

일정변형속도(CRS) 압밀시험에 의한 팽창지수 산정 특성

The Characteristic of Swelling Index Evaluated by CRS Consolidation Test

한 상 재*¹ Han, Sang-Jae

김 수 삼*² Kim, Soo-Sam

김 병 일*³ Kim, Byung-Il

이 응 준*⁴ Lee, Eung-Jun

Abstract

The swelling index of clayey soil was examined by constant rate of strain(CRS) consolidation test. Four kinds of strain rate were applied during unloading. The strain rates are 1/1, 1/5, 1/10, 1/15 of loading. The strain rates during loading are 0.05%/min and 0.03%/min. From the test results using standard consolidometer, the swelling indexes were much similar values in case of 1/5 or 1/10 of the strain rate during loading stage. In the relation between effective stress and excess pore water pressure ratio, it was found that the existence of cross point and the stress level can be separated into two zones according to the swelling index.

요 지

일정변형속도 압밀시험(CRS)을 이용하여 점성토의 팽창지수 산정 특성을 조사하였다. CRS 압밀시험에서 재하단계의 변형률은 0.05%/min와 0.03%/min을 적용하였으며, 제하단계에서는 재하단계의 변형속도의 1/1, 1/5, 1/10, 1/15에 해당하는 변형속도를 적용하였다. 표준압밀시험과 비교하여 팽창지수를 산정한 결과 1/5~1/10 정도의 변형속도를 적용했을 때 서로 유사한 팽창지수가 산정되었다. 또한, 유효응력과 과잉간극수압비의 관계에서 교차점이 존재함을 알았으며 이 교차점을 기준으로 변형속도에 의존적인 부분과 비의존적인 부분이 존재함을 알 수 있었다.

Keywords : Clayey soil, Constant rate of strain(CRS), OCR, Standard consolidometer, Swelling index

1. 서 론

일정변형속도 압밀시험은 일정한 속도로 시료에 연직변형을 발생시키고 변형발생에 따른 간극수압을 측정하고 연직유효응력과 그에 대응하는 변형률을 측정함으로써 빠른 시간 내에 연속적으로 변형률과 유효응력, 압밀계수와 유효응력과의 관계 등 압밀정수를 산정할 수 있는 시험방법으로서 Wissa et al.(1971)을 비롯한 여러 학자들(Smith & Wahls, 1969; Umehara & Zen,

1980; Lee, 1981)에 의해 그 이론적 배경이 이미 정리되었다고 할 수 있다.

그러나 일정변형속도 압밀시험기를 사용하여 점성토의 팽창지수를 산정할 때 적용된 제하속도에 관한 합리적인 설명이 제시되어 있지 않다(이응준 2000). 즉 타당한 근거의 제시가 없는 상태에서 막연히 재하단계에서의 변형속도와 동일한 변형속도를 제하단계에서 적용한다. 하지만 동일한 변형속도를 제하단계에서 적용했다는 점은 단지 시험상의 편의를 고려한 결과라

*1 정회원, 한양대학교 토목환경공학과 연구교수 (Member, Research Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Hanyang Univ., 1sj@korea.com)

*2 정회원, 한양대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Hanyang Univ.)

*3 정회원, 한양대학교 토목환경공학과 박사과정 (Member, Ph.D Candidate, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Hanyang Univ.)

*4 정회원, (주) 보강기술 대리 (Member, Assistant manager., E&S Engrg. Co. Ltd.)

고 판단될 뿐, 이 동일한 속도가 과연 시료의 실제 제하단계에서의 거동을 제대로 구현하는 데 적합한 변형속도이기 때문에 적용한 것은 아니라고 판단된다.

ASTM D4186-89에서는 CRS시험에 있어서 제하속도는 재하시 변형속도의 1/10배의 변형속도를 적용하는 것을 권장하고 있으나 시료의 팽창과 관련된 사항의 임의의 변형속도로 인위적으로 적용한다는 것 자체가 실제 팽창능력을 제대로 반영할 수 있는지도 큰 의문점이다.

따라서, 본 연구에서는 실내에서 재조성한 점성토에 대해 CRS압밀시험과 표준압밀시험을 수행하여 산정된 팽창지수를 상호 비교분석하고, CRS 압밀시험 시 재하시의 변형속도의 일정비율에 해당하는 제하속도를 변화 적용시켜 시료의 제하단계에서의 거동특성의 상호 의존성과 상관성을 실험을 통하여 검토하고자 한다.



사진 1. CRS 압밀시험기기

2. 실험

2.1 대상시료의 기본물성

본 연구에서 사용된 시료는 국내 남해안 가덕도 지역에서 채취한 해성점토로서 표. 1에 제시된 바와 같이 액성한계 61%, 소성지수 36%, 비중은 2.71이다. 본 연구에서는 시료를 교란상태로 채취하여 해수를 첨가하면서 #140번 체로 체가름하여 고함수비의 슬러리 상태로 만든 후, 0.5kg/cm²의 하중까지 단계적으로 예압밀 시켜 사용하였다.

표 1. 대상점토의 기본물성

200번체 통과율 (%)	단위중량 (t/m ³)	비 중	액성 한계 (%)	소성 지수 (%)	구 분
94.3%	1.1	2.71	61%	36	CH

2.2 실험장치

본 연구에서 사용된 CRS압밀시험기는 사진 1에 제시된 바와 같이 Geocomp사에서 제작된 Load Trac II로서 시료관의 하부에 장착된 스크류 잭이 미소모터를 96회 회전시킴으로써 재하판이 1inch씩 상승하도록 되어있다. 변위계측장치는 0.025mm까지 측정이 가능하며 로드셀은 0.1~900kg까지의 하중을 계측할 수 있도록 구성되어있다. 본 실험에서는 직경 6.35cm, 높이 2.54cm의 시료를 이용하여 실험을 실시하였다.

2.3 실험방법

표 2에는 ASTM D4186-82에 제시된 일정변형속도 압밀시험에 대해 제하단계에 대한 추천변형속도가 제시되어 있다.

이를 기준으로, 본 실험에서는 ASTM D4186-89에서 CRS 압밀시험시 제하속도는 재하시 변형속도의 1/10배

표 2. CRS 시험시 추천 변형 속도(ASTM D4186-82)

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. 실험항목

분류	시험 코드	재하시 변형속도 (%/min)	제하속도 (%/min)	제하속도/재하속도
A1	A10 A11 A12 A13	0.05	0.05	1/1
			0.01	1/5
			0.005	1/10
			0.003	1/15
A2	A20 A21 A22 A23	0.03	0.03	1/1
			0.006	1/5
			0.003	1/10
			0.002	1/15
B1	Cyclic Loading	0.03	0.03	1/1
B2		0.01	0.01	
B3		0.005	0.005	

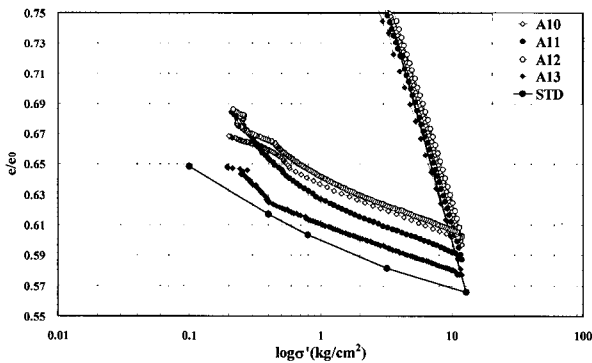
를 적용한다는 기준을 바탕으로 하여 표 3과 같이 재하시 변형속도의 1/1, 1/5, 1/10, 1/15의 속도를 적용한 재하시험을 실시하였다.

A1계열과 A2계열은 각각 재하시 변형속도를 0.05, 0.03%/min을 사용하였다. 또한, 재하와 제하단계에서 동일한 변형속도를 0.03, 0.01, 0.005%/min으로 동일하게 적용한 B계열의 실험을 실시하여 재하시 응력수준에 따른 팽창지수와 재하-제하 응력비를 OCR로 계산하여 그 관계를 조사하였다.

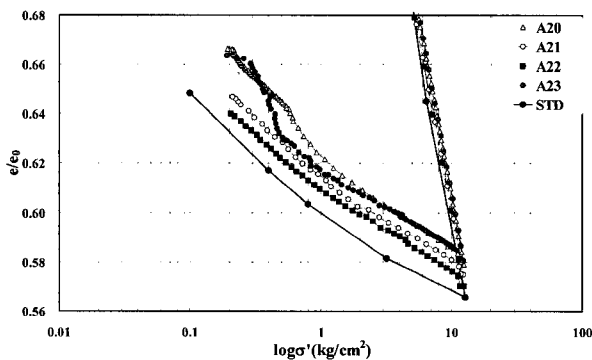
3. 실험결과 및 분석

3.1 유효응력과 간극비의 상관관계

그림 1(a), (b)는 각각 A1계열과 A2계열 즉, 재하단계시 0.05%/min, 0.03%/min의 변형속도를 적용한 후 제하(unloading)시 재하단계의 변형속도의 1/1, 1/5, 1/10, 1/15의 값에 해당하는 제하속도를 적용한 결과를 표준압밀시험 결과와 함께 나타낸 것이다. 그림에서 보이는 바와 같이, 재하시의 팽창속도가 증가할수록 최종 응력 단계에서의 시료 팽창량은 증가하는 경향을 나타냄을



(a) A1 계열



(b) A2 계열

그림 1. 팽창에 따른 간극비-유효응력의 관계

확인할 수 있었다.

그림 2는 재하시 유효응력 0.4kg/cm²범위 까지 만을 고려하여 팽창지수를 산정한 결과를 나타낸 것으로, C_c는 0.237~0.256, C_s는 0.034~0.035로 두 시험법을 통해 산정한 C_c와 C_s/C_c가 변형속도의 차이에도 불구하고 전체적으로 상당히 유사한 결과를 나타냄을 알 수 있었다.

그림 3(a), (b)에는 A1, A2계열의 실험결과 OCR에 대한 C_s값의 관계를 나타내었다. OCR이 약 1.5정도인 초기팽창범위를 제외하고는 대체적으로 표준압밀시험결

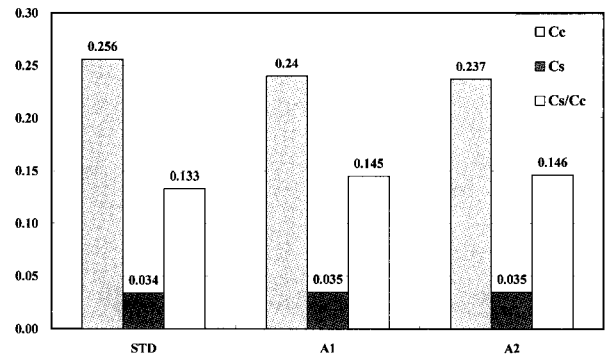
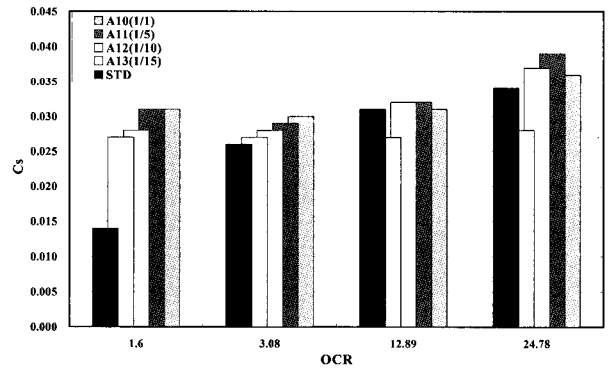
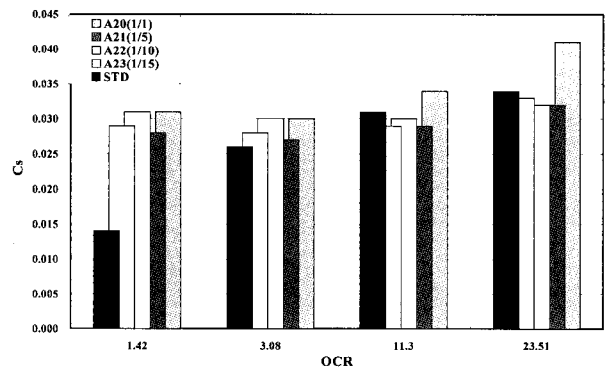


그림 2. CRS 압밀시험과 표준압밀시험을 통해 산정한 C_c, C_s, C_s/C_c의 비교



(a) A1 계열



(b) A2 계열

그림 3. OCR과 C_s와의 관계

과와 CRS압밀시험결과가 유사한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나, 전체적인 경향을 살펴볼 때 OCR이 증가함에 따라 C_s 는 약간 증가하는 경향을 나타내고 있다.

특히 OCR이 약 11~13정도 범위에서의 C_s 는 각 계열 간에 상당히 근접하고 있음을 알 수 있다. 계열에 관계없이 재하단계에서의 변형속도의 1/15에 해당하는 변형속도를 적용하여 C_s 를 산정한 경우 OCR에 따른 값의 변화가 상당히 적음을 알 수 있다.

그림 4(a), (b)에는 e - $\log\sigma'$ 그래프에서 정규압밀상태의 직선의 기울기를 나타내는 C_c 값을 이용하여 각 계열별 C_s 를 나누어 C_s/C_c 를 산정한 결과를 제시하였다.

OCR이 약 1.5 정도인 경우를 제외하고는 C_s/C_c 값은 표준압밀시험(STD)과 일정변형속도 압밀시험이 OCR이 증가함에 따라 약간 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 그림 3의 경우와 마찬가지로 OCR이 약 11~13정도에서 가장 유사한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

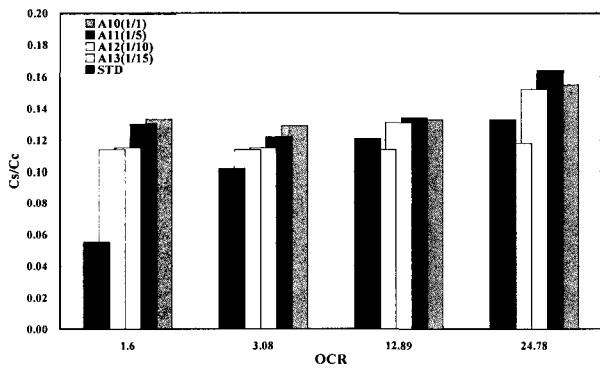
그러므로 본 실험결과를 바탕으로 OCR과 C_s 와의 관계를 분석해 보면, 대체적으로 OCR이 약 11~13정도의 범위 내에 존재할 때 두 시험방법간에 또한 각 계열

간에 산정된 C_s 차이가 가장 작게 산정되는 것을 알 수 있었다.

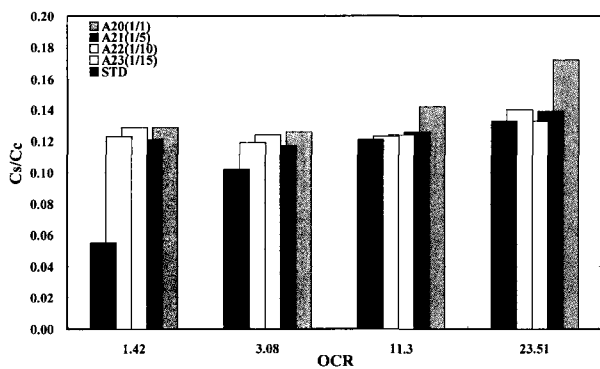
3.2 변형속도에 따른 유효응력과 과잉간극수압의 상관관계

그림 5는 각 실험항목별 유효응력에 대한 과잉간극수압의 변화를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 유효응력이 약 0.2kg/cm^2 인 근처에서 제하시 발생하는 음(-)의 과잉간극수압이 변형속도에 상관없이 수렴하는 경향을 보이면서 거의 0으로 소산되고 있음을 알 수 있다. 이러한 그래프 경향은 표준압밀시험의 경우 시간이 경과함에 따라 시료 팽창속도가 감소하는 것에 반해, 일정변형속도 압밀시험의 경우 일정한 속도로 플레이트를 하강시키게 되므로 두 속도의 차이로 인한 시료와 재하판의 분리가 발생되기 때문인 것으로 판단된다.

따라서, 본 시료의 경우 약 0.2kg/cm^2 가 일정변형속도 압밀시험을 이용해 시료의 팽창지수를 산정함에 있어 한계가 되는 응력수준이라고 판단된다.

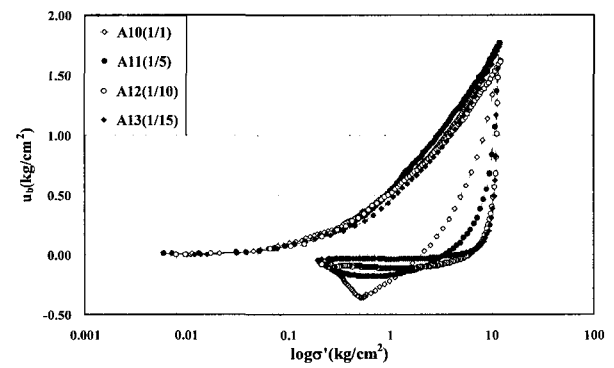


(a) A1 계열

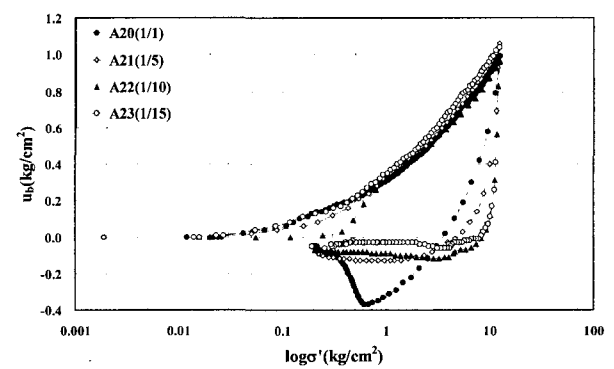


(b) A2 계열

그림 4. OCR과 C_s/C_c 의 관계



(a) A1 계열



(b) A2 계열

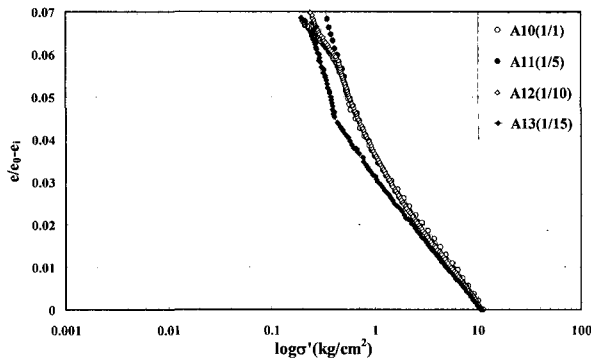
그림 5. $\log\sigma'$ 과 u_b 의 상관관계

3.3 간극비-유효응력 곡선에서 C_s 산정 결과

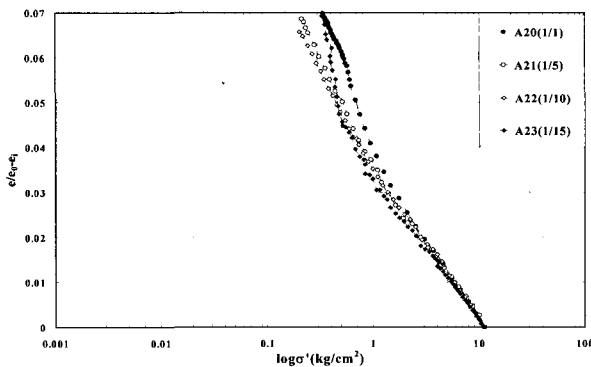
그림 6(a), (b)에는 A1, A2 계열에 대해 CRS 압밀시험을 수행한 결과 얻은 $e-\log\sigma'$ 곡선에서 팽창단계만을 따로 고려하여 유효응력의 감소에 따른 시료의 간극비 변화를 나타낸 것이다.

그림 6(a), (b)에서 A1, A2 각 계열별로 나타낸 그래프에서도 동일한 응력수준 부근에서 변곡점이 발생하고 그 이후 곡선의 경향이 다르게 나타남을 확인할 수 있다. 변곡점보다 높은 응력단계에서는 각 계열별 4가지 종류의 그래프가 거의 일정한 기울기를 가지는 반면, 교차점보다 낮은 응력단계에서는 곡선의 기울기가 변형속도에 따라 상당히 크게 달라짐을 알 수 있다. 이러한 결과를 근거로 CRS 압밀시험을 이용하여 점성토에 대해 제하과정을 수행할 경우 팽창속도에 의존적인 부분과 비의존적인 부분으로 구분할 수 있음을 알 수 있다.

표 4에서는 변곡점을 중심으로 제하 초기 단계에서의 팽창지수를 C_{s1} , 교차점보다 낮은 응력단계에서의 팽창지수를 C_{s2} 라고 설정하여 산정한 결과를 제시하였다. 표 4로부터 A1, A2 계열에 있어서, 제하단계에서



(a) A1 계열



(b) A2 계열

그림 6. 팽창시 유효응력에 따른 간극비의 변화

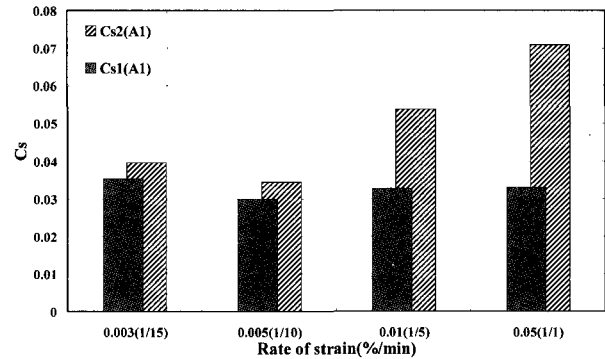
표 4. 팽창속도별 C_s 값 산정결과

No.	Cs1	Cs2	Strain rate(%/min)	Remark	
A1 series	A10	0.0352	0.0396	0.05	1/1
	A11	0.0329	0.0708	0.01	1/5
	A12	0.0326	0.0538	0.005	1/10
	A13	0.0300	0.0344	0.003	1/15
A2 series	A20	0.0343	0.0425	0.03	1/1
	A21	0.0349	0.0568	0.006	1/5
	A22	0.0326	0.0445	0.003	1/10
	A23	0.0341	0.0400	0.002	1/15

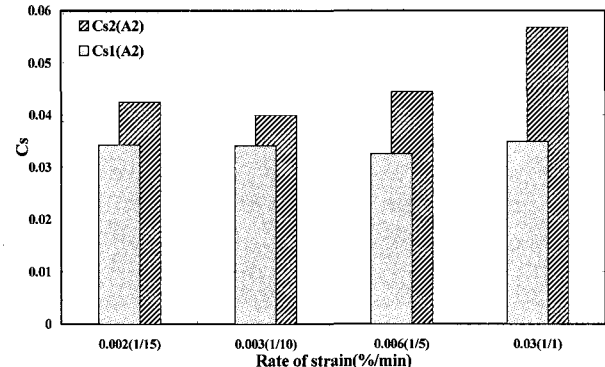
0.003%/min의 동일한 변형속도가 적용된 경우에 대해 C_{s1} , C_{s2} 를 산정한 결과를 살펴보면, A13가 A22에 비해 보다 작은 값으로 산정됨을 알 수 있다.

즉, 제하단계에서 적용된 팽창속도가 동일하다고 할지라도, 재하시 적용된 변형속도의 차이로 인해 시료 내에서 발생된 과잉간극수압의 차이가 제하단계에도 영향을 미치는 것으로 판단된다.

그림 7에는 표 4에 제시된 데이터를 이용하여 각 계열별로 C_{s1} 과 C_{s2} 를 산정한 결과를 제시하였다. 제시된 그래프로부터, C_{s1} 의 경우는 전체적으로 거의 차이가 없



(a) A1 계열



(b) A2 계열

그림 7. 변형속도와 C_s 값의 관계

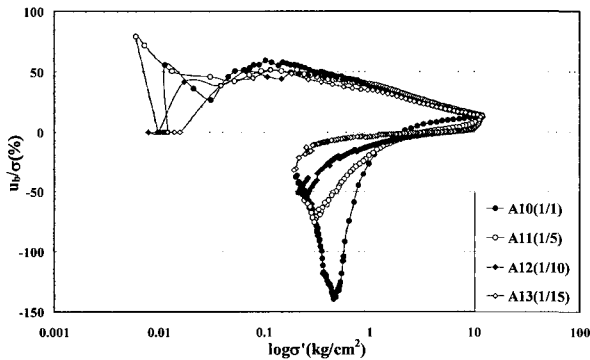
이 일정한 값을 나타내는 반면, C_2 의 경우는 변형속도가 증가함에 따라 큰 차이를 보이며 증가하는 경향을 나타내고 있다.

즉, 변형속도에 의존적인 부분과 비의존적인 부분의 존재를 확인할 수 있었다.

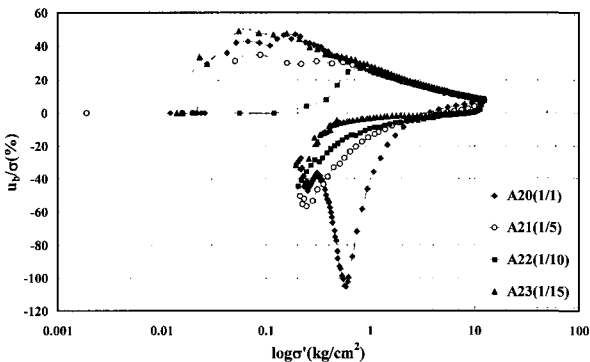
3.4 제하속도에 따른 유효응력과 과잉간극수압비의 상관관계

그림 8에서는 재하시의 변형속도를 기준으로 서로 다른 비율로 제하속도를 적용시킨 실험결과 유효응력에 따른 과잉간극수압비를 나타낸 것으로 팽창속도가 가장 느린 경우 과잉간극수압비가 가장 작은 음의 값을 나타내고 있으며, 팽창속도가 증가함에 따라 그래프의 기울기는 급격하게 증가되면서 음(-)의 과잉간극수압비가 커짐을 알 수 있다.

또한, 그림 8에서의 특이한 사항은 재하시 변형속도가 0.05%/min인 A1계열의 경우 유효응력이 약 2kg/cm^2 , 0.03%/min인 A2계열의 경우 약 3kg/cm^2 부근에서 변곡점이 발생하는 등 재하시의 변형속도가 증가함에 따라



(a) A1 계열



(b) A2 계열

그림 8. $\log \sigma'$ 와 u_b/σ 의 상관관계

팽창시 변곡점이 발생하는 응력이 감소되는 경향을 나타냄을 알 수 있다.

이러한 변곡점이 발생하는 응력을 기준으로 더 높은 응력수준인 초기 팽창단계에서는 완만하고 서로 비슷한 기울기를 나타내는 반면, 더 낮은 응력수준에서는 팽창속도에 따라 각 곡선의 기울기 변화가 발생됨을 알 수 있다.

3.5 반복재하시험에서의 팽창지수 산정

표 5에는 재하와 팽창시 0.03, 0.01, 0.005%/min와 같은 동일한 변형속도를 적용하여 시험한 B계열(표 1 참조)의 실험결과를 나타낸 것으로 응력수준에 따라 산정된 팽창지수(C_s)와 OCR에 대한 사항을 정리하였다.

그림 9는 B계열의 실험결과를 유효응력과 정규화한 간극비의 관계를 나타낸 것이며 그림 10은 유효응력과 팽창지수와의 관계를, 그림 11은 OCR과 팽창지수와의 관계를 나타낸 것이다.

그림 10과 11로부터 팽창지수 C_s 는 재하시 유효응력 수준과 OCR에 대해 비례관계를 갖고 있음을 확인할 수 있었으며, 시험결과로부터 다음과 같은 관계식을 설정할 수 있다.

표 5. B계열의 재하시험 결과

Series	Strain rate (%/min)	σ_c' (kg/cm ²)	C_s	OCR
B1	0.03	0.3881047	0.0124	2.577
		2.915843002	0.0355	11.549
B2	0.01	0.400068204	0.0151	2.657
		1.185617888	0.0316	6.726
B3	0.005	0.430875425	0.0177	2.728
		1.215162053	0.0288	6.607

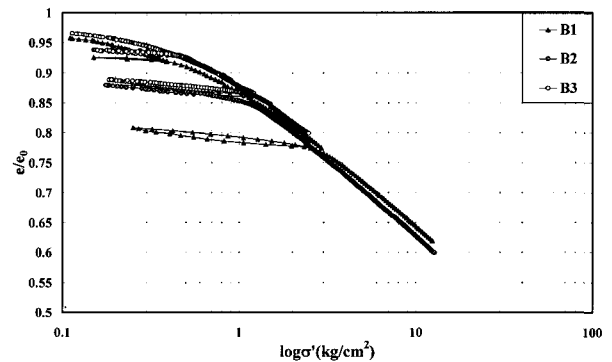


그림 9. B계열 시험결과 유효응력에 따른 간극비의 변화

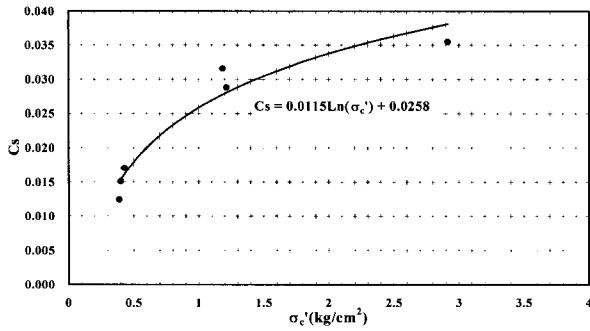


그림 10. 유효응력과 팽창지수와의 관계(B계열)

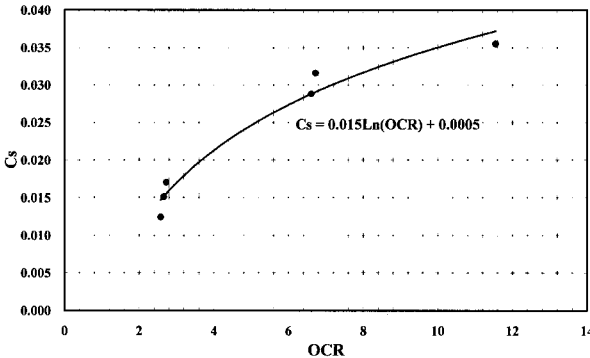


그림 11. OCR과 C_s 의 관계

$$C_s = 0.0115 \ln(\sigma'_c) + 0.0258 \quad (1)$$

$$C_s = 0.015 \ln(\text{OCR}) + 0.0005 \quad (2)$$

4. 결론

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

- (1) 팽창지수를 산정한 결과, 재하시 변형속도가 0.05%/min인 A1계열과 0.03%/min인 A2계열에 대해 재하시 적용된 변형속도의 약 1/5~1/10 정도의 제하속도를 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 CRS압밀시험에 의해 산정된 팽창지수가 서로 유사한 값을 나타내었다.
- (3) 제하시 팽창속도를 달리 적용한 결과, 유효응력과 과잉간극수압비의 관계에서 변곡점이 존재함을 확인할 수 있었는데, 이 변곡점이 발생하는 유효응력은 재하단계에서의 변형속도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다.
- (4) 변곡점을 기준으로 응력단계를 나누어 팽창지수를 C_{s1} 과 C_{s2} 로 산정한 결과, 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 제하단계에서 변형속도의 차이에도 불구하고 팽창지수가 일정하게 산정되는 유효응력 구간의 존재를 확인할 수 있었다.
- (5) 제하단계에서의 팽창속도의 차이에도 불구하고 약 11~13 정도의 OCR에서 유사한 팽창지수가 산정되었는데 이는 변곡점이 발생된 유효응력수준에 해당되는 OCR과 일치하는 값을 알 수 있다. 즉, 일정변형속도 압밀시험에서 제하단계에서의 시료의 거동이 변곡점을 기준으로 변형속도에 의존적인 부분과 비의존적인 부분이 존재함을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. 이용준(2000), 일정변형속도 압밀시험에 의한 해상점토의 팽창특성에 관한 연구, 석사학위논문, 중앙대학교.
2. ASTM.(1989), "Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Controlled-Strain Loading", ASTM, D4186-89, pp.1-5.
3. Lee, K(1981), "Consolidation with Constant Rate of Deformation", *Geotechnique*, Vol.31, pp.215-229.
4. Smith, R.E., Wahls, H.E.(1969), "Consolidation under Constant Rates of Strain", *ASCE*, Vol.95, No.SM2, pp.519-539.
5. Umehara, Y., Zen, K.(1980), "Constant Rate of Strain Consolidation for very soft clayey soils", *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.20, No.2, pp.75-95.
6. Wissa, A.E.Z., Christian, J.T., Davis, E.H. and Heiberg, S.(1970), "Consolidation at Constant Rate of Strain", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol.97, SM10, pp.1393-1413.