

## 일정 압력비 압밀시험을 이용한 연약점토의 압밀특성 분석

### Analysis of Consolidation Characteristics of Soft Clay Based on Constant Pressure Ratio Consolidation Test

김훈규<sup>1)</sup>, Hoon-Gyu Kim, 정두회<sup>2)</sup>, Du-Hwoe Jung.

<sup>1)</sup> 부경대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., PuKyong National Univ.

<sup>2)</sup> 부경대학교 공과대학 토목공학과 부교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Eng., PuKyong National Univ.

**Synopsis :** There exist several kinds of continuous consolidation tests to analyze the consolidation behavior of soft clay. The constant rate of strain (CRS) test has been adopted as a standard method by several countries, and some researches also have been performed by domestic researchers. Among those, the constant pressure ratio (CPR) test is performed with the constant ratio of excess porewater pressure to vertical effective stress. The test has the advantage of considerable reduction of duration time. In the study, the consolidation characteristics are analyzed by performing the CPR test as validate the pressure ratio with undisturbed soft clay and remolded clay. Also, results of the standard consolidation test and CRS test are compared to verify the CPR test can be employed for practical use. As a result, effects of variation of the pressure ratio on consolidation parameter are similar to the strain rate in the CRS test. Therefore, the test can be used to analyze the consolidation behavior of soft clay. But the test have some problems such as expensive cost of equipment and highly skilled workmanship.

**Key words :** continuous consolidation test, constant pressure ratio, CRS, CPR

## 1. 서론

### 1.1 연구배경

점성토의 압밀특성은 상재하중에 의해 발생하는 침하량과 침하에 소요되는 시간으로서 표현되며 각각 압축지수와 압밀계수로 나타낸다. 상용되고 있는 표준압밀시험은 상재하중에 의해 발생된 과잉간극수압의 소산에 의한 압밀변형은 미소하다는 가정하에 얻어진 Terzaghi의 압밀이론을 적용한 단계재하에 의한 시험이다. 그러나 시험방법이 실제 지반에 가해지는 하중증가율과 다르며 압밀과정에서 투수성과 압축성이 일정하다는 등 현실과 다른 몇 가지 가정하에 성립되어 있다. 또한 압축지수, 압밀계수 등은 도해법에 의해 산출되므로 개인오차를 유발할 수 있고 긴 해석시간이 필요하다. Hamilton and Crawford(1959)가 처음 제안한 일정변형률시험(CRS Test)은 이론적인 보완과 시험시간 단축 등의 장점으로 인해 표준시험으로 이미 규정되어 사용되는 나라도 있고 국내에서도 시험적인 연구가 이루어져 왔다. 그러나 일정변형률시험도 간극비가 비교적 큰 연약한 점토의 경우 ASTM 규정의 변형속도를 적용하면 시험시간 단축의 장점을 살리기 어렵다. 다른 연속압밀시험 중 Janbu et al.(1981)이 제안한 일정

압력비시험은 연직응력에 대한 과잉간극수압의 비를 일정하게 유지시키며 압밀을 진행시키는 시험으로 발생하는 과잉간극수압의 크기가 최대이므로 빠른 변형 속도로 시험할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 자연점토와 재성형점토를 대상으로 일정압력비시험을 비롯한 일정변형률시험, 표준압밀시험을 각각 실시하여 구한 압밀정수를 비교 분석하여 연약지반 압밀특성 평가시 일정압력비시험으로 구한 압밀정수 적용의 타당성을 검토하고자 한다.

## 1.2 해석이론

일정압력비시험의 해석이론은 일정변형률시험의 해석이론과 기본적인 맥락을 같이 한다. 일정하중증가율 시험, 일정간극수압경사 시험, 일정압력비시험의 압밀지배방정식이 유사하다. 일정압력비시험 (Constant Pressure Ratio Test; CPR 시험)은 그림 1과 같이 간극수압과 재하압력의 비율이 일정 ( $u_u/p = \text{constant}$ )하게 유지되도록 재하하는 시험으로 Janbu et al.(1981)에 의해 최초로 제안되었다. Janbu는  $\partial u/p = \lambda$ 라고 정의하고  $\lambda$ 는 0.2~0.7 범위에 있다고 했다.

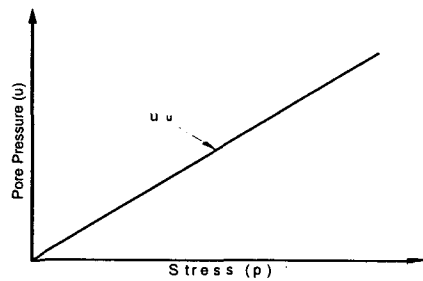


그림 1 일정압력비시험 하중재하형태

압밀계수  $c_v$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$c_v = \alpha_c \frac{dp}{dt} \cdot \frac{\bar{H}^2}{2u_u} \quad (1.1)$$

$\alpha_c$ 는 간극압비와 관련된 값으로써 Janbu는 다음과 같이 정의한다.

$$\alpha_c = 1 - 0.9\lambda \quad (1.2)$$

식 (1.2)를 식 (1.1)에 대입해서 정리하면 다음과 같다.

$$c_v = 0.263(1 - 0.9\lambda) \frac{dp}{dt} \cdot \frac{\bar{H}^2}{\partial u} \quad (\text{m}^2/\text{year}) \quad (1.3)$$

식 (1.3)에서  $dp/dt$ 는  $p$ - $t$  곡선의 기울기이다.

Janbu는 접선계수  $M$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$M = (\alpha_M) \frac{dp}{d\varepsilon} \quad (1.4)$$

식 (1.4)에서  $\alpha_M$ 은  $\lambda$ 의 변수로써 다음과 같이 정의한다.

$$\alpha_M = 1 - 0.75\lambda \quad (1.5)$$

$m_v = 1/M$ 이므로 체적압축계수  $m_v$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$m_v = \frac{1000}{1 - 0.75\lambda} \times \frac{d\varepsilon}{dp} \quad (m^2/MN) \quad (1.6)$$

식 (1.6)을 간극비에 대한 식으로 바꾸면 식(1.7)과 같이 된다.

$$m_v = \frac{1000}{1 - 0.75\lambda} \times \frac{1}{1 + e} \times \frac{de}{dp} \quad (m^2/MN) \quad (1.7)$$

## 2. 시험방법 및 시료

일정압력비시험의 과정은 일정변형률시험(ASTM D-4186)과 유사하다. 일정변형률시험은 압력비( $\lambda$ )를 0.03~0.3 범위에서 유지할 수 있도록 변형속도를 결정하고, 일정압력비시험은 압력비를 일정하게 유지하며 변형속도를 피드백(Feedback)에 의해 조정한다. 그러므로 압력비를 높게 설정할수록 시험시간을 단축할 수 있다. 특히 간극수압의 측정이 시험과정과 결과에 영향을 미치므로 정확한 포화과정이 필요하고, 시험 초반부의 정착하중(seating load)을 가하는 과정이 시험의 성공에 중요한 영향을 미친다(Head, 1988).

시험에 사용된 GEOCOMP사의 압밀시험기는 CRS 시험, CRL 시험, CG 시험, CPR 시험이 가능하도록 고안되었고 하중프레임, 압력조절장치, 계측기기, 컴퓨터로 구성되어 있으며 압밀과정은 자동으로 조정이 가능하다.

본 논문에서는 연약한 불교란 점토와 재성형점토에 대해서 일정압력비시험을 수행하여 점토의 압밀특성을 평가하였다. 점토의 물리적인 특성은 표 1 및 그림 2에서 그림 5에 나타낸 바와 같다. 자연시료는 간극비가 2.85인 연약한 고소성 점토이고, 재성형시료는 연안에서 채취한 점토를 40번 체를 통과시킨 후 슬러리 상태로 반죽하여 0.8 kgf/cm<sup>2</sup>의 압력으로 선행압밀시켜 제조한 시료이다(BS 1924, 1990).

표 1 시료의 물리적 특성

시료의 물리적 특성	자연시료 (광양항)		재성형시료
	DW-11 (3.0 m)		
USCS	CH		CH
W <sub>c</sub> (%)	107.0±3.2SD		55.4±0.7SD
G <sub>s</sub>	2.61		2.60
$\gamma_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.42±0.02SD		1.71±0.04SD
e	2.85±0.03SD		1.55±0.03SD
Grain (%)	Sand	8	3
	Silt	31	60
	Clay	61	37
Consistency	W <sub>L</sub> (%)	88.8	68.6
	W <sub>p</sub> (%)	28.2	29.8
	I <sub>p</sub>	60.6	38.8
	I <sub>c</sub>	-0.3	0.2
	A <sub>c</sub>	1.23	1.21

시료의 연경도는 그림 2에 보여지듯이 자연시료의 액성지수가 -0.1로 액성한계보다 함수비가 높고 소성지수가 60이고, 재성형시료는 액성한계 80% 정도의 수분을 함유하고 있다. 시료의 소성도표 상의 위치는 그림 3과 같다. 자연시료의 입도는 점토의 함유비율이 61%이고 재성형점토는 37%로 비교적 낮다. 0.002 mm 보다 작은 점토입자의 함유비와 소성지수의 비로 나타내는 활성도는 그림 5와 같이 자연시료와 재성형시료 모두 보통의 활성도를 가지고 있다.

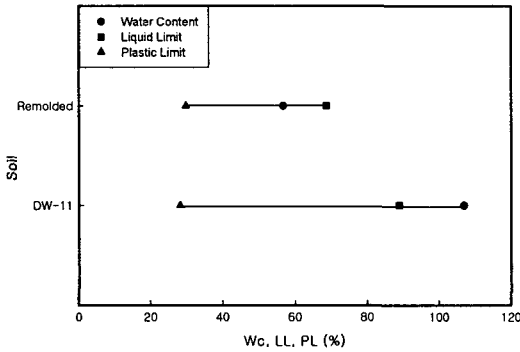


그림 2 아터버그 한계

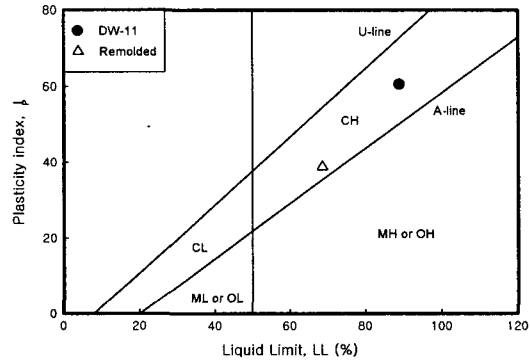


그림 3 소성도표상의 위치

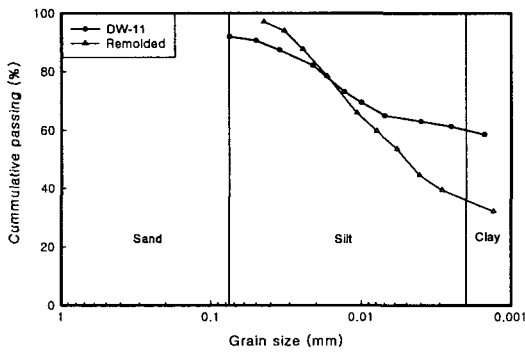


그림 4 입도분포 곡선

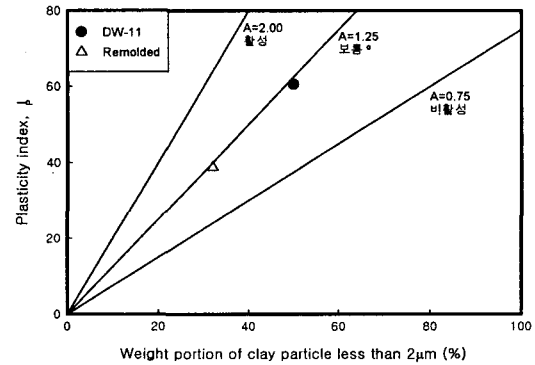


그림 5 점토입자와 소성지수 관계

일정압력비시험의 주된 변수인 압력비는 0.1, 0.2, 0.3, 0.5로 변화시켜 가면서 시험을 수행하였다. 또한 시험 결과를 상용화된 표준압밀시험, ASTM 규정의 속도로 행한 일정변형률시험의 결과와 비교 검토하였다.

### 3. 시험결과 및 고찰

표 2는 표준압밀시험, 일정변형률시험, 압력비를 달리한 일정압력비시험의 결과를 요약해서 나타낸 것이다. 시험에 소요되는 시간이 표 2와 그림 6에 나타난 바와 같이 압력비가 커짐에 따라 변형속도가 빨라져 표준압밀시험의 2~20%, CRS 시험의 5~40% 정도로 단축되는 결과가 나타났다. 시험시간이 단축되는 비율이 자연시료가 더 크게 나타나는데, 이는 ASTM 규정의 일정변형률 압밀시험에 적용하는 연약한 점토의 변형속도가 과소함을 의미한다. 이에 대해 이론적인 대안(Armour and Drnevich, 1986)과 경험적인 방법(이종태, 2001), 확률론적인 방법(채점식, 2001)들이 연구된 바 있으나 일정압력비시험을 통해 그 문제점을 해결할 수 있다.

표 2 시험결과

시료	시험종류	$p_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$C_c$	$e_0$	$\epsilon_{final}$ (%)	소요시간 (hr)	
자연시료 (광양항) DW-11 (3.0 m)	STD	0.22	1.58	2.86	69.0	192.0	
	CRS	0.42	1.13	2.87	43.8	169.9	
	CPR $\lambda$	0.1	0.47	1.05	2.89	45.1	36.0
		0.2	0.39	0.90	2.92	41.2	22.1
		0.3	0.53	0.97	2.80	39.7	13.9
0.5		0.90	0.99	2.86	37.1	6.1	
재성형시료 $p_c = 0.8$ kgf/cm <sup>2</sup>	STD	0.8	0.60	1.55	38.9	192.0	
	CRS	0.9	0.31	1.58	17.9	83.6	
	CPR $\lambda$	0.1	0.9	0.28	1.51	17.0	33.8
		0.2	1.0	0.28	1.58	16.1	15.2
		0.3	1.3	0.26	1.51	14.1	7.4
0.5		1.8	0.24	1.55	10.6	4.7	

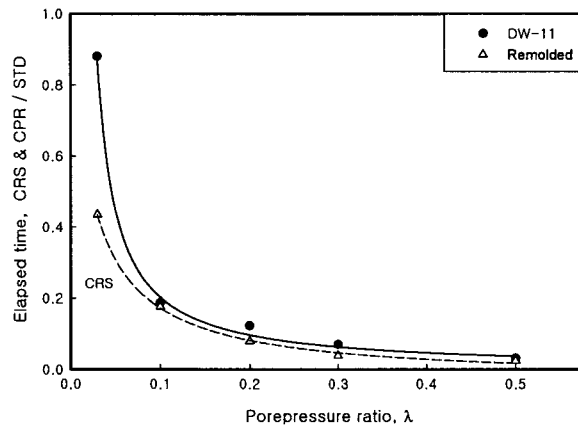


그림 6 압밀시험 소요시간과 압력비 관계

압밀하중과 변형률 관계는 그림 7, 그림 8과 같이 압력비가 커짐에 따라 압밀곡선이 우측에 위치하여 선행압밀응력이 증가하고 최종변형률이 감소하는 경향이 나타났다. 이는 일정변형률시험결과의 변형속도의 변화에 의한 경향과 같은 것으로 압력비 증가에 따라 변형속도가 증가하면서 발생하는 경향이다. 재성형점토의 선행압밀응력이 0.8 kgf/cm<sup>2</sup>임을 감안하면 일정변형률시험과 일정압력비시험의 결과로 도출되는 선행압밀응력이 실제보다 높게 평가됨을 알 수 있다.

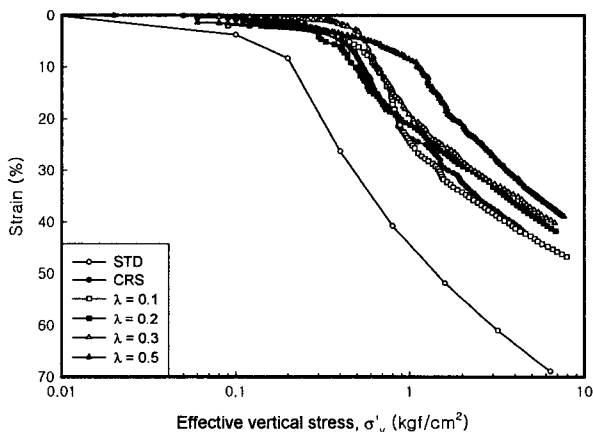


그림 7 DW-11 점토의 변형률과 압밀응력 관계

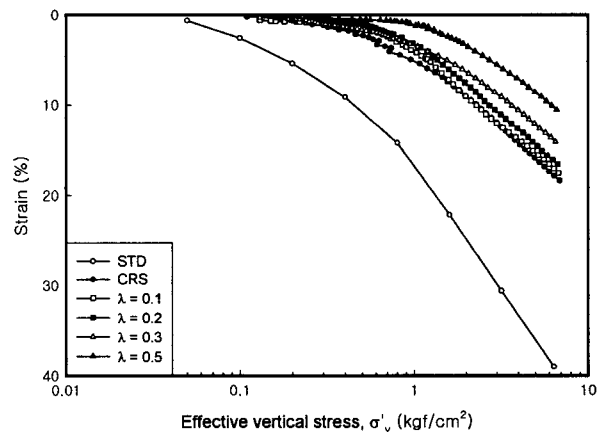


그림 8 재성형점토의 변형률과 압밀응력 관계

압력비와 선행압밀응력의 관계는 그림 9에 보여진 바와 같이 표준압밀시험의 선행압밀응력에 대한 비가 압력비에 따라 증가함을 알 수 있다. 그림 10에서 압력비에 따른 표준압밀시험에 대한 압축지수의 비가 미소하게 감소하는 경향을 나타내었는데 균질한 재성형점토의 경우 선형적인 연관성을 보이거나 자연점토는 그 상관성을 논하기 어렵다. 이는 이승 등(2001)의 연구결과와 일치한다.

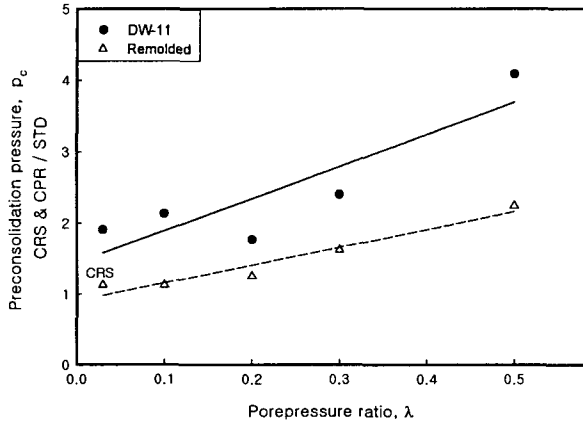


그림 9 선행압밀응력과 압력비 관계

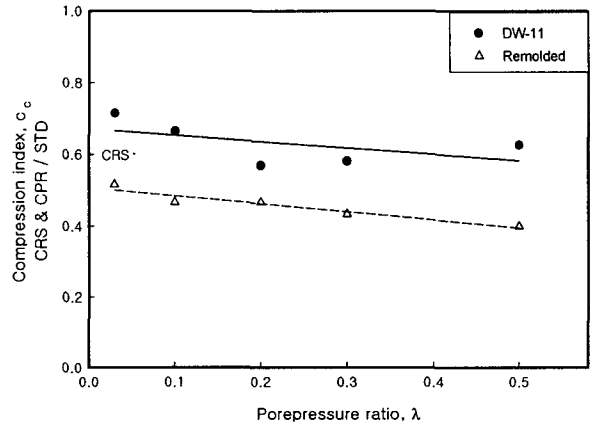


그림 10 압축지수와 압력비 관계

압력비에 따른 투수계수는 그림 11과 그림 12와 같이 압력비가 클수록 투수계수가 미소하게 증가하는 경향이 나타났다. 변형속도가 빨라짐에 따라 투수계수가 미소하게 증가하는 경향은 이종태(2001), 이승 등(2001)의 시험결과와 일치한다. 그 원인은 직관적으로 사료해 볼 때, 압력비가 클수록 시료의 하부에 발생하는 간극수압의 크기가 증가함에 따라 높은 압력으로 인하여 시료 상하부의 수두경사가 높아져 시료내부를 흐르는 물의 속도가 빨라져 투수계수가 크게 평가되는 것이 원인이다. 이러한 원인은 시료 상하부의 간극수압 차이와 구속응력의 크기를 달리하는 투수시험을 통해 규명될 수 있을 것이다.

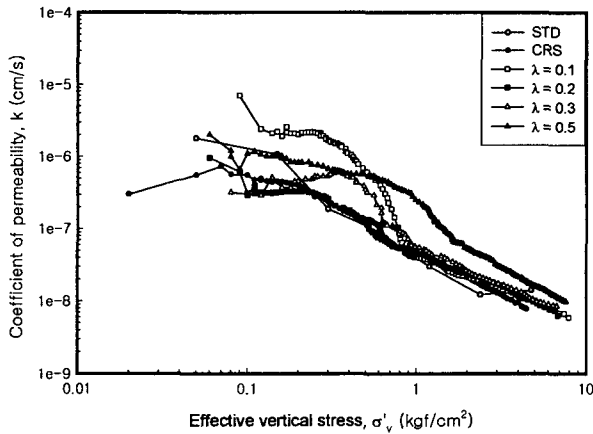


그림 11 DW-11 점토의 투수계수와 압밀응력 관계

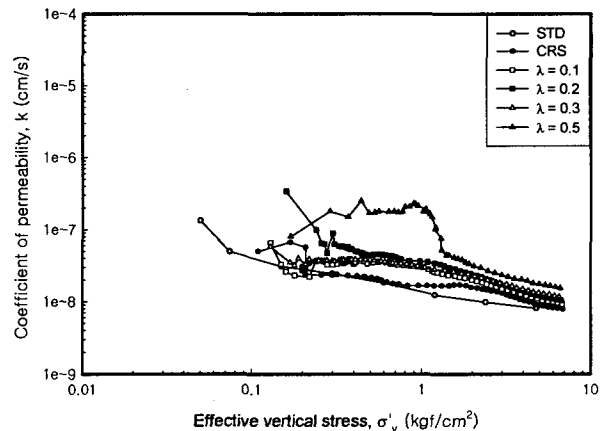


그림 12 재성형점토의 투수계수와 압밀응력 관계

그림 13과 그림 14에 나타나듯이 재압축 구간에서 압력비가 클수록 변형속도가 빨라져 변형계수가 증가하는 경향을 보이거나 정규압밀영역에 접어들면 수렴하는 경향을 나타낸다. 변형계수는 단위변형률당 응력의 변화량을 나타내는 것으로 이러한 경향은 정규압밀 영역에 접어들면서 변형속도의 영향을 받지 않는다는 것을 나타낸다.

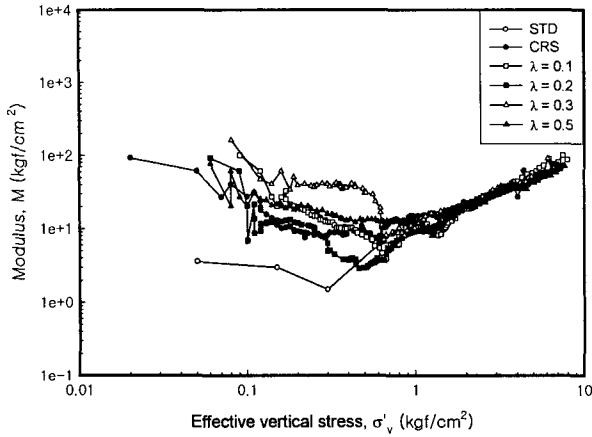


그림 13 DW-11 점토의 변형계수와 압밀응력관계

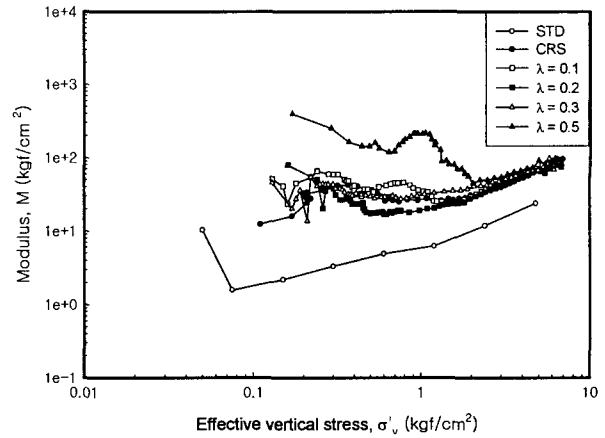


그림 14 재성형점토의 변형계수와 압밀응력 관계

압밀계수는 그림 15와 그림 16과 같이 압력비에 의해 투수계수에 미치는 영향과 유사한 경향이 나타났다. 압밀계수가 투수계수와 변형계수의 곱이므로 투수계수가 변화하는 경향과 같이 정규압밀 영역에서 압력비가 클수록 증가하는 경향을 나타내는 것이다.

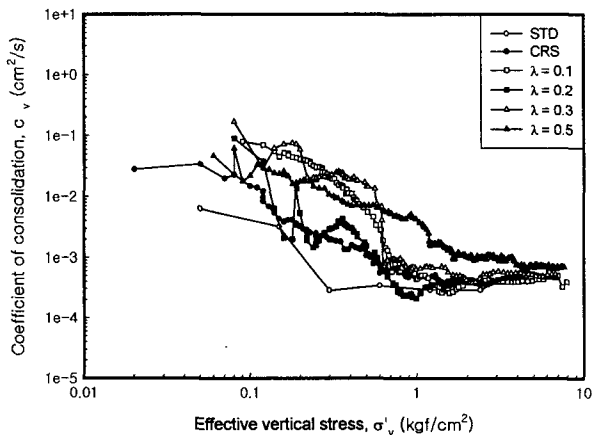


그림 15 DW-11 점토의 압밀계수와 압밀응력 관계

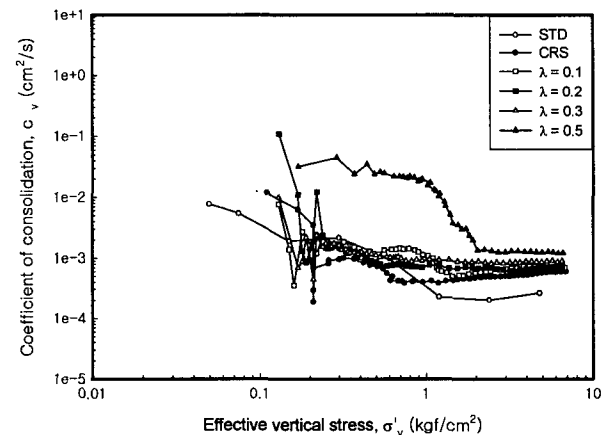


그림 16 재성형점토의 압밀계수와 압밀응력 관계

#### 4. 결론 및 향후과제

자연 점토와 재성형점토에 대해 압력비를 달리한 일정압력비시험, 일정변형률시험, 표준압밀시험을 수행하여 압밀특성을 비교 평가한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 일정압력비시험에서 압력비가 압밀정수에 미치는 영향은 일정변형률시험에서 변형속도의 변화가 압밀정수에 미치는 영향과 유사한 경향이 나타났다. 즉, 압력비가 증가함에 따라 변형속도가 증가하여 선형압밀하중이 증가하고, 압축지수가 미소하게 감소하는 경향이 나타났다. 또한 압력비가 증가함에 따라 투수계수와 압밀계수가 증가하는 경향이 나타나고, 변형계수에 미치는 영향은 없는 것으로 나타났다.
- 2) 일정압력비시험에서 압력비가 증가할수록 시험에 소요되는 시간이 현저하게 감소하였다.

그러므로 일정압력비시험은 압밀특성 평가에 사용되어질 수 있고, 시험시간을 단축할 수 있는 경제적인 시험방법이 될 것이다. 그러나 아직 폭넓은 연구가 부족하여 다양한 시료와 시험변수에 대한 결과와 통계적인 검증이 필요하다. 또한 고가의 장비, 어려운 시험조작 등의 문제점이 남아있다.

## 참고문헌

이송, 박중배, 채점식, (2001), "연속재하 압밀시험방법에 따른 점성토 지반의 압밀특성," 대한토목학회 논문집, 제 21권, 제 3~C호, pp. 299~309.

이종태, (2001), "일정변형률 압밀시험의 변형률속도 산정에 관한 기초적 연구," 국립 부경대학교 석사학위논문.

채점식, 박형규, 김형건, 이송, (2001), "인공신경망을 이용한 적정 변형속도 산정," 2001 대한토목학회 학술발표회 논문집.

Amour, D. W. and Drnevich, V. P., (1986), "Improved Techniques for the Constant Rate of Strain Consolidation Test, Consolidation of Soils : Testing and Evaluation, STP 892, ASTM, Yong, R. N., Townsend, F. C., Eds., Philadelphia, pp. 170~183.

ASTM D-4186, (1997), "Standard Test Method for One-dimensional Consolidation Properties of Soil using Controlled Strain Loading," ASTM., Vol. 04. 08.

BS 1924, (1990), "Testing Stabilized Soils, HMSO, London.

Hamilton, J. J. and Crawford, C. B., (1959), "Improved Determination of Preconsolidation Pressure of a Sensitive Clay," STP 254, ASTM, pp. 254~271.

Head, K., H., (1988), "Soil Laboratory Testing," Pentech Press London, Vol. 3, pp. 787~796, 1160~1161, 1197~1225.

Janbu, N., Tokheim, O. and Senneset, K., (1981), "Consolidation Tests with Continuous Loading," 10th. International Conference Soil Mechanics and Foundation Eng., Stockholm, vol. 1, pp. 645~654.

Smith, E., R and Wahls, E., Harvey, (1969), "Consolidation Under Constant Rate of Strain," Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 95, No. SM2, Proc. Paper 6452, March, 1969, pp. 519~539.

Wissa, E. A. Z., Christian J. T., Davis, E. H. and Heiberg, S., (1971), "Consolidation at Constant Rate of Strain," Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 97, No. SM10, Proc. Paper 8447, March, 1971, pp. 1393~1447.