

액성한계에 따른 재성형 점토의 압밀특성에 관한 연구

A Study on Consolidation Characteristics of Remolded Clay due to the Liquid Limit

임형민[†]
Hyeongmin Lim

Received: February 27th, 2014; Revised: March 31st, 2014; Accepted: April 22nd, 2014

ABSTRACT : In this study, a constant rate of strain test (CRS) and oedometer test was performed in order to study the consolidation characteristics to the liquid limit using a re-shaped clay which was preconsolidated at a constant pressure. Consolidation samples were made of kaolinite which was mixed with bentonite of 6 %, 9 %, 12 % and 15 % of it by weight and the test value of liquid limit of samples were appeared in 77 %, 84 %, 88 % and 91 % respectively. And then consolidation samples which were agitated sufficiently adding distilled water 2 times of liquid limit were preconsolidated in the condition of a constant pressure of 0.2 MPa. The oedometer test which is commonly used recently and the consolidation test of constant rate of strain which were applied in 0.001 %/min, 0.004 %/min, 0.01 %/min rate of strain according to ASTM, D4186-82 were performed and the preconsolidation pressures were compared and analyzed at 0.2 MPa preconsolidated pressure. As a result, in the case of low value of liquid limit, preconsolidation pressure was appeared same as 0.2 MPa preconsolidated pressure at the high speed strain rate, and in the case of high value of liquid limit, preconsolidation pressure was appeared same as 0.2 MPa preconsolidated pressure at the low speed strain rate.

Keywords : Oedometer test, Constant Rate of Strain test, Remolded clay, Strain rate, Liquid limit

요 지 : 본 연구에서는 점토의 액성한계에 따른 압밀특성을 연구하기 위하여 일정한 압력으로 예압밀 된 재성형 점토를 이용하여 표준압밀시험과 일정변형률 압밀시험을 수행하였다. 압밀시료들은 카올리나이트에 중량대비 6 %, 9 %, 12 %, 15 %의 벤토나이트를 혼합하여 제작하였으며, 시료들의 액성한계시험을 수행한 결과 각각 77 %, 84 %, 88 %, 91 %의 값을 얻을 수 있었다. 또한 액성한계의 약 2배의 증류수를 첨가 후 충분히 교반하여 0.2 MPa의 일정한 압력조건하에 예압밀시켜 제작하였다. 최근 일반적으로 사용되고 있는 표준압밀시험과 ASTM, D4186-82에 따라 변형률 속도를 0.001 %/min, 0.004 %/min, 0.01 %/min을 적용하여 일정변형률 압밀시험을 수행하고 선형압밀하중을 0.2 MPa의 예압밀압력에 대해서 비교·분석하였다. 그 결과 액성한계가 낮을수록 빠른 변형률 속도에서 선형압밀하중이 예압밀압력과 유사하게 나타났으며, 액성한계가 높을수록 느린 변형률 속도에서 선형압밀하중이 예압밀압력과 유사하게 나타났다.

주요어 : 표준압밀시험, 일정변형률 시험, 재성형 점토, 변형률 속도, 액성한계

1. 서 론

최근 우리나라는 국토를 효율적 활용과 균형개발을 위하여 해안을 매립한 공항이나 산업단지, 주거단지 등을 조성하고 있다. 매립 초기에는 주로 쇄석이나 호박돌을 포함한 토사를 그대로 이용하였지만, 매립기술과 장비가 발달한 현대에 있어서 비용과 시간을 절약하고자 준설점토를 그대로 활용하기도 하고 있다. 이와 같은 준설매립지반은 대부분이 연약한 상태의 지반으로서 안정처리 없이 구조물이 축조되거나 성토가 진행된다면 과대한 압밀 침하와 전단파괴로 인한 문제가 발생할 가능성이 높다.

연약지반은 공학적인 측면에서 고풍수비, 저응력 그리고 큰 변형률 등의 특성을 가지고 있다. 그중에서 연약지반의 압밀특성, 즉 압밀침하량과 침하속도를 정확하게 파악함으로써 보다 경제적이고 효율적인 공사방법 및 개량공법을 선택하는 것은 대단히 중요하다.

이러한 연약점토지반 압밀특성의 해석은 주로 Terzaghi의 1차원 압밀이론에 근거한 표준압밀시험(Oedometer test)이 이용되고 있으며, 단계하중 재하에 따른 간극비의 변화를 구하여 압밀곡선과 각 하중 단계의 압밀정수를 구하는 방법이다. 그러나 단계별 측정방법으로 인해 시험수행기간이 약 2주 정도 소요되며, 압밀곡선을 도해적으로 해석하는

[†] Department of Construction and Disaster Prevention Engineering, Kyungpook National University (Corresponding Author : hmlim@knu.ac.kr)

과정에서 개인에 따른 편차를 보여 선행압밀하중과 압밀계수의 산정에 따른 문제점이 제기되고 있다(Oh et al., 2013).

이러한 표준압밀시험의 단점을 개선하기 위해 오랫동안 표준압밀시험을 개선하고 대신할 여러 가지 압밀시험법이 발전되어 왔다. 그 대표적인 시험으로는 일정변형률 압밀시험(Smith & Wahls, 1969)이다. 또한 여러 학자들의 연구로 인해 동수구배 압밀시험(Lowe et al., 1969), 일정하중률 압밀시험(Aboshi et al., 1970)과 배수조건 및 시료의 물리적 특성에 따라 함수로 표현되는 무차원 계수를 이용하여 압밀정수를 결정(Janbu et al., 1981) 등의 연구가 되었다. 이 시험방법들은 주로 시험시간을 줄이고 압밀정수를 구하는데 여러 가지 유리한 점을 제공해주고 있다.

특히 일정변형률 압밀시험은 연속적으로 하중을 재하 한다는 점에서 표준압밀시험 보다 현장조건에 더 부합하고, 신속하게 압밀특성을 구할 수 있다는 장점 때문에 외국에서는 널리 사용되고 있으며 표준시험법으로 인정되었다. 반면에 우리나라의 경우 연구가 미약할 뿐만 아니라, 시험 기준도 없는 실정이다(Na, 2000). 또한 일정변형률 압밀시험은 시료를 일정한 변형률 속도로 하중을 재하 조건의 연직변위 제어식 압밀시험법으로 연직변형에 따른 간극수압을 측정하고 연직유효응력과 변형률을 측정함으로써 압밀정수를 산정하는 시험방법(Oh, 2002)이라고 소개하였다.

본 연구에서는 ASTM에서 제안한 액성한계에 따른 변형률 속도의 적용성에 대하여 시험을 수행하고 분석하였으며, 높은 액성한계에서 CRS 압밀시험을 수행 시 시험기간이 장기화되는 단점을 보완하기 위해 제안된 변형률 속도보다 빠른 변형률 속도의 적용 시 압밀정수에 대하여 비교·분석하였다. 압밀시료는 점성토 성분인 카올리나이트와 벤토나이트를 혼합하여 액성한계 77 %, 84 %, 88 %, 91 %에 대한 재성형점토를 이용하여 표준압밀시험을 수행하고 액성한계에 따른 ASTM 추천 변형률 속도인 0.001 %/min, 0.004 %/min, 0.01 %/min을 적용한 일정변형률 압밀시험(Constant Rate of Strain)을 수행하여 액성한계와 변형률 속도에 따른 선행압밀하중과 압밀특성을 비교·분석하였다.

2. 연구방법

2.1 일정변형률 압밀시험 해석이론

일정변형률 압밀시험은 Hamilton & Crawford(1959)에 의해서 최초로 소개되었고, Smith & Wahls(1969)와 Wissa et al.(1971)에 의하여 연직배수조건에 대한 이론적인 해석과 실험방법이 제시되었으며, 이후 Gorman et al.(1978)에

의한 실험 후부터 많은 학자들의 연구결과가 나타나기 시작하였다.

Wissa et al.(1971)은 Janbu의 압밀이론을 이용하여 결과값을 유도하였다. 또한 배압을 주어서 시료를 포화시킬 수 있는 일정변형률 압밀시험용 시험기를 개발하고 일정변형률 압밀이론을 적용하여 검증하였으며, 일정변형률 시험에서 주목할 사항은 흙에서 전이 상태가 발생하고 압밀시료가 정상상태가 되기 전에 간극수압이 소산된다는 것이다. 또한 압밀 시 압밀계수는 임의시간에서 임의 깊이에 대하여 일정하고, 미소변형으로 존재한다고 가정하였다.

일정변형률 시험에는 공시체의 상단면(배수면)의 변위 속도 r 이 일정해지도록 강제적으로 압축하기 때문에 시험조건은, Eq. (1)과 같다.

$$\frac{\partial w(0,t)}{\partial t} = r = Constant \quad (1)$$

여기서 $w(0,t)$ 는 배수면 z 방향 변위이며, 변형 $\varepsilon(z,t)$ 를 사용하면, Eq. (2)와 같다.

$$w(0,t) = \int_0^{H_0} \varepsilon(z,t) dz \quad (2)$$

여기서 H_0 는 공시체의 초기 높이이다. 또한 여기서 미소 변형을 생각하고 있으므로 압밀 중의 층 두께 변화는 생각하지 않는다. 한편 평균 변형속도는 $\bar{\varepsilon}(t)$ 를 평균 변형으로, Eq. (3)으로 나타낸다.

$$\frac{d\bar{\varepsilon}(t)}{dt} = \frac{1}{H_0} \int_0^{H_0} \frac{\partial \varepsilon(z,t)}{\partial t} dz \quad (3)$$

이에 일정변형률 압밀시험의 시험 조건은 Eq. (4)와 같이 표기할 수 있다.

$$\frac{d\bar{\varepsilon}(t)}{dt} = \frac{r}{H_0} = Constant \quad (4)$$

2.2 압밀시료 조성 방법

본 연구에 사용된 압밀시료는 정제된 카올리나이트와 벤토나이트를 이용하였으며, 카올리나이트의 중량 대비 벤토나이트를 6 %, 9 %, 12 %, 15 %의 일정비율로 혼합한 점토시료의 액성한계 시험결과 77 %, 84 %, 88 %, 91 %로 나타났다. 압밀시료의 제작을 위해 액성한계 시를 기준으

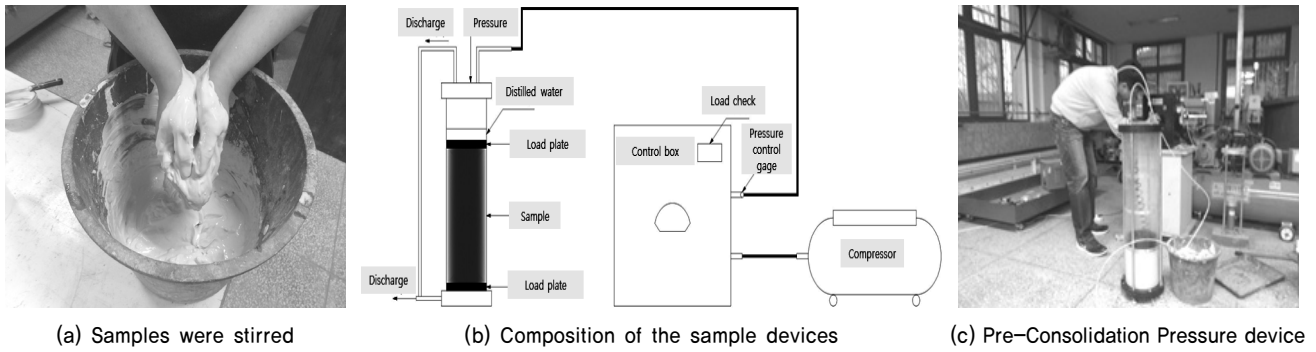


Fig. 1. Samples were stirred and pre-consolidation pressure test device

Table 1. The basic properties of kaolinite and bentonite

	Specific gravity	Liquid limit (%)	Plastic limit (%)	Plasticity index (%)	USCS
Kaolinite	2.6	58	31	27	CH
Bentonite	2.2	197.9	33.3	164.6	CH

로 충분한 교반과 불순물 유입의 방지를 위해 2배가량 증류수를 첨가하여 슬러리 상태로 제작하였다. 충분히 교반된 압밀시료는 Fig. 1(b)와 같은 예압밀 시험 장치를 이용하여 압밀시료에 선형압밀하중의 변화 폭을 최소화할 수 있도록 약 7일간 0.2 MPa의 일정한 예압밀압력을 고르게 적용하였다.

예압밀시험장치는 대형 셀과 컨트롤 박스, 압축기로 구성되어 있으며, 대형 셀은 최대 1 m의 시료를 조성이 가능하도록 제작되었다. 예압밀 시 양면배수를 적용하였으며, 컨트롤 박스 전면에 표시된 압력계를 이용하였으며 압축기의 일정하게 공기를 공급하여 예압밀압력을 유지하였다.

압밀시료의 제작과 예압밀 수행과정은 Fig. 1과 같다.

2.3 압밀시료의 물리적 특성

본 연구에서는 표준압밀시험과 일정변형률 압밀시험의 수행에 사용된 점토시료는 카올리나이트와 벤토나이트이다. 카올리나이트와 벤토나이트에 대하여 비중시험, 입도분석시험, 액·소성한계 시험을 수행하여 물리적 특성을 분석하였다. 입도분석시험결과 #200체를 100 % 통과하여 비중계 분석에 의해 입도분석을 실시하였으며, 물리적 특성은 Table 1과 같다.

2.4 압밀시험 조건

재성형점도를 이용하여 표준압밀시험과 일정변형률 압밀시험을 수행하였으며, 압밀곡선에서 선형압밀하중, 압밀계수, 과잉간극수압을 산정하여 압밀특성을 비교·분석하였다.

Table 2. Conditions of strain rate due to the liquid limit

Liquid Limits (%)	Strain rate (%/min)	
	ASTM	Test
0 ~ 40	0.04	0.001 ~ 0.01
40 ~ 60	0.01	
60 ~ 80	0.004	
80 ~ 100	0.001	
100 ~ 120	0.0004	
120 ~ 140	0.0001	

표준압밀시험은 KS F 2316에 의거한 흙의 압밀시험을 수행하였으며, 일정변형률 압밀시험은 연구수행에 있어 변형률 속도의 적용은 가장 중요한 조건이다. 변형률 속도의 적용에 따라 산정되는 압밀정수의 값이 상이하기에 압밀시료의 특성에 적절한 변형률 속도를 적용해야 된다.

본 연구에서는 Table 2와 같이 액성한계의 결과값에 따른 ASTM, D4186-82에 의거하여 변형률 속도를 적용하였으며, 각각의 압밀시료에 대하여 표준압밀시험을 수행하고 일정변형률 압밀시험에서 변형률 속도를 0.001 %/min, 0.004 %/min, 0.01 %/min을 적용하여 압밀정수에 미치는 영향을 분석하였다.

본 연구에서 수행된 압밀시험의 조건은 Table 3과 같다.

3. 실험결과

3.1 선형압밀하중

선형압밀하중은 압밀시험 결과로부터 e-log p 곡선에 근거한 casagrand의 방법으로 산정하였으며, 0.2 MPa의 동일

Table 3. Performed consolidation test condition

	Test series 1	Test series 2	Test series 3	Test series 4
Bentonite mixing ratio (%)	6	9	12	15
Liquid limits (%)	77	84	88	91
Pre-consolidation pressure (MPa)	0.2			
Oedometer test	KS F 2316 (STD)			
Strain rate (%/min)	0.001	0.001	0.001	0.001
	0.004	0.004	0.004	0.004
	0.01	0.01	0.01	0.01

Table 4. Pre-consolidation load in a accordance with the strain rate

Liquid limit	Strain rate	Pre-consolidation pressure (MPa)			
		Oedometer test	Constant rate of strain test		
			0.001 %/min	0.004 %/min	0.01 %/min
77 %		0.14	0.17	0.17	0.2
84 %		0.13	0.17	0.17	0.2
88 %		0.15	0.18	0.18	0.18
91 %		0.15	0.16	0.17	0.18

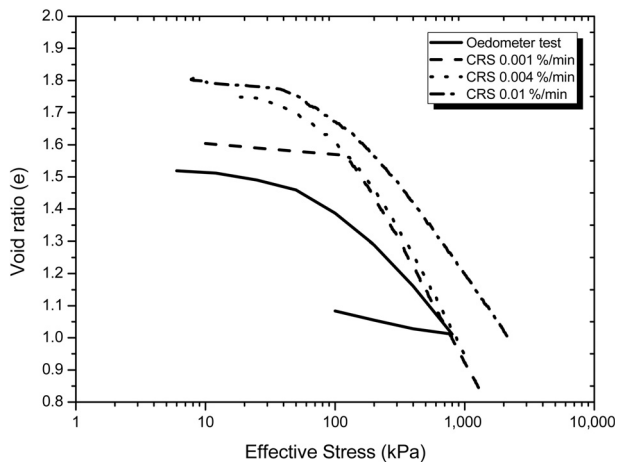


Fig. 2. Comparison of the void ratio and effective stress by the liquid limit 77 %

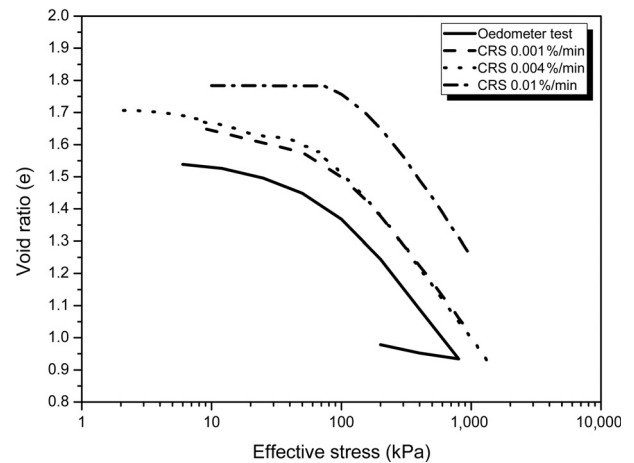


Fig. 3. Comparison of the void ratio and effective stress by the liquid limit 84 %

한 예압밀압력이 적용된 압밀시료의 선형압밀하중을 분석하기 위해 표준압밀시험과 일정변형률 압밀시험을 수행한 결과 Table 4와 같이 분석되었다.

Fig. 2~5는 동일한 예압밀압력에 대하여 압밀시료의 액성한계 77 %, 84 %, 88 %, 91 %의 표준압밀시험과 일정변형률 압밀시험의 압밀곡선을 나타내고 있다.

그림에서 나타나듯이 CRS 압밀시험은 표준압밀시험보다 변형률이 작게 나타나 결과적으로 선형압밀하중이 크게 산정되는 것으로 나타났다. 또한 각 액성한계에 따른 재성형 점토 시료를 이용하여 변형률 속도를 달리한 CRS 압밀 시험 결과 변형률 속도가 증가할수록 선형압밀하중이 조금씩 증가하는 경향을 보이지만 증가범위가 크지 않아 변형률 속도에 대한 영향은 미미한 것으로 판단된다.

Fig. 2의 압밀곡선과 같이 변형률 속도에 관계없이 모든 범위에서 유사한 결과를 나타내고 있으며, 선형압밀하중은 변형률 속도 0.01 %/min에서는 선형압밀하중이 0.2 MPa로 산정되어 예압밀압력과 유사하게 나타났다.

Fig. 3의 압밀곡선에서는 변형률 속도가 증가할수록 우측으로 이동하는 것을 알 수 있으며, 변형률 속도 0.001 %/min과 0.004 %/min에서 유사한 경향을 나타내고 있으며 0.2 MPa의 예압밀압력에 변형률 속도 0.01 %/min에서 선형압밀하중이 0.2 MPa로 산정되어 예압밀압력과 유사한 결과가 나타났다.

Fig. 4의 압밀곡선에서는 변형률 속도 0.004 %/min과 0.01 %/min에서 유사한 경향이 나타났으나, 0.2 MPa의 예압밀압력에 대하여 세 가지의 변형률 속도는 비슷한 경향을 나타

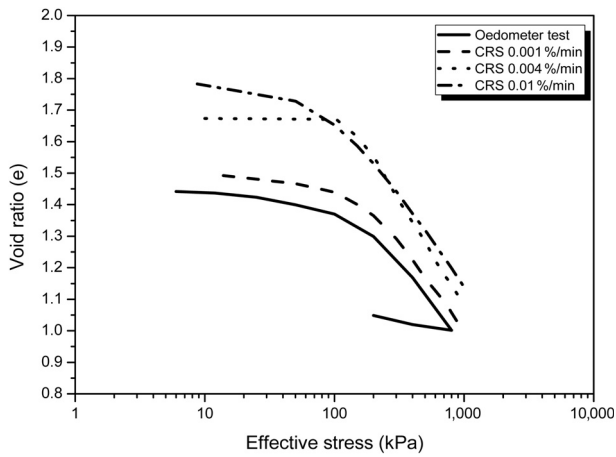


Fig. 4. Comparison of the void ratio and effective stress by the liquid limit 88 %

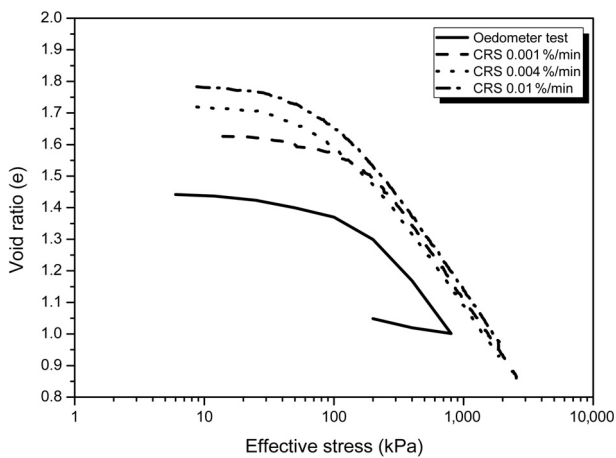


Fig. 5. Comparison of the void ratio and effective stress by the liquid limit 91 %

내고 있다.

Fig. 5의 압밀곡선에서는 초기 간극비에서 값이 차이가 나타나지만 2차 압밀 종료 구간은 변형률 속도에 관계없이 유사한 경향을 보이며, 0.2 MPa에 대한 예압밀압력 또한 비슷한 경향이 나타나는 것으로 보여진다.

Fig. 6은 변형률 속도에 따른 선행압밀하중을 나타내고 있으며, 그림에서의 표준압밀시험(Oedometer test)의 선행압밀하중의 결과는 표로 나타내었다. Fig. 7은 액성한계에 따른 선행압밀하중의 관계를 보여주고 있다.

위와 같은 결과로부터 액성한계 77 %와 84 %에서 변형률 속도 0.01 %/min을 적용하였을 경우 0.2 MPa의 예압밀압력과 유사한 결과가 나타났으며, 88 %와 91 %의 액성한계에서는 낮은 변형률 속도인 0.004 %/min에서 유사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.

3.2 압밀계수

압밀계수는 압밀해석에 있어 압밀속도를 지배하는 토질

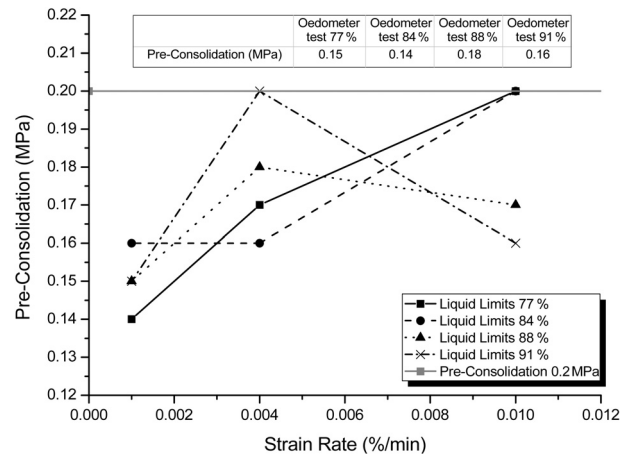


Fig. 6. Pre-consolidation pressure by the strain rate

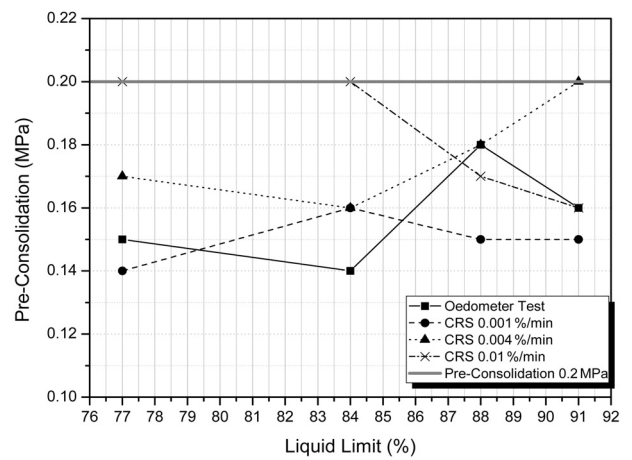


Fig. 7. Pre-consolidation pressure by the Liquid limit

정수이며, 압밀침하속도를 나타내는 계수로서 압밀계수가 크게 나타나면 압밀침하가 빨리 일어나는 것을 알 수 있다.

표준압밀시험에서 연직압밀계수를 구하기 위하여 \sqrt{t} 법을 사용하였으며, 일정변형률 압밀시험에서는 시료저면에서의 간극수압, 연직응력, 평균시료 높이, 시간 등을 고려하여 압밀계수를 산정하였다.

Fig. 8~11은 동일한 예압밀압력에 따라 압밀시료의 액성한계 77 %, 84 %, 88 %, 91 %의 표준압밀시험과 일정변형률 압밀시험의 압밀계수를 나타내고 있다. 그림에 나타나듯이 액성한계와 관계없이 유효응력이 증가할수록 압밀계수는 일정하게 감소하는 경향이 나타났다.

일정변형률 압밀시험을 수행한 압밀계수는 표준압밀시험보다 상대적으로 크게 산정되었으며, 변형률 속도가 증가할수록 압밀계수가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 하중증가에 따라 과잉간극수압이 급격하게 발생하게 되어 과잉간극수압의 소산이 빠르게 이루어져 압밀속도가 증가하는 것으로 판단된다.

압밀계수를 분석한 결과 모든 점토시료에서 CRS 압밀시

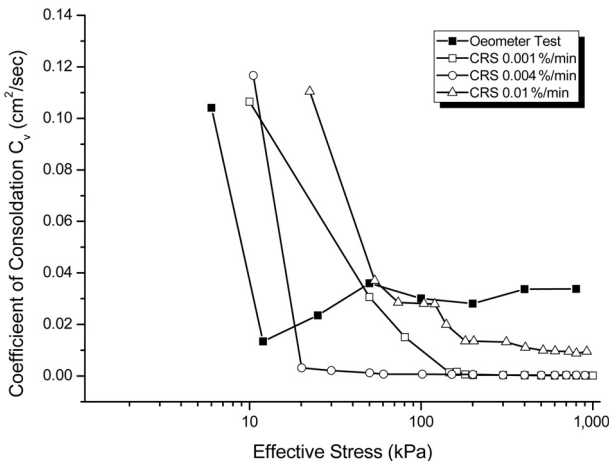


Fig. 8. Comparison of the effective stress and coefficient of consolidation by the liquid limit 77 %

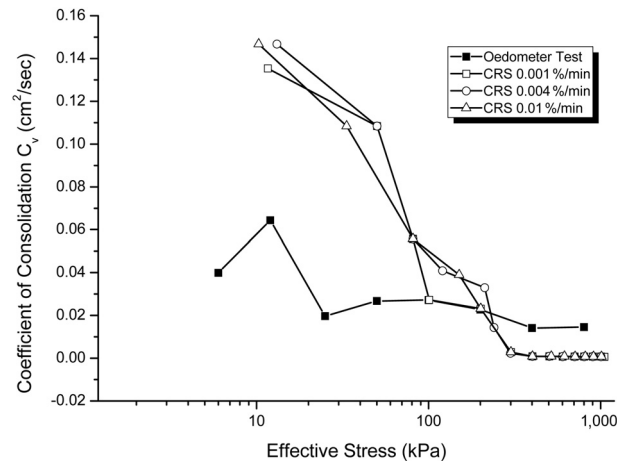


Fig. 10. Comparison of the effective stress and coefficient of consolidation by the liquid limit 88 %

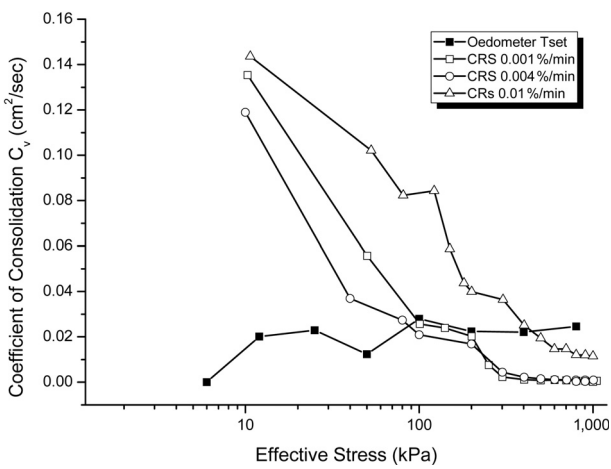


Fig. 9. Comparison of the effective stress and coefficient of consolidation by the liquid limit 84 %

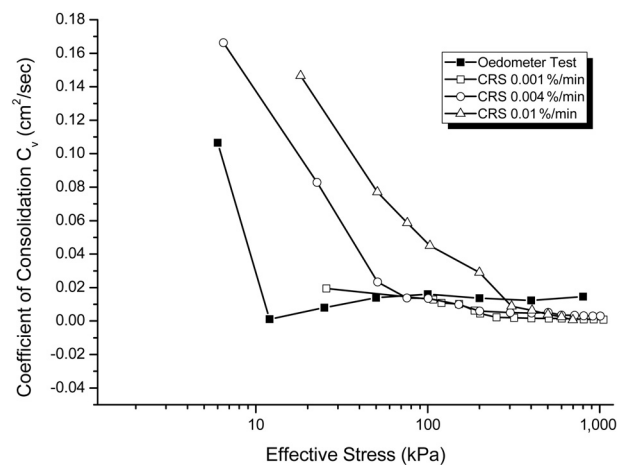


Fig. 11. Comparison of the effective stress and coefficient of consolidation by the liquid limit 91 %

험 시 초기 하중에 대하여 변형률 속도에 관계없이 높게 측정되었다. 이는 초기 하중재하 구간에서 소산되는 경향은 시료 성형 시 시료의 교란, 시료의 불 균질성, 재하장치와 시료의 불완전한 접촉, 압밀기계의 오차, 미소변위 발생 등이 원인인 것으로 판단된다. 또한 정규압밀구간에서는 CRS 압밀시험의 경우 유효응력의 증가에 따라 일정하게 수렴하는 것을 알 수 있다.

위의 분석결과를 토대로 CRS 압밀시험에서의 압밀계수에 대한 평가는 대부분의 압밀계수에 대하여 완속 변형률 속도인 0.001 %/min과 4배의 변형률 속도인 0.004 %/min에서 초기하중 구간을 제외한 정규압밀구간에 대하여 일정한 값을 수렴하여, 완속의 변형률 속도와 중속의 변형률 속도는 압밀계수에 대한 영향은 크지 않은 것으로 판단된다.

3.3 과잉간극수압

CRS 압밀시험에서는 일정한 변형률 속도로 압밀이 이루

어지면서 변형률 속도에 따른 하중의 증가가 간극에서 발생하는 간극수압의 소산 속도보다 빠르기 때문에 작용 된 하중에 인하여, 초과간극수압 중 일부는 소산되며 나머지는 그대로 남아있게 된다.

Fig. 12~15는 동일한 예압밀압력에 대하여 일정변형률 압밀시험을 수행하여 압밀시료의 액성한계 77 %, 84 %, 88 %, 91 %의 일정변형률 압밀시험의 과잉간극수압을 나타내고 있다. 압밀시료 하단부에서 발생하는 간극수압이 유효응력 증가에 따른 변형률 속도와 액성한계가 과잉간극수압에 미치는 영향을 분석하였다.

Fig. 12는 액성한계 77 %의 점토시료에서 세 가지의 변형률 속도를 적용한 과잉간극수압을 나타낸 것이다. 압밀하중 초기 재하 시 간극수압의 변화는 미미한 것으로 나타나며 어느 한점을 기준으로 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 액성한계 84 %, 88 %, 91 %에 대해서도 나타나고 있다.

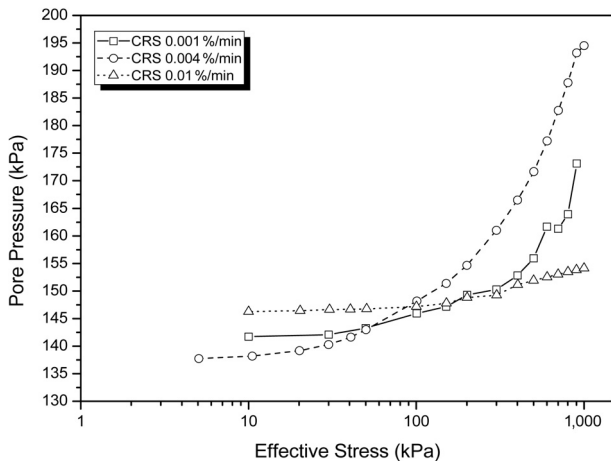


Fig. 12. Comparison of the effective stress and pore pressure by the liquid limit 77 %

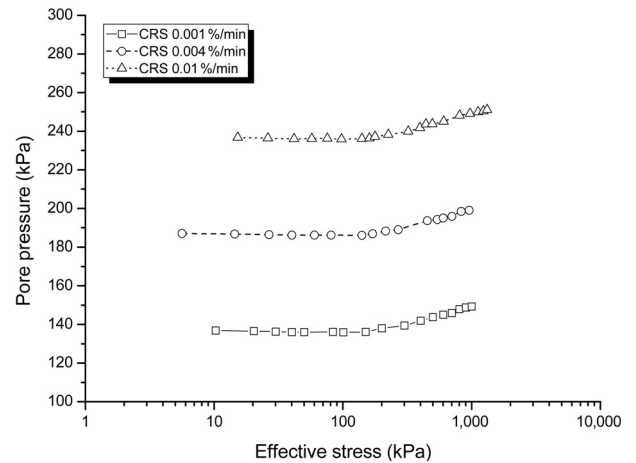


Fig. 14. Comparison of the effective stress and pore pressure by the liquid limit 88 %

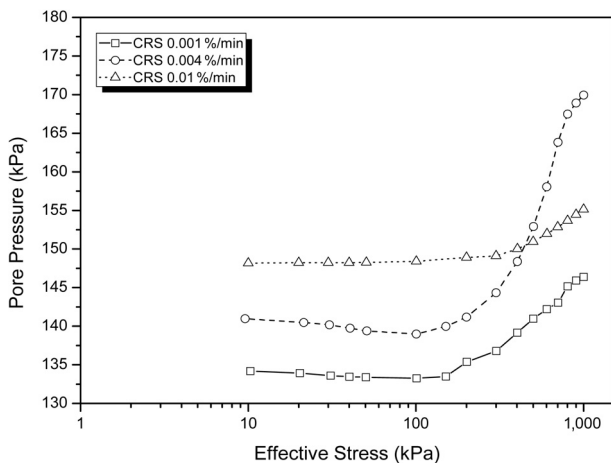


Fig. 13. Comparison of the effective stress and pore pressure by the liquid limit 84 %

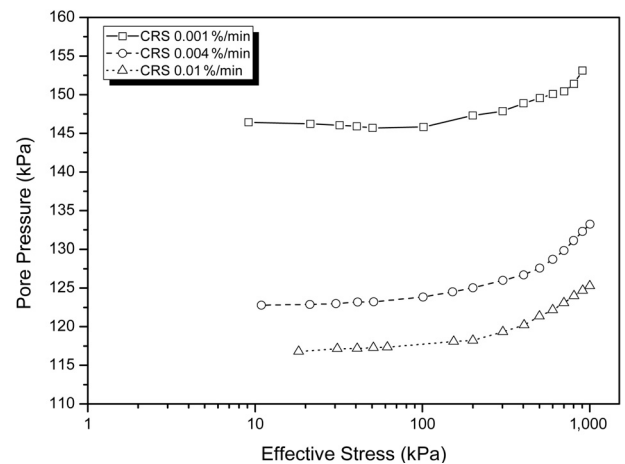


Fig. 15. Comparison of the effective stress and pore pressure by the liquid limit 91 %

그림에서 나타난 결과로부터 과잉간극수압 분포가 전반적으로 유효응력의 증가에 따라 선행압밀하중 부근에서 증가하는 것을 알 수 있는데 이는 초기하중에 대한 압밀시료의 성형과 압밀장치와의 불완전한 접촉 등으로 과잉간극수압이 발생하지 않으며, 선행압밀하중 근처에서 급변하는 것은 압밀시료에 작용하는 하중이 선행압밀하중을 초과하면서 흙의 입자구조의 변형에 인한 것으로 판단된다.

4. 결 론

재성형점토를 이용하여 액성한계와 변형률 속도에 따른 압밀특성을 분석하기 위하여 표준압밀시험과 일정변형률 압밀시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) e-log p 곡선에서 산정된 선행압밀하중은 표준압밀시험에 비해 CRS 압밀시험에서 약 1.3~1.8배가량 높게 산정되었으며, CRS 압밀시험 시 2차 압밀곡선은 완속재하속도 0.001 %/min과 4배의 속도인 0.004 %/min에서 유사한 경향이 나타났다.
- (2) 압밀계수는 완속의 변형률 속도 0.001 %/min과 4배의 변형률 속도인 0.004 %/min은 영향이 미미한 것으로 판단되며, 초기하중 구간을 제외한 정규압밀구간에 대하여 일정한 값을 수렴하는 것으로 판단된다.
- (3) 과잉간극수압은 압밀 초기하중에 대하여 압밀시료 성형과 압밀장치와의 불완전한 접촉 등으로 과잉간극수압의 발생은 미미하며, 유효응력의 증가에 따라 선행압밀하중 구간 근처에서 급변하는 것을 알 수 있다. 이는 압밀시료에 작용하는 하중이 선행압밀하중을 초과하면서 흙의 입자 구조의 변형에 인한 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2012학년도 경북대학교 학술연구비에 의하여 연구되었습니다.

References

1. Aboshi, H., Yosikumi, H. and Maruyama, S. (1970), Constant loading rate consolidation test, *Soil and Foundations*, Vol. 10, No. 1, pp. 43~56.
2. Gorman, C. T., Hopkins, T. C., Deen, R. C. and Drnevich, V. P. (1978) Constant rate of strain and controlled gradient consolidation testing, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 1, No. 1, pp. 3~15.
3. Hamilton, J. and Crawford, C. B. (1959), Improved determination of preconsolidation pressure of a sensitive clay, *STP 254, ASTM*, pp. 254~271.
4. Janbu, N., Tokheim, O. and Senneset, K. (1981), Automatic continuous consolidation testing in sweden, *Consolidation of Soils*, STP 892, ASTM Philadelphia, pp. 215~229.
5. Lowe, J., Jonas, E. and Obrican, V. (1969), Controlled gradient consolidation test, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol. 95, No. SM1, Proc paper 6327 pp. 77~97.
6. Na, G. Y. (2000), A study on the consolidation test with constant rate of strain, Master's thesis, Sunchon National University, pp. 1~14 (in Korean).
7. Oh, I. Z. (2002), A study on consolidation characteristics of recomposed clay by crsc and standard consolidation tests, Master's thesis, Chonnam National University, pp. 25~41 (in Korean).
8. Oh, S. W., Bang, S. T., Yoon, D. K. and Kim, H. S. (2013), A comparative study on the characteristics of the standard consolidation test and crs tests with remolded clay, *Korean Geo-Environmental Society Conference*, pp. 255~258 (in Korean).
9. Smith, R. E. and Wahls, H. E. (1969), consolidation under constant rate of strain, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol. 95, No. SM2, pp. 519~539.
10. Wissa, A., Christian, J., E. and Heibeger, S. (1971), Analysis of consolidation at constant rate of strain, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol. 97, No. SM10, pp. 1393~1413.