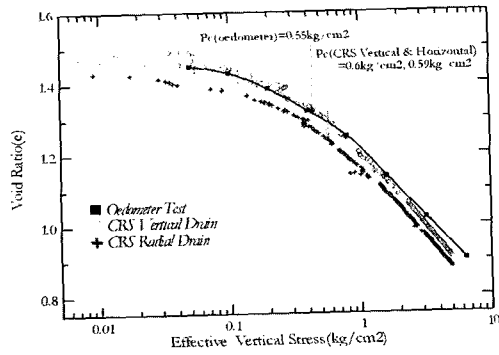


그림 4. 간극비와 유효수직응력과의 관계

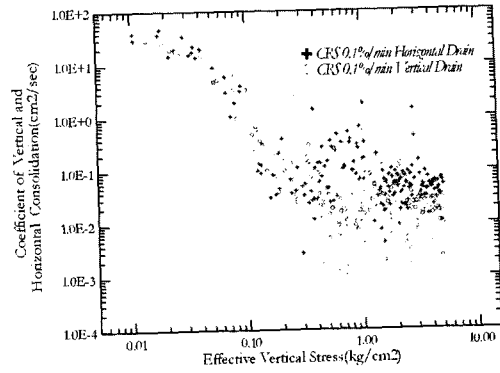


그림 5. 수평, 수직압밀계수와 유효수직응력과의 관계

표 4. 선행압밀하중비의 분포

시험시료	선행압밀하중비 ($P_c'(crs)/P_c'(oedo)$)	참고문헌
Finland	1.16	Kolisoja. et al.(1989)
Osaka, Japan	1.3-1.5	Hanzawa. et al.(1990)
Yokohama, Japan	1.25	Okumura & Suzuki(1991)
Quebec	1.28	Leroueil. et al.(1983)
Fucino, Italy	1.2	Burghignoli(1991)
Ariake & Kuwana, Japan	1.3-1.4	Hanzawa(1991)
Bothkennar. U.K	1.33	Nash. et(1992)

우진(1998) "일정변형률 및 표준압밀시험을 이용한 해성 점토의 압밀특성연구"에서 인용한 국외의 $1.0 \times 10^{-4} - 4.0 \times 10^{-4} \%$ /sec 변형률로 수행된 CRS시험에서 얻어진 선행 압밀하중비의 값은 표 4와 같으며, 대부분의 선행압밀하중비가 1 이상임을 알 수 있다. 위의 결과를 종합해 보면 본 CRS시험에서 변형률 속도는 선행압밀하중을 결정하는데 중요한 변수임을 알 수 있다. 그러나 본 연구에서 실시한 이방성에 따른 선행압밀응력의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

4.2 압밀계수의 영향

그림 5는 이방성에 따른 압밀계수의 영향을 나타내는 것으로 C_h 가 C_v 보다 전반적으로 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 대부분의 쇄설성 퇴적암인 경우 퇴적토 형성시 입자가 수평배열을 하는 경향으로 인해 수직방향의 압축은 크게 일어나지만 수평방향의 압축은 거의 일어나지 않기 때문으로 보인다. 일반적으로 퇴적으로 형성된 모래지반의 경우 K_0 값은 보통 0.4-0.5 정도로 알려져 있고, Lambe et al.(1979)은 정규압밀 퇴적점토에서는 수직방향으로 퇴적물의 성질이 다르고 입자의 배열방향도 다르기 때문에 수직투수계수에 대한 수평투수계수의 비가 대략 2-

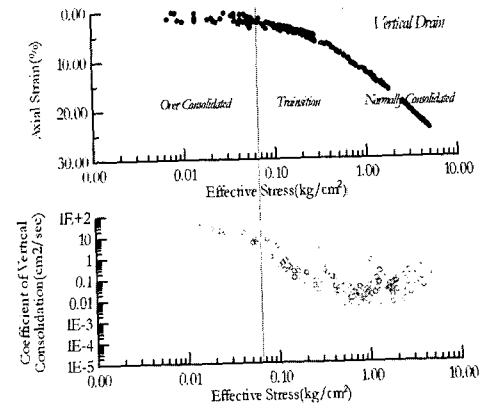


그림 6. 수직압밀계수와 유효응력과의 관계

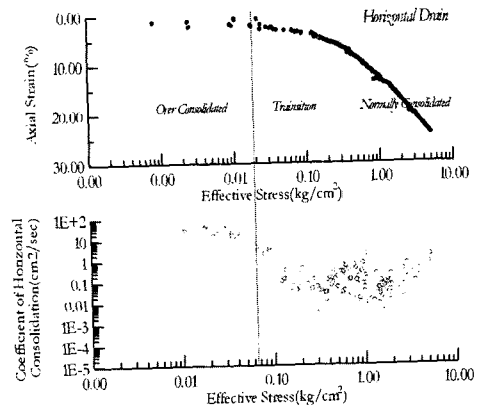


그림 7. 수평압밀계수와 유효응력과의 관계

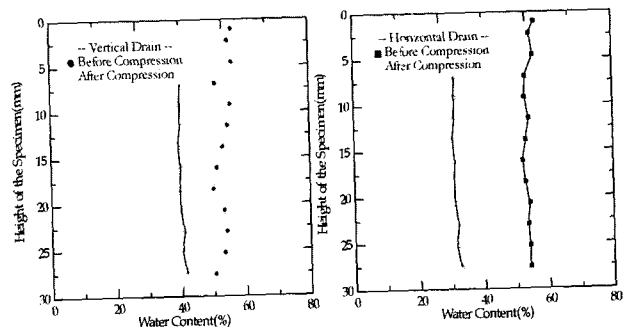


그림 8. 시험전 후의 깊이에 따른 함수비의 변화

4 범위의 값을 가진다고 하였다. 또한 김영수 등(1997) “재형성된 이암풍화토의 이방성에 따른 K_0 정규 압밀특성” 연구결과에서 K_0 압밀시험을 통해 얻어진 이암풍화토의 K_0 값은 이방성에 따라 조금의 차이가 있으나, 그 값은 대략 0.307 - 0.358로 나타남으로써 이러한 결과를 뒷받침해 준다고 할 수 있다. $e - \log p'$ 와 $C_v - \log p'$ 의 관계를 함께 도시한 결과는 그림 6, 7과 같다. 일반적으로 Terzaghi의 일차원 압밀이론에서는 압밀계수가 일정하다고 보고 있으며, 표준 압밀시험을 통해 얻어진 압밀계수와 응력과의 관계는 대부분 일정하지 않다고 알려져 있다. 그러나 CRS 시험을 이용한 $C_v - \log p'$ 곡선은 이방성에 관계없이 명확하진 않지만 세계의 곡선부분으로 구분되고 있다. 즉 시료의 과압밀상태, 전이상태, 정규압밀상태 부분으로 나눌 수 있다. 즉 과압밀 및 전이부분에서의 압밀계수는 유효응력이 증가함에 따라 서서히 감소하다가 유효응력이 선행압밀하중에 이르면 다시 증가하는 양상을 나타내었다. 이러한 경향은 CRS, CGC 시험을 이용한 Samarasinghe et al.(1982)의 연구 결과에서도 볼 수 있다.

압밀시험중 시료의 중앙부에 위치한 모래와 점토간의 마찰 그리고 점토와 횡방향 배수재와의 마찰 영향을 간접적으로 알아보기 위해 시험 전 후에 실시한 함수비를 깊이 에 따라 측정한 결과 그림 8에서 처럼 깊이에 따른 함수비의 변화는 거의 없는 것으로 나타났으며, 이러한 결과에 비추어 마찰이 압밀 경향에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 보인다. 일반적으로 점토와 수평방향 배수재료 사이의 교란효과는 큰 변형률이 있을 경우에 신중히 고려해 볼 필요성이 있으나, 작은 변형률인 경우 그 영향은 크지 않은 것으로 알려져 있다. 이방성에 따른 시험 전 후의 함수비 변화를 살펴보면 동일한 변형률에서 시험을 마친 경우 시험전의 함수비는 이방성에 상관없이 깊이에 따라 48 - 53%로 거의 비슷하지만 시험 후의 함수비에서는 수평방향압밀인 경우가 수직압밀인 경우보다 약 5%정도 작게 나타났다.

4.3 이방성에 따른 간극비와 투수계수와의 관계

점토입자를 둘러싸고 있는 물의 두께는 점토광물의 유형에 관계된다. 그러므로 점토의 소성은 점토광물의 특성과 점토광물의 양에 따라 결정된다는 것을 알 수 있다. Skempton (1953)은 여러 종류의 흙에 대한 실험결과를 기초로 흙에 대한 소성지수는 점토크기의 입자를 포함하는 $CF(2\mu m$ 보다 작은 점토입자의 중량백분율)에 직접 비례한다는 결과를 얻었다. Skempton은 여기서 활성도(A_c)의

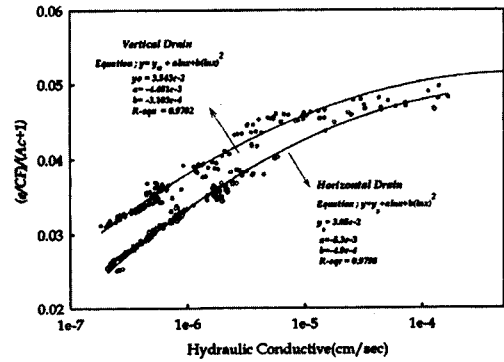


그림 9. 수평, 수직투수계수와 $(e/CF)/(A_c+1)$ 의 관계

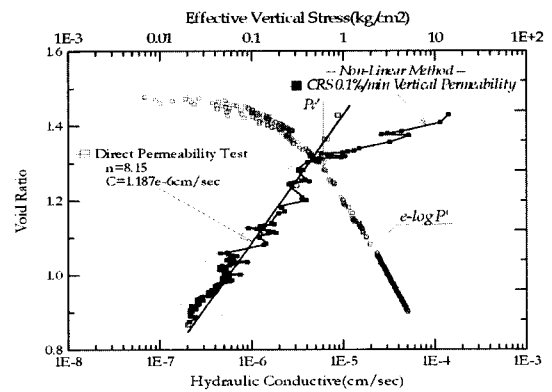


그림 10. 수직투수계수(k_v)와 간극비의 관계

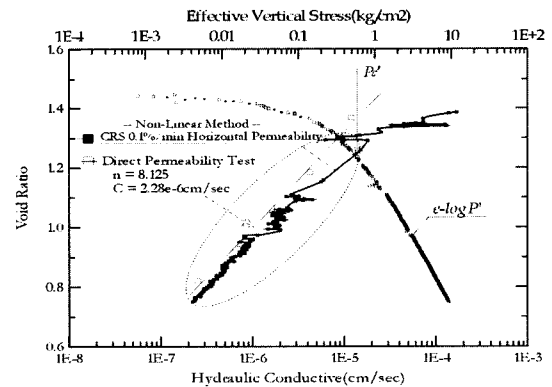


그림 11. 수평투수계수(k_h)와 간극비의 관계

개념을 도입했으며, 이를 바탕으로 Tavenas et al.(1983)는 활성도와 CF를 고려한 $e - \log k$ 의 관계를 연구하였다. 그림 9는 활성도와 CF를 고려한 간극비와 투수계수와의 관계를 나타내고 있다. 그림처럼 수평방향의 투수계수가 수직방향 투수계수보다 크게 나타나고 있으며, 투수계수와 $(e/CF)/(A_c+1)$ 의 관계는 비선형적인 관계를 보여주고 있다. 이러한 결과는 각종 해성점토를 이용한 Mersi와 Feng(1994)의 연구결과에서도 볼 수 있다. 간극비와 투수계수에 대한 많은 경험식들이 여러 학자들에 의해 제안되

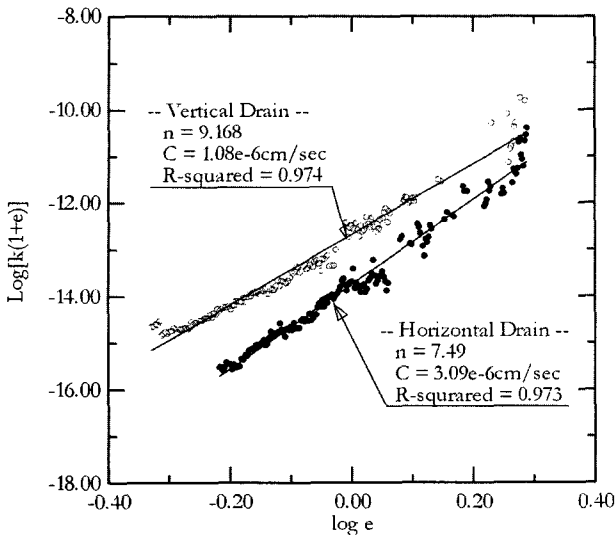


그림 12. log e 와 log[k(1+e)] 와의 관계(정규압밀영역)

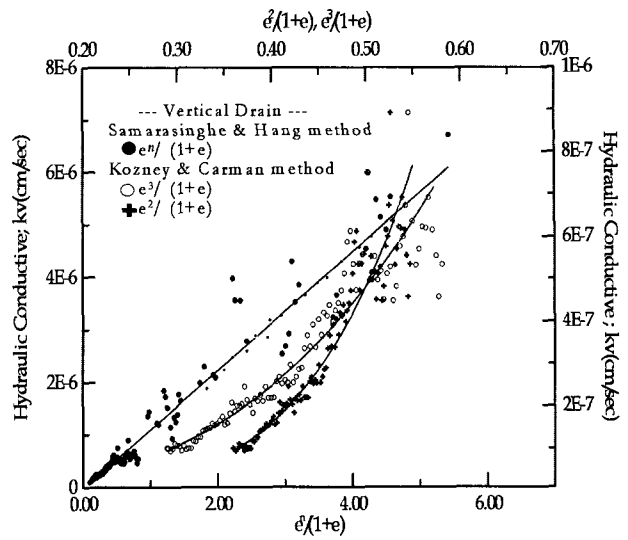


그림 14. kv 와 e^2/(1+e), e^3/(1+e), e^n/(1+e) 와의 관계(정규압밀영역)

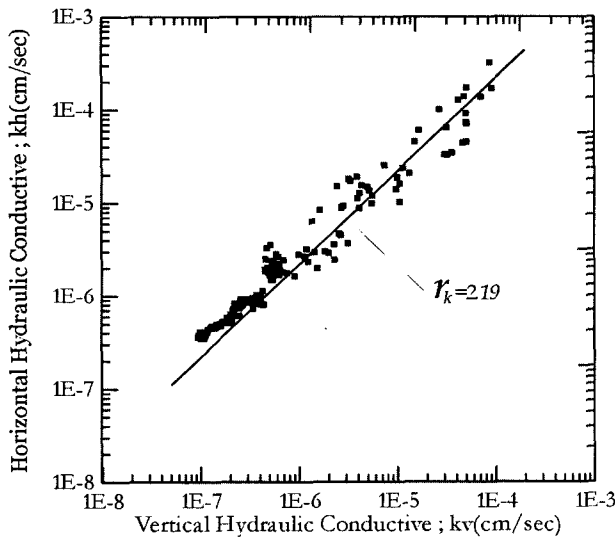


그림 13. 정규압밀영역에서의 이방성비

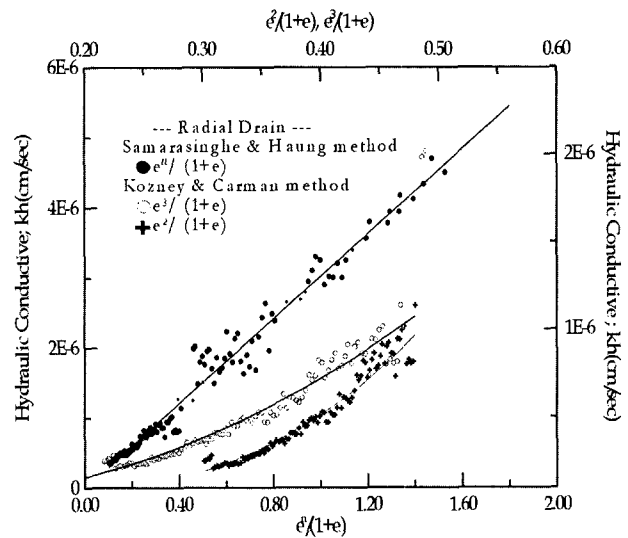


그림 15. kh 와 e^2/(1+e), e^3/(1+e), e^n/(1+e) 와의 관계(정규압밀영역)

어 왔다. Taylor(1948)는 $e - \log k$ 의 관계가 선형적이라고 발표한 바 있고, Samarasinghe et al.(1982)은 표 1에서 언급된 식을 이용하여 점토에 대한 간극비와 투수계수와의 관계를 정의하였다. 그림 10, 12에서처럼 CRS시험을 이용한 수직방향압밀인 경우 점선 부분으로 표시된 선형압밀하중 이후의 정규압밀부분에서 $e - \log k$ 의 관계를 Samarasinghe et al.(1982)의 식을 이용해 구한 투수상수 n , C 값은 각각 9.168, $1.08e-6$ cm/sec로 나타났으며, 동일시료를 이용한 직접투수시험에서 얻어진 투수상수 n , C 값은 그림 10에서처럼 8.15, $1.187e-6$ cm/sec로 나타났다. 이 결과에 비추어 직·간접적인 시험방법에 따른 투수상수의 상이성은 크지 않았다. 수평방향 압밀시험의 결과는 그림 11, 12와 같다. 먼저 CRS시험에서 간접 계산된 n , C 값은 그림 12에서 각각 7.49, $3.09e-6$ cm/sec로 나타났으며, 직접투수

시험에서 얻어진 n , C 값은 그림 11에서처럼 8.125, $2.28e-6$ cm/sec로 나타났다. 수평방향압밀 역시 방법에 따른 투수계수의 차이는 크게 나타나지 않았다. 이방성에 따른 영향을 살펴보면 CRS 압밀시험에서 간접적으로 구해진 투수상수 n 값은 수직방향압밀이 약 1.22배 가량 크게 나타났으나, C 값은 수평방향압밀 일 때가 약 2.86배 가량 크게 나타났다. 직접투수시험 결과에서는 n 값은 별다른 차이가 없었으나 C 값은 수평방향압밀 일 때가 약 1.963배 정도 크게 나타났다. 이러한 결과는 이방성비($r_k = k_h/k_v$)에 대한 결과에서도 잘 나타난다. 그림 13은 이암풍화토의 CRS 시험에 따른 이방성비를 나타낸 것으로 r_k 는 대략 2.19로 나타났다. Olson과 Daniel(1981)은 해성점토를 이용한 실험에서 r_k 는 1-1.5의 값을 갖는다고 발표하 바 있으며, 다

른 여러 점토의 시험 결과에서는 1-40 정도의 범위를 가진다고 발표한 바 있다. 또한 Chan과 Kenney(1973)의 New Liskeard 점토를 이용한 실험에서는 r_k 가 약 3 정도라고 발표한 바 있다. 이러한 결과에 비추어 보면 이암풍화토의 이방성비는 그다지 크지 않은 것으로 보인다. Kozeny-Carman(1983)이 제안한 식을 정규압밀 범위에서 적용한 결과는 그림 14, 15와 같다. Samarasinghe et al.(1982)의 식이 수직, 수평방향 압밀조건에서 거의 선형적인 관계를 보인다 반면, Kozeny-Carman(1983)의 식을 이용한 투수계수(k)와 $e^2/(1+e)$, $e^3/(1+e)$ 의 관계는 이방성에 관계없이 비선형적인 관계에 있으며, 간극비의 승수가 커질수록 점점 선형에 가까워짐을 알 수 있다. 따라서 정규압밀 범위에서 이암풍화토의 간극비(e)와 투수계수(k)와의 관계는 Samarasinghe et al.(1982)의 식을 이용해 충분히 구할 수 있을 것으로 보이며, 직접투수시험의 결과와도 상당히 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

CRS시험을 이용한 이암풍화토의 수평, 수직방향의 압밀 및 투수특성을 요약하면 다음과 같다.

- 1) CRS시험에 의한 선행압밀응력은 표준압밀시험에서 구해진 값보다 조금 크게 나타났다. 그러나 이방성에 따른 선행압밀응력의 차이는 거의 나타나지 않았다.
- 2) CRS시험을 이용한 이방성에 따른 압밀계수는 C_h 가 C_v 보다 크게 나타나고 있으며, 이러한 이유는 이암풍화토의 삼축압축시험을 통해 얻어진 K_0 값이 대략 0.307-0.358 정도의 범위를 갖는 데서 알 수 있다. 그리고 $e - \log p'$ 와 $C_v, C_h - \log p'$ 와의 그래프를 고찰한 결과 압밀계수는 유효응력에 따라 과압밀상태, 전이상태, 정규압밀상태에 해당하는 3가지 곡선부분으로 구분됨을 알 수 있었다.
- 3) 수평방향 압밀시험시 중앙부위에 위치한 모래와 점토와의 마찰에 대한 영향을 간접적으로 확인하기 위해 실시한 함수비 측정결과 마찰에 대한 영향은 크지 않은 것으로 나타났으며, 시험 후 이방성에 따른 함수비의 변화는 수평방향압밀시의 함수비가 수직방향압밀시의 함수비보다 약 5% 작게 나타남을 알 수 있었다.
- 4) 이암풍화토의 활성도(A_v)와 CF를 고려한 간극비(e) - logk와의 관계는 비선형임을 알 수 있었으며, 이방성비($r_k = k_h/k_v$)는 약 2.19로 나타났다.
- 5) CRS시험을 이용해 간접적으로 구해진 간극비와 투수

계수와와의 관계를 정규압밀영역에서 여러 경험식을 이용해 해석한 결과 Samarasinghe, et al.의 식이 가장 만족할만한 결과를 얻을 수가 있었으며, 이 식에서 얻어진 투수상수 n값은 이방성에 커다란 영향을 받지 않았으나, C값은 수평방향압밀이 수직방향압밀에 비해 약 2.86배정도 크게 나타났다.

- 6) 직접투수시험에서 얻어진 결과 역시 정규압밀 상태에서는 $\log e - \log(k(1+e))$ 가 선형적인 관계에 있으며, 여기서 얻어진 n값은 CRS를 이용한 간접시험결과와 마찬가지로 이방성에 따른 차이가 거의 없었으나, C값은 수평방향압밀이 약 1.92배정도 크게 나타났다. 그러나 동일한 조건에서 직·간접적 시험방법에 따른 n, C값은 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 CRS시험을 이용한 압밀시험은 상당히 유용하다고 할 수 있다.

참고 문헌

1. 김영수, 김기영, 김대만(2000), "일정변형률 압밀시험에 따른 이암풍화토의 압밀특성", 지반공학회지 2000년 3월 게재예정.
2. 김영수, 김기영, 김종승(1997), "제형성된 이암풍화토의 이방성에 따른 K_0 정규압밀특성", '97 대한토목학회 학술발표회 논문집, III, pp. 201~204.
3. 이송, 이규환, 최점식(1999), "CRS시험의 적정변형속도 산정에 관한 연구", 대한토목학회지, 제19권, 제III-4호, pp. 821~829.
4. 이우진, 임형덕, 이원제(1998), "일정 변형률 및 표준압밀시험을 이용한 해성점토의 압밀특성 연구", 지반공학회지, 제14권 제4호, pp. 48~60.
5. Amer, A. M., and Awad, A. A.(1974). "Permeability of Cohesionless Soils," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.100, No. GT12, 1309~1316.
6. Armour, D. W. and Drnevich, V. P.(1986), "Improved Technique for the Constant Rate of Strain Consolidation Test", Consolidation of Soils : Testing and Evaluation. ASTM STP 892. Young, R. N., and Townsend, F. C., Eds., Philadelphia, pp. 170~183.
7. ASTM Designation : D4186-82(1982), Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Controlled-Strain Loading.
8. Bergeron, L.(1987), De l'anisotropie de permeabilite des argiles varvees de la region de Matagami. M. Sc. thesis, Universite Laval, Quebec.
9. Chan, H. T., and Kenney, T. C.(1973), "Laboratory Investigation of Permeability ratio of New Liskeard varved soil", Can. Geotec. J. 10(3), pp. 453~472.
10. Feng, T. W.(1991), "Compressibility and Permeability of Natural Soft Clays and Surc-harging to Reduce Settlements", Ph. D. Thesis, University of Illinois at Urbanachamp-aign.
11. Lambe, T. W., and Whitman, R. V.(1979), Soil Mechanics, John & Sons, United Publi-shing & Promotion, Co., LTD. pp. 266~294.
12. Leroueil, S., Bouclin, G., Tavenas, F., Bergeron, L. and La Rochelle, P.(1990), "Perm-eability anisotropy og natural clays as a function of strain", Can. Geotec. J. 27, pp. 568~579.
13. Mersi, G., Feng, T. W., Ali, S., and Hayat, T. M.(1994), "Permeability Characteristics of Soft Clays", 13th ICSMFE, New Delhi, India, pp. 187~192.
14. Misuharu, F., Seiji, S. and Takao, U.(1997). "Major Effect of Grain Size Distribution to Coefficient of permeability of Marine Clay," Proc 7th

- IOPEC, Vol. 1. pp. 634~638.
15. Olson, R. E., and Daniel, D. E.(1981), "Measurement of the Hydraulic Conductivity of Fine-grained Soils", ASTM, Special Technical Publication 746, pp. 18~64.
 16. Samarasinghe, A. M., Haung, Y. H., Drnevich, V. P.(1982), "Permeability and Consolidation of Normally Consolidated Soils", Journal of Geotechnical Engineering Division Vol. 108, GT6
 17. Shahabi, A. A., Das, B. M., and Tarquin, A. J.(1984). "An Empirical Relation for Co-efficient of Permeability of Sand," Proceedings, Fourth Australia-New Zealand Conference on Geomechanics, Vol. 1, 54~57.
 18. Skempton, A. W.(1953), "The Colloidal Activity of Clay", Proc. of the 3rd Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Vol. 1, pp. 55~61.
 19. Smith, R. E. and Wahls, H. E.(1969), "Consolidation under Constant Rates of Strain", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 95, No. SM2, pp. 519~539.
 20. Tavenas, F., Jean, P., Leblond. P., and Leroueil, S.(1983), "The Permeability of Natural Soft Clay", Part II; Permeability Characteristics. Can. Geotec. J. 20, pp. 645~660.
 21. Taylor, D. W.(1948), Fundamental Soil Mechanics, John Wiley and Sons, New York, N. Y., pp. 700.
 22. Wissa, A. E. Z., Christian, J. T., Davis, E. H., and Heiber, S.(1971), "Consolidation at Constant Rate of Strain", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Engineering Division, ASCE, Vol. 97, No. SM10, Proc. Paper 8447, pp. 1393~1413.

(접수일자 1999. 11. 13)