

일정변형률 압밀시험에 따른 이암풍화토의 압밀특성

A Consolidation Characteristics of Decomposed Mudstone Soil by Constant Rate of Strain Consolidation

김 영 수*¹ Kim, Young-Su

김 기 영*² Kim, Ki-Young

김 대 만*³ Kim, Dae-Man

Abstract

The main advantage of incremental loading consolidation test is the simplicity of equipments that can be used. However, it is known that the incremental loading test has several deficiencies including long testing time, non-uniform stress state, high and variable rates of strain, very soft clay and problem of back pressure saturation.

Due to these drawbacks, various testing methods including constant rate of strain consolidation test(CRS) were developed. In this paper, CRS consolidation test was performed with three different strain rate. The results were verified by the modified CRS theory of Wissa et al.(1971). And then the results obtained from the CRS consolidation tests were compared with those from incremental loading test and direct permeability test.

요 지

기존의 Oedometer 시험은 간단한 시험장치의 편리함으로 인해 널리 이용되어 왔다. 그러나 이 방법은 장시간의 시험 기간, 각 단계 하중에서의 불규칙적인 응력상태, 매우 연약한 점토에 대한 시험의 어려움 및 시료의 포화문제와 같은 여러 문제점을 노출하게 되었다. 따라서 이런 단점을 보완 할수 있는 시험 방법의 하나로 일정 변형률 압밀시험이 개발되어 널리 이용되고 있다. 본 논문에서는 세가지 변형률을 이용한 CRS 시험을 실시하였으며, 이 결과를 수정된 Wissa(1971)의 비선형이론을 이용해 해석하고, 기존의 Oedometer 시험 및 직접투수시험과 비교분석함으로써 CRS 시험의 효율성 및 적용성 유무를 판단하고자 한다.

Keywords : Decomposed mudstone soil, Constant rate of strain, Oedometer, Rowe cell, Non-Linear theory.

*1 정회원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

*2 정회원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 박사과정 수료

*3 정회원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

1. 서론

기존의 Oedometer test는 장치의 간단함으로 인해 40년 간 커다란 변화없이 이용되어왔다. 그러나 이 방법은 시험 기간이 길고, 각 단계 하중에서의 응력 불균형 상태, 시료의 포화문제가 단점으로 남아있다. 더구나 점증하중에 따른 압밀시험 방법은 현장상태를 정확하게 재현하기가 어려웠다. 그러나 전자 계측장치의 발달과 제어 장치의 발달로 인해 일정변형을 압밀장치가 개발되어 이 장치를 이용한 점토의 압밀특성 연구가 활발히 이루어지고 있는 실정이다. 초기에는 Hamilton, J. J. & Crawford, C. B.(1959), Crawford, C. B.(1964), Wahls, H. E. & Degodoy, N. S.(1965)에 의해 주도적인 연구가 진행되어 왔으며, CRS 시험에 따른 최초의 해석방법은 Smith, R. E. & Wahls, P. J.(1969)에 의해 개발되었다. 그 후 Wissa et al.(1971), Zen, K.(1980), Lee, K.(1981), 그리고 Crawford, C. B.(1988) 등에 의해 이론적인 발전이 있어왔다. 이러한 해석방법은 비선형 응력-변형거동에 기초를 둔 이론으로 이미 널리 이용되고 있으나 경험적으로 많이 검증되지 않았다는 단점이다. 그러므로 CRS시험에서 합리적인 변형률의 적용 및 Oedometer와 CRS시험에서 얻어진 상수와의 일치성 등은 실험의 중요한 관건이 된다고 할 수 있다.

본 연구의 주된 목적은 포항지역의 재성형된 이암 풍화토를 세가지 변형률을 이용하여 CRS압밀시험을 실시하고 그 결과를 Wissa(1971)의 비선형이론을 적용해 압밀 및 투수특성을 알아보았으며, 이 결과를 Oedometer 시험결과와 비교하였다. 또한 Rowecell을 통한 직접투수시험을 실시하고 그 결과를 CRS시험에서 얻어진 간접투수시험결과와 비교분석하므로써 CRS시험의 효율성 및 적용성 여부를 판단하는데 그 목적이 있다.

2. 해석방법

2.1 Non-Linear CRS Theory

Smith, R. E. & Wahls, H. E.(1969)는 유효수직응력 (σ_v')와 수직변형률 (ϵ_v)의 관계를 직선적이라고 가정하고, 평균유효응력 (σ_v')와 압밀계수 (C_v), 투수계수 (k_v)와의 관계를 규정하는 관계식을 발표하였으며, Wissa (1971)의 비선형이론은 평균유효응력 (σ_v')과 압밀계수 (C_v), 투수계수 (k_v)의 관계가 비선형($d\epsilon_v/d\log \sigma_v' = \text{const}$)

이라는 데 기초를 둔 새로운 관계식을 제안하였다. 이 비선형이론은 응력분포 상태가 일정하고 무차원 시간계수 (T)가 일정하다는 Steady-State 조건과 빠른 하중변형에 따라 초기에 발생하는 Transient 조건상태를 고려한 식이며, 이 2가지 조건을 구분하기 위해 Wissa et al.(1971)은 무차원 시간계수 (T)를 도입하였다. 여기서 T 는 시료 내 응력분포의 전이 정도를 나타내는 것으로 임의 시간 동안의 함수인 F_3 을 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 Steady-State 상태라고 가정할 수 있으며, Wissa et al.(1971)의 Steady-State 조건을 고려한 해석방법은 Cell 중앙 바닥면에서 발생하는 과잉 간극수압이 총 수직응력의 30%을 초과할 수 없다는 ASTM D4186 기준을 만족하기 위한 즉, CRS시험중 발생할 수 있는 Transient 조건의 발생을 제한하기 위한 시도이다. 가정한 비선형 거동은 응력이 깊이에 따라 Parabolic 하고 Steady-State 상태인 경우 평균유효응력 (σ_v')와 C_v 와 k_v 와의 관계는 식 (3), (4), (5)와 같다.

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

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

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

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 평균값

$T < 0.5$ 인 Transient 조건상태에 대한 C_v 와 k_v 는 식 (2)에서 구해진 시간계수 (T)와 Terzaghi 이론에서 구할 수 있다.

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

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

2.2 e-log k 관계

투수는 흙의 압밀특성에 의해 커다란 영향을 받는다. 많은 학자들이 투수계수(k)와 간극비(e)와의 관계에 대한 많은 방정식을 제안해 왔다. 가장 일반적인 식은 간극비(e)와 $\log k$ 가 선형적인 관계에 있다는 것이다. 따라서 Taylor, D. W.(1948)는 모래에 대한 투수계수를 다음과 같은 식으로 나타내었다.

$$k = C \frac{e^3}{1+e} \quad (8)$$

$$C = C_s \frac{\gamma_w}{\mu} D_s^2 \quad (9)$$

여기서 C_s ; 형상계수

μ ; 간극유체의 점성계수

γ_w ; 물의 단위중량

D_s ; 입자의 직경

또한 Taylor는 점성토에서도 간극비(e)와 $\log k$ 는 직선 관계를 나타낸다고 제안하였다. 그러나 경험적인 결과 항상 직선적인 관계를 나타내는 것은 아니다. 따라서 점성토에 대하여 다음과 같은 변형된 식을 제안하였다.

$$k = C \frac{e^n}{1+e} \quad (10)$$

여기서, n 은 $\log[k(1+e)]$ 와 $\log e$ 그래프에서의 직선의 기울기, C 는 절편의 크기를 나타낸다. 이러한 관계는 많은 종류의 정규압밀점토에서 충분히 입증된 바 있다.

3. 시험장치

본 연구에서 사용된 시험기는 미국 GEOCOMP사에서 제작된 장치로서 삼축압축시험, 일정변형률 압밀시험, 삼축투수시험을 실시할 수 있는 다기능 시험기이다. 세부장치로는 시료를 포화시키는데 필요한 Back Pressure Transducer, 시료의 변형측정을 위한 LVDT, 과잉 간극수압을

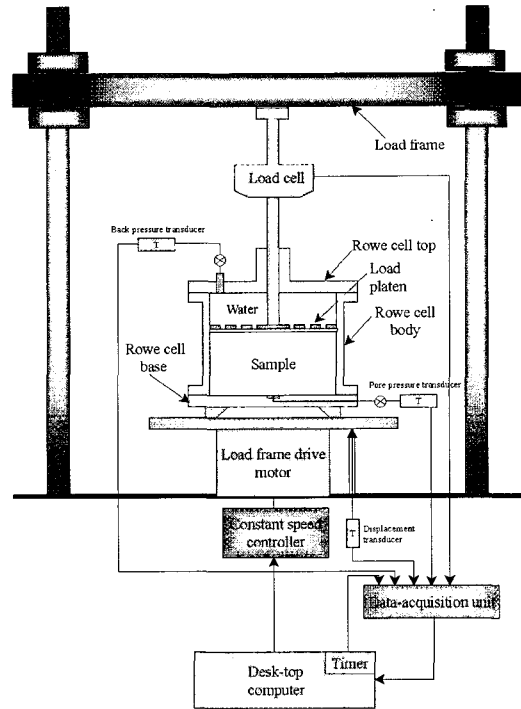


그림 1. 일정변형률 압밀시험장치의 개요도

측정할 수 있는 간극수압계, 응력을 측정할 수 있는 Load Cell 그리고 일정 변형속도를 유지할 수 있는 Drive Motor 및 이 모두를 총괄할 수 있는 제어장치로 구성되어 있으며 자세한 세부도면은 그림 1과 같다. CRS 시험에 사용되는 cell은 크게 Hydraulic Loading 방식과 Mechanical Loading 방식으로 나눌 수 있다. 세부 분류방식은 Head, K. H.(1986)을 참조하기 바람, 본 연구에서 사용된 장치는 직경 15cm의 Rowe cell를 이용한 Mechanical Loading 방식으로 Back Pressure를 가할 수 있는 방식이다. Cell 내부는 그림 1에서처럼 상부에는 Poros Disc를 설치하여 시료의 포화 및 배수가 이루어질 수 있도록 하였으며, 하부 중앙에는 간극수압계를 설치하여 과잉간극수압을 측정할 수 있도록 하였다.

4. 시료성형 및 시험방법.

4.1 시료성형

시료의 성형은 포항 두호동 지역의 이암 풍화토를 No. 40번 체를 이용하여 거른다음 증류수를 액성한계 2배의 함수비로 48시간 가랑 교반시킴과 동시에 진공장치를 이용시료속의 공기를 완전히 제거하였다. 이후 슬러리 상태의 시료를 Rowe cell에 공기가 들어가지 않도록 붓고 Hydraulic loading 방식을 이용해 20, 40, 60kPa의 단계로 예비

압밀 시킨 후 시료의 높이와 무게를 측정하였다. 시험에 사용된 이암 풍화토의 물성치는 표 1과 같다.

표 1. 이암 풍화토의 기본 물성치

G_s	D_{10} (mm)	C_u	ω_L (%)	ω_p (%)	I_p
2.595	0.032	4.725	48.25	23.7	24.55

4.2 시험방법

본 연구에서는 세가지 변형률을 이용한 CRS압밀시험과 Oedometer를 이용한 표준압밀시험 그리고 Rowecell을 이용한 직접투수시험을 실시하였다. CRS압밀시험은 Rowecell(15cm)을 이용한 Mechanical loading 방식을 사용하였다. 먼저 4.1절의 시료성형방법으로 예비압밀된 시료의 완전포화를 위해 cell 상부와 하부에 Back Pressure를 가하였다. Back Pressure 단계는 50kPa씩 증가시켜 350kPa까지 가한 후 각 단계별로 B Value를 측정 포화도가 98% 이상이 되도록 하였다. 이 후 변형률을 0.1%/min, 0.05%/min, 0.025%/min의 속도로 가해 수직응력과 저부 중앙의 간극수압 및 수직변위를 동시에 측정하였으며, 압밀이 이루어지는 동안 Back Pressure는 일정하게 유지시켰다. Oedometer를 이용한 표준압밀시험은 시료를 Rowecell을 이용해 예비압밀 시킨 다음 추출하고, ASTM Standard D2435에서 제안한 지름 6cm, 높이 2cm 크기의 시료를 이용해 실시하였다. 하중단계는 0.1kg/cm²부터 6.4kg/cm²까지 실시하였으며 하중증가비는 1, 압밀기간은 24시간으로 하였다. Rowecell을 이용한 직접투수시험은 압밀시험과 동일한 방법으로 슬러리상태의 시료를 예비압밀 시킨 다음 하중을 제거시키고 시료의 초기 높이와 무게를 측정한 후 CRS압밀시험 방법과 동일하게 포화시켰다. 하중단계는 표준압밀시험과 동일한 방식으로 가하였으며, 각 단계하중별 압밀이 완료된 후 Rowecell 상부와 하부에 약 5kPa 차이의 Back Pressure를 가한 후 약 6시간 동안 유출된 유량을 측정했다.

5. 시험결과 및 고찰

5.1 변형률에 따른 e-log p'의 관계

이암 풍화토를 이용한 9회의 CRS압밀시험 및 4회의 Oedometer 시험결과를 요약하면 표 2와 같다. 먼저 그림 2의 e - log p' 곡선에서 얻어진 선행압밀하중(p_c)은 Casa-

grande법을 통해 구하였으며, 시험결과 Oedometer 시험에서의 평균 선행압밀하중은 0.592kg/cm²로 나타났다. 이 값은 CRS 0.05, 0.025%/min 시험에서 얻어진 평균값 0.616, 0.58kg/cm² 과는 큰 차이를 보이지 않았으나 0.1%/min 시험에서 얻어진 평균값인 0.68kg/cm² 보다는 0.088kg/cm² 정도 작은 값을 나타내었다. Vertical Strain(ϵ_v) - log p'의 관계는 그림 3과 같다. 그림에서처럼 CRS시험(0.05%/min)과 Oedometer 시험결과는 시험초기인 0.8kg/cm² 범위까지 상당히 만족할 만한 결과를 보여주고 있으며 이후의 하중범위에서는 변형률 0.1%/min의 시험결과와 더 근접하고 있음을 알 수 있다. 또한 같은 하중에서의 수직변형률을 비교해 보면 변형률이 느릴수록 더 많은 양의 수직변형이 발생하는 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 Akagi, H. & Komoya, K.(1995)의 채성형된 점토 시료에 대한 연구 및 Yildirim, H. & Okdem, K.(1995)의 연구 결과에서도 발표된 바 있다. 위의 결과에 비추어 변형률에 따라 선행압밀하중 및 수직변형률은 조금씩 변화함을

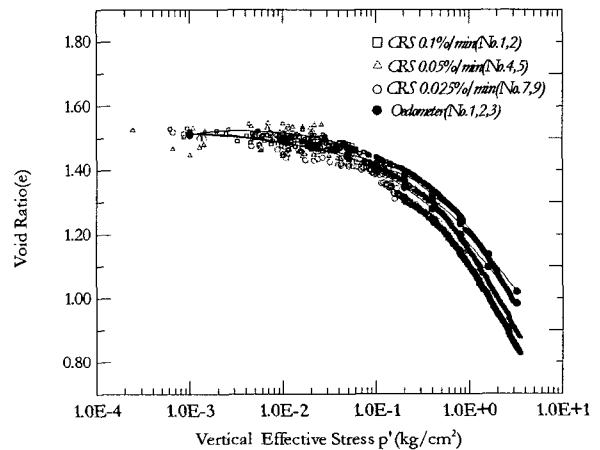


그림 2. 변형률에 따른 간극비와 유효수직응력과의 관계

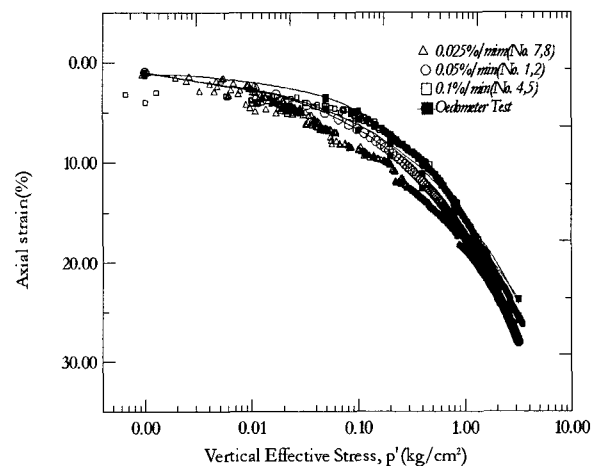


그림 3. 변형률에 따른 간극수압과 유효수직응력과의 관계

알 수 있다. 그러나 0.05%/min의 변형률을 이용해 얻어진 선행압밀하중과 수직변형률은 Oedometer 시험 결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

5.2 변형률에 따른 간극수압의 경향

그림 4는 과잉간극수압의 경향을 나타낸 것으로 변형률에 상관없이 선행압밀하중보다 작은 시험초기에는 과잉간극수압이 거의 발생하지 않았으며, 선행압밀하중에 근접하면서 서서히 증가하기 시작해 선행압밀하중을 지나서는 크게 증가하는 양상을 보였다. 또한, 변형률이 증가할수록 간극수압의 크기도 증가하는 것으로 나타났다. 표 2의 결과에서 처럼 $\Delta u_b/u_b$ 의 값은 변형률 0.025, 0.05%/min인 경우 7~12.35% 범위로 나타났고 이에 비해 0.1%/min인 경우엔 29.3~34.28%로 높게 나타났다. 그러

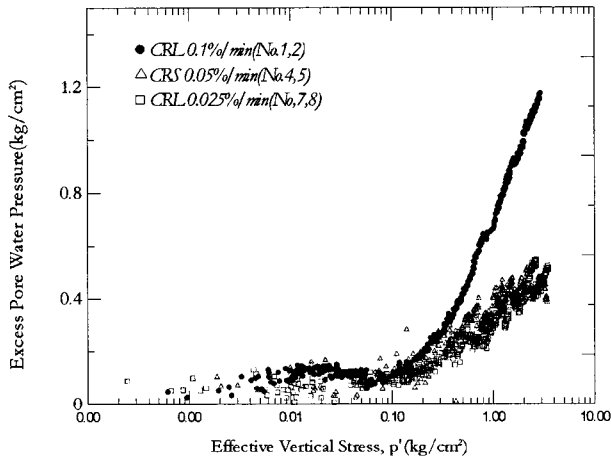


그림 4. 변형률에 따른 간극수압과 유효수직응력과의 관계

표 2. 표준압밀시험 및 CRS압밀시험의 결과 요약

Test Type	ϵ_a (%/min)		H_o (cm)	W_o (%)	e_o	B value	p_c' (kg/cm ²)	$\Delta u_b / U_b^*$ (%)
Oedometer	No.1	IL*	2	43.35	1.515	-	0.58	-
	No.2	IL	2	41.89	1.567	-	0.55	-
	No.3	IL	2	42.79	1.512	-	0.61	-
	No.4	IL	2	42.95	1.518	-	0.63	-
CRS	No.1	0.1	4.48	45.8	1.60	0.99	0.66	34.28
	No.2	0.1	4.38	44.8	1.57	0.98	0.67	33.03
	No.3	0.1	4.50	45.1	1.58	1.0	0.71	29.30
	No.4	0.05	4.51	44.2	1.561	0.99	0.62	11.76
	No.5	0.05	4.57	44.8	1.552	1.0	0.63	12.35
	No.6	0.05	4.60	43.7	1.549	0.985	0.60	10.25
	No.7	0.025	4.71	47.6	1.552	0.99	0.58	9.24
	No.8	0.025	4.60	46.3	1.548	1.0	0.59	7.0
	No.9	0.025	4.59	45.3	1.559	1.0	0.60	7.2

* IL : Incremental Loading, Δu_b : 압밀과정중 발생한 최대 과잉간극수압 U_b : Back Pressure

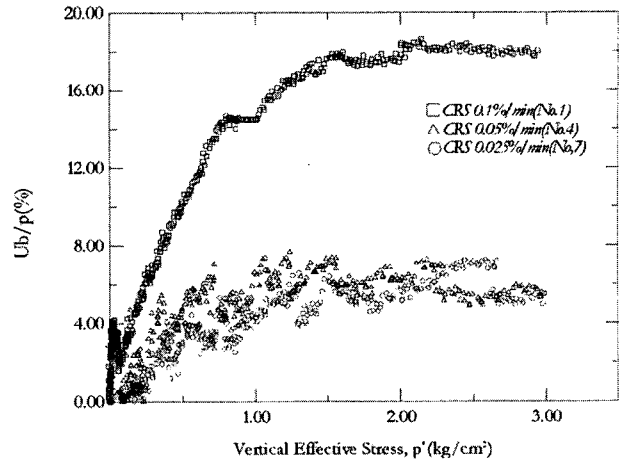


그림 5. 변형률에 따른 U_b/p 와 유효수직응력과의 관계

나 세가지 변형속도 모두 과잉간극수압이 가해진 총 수직응력의 30%를 초과 하지 않도록 규정한 ASTM D4186의 조건을 만족하며, 시간계수 (T)가 0.5보다 큰 Steady-State 상태로서 Wissa et al.(1971)의 비선형이론을 적용할 수 있는 조건을 만족한다.

U_b (과잉간극수압) / p (총수직응력) 와 유효수직응력(p')과의 관계를 도시하면 그림 5와 같다. 그림에서처럼 변형률이 빠를수록 U_b/p 의 최대값이 크게 나타났으며, 초기에는 증가량이 작은 반면 선행압밀하중에 도달하면서 U_b/p 값이 서서히 증가해 최대값에 도달한 후 변형률에 관계없이 일정한 값을 유지하는 것으로 나타났다.

5.3 변형률에 따른 압밀계수 및 투수계수

CRS시험과 Oedometer 시험에서 얻어진 압밀계수 (C_v)

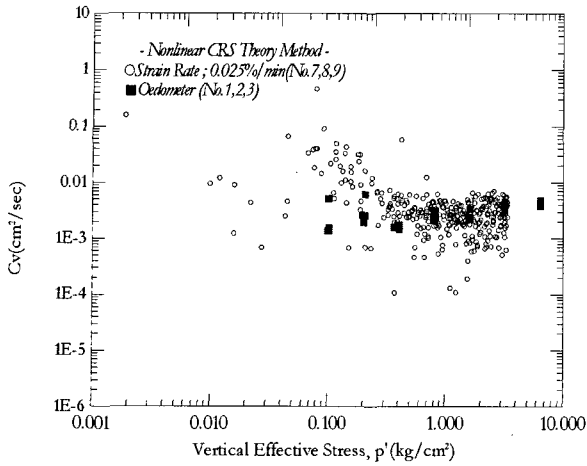


그림 6. 압밀계수와 유효수직응력과의 관계(변형률: 0.025%/min)

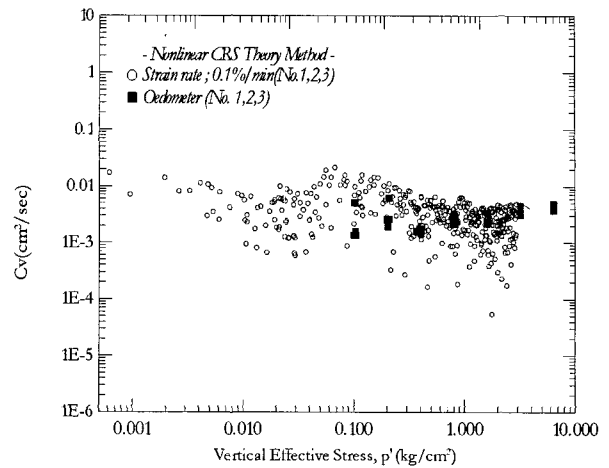


그림 8. 압밀계수와 유효수직응력과의 관계(변형률: 0.1%/min)

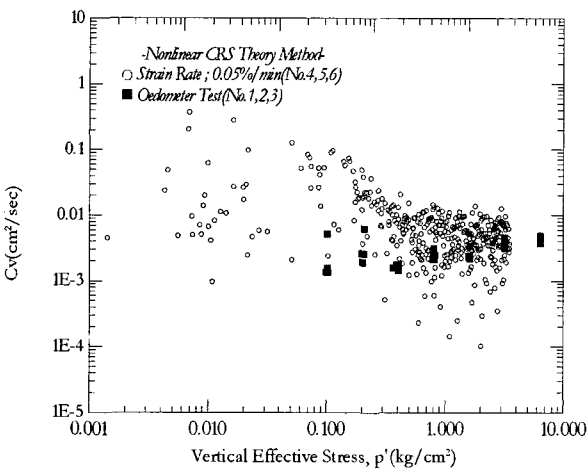


그림 7. 압밀계수와 유효수직응력과의 관계(변형률: 0.05%/min)

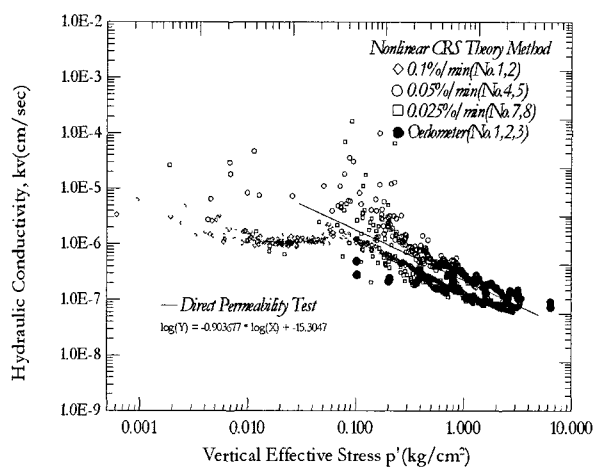


그림 9. 투수계수와 유효수직응력과의 관계

를 비교한 결과는 그림 6, 7, 8과 같다. 무차원 시간계수 (T)가 0.5보다 큰 Steady-State 조건인 경우에는 식 (4), (5)를 이용하여 구했으며, 0.5보다 작은 Transient 조건인 경우에는 식 (6), (7)을 이용하여 구한다. 비선형이론을 적용해 구한 값과 Oedometer 시험결과를 Casagrand 방법으로 구한 C_v 와 비교해 보면 변형률에 관계없이 과압밀 부분인 0.6kg/cm^2 이하 범위에서의 압밀계수는 CRS에서 구한 값이 Oedometer의 결과보다 조금 크게 나타났으나, 정규압밀영역에서의 값은 상당히 잘 일치하고 있는 경향을 보였다. 이러한 결과는 Blumenau-Navegante 점토를 이용한 Almeida, M. S. S. & Martins, I. S. M.(1995)의 연구 및 Boston Blue 점토를 이용한 Thomas C. S. & atrick J.

W.(1997)의 연구결과와도 일치한다. 따라서 이암 풍화토의 정규압밀영역에서의 CRS압밀시험으로 부터 얻어진 C_v 값은 어느정도 타당성을 갖는다고 판단된다.

투수계수 (k_v) - 유효응력 (p')와의 관계는 그림 9와 같다. 세가지 변형률 중 0.05%/min에서 얻어진 투수계수가 다른 두가지 변형률에서 얻어진 투수계수보다 조금 더 큰 범위의 값을 나타내었으며, 이 결과를 Oedometer 시험에서 얻어진 간접투수계수와 비교해 보면 선행압밀하중 이후 범위에서는 세가지 변형률에서 얻어진 투수계수와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있으나 과압밀부분에서는 상당한 차이를 나타내었다. CRS시험에서 얻어진 투수계수의 유효성을 검증하기 위해 실시한 직접투수시험 결과

표 3. Taylor 방법을 이용한 투수상수 n , C

상수 방법	Oedometer No.1	Oedometer No.2	Oedometer No.3	Direct Permeability Test
n	3.37	5.209	5.903	7.01
$C(\text{cm/sec})$	2.21×10^{-7}	1.67×10^{-7}	1.59×10^{-7}	2.2×10^{-7}

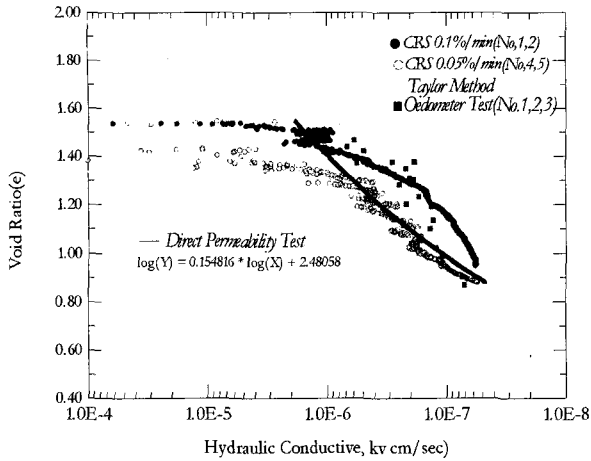


그림 10. 간극비와 투수계수와의 관계

는 그림 9와 같다. 그림에서 굵은 실선으로 나타낸 것이 직접투수시험 결과를 회귀분석한 식으로 CRS시험을 통해 구한 투수계수 사이에 위치하고 있으며, 그 중 0.05%/min의 변형률을 이용해 구해진 투수계수는 직접투수시험에서 얻어진 결과와 비교적 일치하고 있다. 따라서 CRS시험으로 얻어진 투수계수들 또한 상당히 유효하다는 것을 알 수 있다. Oedometer시험 및 직접투수시험에서 얻어진 결과를 2장에서 언급한 Taylor의 방법으로 해석한 투수상수 n , C 값은 표 3과 같다.

표 3에서 얻어진 투수상수를 이용해 구한 간극비(e)와 투수계수(k_v)와의 결과는 그림 10과 같다. 그림에서 점선으로 나타난 부분은 표 3의 Oedometer에서 얻어진 투수상수를 이용해 구한 투수계수들을 나타낸 값이며, 굵은 실선 부분은 직접투수시험에서 얻어진 투수상수로부터 얻어진 결과를 나타낸 것이다. Oedometer시험 및 CRS시험중 변형률 0.1%/min에서 얻어진 결과는 직접투수시험의 결과와 상당한 차이를 나타내고 있으나 0.05%/min의 변형률에서 얻어진 투수계수는 정규압밀영역 즉 선행압밀하중의 간극비(1.25) 이후 부분에서 직접투수시험 결과와 상당히 잘 일치하는 것으로 나타났다.

6. 결론

포항 두호동 지역에 산재하고 있는 이암 풍화토를 재성형한 후 일정변형률 압밀시험(CRS)을 변형률을 달리하여 실시하고 이 결과를 Oedometer시험 및 직접투수시험 결과와 비교 분석한 결론은 다음과 같다.

1) 본 연구에서 시행한 세가지 변형률에서의 과잉간극수

압은 총 수직응력의 30%를 초과할 수 없다고 규정한 ASTM의 조건을 만족함으로 Wissa et al(1971)의 비선형이론을 적용한 해석이 가능하였다.

- 2) 비선형 이론을 이용하여 구한 유효수직응력과 수직변형률과의 관계에서는 변형률이 느릴수록 동일 하중에서의 변형은 크게 발생하는 것으로 나타났으며, 이러한 현상은 변형률이 빠를수록 과잉간극수압의 소산이 원활히 이루어지지 않는데 그 원인이 있는 것으로 보인다.
- 3) 과잉간극수압의 발생은 과압밀상태의 응력범위에서는 거의 발생하지 않았으나 선행압밀 하중에 근접하면서부터 서서히 증가한 후 선행압밀하중 이후 급격히 발생하는 양상을 보였다.
- 4) 유효수직응력과 압밀계수와의 관계를 Oedometer 시험 결과와 비교해보면 변형률에 관계 없이 선행압밀하중 전에는 어느 정도의 차이를 보였으나, 선행압밀하중 이후에서는 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 CRS시험에서 얻어진 C_c 값은 Steady-State 조건인 경우 변형률에 큰 영향을 받지 않는 것으로 보이며, Oedometer의 결과와도 잘 일치하는 것으로 나타났다.
- 5) CRS시험에서 얻어진 투수계수의 유효성을 검증하기 위해 실시한 직접투수시험 결과 유효수직응력과 투수계수와의 관계에서 세가지 변형률중 0.05%/min의 변형률에서 얻어진 결과가 직접투수시험 결과와 가장 근접하게 나타났으며, 나머지 두가지 변형률에서도 큰 차이는 나타내지 않았다. 따라서 CRS시험에서 얻어진 투수계수의 유효성 및 효율성을 검증할 수 있었다.
- 6) 간극비와 투수계수와의 관계에서 얻어진 결과 역시 변형률 0.05%/min에서 얻어진 결과치가 직접투수시험 결과와 가장 근접했으며, 오히려 Oedometer에서 얻어진 결과보다 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

위 결과를 종합해 보면 재성형된 이암 풍화토에 대한 CRS압밀시험은 기존의 표준압밀시험과는 방법면에서 상당히 상이함에도 불구하고 각종 결과에서 실험의 타당성 및 유용성을 확인할 수 있어 효과적인 압밀시험방법으로 생각된다.

참고문헌

1. Almeida, M. S. S. & Martins, I. S. M.(1995), "Constant Rate of Strain Consolidation on Very Soft Clays", A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 9~14.

2. Amnour, D. W. & Drnevich, V. P.(1986), "Improve Technique for the Constant Rate of Strain Consolidation Test", Consolidation of Soils Testing and Evaluation, ASTM Spec. Tech. Publ. No. 892, Yong, R. N. & Tounsend, F. C. eds., ASTM, Philadelphia, pp. 170~183.
3. Akagi, H. & Komiya, H.(1995), "Constant Ratio of Strain Consolidation Properties of Clay Soil at High Temperature", A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 3~8.
4. Crawford, C. B.(1964), "Interpretation of the Consolidation Test", J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE, 90(5), pp. 87~102.
5. Crawford, C. B.(1988), "On Importance of Rate of Strain in the Consolidation Test", Geotechnical Testing Journal, Vol. 11, No. 1, March, pp. 60~62.
6. Hamilton, J. J. & Crawford, C. B.(1959), "Improved Determination of Preconsolidation Pressure of a Sensitive Clay", Paper on Soils, ASTM Spec. Tech. Publ. No. 254, ASTM, Philadelphia, pp. 254~270.
7. Head, K. H.(1986), Manual of Soil Laboratory Testing, Vol. 3, Pentech Press, London.
8. Lee, K.(1981), "Consolidation with Constant Rate of Deformation", Geotechnique, Vol. 31, June, pp. 259~329.
9. Sheahan, T. C. & Watters, P. J.(1996), "Using an Automated Rowe cell for Constant Rate of Strain Consolidation Testing", Geotec. Testing J., 19(4), pp. 354~363.
10. Smith, R. E. & Wahls, H. E.(1969), "Consolidation under Constant Rate of Strain", Soil Mech. and Found. Div., ASCE, 95(2), pp. 519~539.
11. Taylor, D. W.(1948), Fundamental of Soil Mechanics, John Wiley and Sons, Inc., New York, N. Y.
12. Thomas, C. S. & Patrick, J. W.(1997), "Experimental Verification of CRS Consolidation Theory", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 123, No. 5-8, May, pp. 430~437.
13. Wahls, H. E. & Degodoy, N. S.(1965), "Interpretation of the Consolidation Test", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 91, No. SM3, May, pp. 147~152.
14. Wissa, A. E. Z., Christian, J. T., Davis, E. H. & Heiberg, S.(1971), "Consolidation at Constant Ratio of Strain", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 97, No. SM10, October, pp. 1893~1413.
15. Yildirim, H. & Okdem, F.(1995), "Constant Rate of Strain Consolidation Test", A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 227~231.
16. Zen, K. & Umehera, Y.(1980), "Constant Rate of Strain Consolidation for Very Soft Clayey Soils", Soil and Foundations, Vol. 20, No. 2, 1980, pp 79~95.

(접수일자 1999. 9. 13)