CRS 압밀시험에 의한 점성토의 팽창특성에 관한 연구
The Swelling Characteristics of Clayey Soil by CRS Consolidation Test

이응준[1], Yeng-Jun Lee, 한상재[2], Sang-Jae Han, 김지용[3], Ji-Yong Kim, 김수삼[4], Soo-Sam Kim

[1] 중앙대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, Master Course, Dept. of Civil Eng., Chung-Ang Univ.
[2] 중앙대학교 생산공학연구소 전임연구원, Senior Researcher, The Research Institute of Production Engineering, Chung-Ang Univ.
[3] 중앙대학교 공과대학 토목공학과 박사수료, Ph.D Candidate, Dept. of Civil Eng., Chung-Ang Univ.
[4] 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng., Chung-Ang Univ.

SYNOPSIS : In this study, the swelling characteristics of reconstituted clayey soil were investigated by STD and CRS test. The strain rate during loading was constant i.e. 0.05 %/min, 0.03 %/min and during unloading was varied in proportion to 1/1, 1/5, 1/10 and 1/15 of strain rate during loading. From this study the following conclusions were obtained; (1) There were similar values, especially, during unloading in case of 1/10 or 1/15 of strain rate during loading and the test results between STD and CRS were much to be alike. (2) The cross point of effective stress versus excess pore water pressure ratio curve, was increased during unloading, while the stress level of the cross point was decreased. The stress level can be separated into two zones according to the swelling index named Cs1 and Cs2. From the test results, the values of Cs1 were approximately constant irrespective of strain rate during unloading, but the values of Cs2 were much influenced by strain rate. (3) In CRS consolidation tests, it was found that unloading strain rate did not affect on the existence of zone.

Key Words : swelling index, constant rate of strain, clayey soil, consolidation

1. 서론

기초지반의 구속압력이 감소하거나 함수비가 증가하여 팽창하는 경우 기초융기의 문제가 발생할 가능성이 높아진다. 점성토의 습윤과정에 있어서의 체적팽창을 흡수팽창이라고 하는데, 이러한 흡수팽창에 의한 것 이외에 응력해방에 의한 토립자 골격의 탄성적 팽창에 의한 경우도 발생한다.

본 연구에서는 점성토의 팽창특성을 규명함에 있어서 일정변형속도 압밀시험과 표준압밀시험을 수행하여 제하단계에서의 점성토의 팽창지수 산정과 변형속도에 따른 시료 거동특성을 검토하고자 한다.

2. 일정변형속도 압밀이론

Wissa et al.(1971)은 미소변형률이론을 바탕으로 정상상태와 전이상태의 거동을 포함하는 이론적 해를 얻고자 하였으며 흙의 거동을 선형 및 비선형으로 구분하여 표현하였다. 이에 대해 미소변형이 존재하고 압밀계수 C_v는 임의의 시간에 대해 시료의 깊이에 따라 일정하며 또한 변형과 흐름은 연직방향으로만 발생하고, 유체와 토립자는 비압축성이며, 시료는 완전히 포화되어 있다고 가정하였다.

압밀지배방정식은 식(1)과 같다.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} \tag{1}$$

여기서, $C_v = k/\gamma_w m_v$ z = 임의의 위치 m_v = 체적압축계수

k = 투수계수 γ_w = 물의 단위중량 t = 압밀경과시간 ε = 연직변형률

식(2)에서 각각 좌표, 시간, 변형률에 관한 무차원 변수를 제시하였다.

$$X = \frac{z}{H}(\text{좌표}), \quad T_v = C_v \frac{t}{H^2}(\text{시간}), \quad V = \frac{v}{H}(\text{변형률}) \tag{2}$$

식(2)의 세 가지 무차원변수를 식(1)에 적용하면 식(3)과 같은 기본방정식으로 변환된다.

경계조건과 초기조건은 각각 식(4)와 같다.

$$\frac{\partial^3 V}{\partial X^3} = \frac{\partial^2 V}{\partial X \partial T_v} \tag{3}$$

$$V(1, T_v) = V(X,0) = \frac{\partial^2 V(1, T_v)}{\partial X^2}, \quad T(0, T_v) = T_v\left(\frac{rH^2}{C_v}\right) \tag{4}$$

경계조건과 초기조건을 고려한 변형률을 무차원변수의 함수로 나타내면 식(5)와 같이 된다.

$$\varepsilon(X, T_v) = rt[1 + F(X, T_v)] \tag{5}$$

여기서, $$F(X, T_v) = \frac{1}{6T_v}(2 - 6X + 3X^2) - \frac{2}{\pi^2 T_v} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos nx}{n^2} \exp(-n^2 \pi^2 T_v) \tag{6}$$

식(5)는 전이상태와 정상상태로 분리되며 응력-변형률의 가정조건을 통해 선형 및 비선형으로 구분하여 압밀정수를 산정하게 된다. 먼저 정상상태에서 시료의 거동을 체적변화계수(m_v)가 일정하다고 가정할 경우, 선형조건의 압밀정수는 식(7)을 이용하여 산정하게 된다. 또한 정상상태에서 시료의 거동을 압축지수(C_c)가 일정하다고 가정할 경우, 비선형조건의 압밀정수는 식(8)을 이용하여 산정하게 된다.

$$\overline{\sigma_{v_{avg}}} = \sigma_v - \frac{2}{3} u_b \qquad C_v = \frac{H^2}{2u_b}\left(\frac{\Delta \sigma_v}{\Delta t}\right) \tag{7}$$

$$m_v = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \sigma_v} = r\left(\frac{\Delta t}{\Delta \sigma_v}\right) \qquad k = \frac{1}{2} \frac{rH^2 \gamma_w}{u_b}$$

$$\overline{\sigma_{v_{avg}}} = (\sigma_v^3 - 2\sigma_v^2 u_b + \sigma_v u_b^2)^{\frac{1}{3}} \qquad C_v = -\frac{H^2 \log\left(\frac{\sigma_{v2}}{\sigma_{v1}}\right)}{2\Delta t \log\left(1 - \frac{u_b}{\sigma_v}\right)} \tag{8}$$

$$m_v = \frac{0.434 C_\varepsilon}{\overline{\sigma_v}} \qquad k = C_v \, m_v \, \gamma_w$$

3. 실험

3.1 시료의 기본물성 및 준비

본 시험에서 사용된 시료는 남해안에서 채취한 해성점토로서 시료를 교란된 상태로 채취하여 실험실에서 습윤상태의 흙을 #140번 체로 체가름한 것을 사용하여 1.2 kg/cm^{2}을 가하여 재조성하였다.
표 1.은 본 시험에 사용된 시료의 물성치를 나타낸 것이다.

표 1. 본 연구에서 사용된 시료의 기본물성

percent passing No. 200 sieve	dry unit weight	specific gravity	liquid limit	plastic index	soil classification
94.3%	1.1 (t/m^3)	2.71	61%	36	CH

3.2 일정변형속도 압밀시험

본 연구에서는 일정변형속도 압밀시험을 위해 미국 GEOCOMP사에서 제작한 Load Trac Ⅱ를 사용하였다. 본 시험장치는 Load frame, 압밀셀, Signal Conditional unit, P/C, 가압장치, 측정장치로 구성되어 있으며, CRS 시험단계는 시료성형단계, 압밀링조립단계, 포화단계, 압밀단계, 완료단계로 구분할 수 있다. 표 2.에는 일정변형속도 압밀시험에 대한 ASTM D 4186-82의 추전 변형속도 기준을 나타낸 것이다. 또한 일정변형속도 압밀시험에서의 제하단계에 대한 변형속도는 ASTM D4186-89를 참조하였다. 표 3.에는 본 연구에서 수행한 일정변형속도 압밀시험의 종류를 나타낸 것이다.

표 2. CRS 압밀시험에 대한 변형속도

Liquid Limit Index(%)	Strain rate (%/min)
up to 40	0.04
40 - 60	0.01
60 - 80	0.004
80 - 100	0.001
100 - 120	0.0004
120 - 140	0.0001

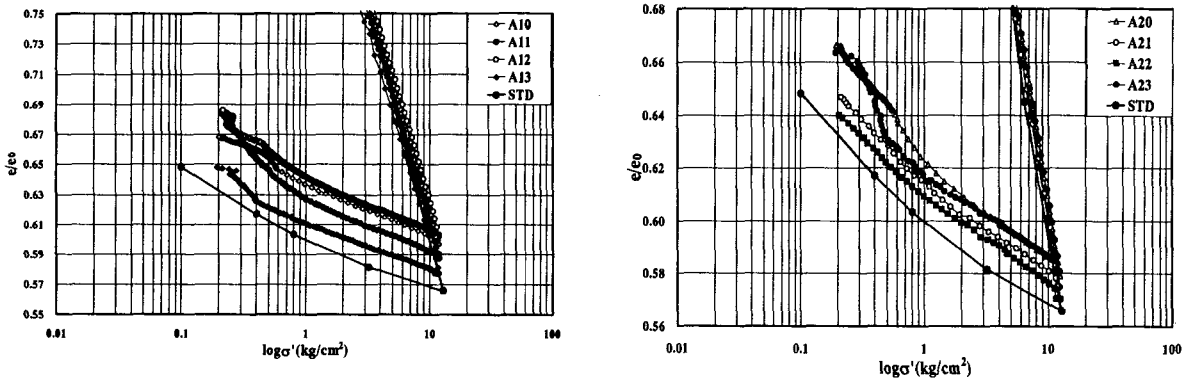
표 3. 본 연구에서의 시험항목

Series	Test No.	Loading strain rate (%/min)	Unloading strain rate (%/min)	unloading/loading strain rate
A1	A10	0.05	0.05	1/1
	A11		0.01	1/5
	A12		0.005	1/10
	A13		0.003	1/15
A2	A20	0.03	0.03	1/1
	A21		0.006	1/5
	A22		0.003	1/10
	A23		0.002	1/15
STD	Oedometer Consolidation Test			

제 4 장 실험결과 및 분석

4.1 변형속도에 따른 유효응력과 간극비의 상관관계

그림 1.에는 재하단계에서 0.05 %/min, 0.03 %/min의 변형속도를 적용하여 설정된 응력단계까지 도달한 이후 재하단계의 변형속도의 1/1, 1/5, 1/10, 1/15의 값에 해당하는 변형속도를 적용하여 제하한 결과를 표준압밀시험 결과와 함께 제시하였다. 그 결과 변형속도가 증가할수록 시료의 팽창량은 증가하고 있음을 알 수 있었다. 본문에 제시된 분석결과는 약 0.4 kg/cm^{2}의 유효응력에서 그래프가 전반적으로 일정한 경향을 나타내지 못하고 상당히 분산되어 있어, 팽창지수 산정시 0.4 kg/cm^2 이하의 값은 제외하였다.



(a) A1 계열 (b) A2 계열

그림 1. 제하속도에 따른 log σ'과 e/e$_0$의 상관관계

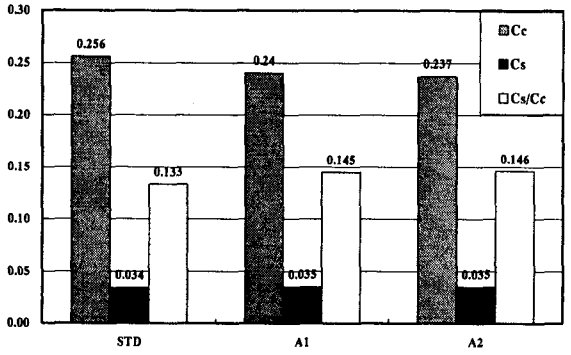


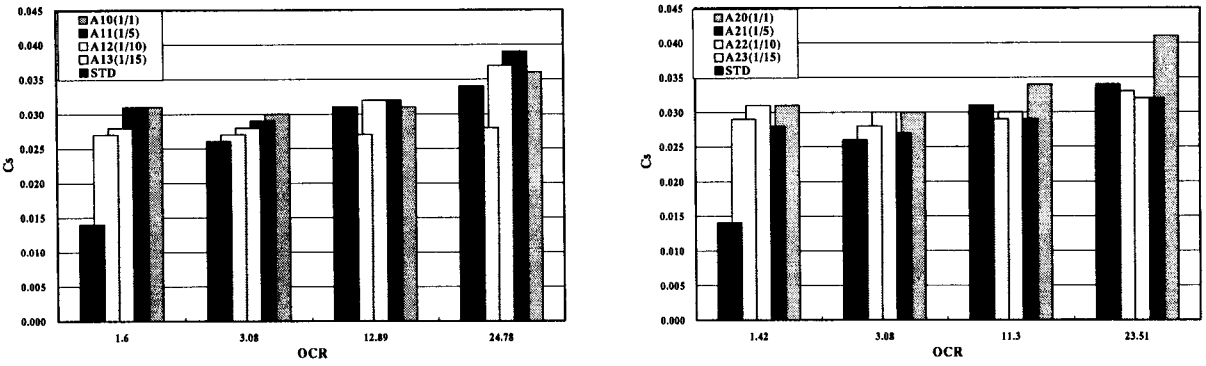
그림 2. CRS 압밀시험과 표준압밀시험을 통해 산정한 Cc, Cs, Cs/Cc의 비교

그림 2.에는 유효응력 0.4 kg/cm^{2}까지만 고려하여 팽창지수를 산정한 결과를 나타낸 것으로, C_c는 0.237~0.256, C_s는 0.034~0.035로 두 시험법을 통해 산정한 C_s와 C_s/C_c가 변형속도의 차이에도 불구하고 전체적으로 상당히 유사한 결과를 나타냄을 알 수 있었다.

그림 3.에는 A1, A2 계열에 대해 응력단계에 따른 OCR과 C_s와의 관계가 제시되어 있다. OCR이 약 1.5 정도인 초기 제하단계를 제외하고는 대체적으로 표준압밀시험결과와 일정변형속도 압밀시험결과가 OCR이 증가함에 따라 서로 근접해 가는 것을 알 수 있다. 특히 약 11~13 사이의 OCR 범위에서 C_s는 계열간에 상당히 유사한 값을 나타냄을 알 수 있다.

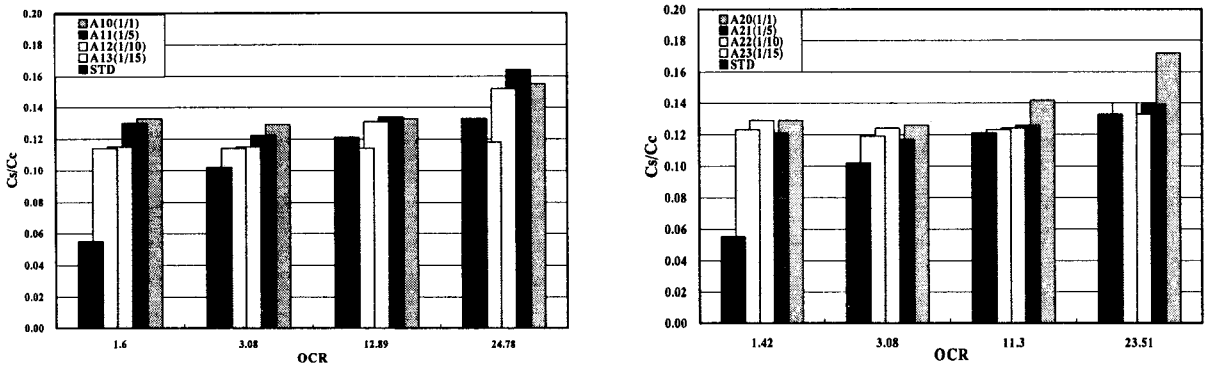
그림 4.에는 $e-\log\sigma'$ 그래프에서 C_s/C_c를 산정한 결과를 나타내고 있다. C_s/C_c값은 표준압밀시

험과 일정변형속도 압밀시험 결과로부터 OCR이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있으며, OCR이 약 11~13 정도에서는 가장 유사한 값을 나타내었다.



(a) A1 계열 (b) A2 계열

그림 3. OCR에 따른 Cs 산정결과



(a) A1 계열 (b) A2 계열

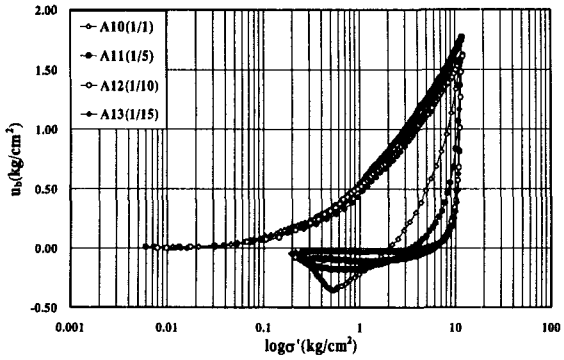
그림 4. OCR에 따른 Cs/Cc 산정결과

4.2 변형속도에 따른 유효응력과 과잉간극수압의 상관관계

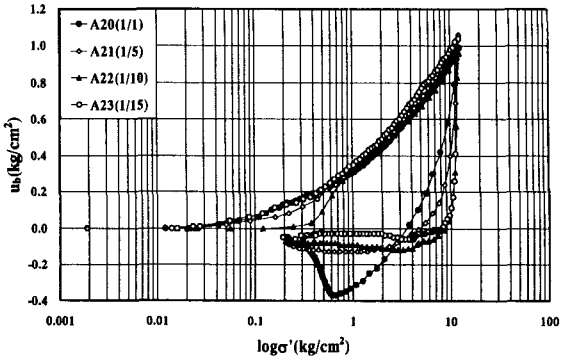
그림 5.에는 각 계열별 유효응력에 대한 과잉간극수압의 분포가 제시되어 있다. 각 계열별로 나타낸 그래프에서 약 0.2 kg/cm^2 부근에서 제하단계에서 발생된 부의 과잉간극수압이 변형속도에 상관없이 수렴하는 경향을 보이면서 거의 0으로 소산되고 있음을 알 수 있다. 이러한 그래프 경향은 시간의 경과에 따른 시료 팽창속도의 감소에 비해, 일정변형속도 압밀시험의 경우 일정한 속도로 플레이트를 하강시키게 되므로 두 속도의 차이로 인한 시료와 재하판의 분리가 발생한 것으로 판단된다. 따라서 본 시료의 경우 약 0.2 kg/cm^{2}가 일정변형속도 압밀시험을 이용해 시료의 팽창지수를 산정함에 있어 한계가 되는 응력수준이라고 판단된다.

그림 6.에서 $(u_b)_{min}$의 값은 제하단계에서 변형속도가 증가함에 따라 증가됨을 알 수 있으며, $(u_b)_{max}$의 값은 A1 계열의 경우 평균 1.7 kg/cm^2, A2 계열의 경우 평균 1.00 kg/cm^{2}의 값을 나타내어 $(u_b)_{max}$는 변형속도가 증가함에 따라 증가됨을 알 수 있었다. 특이한 점은 $(u_b)_{min}$이 발생한 유효응력을 각 계열의 세부시험항목별로 나타낸 결과, A1 계열에 비해 A2 계열의 변화가 보다 급격함을 알 수 있다.

그림 7.에는 각 계열별 $(u_b)_{max}$에 대해 $(u_b)_{min}$이 차지하는 비율을 나타낸 것으로 A1 계열보다는 A2 계열이 더 큰 값을 보이며 보다 급격한 비율로 감소하고 있음을 알 수 있다.



(a) A1 계열



(b) A2 계열

그림 5. log σ'과 u_b의 상관관계

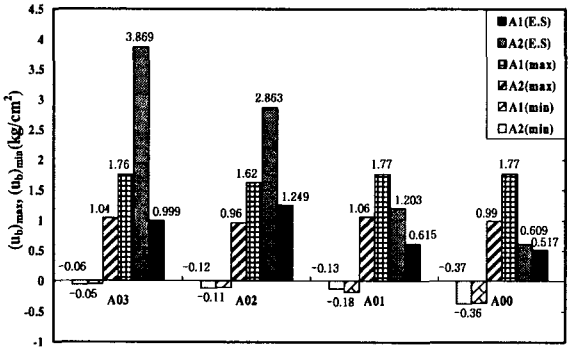


그림 6. 계열별 $(u_b)_{max}$, $(u_b)_{min}$, σ' 산정결과

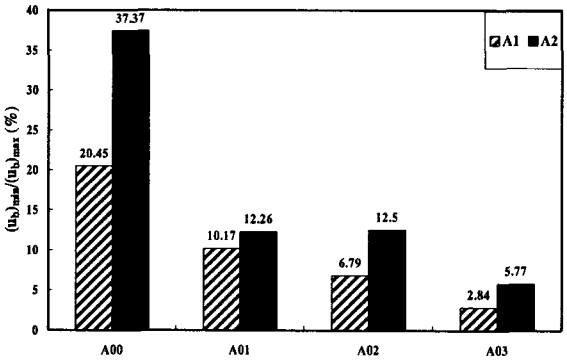
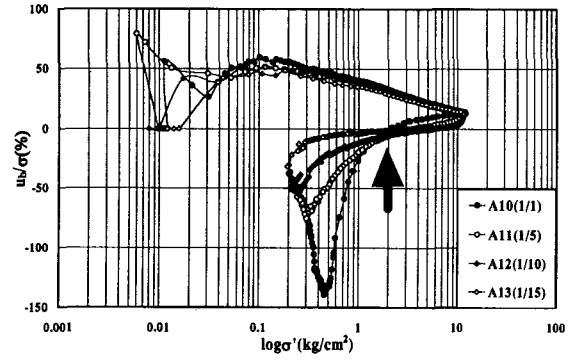


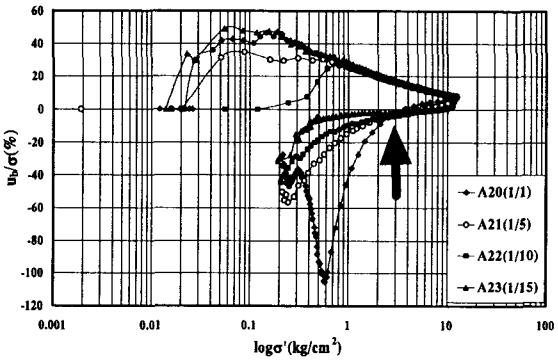
그림 7. 계열별 $(u_b)_{min}/(u_b)_{max}$ 산정결과

4.3 변형속도에 따른 유효응력과 과잉간극수압비의 상관관계

그림 8.에서는 재하단계에서의 변형속도를 기준으로 서로 다른 비율로 제하변형속도를 적용한 결과, 변형속도가 가장 느린 경우 과잉간극수압비가 가장 작은 음의 값을 나타내고 있으며, 변형속도가 증가함에 따라 기울기는 급격하게 증가되면서 부의 과잉간극수압비가 증가함을 알 수 있다.



(a) A1 계열



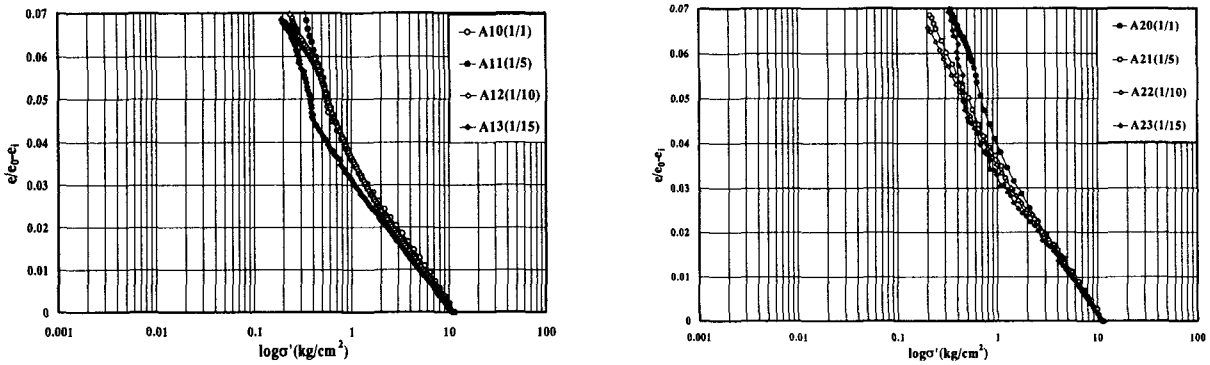
(b) A2 계열

그림 8. log σ'과 u_b/σ의 상관관계

또한 그림 8.에서의 특이한 사항은 재하단계에서의 변형속도가 0.05 %/min인 A1 계열의 경우 유효응력이 약 2 kg/cm^2, 0.03 %/min인 A2 계열의 경우 약 3 kg/cm^2 부근에서 교차점(cross point)이 발생하는 등 재하단계에서의 변형속도가 증가함에 따라 제하단계에서의 교차점이 발생하는 응력이 감소되는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 이러한 교차점이 발생하는 응력을 기준으로 더 높은 응력수준인 초기 제하단계에서는 완만하고 유사한 기울기를 나타내는 반면, 더 낮은 응력수준에서는 변형속도에 따라 각 곡선의 기울기 변화가 발생됨을 알 수 있다.

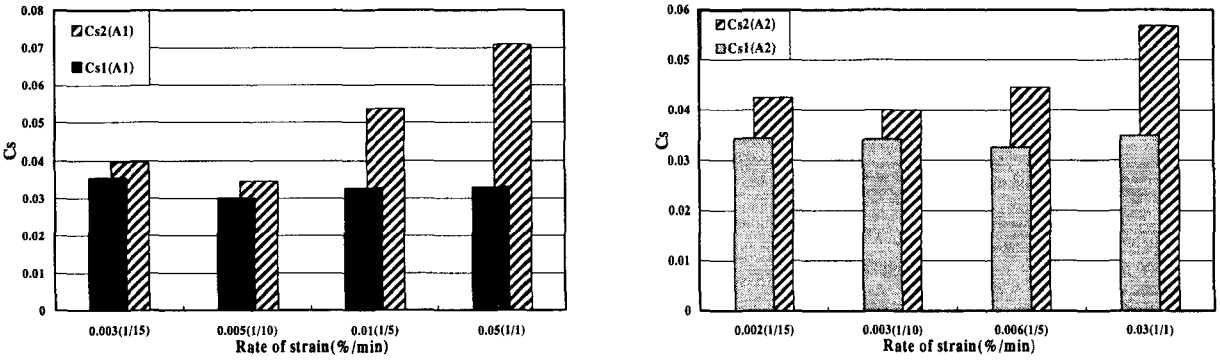
4.4 제하단계에서의 Cs 산정 결과

그림 9.에는 A1, A2 계열에 대해 제하단계에서의 그래프만을 따로 분리하여 초기점을 동일하게 설정한 결과가 제시되어 있다. 각 계열별로 나타낸 그래프에서도 그림 8.에서 제시된 동일한 응력수준에서 곡선의 경향이 다르게 나타남을 알 수 있다. 교차점이 발생한 응력을 기준으로 더 높은 응력범위에서 산정한 팽창지수를 C_{s1}, 더 낮은 응력범위에서 산정한 팽창지수를 C_{s2}라고 설정하여 그 결과를 그림 10.에 제시하였는데, C_{s1}의 경우는 전체적으로 거의 차이가 없이 일정한 값을 나타내는 반면, C_{s2}의 경우는 변형속도가 증가함에 따라 큰 차이를 보이며 증가하는 경향을 나타내고 있다. 즉, 그림 10.에서 시료에 대해 변형속도를 달리하여 제하를 수행한 결과, 변형속도의 변화에 영향을 받지 않는 응력구간이 존재함을 확인할 수 있었다.



(a) A1 계열 (b) A2 계열

그림 9. log σ'와 (e/e$_0$)-e$_i$의 상관관계



(a) A1 계열 (b) A2 계열

그림 10. 변형속도에 따른 Cs1과 Cs2 산정결과

5. 결론

점성토의 팽창지수를 산정하기 위해 일정변형속도 압밀시험과 표준압밀시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 두 시험법을 이용하여 팽창지수를 산정한 결과, 재하시 변형속도가 0.05 %/min인 A1 계열과 0.03 %/min인 A2 계열에 대해 재하시 적용된 변형속도의 약 1/5~1/10 정도의 변형속도를 적용했을 때 표준압밀시험과 유사한 팽창지수가 산정되었다.

(2) 동일한 응력까지 재하를 실시한 이후 OCR에 따라 팽창지수를 산정한 결과 OCR이 약 11~13 사이의 범위인 경우, 표준압밀시험과 일정변형속도 압밀시험에 의해 산정된 팽창지수가 서로 유사한 값을 나타내었다.

(3) 재하단계의 변형속도를 달리 적용한 결과, 유효응력과 과잉간극수압비의 관계에서 교차점이 존재함을 확인할 수 있었는데, 이 교차점에서의 유효응력은 재하단계에서의 변형속도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 교차점을 기준으로 응력단계를 나누어 팽창지수를 C_{s1}과 C_{s2}로 산정해 보면, C_{s1}의 경우 변형속도의 차이에도 불구하고 일정한 값을 보이는 반면, C_{s2}의 경우 변형속도가 증가할수록 팽창지수가 크게 산정되는 경향을 나타내었다. 즉, 일정변형속도 압밀시험을 통해 재하단계에서 변형속도의 차이에도 불구하고 팽창지수가 일정하게 산정되는 유효응력 구간이 존재함을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Wissa, A. E. Z., Christian, J. T., Davis, E. H. and Heiberg, S.(1971), "Consolidation at Constant Rate of Strain", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol.97, SM10, pp.1393-1413.
2. Annual Book of ASTM Standard(1985), "Standard test method for one-dimensional consolidation properties of soils using controlled-strain loading", Vol.04.08, D4186-82. pp.713~719.
3. Annual Book of ASTM Standard(1989), "Standard test method for one-dimensional consolidation properties of soils using controlled-strain loading", D4186-89. pp.1~5.