

Aging Effect를 고려한 점성토의 압밀특성

Consolidation Characteristics of Clays Considering the Aging Effect

김 영 수¹ Kim, Young-Su

이 상 웅² Lee, Sang-Woong

김 대 만³ Kim, Dae-Man

현 영 환⁴ Hyun, Young-Hwan

Abstract

The consolidation of clay occurs with time lag, and this kind of lag can be separated into plastic lag and hydraulic lag. In this study, CRS tests were performed to research the effect of original secondary consolidation of the clay with respect to the characteristics of consolidation. Test results showed that plastic time lag was one of the key factors to get the preconsolidation pressure, and suggested the formula of the Quasi-preconsolidation pressure obtained from the relationship between consolidation time lag and consolidation pressures. In addition, though the characteristics of coefficient of consolidation show a wide range of values, after passing the double preconsolidation point, it showed the tendency to converge into the constant value. The coefficient of permeability in normally consolidated state is related to its void ratio, and the permeability variables, n and C_1 were determined by the test results using the equation suggested by Samarasinghe et. al. And then the equation was compared with the Kozeny-Carman's equation. Because of delayed compression caused by consolidation time lag, aging effect could be also found in the relationship between coefficient of permeability and void ratio.

요 지

점토의 압밀은 시간적 지연을 갖는 현상으로 시간적 지연은 소성적 지연시간과 수리적 지연시간으로 나뉜다. 본 연구에서는 점토의 2차압밀이 압밀침하에 어떠한 영향을 미치는지를 알고자 CRS 시험을 실시하였다. 시험결과 소성적 지연시간은 선행압밀하중을 구하는데 큰 영향을 미치는 것으로 나타났고, 압밀하중과 압밀지연시간으로부터 유사선행압밀하중을 예측하는 식을 제안하였다. 또 압밀지연시간에 따른 압밀계수의 특징은 선행압밀 전까지는 큰 범위의 값을 가지나 선행압밀하중의 약 2배 지점을 지나서는 압밀지연시간에 관계없이 일정한 값으로 수렴하는 경향을 나타냈다. 그리고 정규압밀영역에서의 투수계수는 간극비와 밀접한 관계에 있으며, Samarasinghe 등의 제안식을 이용하여 시험결과로부터 투수상수 n , C_1 값을 결정하였고, Kozeny-Carman 제안식과 비교분석하여 보았다. 투수계수와 간극비 관계에서도 압밀지연시간에 의한 지연압축으로 인하여 aging effect를 관찰할 수 있었다.

Keywords : Aging effect, CRS test, Quasi-preconsolidation, Secondary settlement

1. 서 론

연약지반은 고함수비, 고압축성으로 인하여 대부분

큰 변형이 발생하며, 또한 지반의 이방성, 선행압밀하중 및 creep 현상 등으로 거동의 특성이 복합적인 요소에 영향을 받음에도 불구하고 아직 이러한 요소들을

1 정회원, 경북대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ.)

2 정회원, 경북대학교 토목공학과 박사 (Member, Ph.D. Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ.)

3 정회원, 경북대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ., ksmansll@hanmail.net)

4 정회원, 경북대학교 토목공학과 석사 (Member, Master, Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ.)

고려한 정밀한 해석기법의 확립은 부족한 실정이다. 특히 고압축성의 점토지반에서는 과잉간극수압의 소산에 따른 1차 압밀이 종료된 이후 압밀시간의 경과에 따른 creep 현상이 발생하게 되며, creep 현상은 점토지반에 하중이 재하된 후 상당한 시간적 지연을 두고 침하가 발생된다. 이와 같은 시간적 지연은 수리적 지연과 소성적 지연으로 나누어 생각할 수 있는데, 먼저 수리적 지연은 점토의 투수성, 압축성 및 배수거리에 관계되며 그리고 소성적 지연은 일정한 유효응력 하에서의 변형이 시간에 비례하여 증가하는 성질에 관계가 있다. 이러한 압밀지연시간에 의한 creep 현상을 분석함에 있어 기존의 표준압밀시험(oedometer test)은 배수거리가 짧기 때문에 수리적 지연은 매우 짧은 시간에 발생하며, 이에 따라 유효응력이 빠른 시간 내에 급격히 증가한 후 일정한 값이 되어 점토의 creep 현상이 발생할 수 있는 시간적 여유가 없고, 또한 단계별 하중재하로 인한 긴 압밀시간의 소요와 압밀해석상 가정의 오류 등의 문제점이 있다. 이를 개선하기 위하여 일정변형률(Constant Rate of Strain, CRS) 압밀시험이 Hamilton와 Crawford(1959)의 연구과정에서 제안되었으며, Smith와 Wahls(1969)는 간극비 변화가 아주 작은 미소변형이 존재한다고 가정하고 배수면과 비배수면에서 측정된 전응력과 과잉간극수압을 이용하여 압밀계수와 평균유효응력을 유도함으로써 CRS 압밀시험을 최초로 해석하였다. 그 후 Wissa 등(1971)은 수학적 유도과정에서 미소변형이 존재하고 압밀계수는 일정하며 간극수압은 포물선분포라고 가정하여 압축변형의 형태로 표현된 압밀기본방정식을 변형분포로 유도함으로써 전이상태와 정상상태에서 선형 및 비선형에 대한 압밀계수와 평균유효응력의 계산식을 유도하였다. 국내 연구 동향으로 이진주(1986)는 kaolinite와 낙동강하구 점토질 실트를 사용한 유한변형률 압밀이론으로부터 일정변위 압밀특성을 연구하였고, 임형덕(1997)은 CRS 압밀시험에서 간극수압비는 변형속도와 압밀하중에 크게 영향을 받는다고 하였다. 그리고 김영수 등(2000b)은 CRS 압밀시험과 표준압밀시험에서의 선형압밀하중 차이를 비교 검토하였다.

본 연구에서는 포항 장성동의 이암풍화토를 대상으로 1차 압밀 종료시점을 기준으로 압밀지연시간을 1, 10, 100, 1000hr의 4가지 시료에 CRS시험을 실시하여 점토의 creep 현상으로 인한 aging 효과를 분석하였다.

2. 해석방법

2.1 2차압밀에 대한 기본적인 이론고찰

그림 1에서와 같이 정규압밀점토를 초기에 압축하면 처녀압축곡선 \overline{AB} 를 따라 압축하지만 어느 응력 p_0 를 장시간 유지하면 \overline{BC} 선을 따라 지연압축(delayed compression)이 진행된다. 예를 들어 응력 p_0 하에서 10,000년 동안 비교란 상태로 존속시킨다면 creep 현상에 의하여 압축성이 감소하여 간극비는 e_0 에서 e_1 으로 감소하게 된다. 이때 응력이 p_0 인 상태의 점토를 채취하여 압밀시험을 한다면 처녀압축곡선상의 D점의 응력에 도달한 후에야 급격한 압축변형이 일어나서 처녀압축 과정에 들어가게 된다. 이와 같이 처녀압축곡선의 굴곡점 D의 응력이 압밀항복하중 p_c 이고 \overline{BC} 선의 응력 p_0 가 선형압밀하중으로서 이때의 압밀항복하중 p_c 는 선형압밀하중 p_0 보다 훨씬 커서 과압밀점토의 거동을 보이는데 이러한 현상을 경시효과(aging effect)라 한다.

점토의 creep 현상에 의한 2차 압밀은 Mitchell(1976)에 의해 '흙구조의 점성저항(viscous resistance)의 정도에 따라 지배되는 시간에 의존하는 전단 또는 체적변형률'로 정의되었으며, 배수상태뿐만 아니라 비배수상태에서도 발생한다.

배수 상태의 creep은 Deviatoric과 Volumetric한 요소를 가지며 일정한 유효응력하에서 발생하는 것으로 가정되어진다. 이때 2차 압밀은 K_0 상태의 일차원 1차 압밀을 잇는 배수상태의 creep으로 정의 할 수 있다. 한편, 비배수상태의 creep은 일정한 체적과 전응력하에서 발생하는 것으로 가정되며 전단변형과 유효응력변화의

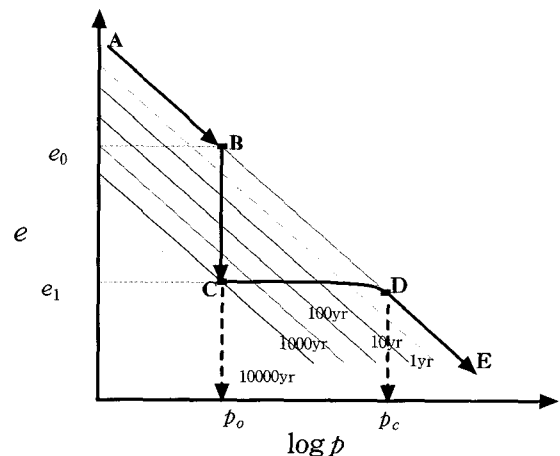


그림 1. 점토압밀의 Aging effect

원인이 된다.

2차 압밀의 원인에 대해서는 아직까지 완벽하게 정리된 이론이 없으나 개괄적으로 1차 압밀 등으로 인한 간극비의 감소로 구조적인 교란이 발생한 이후 특히 수평 방향으로 구속된 경우보다 안정적인 구조가 되기 위해 점토입자가 재배열을 계속하기 때문인 것으로 알려져 있으며, 추가적으로 두꺼운 점토층에서 점진적인 수평 방향의 변위가 생겨 전단응력이 발생하는 것으로 알려져 있다.

2.2 일정변형률(CRS) 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. 이후 Wissa 등(1971)은 $d\epsilon_v/d\log \sigma_v'$ 이 일정하다는 가정하에 평균유효응력(σ_v')과 압밀계수(C_v), 투수계수(k_v)의 관계가 비선형이라는데 기초를 둔 새로운 관계식을 제안하였다. 즉, 응력분포 상태가 일정하고 무차원 시간계수(T)가 일정하다는 정상 침투류 상태와, 빠른 하중변형에 의해 하중초기 발생하는 비정상류 침투상태를 고려한 식이다. 이 두 가지 조건을 구분하기 위해 Wissa 등(1971)은 무차원 시간계수(T)를 도입하였다. 여기서 시간계수(T)는 시료내 응력분포의 전이 정도를 나타내는 상수로서 임의시간 동안의 함수인 F_3 을 이용하여 구할 수 있다. F_3 와 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 등(1971)의 정상 침투류 조건을 고려한 해석방법은 ASTM D4186-89 기준인 Cell 중앙 바닥면에서 발생하는 과잉 간극수압이 총 수직응력의 30%를 초과할 수 없다는 조건을 만족하는 즉, CRS 시험중 발생 할 수 있는 전이조건의 발생을 제한하기 위한 시도이다. 가정한 비선형 거동은 응력이 깊이에 따라 포물선형태를 이루며, 정상 침투류 상태인 경우 평균유효

응력(σ_v'), C_v 그리고 k_v 와의 관계를 식 (3), (4), (5)와 같이 표현할 수 있다.

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

$$C_v = \frac{-H^2 \log \frac{\sigma_{v2}}{\sigma_{v1}}}{2\Delta t \log(1 - \frac{\Delta u_b}{\sigma_v'})} \quad (4)$$

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

여기서 H : 시료의 높이

ϵ : 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 Terzaghi 이론을 이용해서 식 (6), (7)과 같이 구할 수 있다.

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

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

3. 실내시험

3.1 시료성형

포항지역 이암은 퇴적암 중 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 포항 장성동 현장에서 채취한 것으로 채취 당시 이암풍화도는 비교적 신선한 상태로 존재하고 있었으며 압밀특성을 파악하기 위하여 현장 불교란시료를 채취하여 시험할 경우 지반의 불균질성과 이방성 등으로 거동특성의 상호비교에서 기준을 삼기가 어렵게 되므로 본 연구에서는 시료를 표토에서부터 대략 50cm 정도의 심도에서 교란된 상태로 채취하여 시험결과에 영향을 미칠 정도의 큰 자갈이나 조개껍데기 등의 불순물을 제거하였다. 그리고 시험에 사용할 시료를 준비함에 있어서 습윤상태

표 1. 이암풍화토의 물성치

Gs	Percent passing No.200 sieve(%)	Soil classification	LL(%)	PL(%)	PI
2.55	84	CH	52.02	24.12	27.9

의 흙을 #40번 체로 체가름한 후 증류수를 섞어 토조내에서 인공풍화시켰다. 사용된 시료의 주성분은 석영, 장석, 백운모, 흑운모 그리고 점토 광물로 구성되어 있으며, 이 외에 조암광물을 포함하기도 한다. 이암풍화토의 물성치는 표 1에 나타내었다.

3.2 시험장치

본 시험에 사용된 장치는 미국 GEOCOMP사에서 제작한 제품으로 CRS 압밀시험, 표준압밀시험, 일정동수경사 압밀시험(controlled gradient test) 및 일정하중률 압밀시험(constant rate of loading test) 등을 수행할 수 있는 다기능 시험기이다. 세부 시험장치로는 2000lb용량의 로드셀(load cell), 간극수압계, 직류 모터, LVDT(최대 5cm) 및 컴퓨터 제어장치로 구성되어 있으며, 사용된 압밀장치는 직경 15cm의 로우셀(Rowe cell)를 사용하였다. 시험준비 완료 후의 모습은 그림 2와 같다.

3.3 시험방법

3.3.1 CRS 압밀시험

CRS 압밀시험의 시험절차는 표준압밀시험과 비슷하나 배압을 이용한 시료의 포화 및 시료 하단부에서의 간극수압측정 그리고 점증하중 대신 일정변형률이 이용되는 점이 표준압밀시험과 다르다. 또한 표준압밀시

험기와는 달리 로우셀은 압력수두를 이용함으로써 재하시 시료에 균등한 응력을 줄 수 있으며, 압밀링과 시료와의 마찰을 최소화 할 수 있다. 먼저 시험전 다공판을 끊어 다공판 사이의 공기를 제거하였으며, 준비된 시료를 성형하여 로우셀을 조립하고 시료의 포화를 위해 배압을 0.5 kg/cm^2 단위로 3 kg/cm^2 까지 점증시켜 B값이 0.98 이상이 되도록 하였다. 그 후 압밀하중을 0.8, 1.6, 3.2 kg/cm^2 로 가하였고, 각 압밀하중에 대하여 1차 압밀종료 시점으로부터 압밀지연시간을 1, 10, 100, 1000hr로 유지시켜 총 12개 시료에 대하여 미리 결정된 변형률을 컴퓨터에 입력한 후 일정변형률이 가해지도록 압밀을 실시하였다. 표 2는 본 연구의 전체 시험개요를 보여주고 있으며 시험결과 분석의 편이를 위해 표 2에서와 같이 시험명을 명명하여 사용하였다. 시험 중 하중과 변위는 각각 로드셀과 변위측정계를 이용하여 측정하고 간극수압은 로우셀 하부에 간극수압계를 설치하여 컴퓨터에 자동 입력되도록 하였다.

3.3.2 변형률

변형률 속도는 CRS 압밀시험에 매우 중요한 요소로서 산정방법은 일반적으로 최대 간극수압비, $(U_b/\sigma_v)_{\max}$ 가 제한치를 초과하지 않는 범위에서 결정된다. 본 연구에 사용된 이암풍화토의 액성한계는 52.02%로 이 범위에

표 2. CRS 시험명

압밀하중 (kg/cm^2)	압밀지연시간 (hr)	CRS 시험명
0.8	1	CRS 0.8-1
	10	CRS 0.8-10
	100	CRS 0.8-100
	1000	CRS 0.8-1000
1.6	1	CRS 1.6-1
	10	CRS 1.6-10
	100	CRS 1.6-100
	1000	CRS 1.6-1000
3.2	1	CRS 3.2-1
	10	CRS 3.2-10
	100	CRS 3.2-100
	1000	CRS 3.2-1000

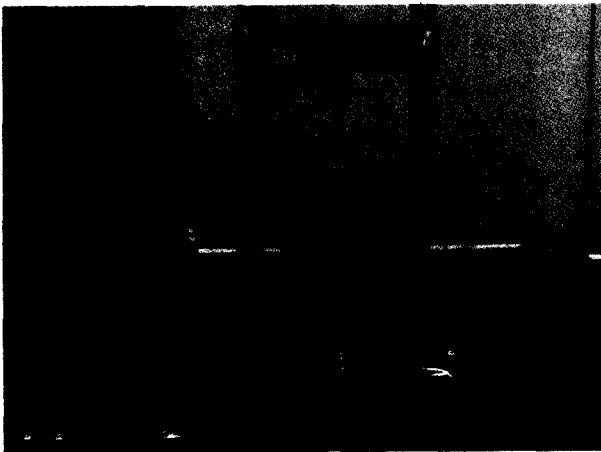


그림 2. CRS 압밀시험의 setting후 모습

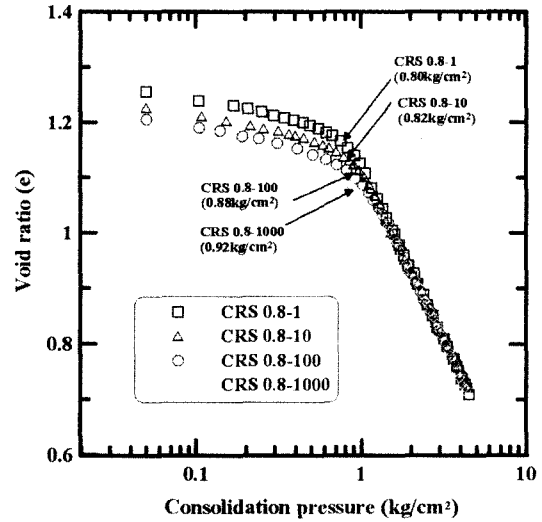
해당하는 ASTM의 추천 변형률 속도는 0.01%/min이다. 그러나 이 기준은 과잉간극수압이 총 가해진 수직응력의 30%를 초과하는 것을 방지하기 위한 것으로 대상지 반의 액성한계가 60%를 초과하는 경우 변형률 속도가 너무 느리게 산정되는 단점이 있다. 실제 ASTM의 추천 속도인 0.01%/min로 예비시험을 실시한 결과 변형률 속도가 너무 느려 간극수압이 발생하지 않았다. 따라서 본 시험에 사용된 변형률 속도는 김영수 등(2000a)의 연구에서 얻어진 결과를 토대로 과잉간극수압이 발생하면서도 가해진 총 수직응력의 30%를 초과하지 않은 0.1%/min의 변형률 속도를 이용하여 시험을 실시하였다.

4. 시험결과 및 고찰

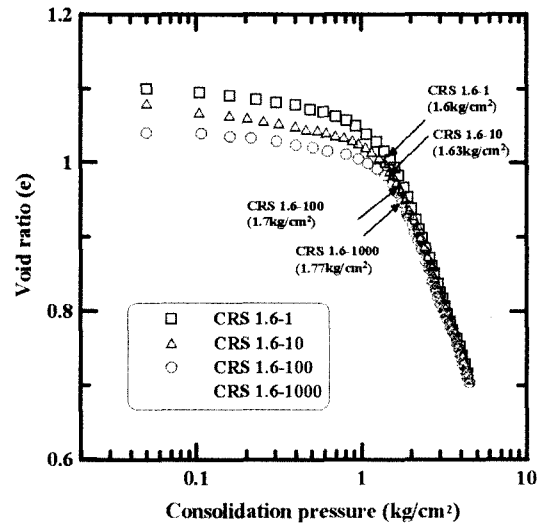
4.1 선행압밀하중

압축지연시간에 대한 선행압밀하중 변화를 확인하기 위하여 CRS 압밀시험으로부터 선행압밀하중을 산정해 보았다. 산정 방법에는 여러 가지가 있으나 그 중 대표적인 것이 Casagrande 방법이다. 그림 3(a), (b)의 0.8, 1.6 kg/cm²에 대한 일련의 시험에 대하여서는 Casagrande 방법으로 선행압밀하중을 결정하는데 있어 개인적 오차가 비교적 적었으나, (c)의 3.2 kg/cm²에 대한 일련의 시험 결과는 Casagrande 방법으로 구하기에는 개인적인 오차가 너무 심하여 Butterfield(1979)가 제안한 log f - log p 관계를 이용하여 구하였다. log f - log p법은 연약점토에 대해 정규압밀 범위에서 log f - log p관계가 직선적인 관계로 나타내어질 수 있다고 하였으며, 여기서 f는 비체적(specific volume)이며 $f = 1 + e$ 로 정의된다. log f - log p법은 전 범위 응력구간에서 대표적인 두개의 선형직선을 찾을 수 있고 이로부터 선행압밀하중을 결정하는 방법이다.

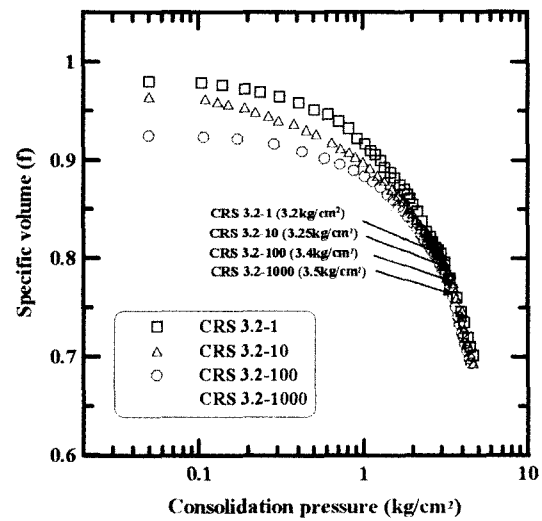
Casagrande의 e - log p 그래프에서의 선형근사법과 log f - log p 그래프에서의 선형근사법 중 연약점토의 주된 특성을 나타내는 데에 어느 것이 더 적합한지에 대한 결정적인 자료는 거의 없다. 그러나 0.8, 1.6 kg/cm²에서 Casagrande 법과 log f - log p 법으로 구하여진 선행압밀하중 값의 차이는 그리 크게 나타나지 않으며 위의 두 가지 방법에 의해 구하여진 선행압밀하중을 표 3에 나타내었다. 선행압밀하중은 압밀하중에 상관없이 압축지연시간이 증가함에 따라 조금씩 증가되는 것으로 나타났다. 그림 3에서 압축지연시간에 대해서 그래프의



(a) 0.8kg/cm² series



(b) 1.6kg/cm² series



(c) 3.2kg/cm² series

그림 3. 압축지연시간에 따른 선행압밀하중

하향이동은 일정한 유효응력 하에서 시간이 경과함에 따라 지속적인 압축(크리프)이 발생함에 따른 것으로 생각된다. 이와 같은 항복과 크리프는 연관성을 갖고 있는데 이는 하중단계에서 압축지연시간으로 인한 지연 압축이 경화 현상을 발생되게 하며, 이 경화 현상으로 인하여 하중이 증가하는 동안 항복이 발생하는 지점에서의 유효응력을 증가시켜 선행압밀하중이 증가한다.

그림 4는 표 3을 토대로 압축지연시간에 대한 압밀하중과 선행압밀하중비(p_c/p_0)를 수식으로 나타낸 것이다. 점토의 압축성은 선행압밀하중보다 작은 하중에 비해 선행압밀하중보다 큰 하중에서는 10배 이상으로 커지기 때문에 정확한 선행압밀하중을 선정하는 것이 침하량 산정에 무엇보다도 중요하다. 따라서, 압밀하중과 압축지연시간으로부터 그림 4에서와 같이 현재 점토지반의 선행압밀하중을 식 (8)과 같이 예측할 수 있으며 이렇게 구한 선행압밀하중 값으로 현장에서 보다 정확한 침하량 산정에 도움이 될 것으로 사료된다.

표 3. 선행압밀하중

시험종류	선행압밀하중 (kg/cm^2)
CRS 0.8-1	0.8
CRS 0.8-10	0.82
CRS 0.8-100	0.88
CRS 0.8-1000	0.92
CRS 1.6-1	1.6
CRS 1.6-10	1.63
CRS 1.6-100	1.7
CRS 1.6-1000	1.77
CRS 3.2-1	3.2
CRS 3.2-10	3.25
CRS 3.2-100	3.4
CRS 3.2-1000	3.5

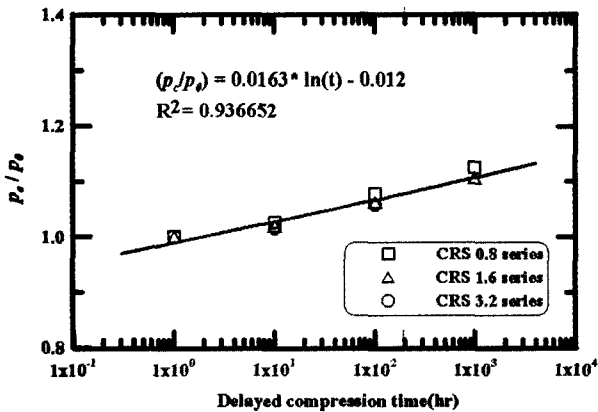


그림 4. 선행압밀하중 예측

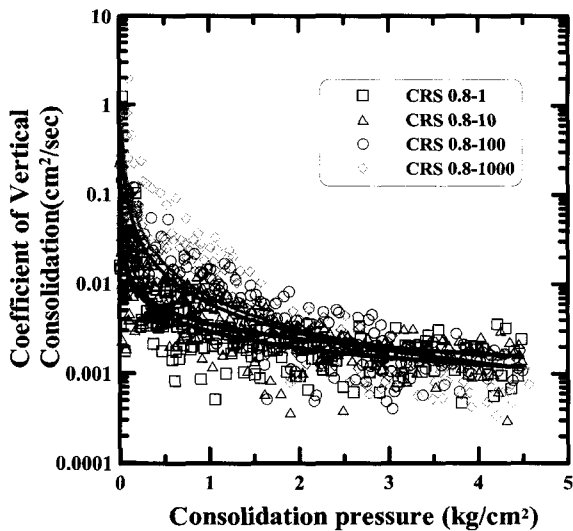
$$(p_c/p_0) = 0.0163 \ln(t) - 0.012 \quad (8)$$

4.2 유효응력과 압밀계수

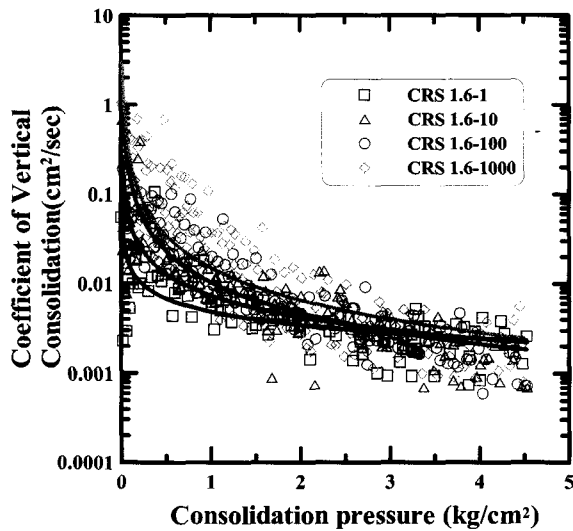
표준압밀시험은 각 하중단계에 따른 압밀계수를 Terzaghi의 1차원 압밀이론으로 구해지는데 Terzaghi 이론에 따르면 압밀이 진행되는 동안 체적변화계수(m_v), 압밀계수(C_v), 투수계수(k)는 일정하다고 가정하였으나 실제 정규압밀범위의 압밀하중이 재하되어질 때 압밀과정에서 간극비의 감소에 따른 m_v , C_v , k 값이 상당한 변화를 나타남을 Tavenas 등(1979)이 지적하였고, 또한 표준압밀시험에서는 각 재하압밀하중에 대한 C_v 값만 구하여지며 시간도 많이 소요될 뿐만 아니라 압밀하중 증가에 대한 C_v 값의 변화가 거의 불규칙이며 연속적인 값도 얻을 수가 없다. 이에 비하여 CRS 압밀시험은 시험과정에서 비교적 빠른 시간내에 정확한 간극수압을 측정하여 압밀하중에 대한 연속적인 C_v 값을 얻을 수 있고, 압밀하중에 대한 C_v 값의 변화를 잘 나타낼 수 있다.

그림 5의 (a), (b), (c)는 본 연구에서 실시된 CRS 압밀시험에서 0.8, 1.6, 3.2 kg/cm^2 압밀하중에 대하여 압축지연시간에 따른 압밀하중에 대한 압밀계수의 변화특성을 각각 나타낸 것으로, 그림 5(a)는 선행압밀하중인 0.8 kg/cm^2 에서 큰 폭으로 압밀계수의 값이 감소하며 선행압밀하중의 약 2배지점인 1.6 kg/cm^2 까지는 감소폭이 줄어들며, 1.6 kg/cm^2 이후로는 0.0005~0.003 cm^2/sec 값으로 수렴하였으며, 그림 5(b)도 (a)와 유사하게 선행압밀하중인 1.6 kg/cm^2 까지 큰 폭으로 감소하며 약 2배지점인 3.2 kg/cm^2 까지는 감소폭과 기울기도 낮아지다가 2배 지점 이후의 압력에서는 (a)와 같이 0.0005~0.003 cm^2/sec 값으로 수렴하였다. 그림 5(c)의 경우는 측정범위의 한계로 (a), (b)처럼 수렴하는 경향을 확인할 수는 없으나 (a), (b)의 그래프로 (c)의 그래프로 유추하여보면 선행압밀하중의 약 2배 지점(6.4 kg/cm^2)까지 감소하다가 그 이후 일정한 값으로 수렴할 것으로 생각되어진다.

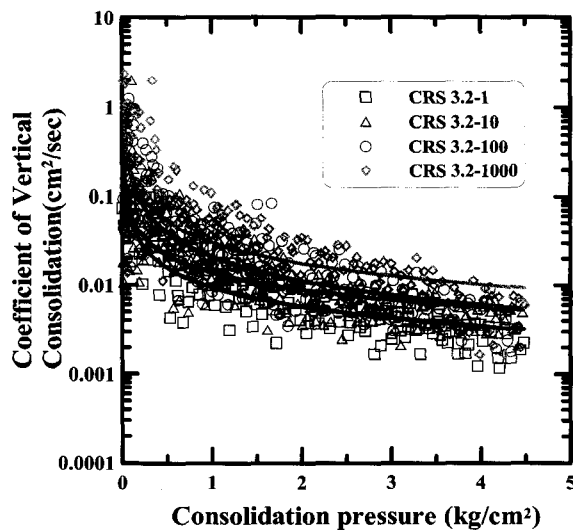
C_v 값은 일반적으로 시험 초기 상당히 큰 값을 보였으며 분산되어 있는 경향을 나타내었고 압밀하중이 증가할수록 일정한 값으로 수렴하였으며, 초기 C_v 값은 압축지연시간이 클수록 그리고 선행압밀하중이 클수록 높은 값을 나타내었다. 이는 C_v 값이 시간계수, 시간, 배수거리의 함수로 되어있으며, 압축지연시간에 따른 지연 압축으로 CRS 압밀시험시 초기 압밀도가 달라지게 되



(a) 0.8kg/cm² series



(b) 1.6kg/cm² series



(c) 3.2kg/cm² series

그림 5. 압축지연시간에 따른 log p와 C_v의 관계

어 초기 C_v 값에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

4.3 간극비와 투수계수

본 논문에서는 CRS 압밀시험의 결과를 이용하여 간접적인 방법으로 투수계수를 산정하였고, 산정결과를 여러 경험식을 이용하여 비교분석하였다.

투수계수는 흙의 압밀특성에 매우 큰 영향을 미치는 인자로 많은 연구자들이 투수계수(k)와 간극비(e)와의 관계에 대하여 많은 함수를 제안하였으며, 그 중 점성토에 대해 가장 일반적으로 사용되고 있는 $e-\log k$ 관계는 포화상태의 고화되지 않은 세립토에서 거의 직선적인 관계에 있다는 것으로 잘 알려져 있다. Mesri(1994)와 Tavenas(1983)는 $e-\log k$ 곡선의 선형 이점은 기울기로 정의되는 투수성 지수항과 공극비의 변화를 연결시키는 것이라고 하였다. 그러나 Mesri의 $e-\log k$ 곡선에서 비선형이 존재하나 비선형성은 심각하지 않기 때문에 $e-\log k$ 의 관계는 큰 오차를 낳지 않으면서 선형화할 수 있다고 하였다.

그림 6은 CRS 0.8-1의 $e-\log k$ 곡선을 도시한 것으로 응력범위에 대한 $e-\log k$ 관계를 알아 보기 위해 $e-\log p$ 곡선을 추가적으로 삽입하였으며, 삽입한 $e-\log p$ 곡선으로부터 과압밀영역, 전이영역, 정규압밀영역을 구분하여 해당영역의 간극비를 확인하여 $e-\log k$ 곡선을 분석하였다. 응력 전구간에 대해서 $e-\log k$ 곡선은 비선형적 관계를 나타내고 있으나 정규압밀영역의 곡선은 선형적

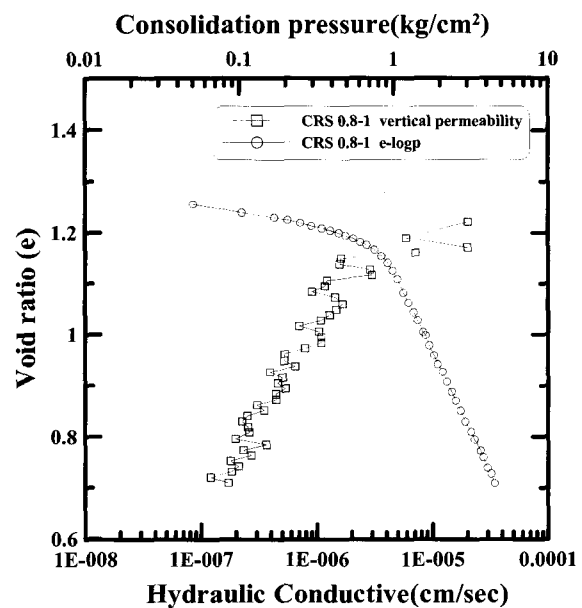


그림 6. CRS 0.8-1 투수계수와 간극비 관계곡선

인 관계로 간주하여도 큰 오차는 발생하지 않을 것으로 판단되며, Tavenas의 정규압밀 세립토에서 $e - \log k$ 는 선형적인 관계를 나타낸다는 것을 시험으로 확인할 수 있었다.

Samarasinghe 등(1982)은 식 (9)를 경험식으로 제시하여 점토에 대한 간극비와 투수계수와와의 관계를 정의하였다.

$$k = C_1 \cdot \frac{e^n}{1+e} \quad (9)$$

여기서, C_1 과 n 은 시험적으로 결정할 수 있는 상수들로서 C_1 은 투수계수 k 와 동일한 단위를 가지는 상수이며, C_1 과 n 모두는 양의 값을 가진다. 이 식 (9)는 다음 식 (10)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\log[k(1+e)] = \log C_1 + n \log e \quad (10)$$

식 (10)은 $\log[k(1+e)]$ 와 $\log e$ 의 그래프가 직선적이라는 것을 보여주는 식으로 n 은 직선의 기울기이며 $\log C_1$ 은 수직축의 절편이라는 것을 알 수 있다. 그러므로 주어진 점성토에 대하여 간극비에 따른 k 값의 변화를 안다면, 양대수 그래프에 e 와 $k(1+e)$ 의 관계를 도시하여 C_1 과 n 값을 구할 수 있다. 그림 7은 CRS 0.8-1의 정규압밀구간에 대하여 $\log[k(1+e)] - \log e$ 관계를 도시한 것으로 이 관계식으로부터 시험상수 n 값과 C_1 을 구할 수 있으며 본 연구에서 실시된 일련의 시험에 대한 n , C_1 결과는 표 4와 같다.

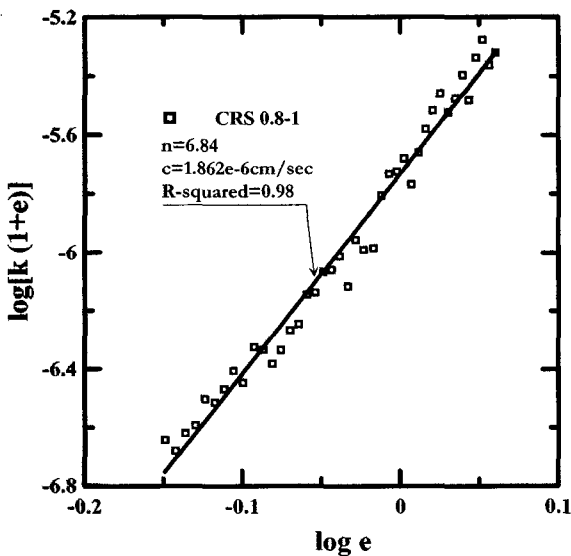


그림 7. CRS 0.8-1의 $\log[k(1+e)] - \log e$ 관계곡선

표 4에서 Samarasinghe 제안식의 선형적인 관계를 나타내기 위한 C_1 값은 $1.412E-6 \sim 2.137E-6$ cm/sec, n 값은 $5.36 \sim 7.81$ 의 범위로 나타났으며, 압축지연시간에 따른 n 값의 변화를 보면 CRS 0.8의 시험에서는 압축지연시간이 증가함에 따라 n 값이 점점 증가하였으나 CRS 1.6, 3.2의 경우에는 불규칙적으로 나타나 압축지연시간 증가에 따른 n 값의 변화는 일정한 관계를 나타내지 않았다.

또한 Kozeny-Carman(Carman, 1956)이 제안한 투수계수와 간극비의 경험식은 식 (11), 식 (12)와 같다.

$$k = C_2 \cdot \frac{e^3}{1+e} \quad (11)$$

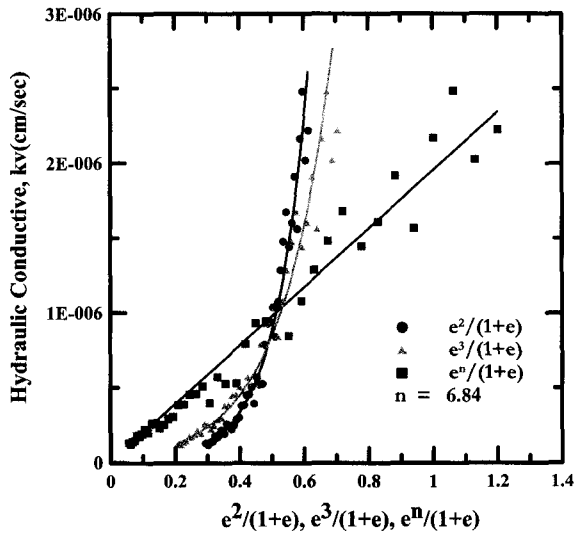
$$k = C_3 \cdot \frac{e^2}{1+e} \quad (12)$$

Samarasinghe 등과 Kozeny-Carman의 경험식을 비교 분석하기 위하여 본 연구에서 실시된 일련의 CRS 압밀 시험에 의한 결과를 식 (9)와 식 (11), (12)를 이용하여 그림 8에 나타내었으며, 지면상 문제로 압밀지연시간이 10, 100hr인 경우는 생략하였다.

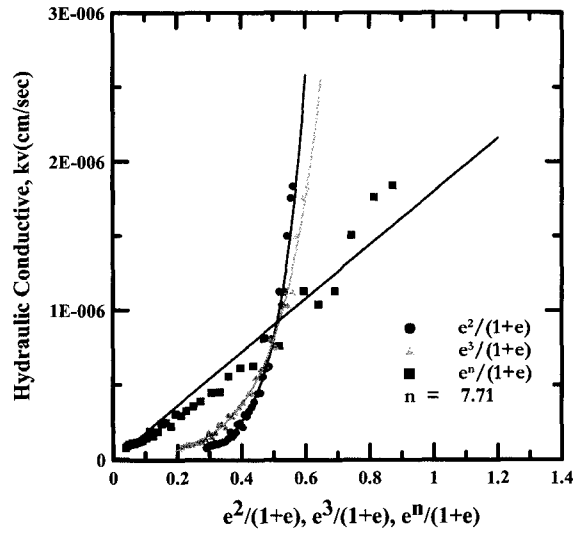
그림 8에서 모든 경우 $e=1$ 일 때를 경계로 하여 e 가 1 이상일 때는 시험에 의한 k 값보다 Kozeny-Carman의 경험식에 의한 k 값이 과대하게 나타났고, e 가 1 이하에서는 과소로 평가되었다. 그리고 그림 8(a), (c), (e)에서 압밀하중이 증가할수록 간극비가 감소하여 범위가 좁아지는 경향을 볼 수 있었으며, 또한 같은 압밀하중에 압밀지연시간을 달리한 그림 8의 (a), (b)와 (c), (d) 그리고 (e), (f)에서도 압밀지연시간이 1hr에서 1000hr으로

표 4. 시험결과에 따른 지수항 상수 n 값과 C_1

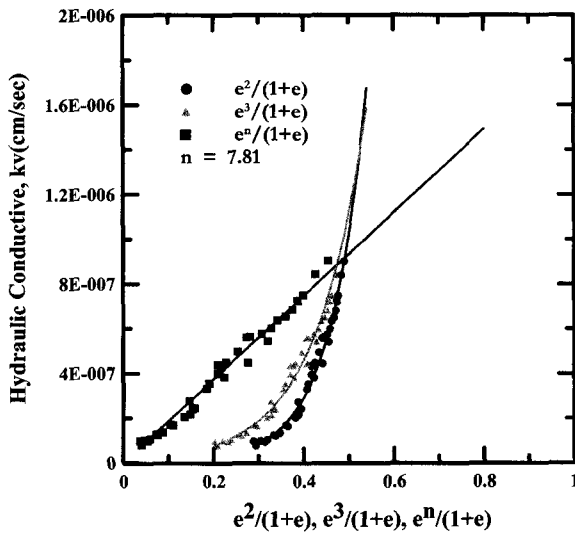
시험종류	n	C_1 (cm/sec)
CRS 0.8-1	6.84	1.862e-6
CRS 0.8-10	7.18	1.778e-6
CRS 0.8-100	7.37	1.659e-6
CRS 0.8-1000	7.71	1.621e-6
CRS 1.6-1	7.81	1.819e-6
CRS 1.6-10	6.54	1.737e-6
CRS 1.6-100	7.66	1.584e-6
CRS 1.6-1000	6.18	1.620e-6
CRS 3.2-1	6.82	2.040e-6
CRS 3.2-10	5.93	1.737e-6
CRS 3.2-100	5.36	1.412e-6
CRS 3.2-1000	6.94	2.137e-6



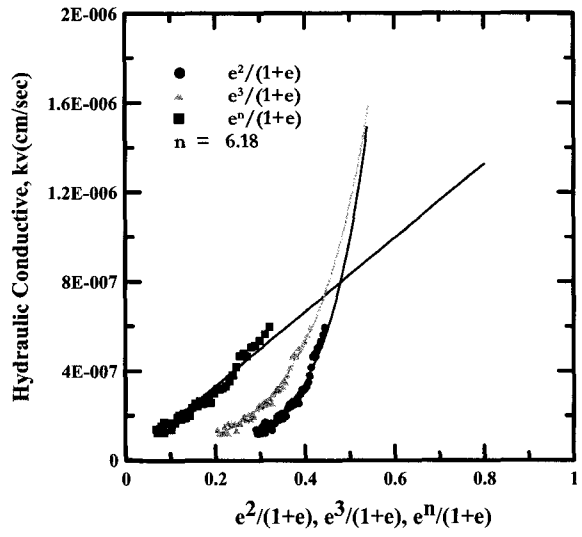
(a) CRS 0.8-1



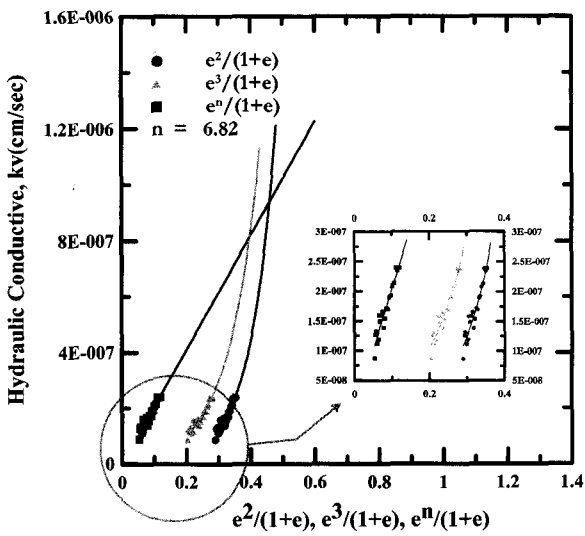
(b) CRS 0.8-1000



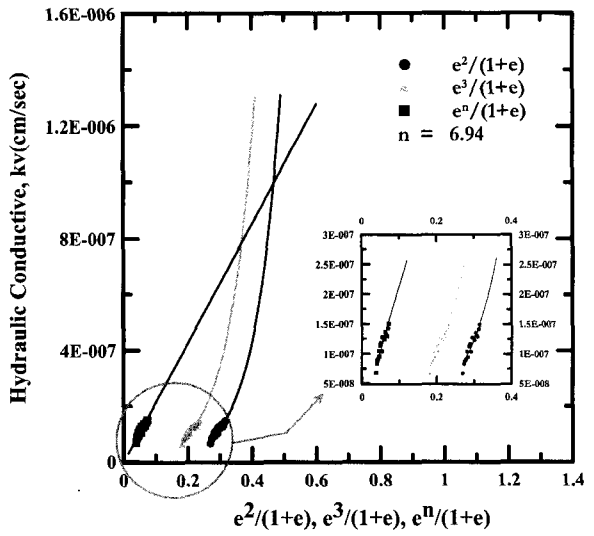
(c) CRS 1.6-1



(d) CRS 1.6-1000



(e) CRS 3.2-1



(f) CRS 3.2-1000

그림 8. k_v 와 $e^2/(1+e)$, $e^3/(1+e)$, $e^n/(1+e)$ 상관관계

지연압축이 됨에 따라 간극비의 감소로 인하여 간극비의 범위가 좁아지는 aging 효과를 관찰할 수 있었다.

비의 감소로 간극비의 범위가 좁아지는 aging 효과가 나타남을 볼 수 있었다.

5. 결론

본 연구는 포항 장성동에서 채취된 이암풍화토를 이용하여 aging effect 고려한 일련의 CRS 압밀시험을 통해 압밀특성을 분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었으며, 본 연구에서 얻어진 결과는 포항 이암풍화토에 대한 것으로 다른 점성토의 적용성에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

- (1) CRS 시험결과 압밀지연시간의 경과에 비례하여 간극비는 점차 감소하였으며, 선행압밀하중의 크기는 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 일정한 유효응력 하에서 시간이 경과함에 따라 지속적인 압축으로 인한 aging 효과에 의한 것이다.
- (2) 압밀지연시간에 대한 압밀하중과 선행압밀하중비 (p_d/p_o)의 관계로부터 압밀하중과 압밀지연시간에 따른 유사선행압밀하중을 예측할 수 있었다.
- (3) 압밀계수의 특성은 선행압밀하중까지는 급격히 감소하고, 선행압밀하중의 약 2배 지점까지는 비교적 완만하게 감소하며 그리고 2배 이상인 구간에서는 $0.0005 \sim 0.003 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 값으로 수렴하는 것으로 나타났다. 초기 압밀계수는 압밀지연시간이 길어질수록 그리고 압밀하중이 증가할수록 높은 값을 나타내는데 이는 압밀지연시간에 의한 지연압축으로 인해 CRS 압밀시험시 초기압밀도가 달라지기 때문인 것으로 생각된다.
- (4) 전체 응력구간에 대해서 $e - \log k$ 곡선은 비선형적 관계를 나타내고 있으나, 정규압밀영역에서는 선형적인 관계로 볼 수 있다. 간극비와 투수계수의 관계에서 Samarasinghe 제안식에 의한 시험치와 Kozeny-Carman의 경험식을 비교하여보면, $e > 1$ 일 때는 시험에 의한 k 값보다 Kozeny-Carman의 경험식에 의한 k 값이 과대하게 나타났고, $e < 1$ 에서는 과소로 평가되었다. 또한 투수계수와 간극비의 관계에서 압밀지연시간에 의한 지연압축에 따른 간극

참고 문헌

1. 김영수, 김기영, 김대만 (2000a), "일정변형률 압밀시험에 따른 이암풍화토의 압밀특성", *지반공학회지*, 제 16권, 제 1호, pp.99-106.
2. 김영수, 김기영, 이상웅 (2000b), "채성형된 이암풍화토를 이용한 정규압밀영역의 압밀 및 투수특성", *지반공학회지*, 제 16권, 제 2호, pp.61-69.
3. 임형덕 (1997), *Comparison of consolidation characteristics of Gaduk-do clay by CRS and conventional tests*, 석사학위논문, 고려대학교.
4. 이진주 (1986), *일정변위압밀시험에 의한 낙동강 하구토 압밀특성*, 석사학위논문, 동아대학교.
5. ASTM Designation : D4186-82 (1982), Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Controlled-Strain Loading.
6. Butterfield, R. (1979), "A Natural Compression Law for Soils (and Advance on $e - \log p$)", *Geotechnique*, Vol.29, No.4, pp.469-480.
7. Carman (1956), P.E., *Flow of gases through porous media*, Academic, New York.
8. Hamilton, J. J. and Crawford, C. B. (1959), "Improved Determination of Preconsolidation Pressure of a Sensitive Clay", *ASTM, STP*, No.254, pp.254-274.
9. Mesri, G. and Tavenas, F. (1983), "Discussion on Permeability and Consolidation of Normally Consolidated Soils by Samarasinghe et al. (1982)", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.109, pp.873-878.
10. Mitchell, J. K. (1976), *Fundamentals of soil behavior*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
11. Samarasinghe, A. M., Haung, Y. H., and Drnevich, V. P. (1982), "Permeability and Consolidation of Normally Consolidated Soils", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, Vol.108, GT6.
12. 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.
13. Tavenas, F., Brucy, M., Magnan, J. P., La Rochelle, P., and Roy, M. (1979), "Analyse critique de la théorie de consolidation Unidimensionnelle de terzaghi", *Revue Française de Géotechnique*, No.7, pp.29-43.
14. 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.
15. 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 2004. 4. 13, 심사완료일 2004. 7. 16)