

## 2. 一定變位 壓密實驗에 의한 軟弱粘土의 壓密特性 算定

유남재, 박순규, 김영길, 이명욱

# 一定變位 壓密實驗에 의한 軟弱粘土의 壓密特性 算定

유 남 제<sup>1)</sup> 박 순 규\* 김 영 길\*\* 이 명 옥\*\*

## Evaluation of the Consolidational Characteristics of Soft Clay with Constant Strain Rate of Consolidation Test

Nam-Jae Yoo Soon-Gyu Park\* Young-Gil Kim\*\* Myung Wog Lee\*\*

### Abstract

This paper is to evaluate the consolidational coefficient of soft clay by performing a strain controlled test of Constant Rate of Strain Consolidation(CRSC) testing technique. Compared with the conventional consolidation tests, this technique has an advantage of obtaining the coefficients within a short period of times, at most 3-5 hrs.

Parametric experiments were performed by changing initial void ratio of specimen prepared in laboratory, stress histories (normally consolidated and overconsolidated states) and loading rates. Thus, their effects on constitutive relations of void ratio-effective stress-permeability were investigated.

A specially built consolidation ring and kaolinite as a specimen were used to carry out these tests. The method proposed by Wissa et al(1971) was used and programmed to analyze the CRSC testing results and to evaluate the consolidational coefficients.

On the other hand, CRSC testing results were compared with those obtained from conventional step loading test. Therefore, validity of CRSC test was assessed and their differences were discussed.

### 1. 서론

최근들어 국내에서 대규모로 수행되고 있는 간척사업 및 부지조성을 위한 해안매립 사업은 현장의 토질 조건이 대부분 점성토 지반으로 구성되어 있어서, 상부 구조물 및 토류 구조물 설치시 연약지반의 침하에 관련된 문제가 토질공학적인 측면에서 중요 관심사항으로 대두되고 있다.

이와 같이 관심이 고조되고 있는 연약지반에서의 침하량 산정에 관련된 문제중에서 적정한 압밀정수를 결정하는 과정은 매우 중요한 단계로서, 이를 결정하기 위하여 다양한 해석방법 및 실험기법이 제안 사용되어져 왔다.

Terzaghi가 일차원 압밀이론을 바탕으로 한 수학적 모델을 제시<sup>1)</sup>한 이래로 현장에서 발생하는 압밀에 관련된 토질공학적 문제를 해결하기 위하여, 흙의 선형

및 비선형적 거동 여부, 변형률의 크기, 다차원적 압밀문제 등으로 압축 분류하여 많은 연구가 수행되어져 왔다.

Terzaghi의 선형적 압밀이론을 보완하여 흙의 비선형적 거동을 고려한 보다 일반적인 압밀이론이 제안 사용되어 왔다.<sup>2,3)</sup> Biot 와 Rendulic 은 Terzaghi의 일차원적인 압밀이론이 현장 조건과 불일치함에 따라 현장 조건과 일치시키기 위한 다차원적 압밀 이론으로 3차원 압밀이론을 제안하였다.<sup>4,5)</sup> 미소변형률 압밀이론에서는 종래의 고정된 Eulerian 좌표개념을 사용한 반면에 유한변형률 압밀이론에서는 Convective 좌표 또는 축소 좌표를 사용하여 해석을 실시하였다.

압밀실험 장치는 대부분 하중을 점증적으로 단계별로 증가시키면서 압밀을 유도시킴으로서 그와 관련된 압밀정수를 획득하는 단계하중 압밀실험법이 주를 이루었다.

강원대학교 공과대학 토목공학과 조교수

\* 주식회사 인터세크

\*\* 강원대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

이와 같은 단계하중에 의한 실험기법에서는 압밀정수를 구하기 위하여 Curve Fitting 방법이 제안되었는데, 이는  $\sqrt{t}$  법<sup>6)</sup>과 Casagrande의  $\log t$  법<sup>7)</sup>으로 현재 표준압밀실험의 해석기법으로 통용되고 있다. Lowe 등은 배수면에서의 간극수압 수두를 일정하게 함으로써, 즉 일정한 동수구배를 유지시켜 동수구배 차이에 의한 유효응력의 차이에 따라 시료의 압밀을 촉진시켜 압밀정수를 구하는 제어된 동수구배 실험기법(Controlled Gradient Consolidation Testing)을 제안하였다.<sup>8)</sup> 한편, 변위제어식 압밀실험 기법이 Crawford 등에 의하여 최초로 제안되었다.<sup>9)</sup> 이 방법은 일정한 속도로 연직변위를 유발시키고, 그에 따른 연직 전응력과 비배수 경계면에서 발생하는 과잉간극수압의 변화를 측정함으로써 시료에 가하여진 연직 유효응력을 산정하고 그에 대응하는 간극비를 측정함으로써 압밀정수를 계산하는 기법이다. 이러한 일정 변위 압밀실험의 해석기법이 Smith & Wahls 와 Wissa 등에 의하여 제안되었다.<sup>10,11)</sup> 한편, Aboshi 등이 제안한 하중제어식 압밀실험 기법은 일정율로 하중을 증가시킴으로써 압밀을 유도하는 방법이다.<sup>12)</sup> 또한, 1979년 Imai는 시료에 침투압을 유발시켜 침투압에 의한 시료의 압밀을 유도함으로써 압밀정수를 산정하는 기법을 개발하였다.

따라서, 본 연구에서는 연약점토의 일종인 Kaolinite를 시료로 사용하여 여러 가지 종류의 다양한 압밀실험 기법중 Terzaghi가 제안한 단계하중 압밀실험 기법과 Wissa 등이 제안<sup>11)</sup>한 일정변위 압밀실험 기법 및 해석법을 바탕으로 각각의 실험을 수행하고 실험 결과에 따라 압밀정수를 구하여 두 결과를 비교 분석함과 동시에 그의 타당성 및 유효성에 대하여 해석적 고찰을 수행함으로써 비교적 장기간의 시간이 소요되는 단계하중 압밀 실험기법에 비하여 단기간에 실험을 완료시킬 수 있는 일정변위 압밀실험의 유효성을 검증하고자 한다.

## 2. 이론적 고찰

일정변위 압밀실험의 해석과정은 Wissa등이 제안한 방법을 사용하여 해를 구하는 과정으로서 해는 정상상태와 전이상태로 나누고, 흙의 압축특성에 따라 선형 및 비선형 거동을 나타내는 것으로 구분하여 산정하였다.

Wissa 등이 제안한 해석방법은 압밀되는 동안의 연직 변형률이 미소하다는 가정을 토대로 한 일종의 미소 변형률 이론(Infinitesimal Strain Theory)으로써 압밀계수  $C_v$ 는 시료의 깊이 에 따라 일정하다는 가정과 함께 일축압밀조건, 토립자와 간극수의 비압축성, 시료의 완전포화 등의 기본가정을 바탕으로 다음과 같은 압밀지배 방정식을 도입하였다.

$$C_v \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (1)$$

여기서,  $C_v$ 는  $k / \gamma_w \cdot m_v$ ,  $t$ 는 시간,  $z$ 는 시료의 깊이 에 대한 임의점의 연직좌표,  $\varepsilon$ 은 연직변형률,  $k$

는 투수계수,  $\gamma_w$ 는 물의 단위 중량,  $m_v$ 는 체적변형률계수이다.

압밀 지배 방정식에 초기조건 및 경계조건을 대입한 후, 변수 분리법(Separation of Variables)과 Fourier Cosine 급수를 사용하여 다음과 같은 정해를 구하였다.

$$\varepsilon(X, T_v) = rt [1 + F(X, T_v)] \quad (2)$$

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

여기서,  $r = \frac{\Delta H}{H \cdot t}$ 로 단위 시간당 변형률의 변화량이며,  $X, T_v$ 는 각각  $\frac{z}{H}$  및  $\frac{C_v t}{H^2}$ 로 좌표와 시간에 관한 무차원 변수이고,  $H$ 는 시료의 높이를 나타낸다.

상기식 (2)의 오른쪽 항은 두 부분으로 되어 있다. 첫 항은 부하된 평균변형률을 표시한다. 즉, 모든 점에서 변형률이 같다는 것을 의미한다. 한편, 식 (3)의 첫번째 항은 시간에 대한 독립변수로서 정상상태 일때의 평균변형률의 편차를 나타낸다. 이 편차는 일정한 간극수의 흐름을 유발시키기 위한 동수구배가 존재함에 따라 형성되는 부분이다. 식 (3)의 두번째 항은 시간에 대한 종속변수로서 전이상태를 나타내며 실험시작 직후에 발생한 간극수압이 시간경과에 따라 지수함수의 형태로 감소됨을 알 수 있다.

위와 같이 유도된 일정변위 압밀실험 조건의 정해를 사용하여 시료의 압밀특성, 즉 연직유효응력-간극비-투수계수간의 구성식을 정상상태와 전이상태로 구분하여 구하였다.

정상상태의 해는 정해 (2)식에서 시간의 종속함수 부분을 제거함으로써 아래식과 같이 구할 수 있다.

$$\varepsilon(z, t) = rt + \frac{rH^2}{C_v} \left\{ \frac{1}{6} \left[ 3 \left( \frac{z}{H} \right)^2 - 6 \frac{z}{H} + 2 \right] \right\} \quad (4)$$

윗식으로 부터 시료의 상하부에서 발생하는 응력과 변형률의 차이를 알면, 투수계수  $k$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$k = \frac{1}{2} \frac{rH^2 \gamma_w}{u_h} \quad (5)$$

여기서,  $u_h$ 는 시료하단의 비배수면에서 발생하는 간극수압이다.

한편, 시료의 상하단에서 발생하는 전응력 및 유효응력 그리고 간극수압은 실험을 통하여 알 수 있으므로 시료의 상단면을 기준으로 변형률을 알면 압밀계수  $C_v$ 를 얻을 수 있다.

$$C_v = - \frac{H^2 \log \left( \frac{\sigma_{v2}}{\sigma_{v1}} \right)}{2 \Delta t \log \left( 1 - \frac{u_h}{\sigma_v} \right)} \quad (6)$$

여기서,  $\sigma_{v1}$ ,  $\sigma_{v2}$ 는  $t_1$ ,  $t_2$ 에서의 전응력이며  $\Delta t = t_2 - t_1$ ,  $u_h/\sigma_v$ 는  $\Delta t$  동안의 평균값을 사용한다.

만약 시료가 선형 및 비선형적 거동을 나타낼때, 평균 변형률에 상응하는 평균유효응력은 다음과 같다.

$$\text{선형} : \bar{\sigma}_v \text{ ave} = \sigma_v - \frac{2}{3} u_h \quad (7)$$

$$\text{비선형} : \bar{\sigma}_v \text{ ave} = (\sigma_v^3 - 2\sigma_v^2 u_h + \sigma_v u_h^2)^{1/3} \quad (8)$$

전이상태인 경우, 식 (2)의 두번째 항이 임의시간  $t$ 에 대하여 다음과 같은 형태로 바꾸어 쓸 수 있다.

$$\frac{\varepsilon(H, t)}{\varepsilon(0, t)} = \frac{1 + F(1, T_v)}{1 + F(0, T_v)} = F_3(T_v) \quad (9)$$

여기서,  $F_3$  항은 변형률의 비로서 시간계수  $T_v$ 의 함수로 표시된다.

선형적인 거동을 나타내는 시료일때,  $t$  시간 동안의 변형률의 비는 유효응력의 변화에 비례하며 비선형적 거동을 나타내는 시료일 경우 변형률의 비는 유효응력의 대수값에 비례하여 변화한다.

이와같은 해석과정을 토대로 수치해석 기법을 도입한 프로그램을 개발한 후, 점증하중 실험결과와 일정 변형률 압밀실험 결과를 비교 분석함으로써 일정 변형률 압밀 실험결과와의 타당성 및 효율성을 검토하였다.

### 3. 압밀실험

#### 3.1 표준압밀시험

본 실험에 사용된 시료는 경기도 포천군에서 도자기 제작용으로 쓰이는 고풍토상의 Kaolinite 를 채취하여 사용하였다. 본 시료의 토질공학적 특성은 Table 1과 같고 입도분포는 Fig. 1에 도시한 바와 같다.

Table 1. Basic Soil Properties of Kaolinite.

Gs	LL(%)	PL(%)	PI	USCS
2.66	41	30	11	ML

기존의 점증하중법에 의하여 획득한 점토의 압밀특성을 일정변위 압밀실험에서 얻은 결과와 비교 검토하기 위하여 점증하중법을 이용하여 Kaolinite 에 대한 연직유효응력-간극비-투수계수 구성관계 및 압밀계수의 변화에 관한 자료를 획득하였다.

점증하중 실험은 KSF 2316 규정에 의한 표준압밀

실험방법에 의하여 실시하였다<sup>13)</sup>.

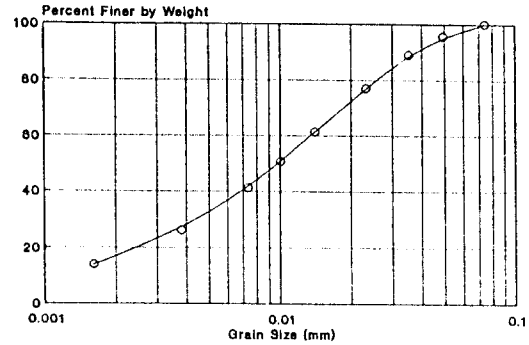


Fig. 1 Grain Size Distribution

실험장치는 강원대학교 토질실험실이 소재하고 있는 6연식 압밀 시험기를 사용하였다. 유효응력-간극비 관계는 압밀실험 결과에서 직접 구하였으며, 간극비 변화에 따른 투수계수의 변화는 변수위 투수실험 및  $\sqrt{t}$  법에 의하여 산정된 압밀계수  $C_v$  값과 투수계수간의 관계식( $k = C_v \cdot m_v \cdot \gamma_w$ )을 사용하여 구하였다. 표준압밀실험 결과에서 얻어진 간극비-유효응력, 간극비-투수계수의 변화 및 유효응력-압밀계수간의 상호관계는 결과분석에서 SDT로 표시하였다.

#### 3.2 일정변위 압밀실험

##### 3.2.1 실험장치

일정변위 압밀실험 수행을 위하여 배압이 가능한 밀폐된 압밀링을 제작하였다. 실험장치는 크게 하중재하장치, 압밀링 및 구속 Cell, 자료수집장치로 구성되어 있다.

시료를 일정한 변위로 압밀을 유발시키기 위한 재하장치는 TaniFugi 사의 삼축압축기를 사용함으로써 재하속도를 변화시키면서 실험을 수행하였다. 본 재하장치의 재하속도는 0.0-0.5 mm/min. 까지 조절할 수 있는 변속장치를 사용하여 연속적으로 변화시킬 수 있으나 0.1 mm/min. 이하의 저속에서는 연직변위가 일정하게 조절되지 않음을 고려하여 최저속도를 0.1 mm/min. 으로 결정하였고, 고속의 재하속도에서는 큰 과잉간극수압의 발생으로 유효한 압밀정수를 구할 수 없는 실험의 한계성에 비추어 최대 재하속도를 0.5 mm/min. 으로 결정하였다.

밀폐된 압밀링 및 구속 Cell을 제작하여 시료의 횡방향 변위를 억제시킴과 동시에 Back Pressure 를 가하여 시료를 완전 포화시킬 수 있도록 하였다. Fig. 2에서 보듯이 Brass로 제작한 압밀링(지름 60 mm, 높이 20 mm)과 같은 직경의 유도링(Guiding Ring)을 결합시킴으로써 편심없이 연직변위를 가할 수 있도록 재하판>Loading Cell)을 설계 제작하였다. 재하판의 하부에는 다공판이 부착되어 있어서 시료의 상단부를 배수 경계면으로 사용할 수 있도록 하였다. 한편, 재하축>Loading Shaft)과 재하판을 고정 연결시킴으로써 초기 간극비가 큰 연약점토에서

재하판에 의하여 침하가 유발되는 것을 방지하도록 하였다. 시료의 저면에는 직경 23 mm의 세립질 다공판을 사용하였고, 이를 간극수압 측정기(Pore Pressure Transducer)에 연결시킴으로서 시료 저면의 비배수 경계면에서 발생하는 과잉간극수압의 변화량을 측정하도록 하였다. 한편, 압밀링은 고강도 알루미늄의 Cell로 밀폐시킴으로서 Back Pressure를 가할 수 있도록 설계 제작하였다.

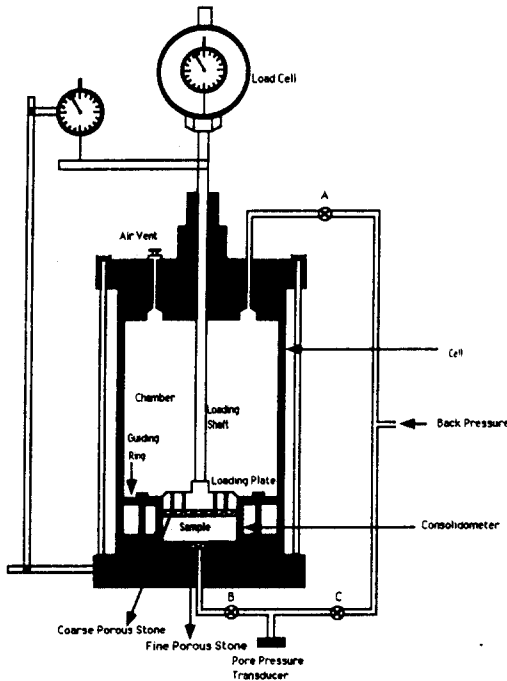


Fig. 2 A Schematic of CRSC Testing Apparatus

재하측은 Proving Ring으로 연결함으로서 일정한 속도로 재하시 시료의 압축에 따라 증가하는 연직 전응력의 변화량을 측정하였으며, 재하측에 수평방향으로 알루미늄판을 부착하고, 그 판위에 Dial Gauge를 설치하여 재하측의 연직 변위량을 측정함에 따라 시료의 압축량을 측정할 수 있도록 하였다.

자료수집장치(Data Acquisition System)는 삼축압축기에 부착되어 있는 장치로서 Proving Ring 으로부터 연직 전응력, 간극수압 측정기로 부터 간극수압의 변화, Dial Gauge 로 부터 측정되는 시료의 연직 변위량에 대한 출력자료를 Strip Chart Recorder 에 자동적으로 기록되도록 하였다.

### 3.2.2 실험내역

비교적 짧은 시간내에 압밀정수를 구할 수 있는 압밀실험 기법인 일정변위 압밀실험에서는 시료의 이력상태, 초기 간극비, 재하속도의 변화에 따라 얻어지는 압밀정수 변화에 대하여 알아보하고자 매개변수적 실험을 수행하여 실험기법의 타당성을 검토하였다.

본 연구에서는 시료중 # 200 체를 통과한 부분에 대하여 재가름을 실시하여 실험을 수행하였다. 시료

는 초기함수비율 약 70-85%로 조절하여 교반기를 사용, 잘 혼합시킴으로써 완전분쇄 및 교반을 실시한 후 2-3일 정도 용기속에 담아 침강시켜 포화도를 증가시킨 후, 실험실시 직전에 비이커에 담아 끓임으로서 시료내의 미세한 공기를 제거하여 포화도를 증가시켰다.

위와 같이 조제된 Slurry 상태의 시료를 압밀링에 직접 투입하여 정규압밀토 상태의 압밀특성을 구하였으며, 과압밀 상태의 압밀특성은 Slurry 상태의 시료를 CBR 몰드에 투입하여 강제적으로 하중을 재하시킨 다음 하중을 다시 제거시킴으로서 과압밀토로 성형시킨 후, 시료를 몰드에서 추출하여 예각의 예리한 Knife 상으로 제작되어 있는 압밀링의 선단부를 추출된 시료에 관입하고 잔여부분을 각음으로서 직경 60 mm, 높이 20 mm의 시료를 성형하였다.

일정변위 압밀실험중 정규 압밀토에 관한 실험에서 시료의 조제는 Slurry 상태의 Kaolinite 를 용기속에 방치시켜 둠으로서 압밀시간 경과에 따라 압밀의 진행에 의해 시료의 간극비가 감소하는 원리를 이용하여 시료의 초기 간극비를 조절하였다. 시료는 초기 간극비의 정도에 따라 느슨한 상태(1.96-2.22), 중간 상태(1.74-1.93) 및 조밀한 상태(1.55-1.65)로 구분하고 각각의 경우에 대하여 재하속도를 0.1 mm/min. 에서 0.5 mm/min. 의 속도로 0.1 mm/min. 씩 증가시키면서 실험을 실시하였다.

한편, 과압밀토에 관한 실험에서의 시료의 조제는 Slurry 상태의 시료를 CBR 시험기의 몰드에 투입한 후 하중을 가함으로써 시료의 압밀 축진을 유도하는 한편, 최종적으로 재하된 연직하중의 크기(과압밀토의 초기 간극비 또는 선행하중)를 변화시켜줌으로서 그에 따른 영향에 관한 연구를 수행할 수 있었다. CBR 시료에 가하여진 연직응력의 크기는 2.8 kg/cm<sup>2</sup>, 5.6 kg/cm<sup>2</sup>, 8.4 kg/cm<sup>2</sup> 이었다.

시료의 이력상태를 실험실에서 재현시키기 위하여 시료를 정규압밀상태와 과압밀 상태로 성형하는 한편, 각 경우에 대하여 시료의 초기 간극비 및 재하속도를 변화시키면서 실험을 수행하였다.

Table 2 와 Table 3은 정규압밀상태 및 과압밀 상태의 시료에 대한 실험내역을 보여준다.

Table 2. Summary of Tests for Normally Consolidated States with Different Initial Void Ratio.

Test Type	Initial Condition	Initial Void Ratio (e <sub>0</sub> )	Initial Water Content (%)	Loading Speed (mm/min)
NCL 1	Loose	2.15	81	0.1
NCL 2		2.22	83	0.2
NCL 4		2.01	75	0.4
NCL 5		1.96	74	0.5
NCM 2		1.93	73	0.2
NCM 3	Medium	1.89	71	0.3
NCM 4		1.74	65	0.4
NCM 5		1.82	68	0.5
NCD 1	Dense	1.55	58	0.1
NCD 2		1.55	58	0.2
NCD 3		1.56	58	0.3
NCD 4		1.60	60	0.4
NCD 5		1.65	62	0.5

Table 3. Summary of Tests for Overconsolidated States with Different of Preconsolidation Pressure.

Test Type	Preconsolidation Pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Initial Void Ratio (e <sub>0</sub> )	Initial Water Content (%)	Loading Speed (mm/min)
OC281	2.8	1.16	44	0.1
OC282		1.15	43	0.2
OC283		1.11	42	0.3
OC284		1.41	53	0.4
OC285		1.10	41	0.5
OC561	5.6	1.08	41	0.1
OC562		1.09	41	0.2
OC563		1.05	40	0.3
OC564		1.01	40	0.4
OC565		1.06	40	0.5
OC841	8.4	0.89	34	0.1
OC842		0.85	32	0.2
OC843		1.08	41	0.3
OC844		0.96	36	0.4
OC845		1.02	38	0.5

### 3.2.3 실험과정

새로이 제작된 일정변위 압밀 시험기를 사용하여 실험을 수행함에 있어서 발생할 수 있는 실험오차를 최소화 시키고 일관성 있는 실험결과를 얻기 위하여 세심한 실험과정을 통하여 실험을 실시하였다. 실험 순서는 크게 시료의 안착 및 실험장치의 결합, 실험 과정, 하중제하단계, 시료제거 및 함수비 측정단계로 구별할 수 있다. 이와 같은 과정을 좀더 자세히 살펴보면 다음과 같다.

1) 시료를 압밀 시험기에 안착시키기 전 단계로서, 간극수압 라인과 압밀링 사이에 위치할 세립질 다공판(Fine Porous Stone)을 완전히 포화시킨다. 이를 위하여 공극이 매우 조밀한 세립질 다공판을 끓는 물속에 집어넣고 공극이 완전히 제거될 때까지 끓인 후에 포화상태를 확인하고 난 다음, 압밀기 저판 중심 고정 흡속에 위치시킨 후 세립질 다공판에 공기가 유입되는 것을 방지하기 위하여 세립질 다공판 표면을 물로 축축히 적셔 놓는다.

2) 제 2단계는 비배수 면에서 발생하는 간극수압이 과잉간극수압 측정장치 이외의 다른 곳으로 새는 것을 방지하기 위한 단계로써 압밀링 저면, 오링 및 오링이 위치할 흡속에 진공 그리스를 발라 압밀링과 압밀링 저판의 흡 사이로 물이 새지 않도록 특히 조심한다.

3) 압밀링 내부 벽면에 실리콘 그리스를 발라 하중이 재하되는 동안 발생할 가능성이 있는 편심으로 인한 벽면 마찰을 최대한으로 감소시킨다.

4) 준비된 시료를 압밀링에 안착시킨 후, 그 위에 물로 적신 여과지를 올려 놓고 유도링을 끼운 다음 3개의 조정나사를 완전히 잠근다.

5) 하중축을 내려 조립질 다공판(Coarse Porous Stone)과 압밀링이 최대한 접근하도록 하중축을 내린 상태에서 압밀시험기의 상판과 Chamber 그리고

저판(각 연결 부위에 진공 그리스를 바름)을 결합한다.

6) Back Pressure 시스템을 이용하여 구속용력을 가하는 단계로서 ①, ②, ③ 밸브 및 압밀시험기 상판에 있는 air cock 를 모두 열고 작은 압력(보통 0.1-0.2 kg/cm<sup>2</sup>)으로 Chamber 안을 물로 충만시킨다.

7) Chamber 내에 물이 찬 것을 확인한 후에 air cock 만 잠그고 압력을 원하는 만큼(보통 4-6 kg/cm<sup>2</sup>) 증가시켜 구속용력을 주는데, 이 때 시료를 완전 포화시키기 위하여 ①, ②, ③ 밸브를 모두 열고 하루 정도 물로 순환시킨다.

8) 연직변위를 측정하기 위하여 1개의 선형전압 변위 측정기를 설치하고, 연직 전용력을 측정할 수 있는 Proving Ring 및 비배수면에서 발생하는 과잉간극수압을 측정하기 위한 간극수압 측정기를 설치한 후, 이들 장치를 모두 자동입력 기록장치에 연결시킨다.

9) 하중을 재하하기 전에 시료저면의 비배수 면에서 발생하는 과잉간극수압을 측정하기 위하여 ③ 밸브를 잠근다.

10) 주어진 변위로 압밀을 실시한다.

11) 실험이 종료된 후 압밀링에서 시료를 추출하여 건조기에 넣고 24 시간 경과한 후에 무게를 측정하여 초기 함수비를 산정한다.

## 4. 결과분석

### 4.1 정규 압밀토

정규압밀토 시료의 초기 간극비에 따라 다음과 같이 세가지의 경우로 나누어 실험을 실시하였다. 즉, 시료의 초기 간극비가 비교적 큰 경우(Normally Consolidated Soil with Loose Void Ratios ; NCL), 중간상태(Normally Consolidated Soil with Medium Void Ratios ; NCM) 및 조밀한 상태(Normally Consolidated Soil with Dense Void Ratios ; NCD)로 분류한 후, 각각의 경우에 대하여 재하속도를 0.1-0.5 mm/min까지 0.1 mm/min 씩 증가시키면서 정규 압밀 상태에서 연직점토의 초기 간극비 및 재하속도 변화에 따른 압밀정수 변화에 대하여 연구를 실시하였다.

Fig. 3은 NCL 실험결과에서 얻은 간극비-연직유효용력 관계를 나타낸 것이다. Fig.에서 보는 바와 같이 재하속도를 변화시키면서 실험을 실시한 경우, 비교적 작은 연직유효용력(0.4 kg/cm<sup>2</sup> 이하, 대응하는 간극비 e=1.5 이상) 하에서는 분산된 실험결과를 보이거나 연직유효용력이 증가하면서 C<sub>c</sub> 값(NCL1=0.25, NCL2=0.29, NCL4=0.35, NCL5=0.3)이 수렴되는 현상을 보이고 있다. 이와 같이 초기 간극비가 큰 시료를 사용할때 측정되는 전용력 및 과잉간극수압은 매우 작은 값을 나타내었다. 그러므로, 압밀링과 시료사이에서 유발되는 마찰력, 재하축과 cell 사이의 마찰력 등이 측정되는 전용력 및 비배수면에서 유발되는 과잉간극수압에 예민하게 영향을 미치는 것으로 판단된

다. 따라서 등속의 재하에 따라 시료의 압축이 진행되면서 발생하는 전응력이 지수함수의 형태로 급격히 증가함으로써 그의 영향이 감소되어 마찰력에 의한 실험오차의 영향이 감소되는 것으로 판단된다. 이로 인해 발생하는 실험오차를 감소시키기 위하여 시료의 직경을 증가시킴으로써 해소될 수 있다. 한편, NCL2, NCL4, NCL5의 실험결과의 곡선에서 나타나는 변곡점의 발생 역시 같은 영향의 결과로 생각된다.

한편, 재하속도가 빠를수록 분산된 실험결과를 보여 주는데, 이는 재하속도가 빠를수록 전이상태 (Transient State)에서 정상상태 (Steady State)에 도달하는데 걸리는 시간이 길게 되어 일관성 있는 실험결과, 즉 일정한  $C_c$  값을 갖기 위한 유효응력의 크기가 증가됨을 알 수 있다. 또한, 재하속도가 증가할수록  $C_c$  값이 증가하는 결과를 보여주고 있다. 이는 재하속도가 증가할수록 시료의 연직유효응력의 증가 속도가 시료의 연직변형을 증가속도에 비하여 느림을 나타낸다. 재하속도가 빠를수록 비배수면에서 높은 과잉간극수압이 발생하여 연직유효응력이 작게 산정되므로 작은  $C_c$  값이 산정됨을 알 수 있다. 만일 재하속도가 무한히 클 경우에는 비배수 상태가 되어 유효응력-간극비 관계식을 구할 수 없으며 재하속도를 최대한 느린 속도로 적용할 경우, 즉 과잉간극수압의 발생이 없을 때에는 측정된 전응력 값이 유효응력이 되므로 간극비-유효응력의 유효한 관계식을 얻을 수 있다. 따라서 재하속도를 최대한 느린속도로 가하는 것이 타당한 방법이 될 수 있으나 느린 재하 속도에 따라 장기간의 실험시간이 소요되므로 단기간에 실험결과를 얻을 수 있는 일정 변위 압밀실험이 지난 장점을 고려하면, 본 실험의 효율성이 문제시 된다. 따라서 적정의 실험속도 선택이 중요한 변수임을 알 수 있다.

한편, 표준압밀 실험결과와 일정 변위 압밀 실험결과를 비교하여 보면 표준압밀실험에서 연직유효응력이  $1 \text{ kg/cm}^2$  이하인 경우에는  $C_c$  값이 0.32 이며  $2 \text{ kg/cm}^2$  이상의 응력 범위에서는 0.35 값을 나타낸다. 이는 표준압밀실험 결과가 일정변위 압밀실험 결과에 비하여 연직유효응력이 비교적 작은 경우에는 유사한 값을 보이나 연직유효응력이 클 경우에는  $C_c$  값이 일정변위 실험결과에 비하여 큰 값으로 나타났다. 이와 같은 현상은 이차 압밀량의 효과에 기인된 것으로 보인다. 즉, 일정변위 압밀실험에서는 실험이 비교적 단기간에 완료되므로 연약점토에서 이차 압밀량의 효과가 내포되어 있지 않은 반면에 표준압밀실험에서는 각 하중단계에 대하여 24 시간 재하가 요구되므로 과잉간극수압이 완전 배제되어 일차 압밀이 완료된 후 발생하는 이차압밀에 의한 간극비의 감소가 포함되므로 주어진 연직유효응력의 변화에 대하여 큰 변형률이 산정되기 때문이다.

한편, 표준압밀실험에서 연직하중이 클 경우에 시간 경과에 따른 침하량에 관한 자료를 분석해 본 결과, 이차 압밀량이 일차 압밀량과 같은 크기임을 알 수 있었다. 따라서 이차 압밀량 효과가 큰 연약점토, 대체적으로 소성지수가 큰 시료에 대하여는 표준압밀실험 결과와 일정변위 압밀실험 결과가 불일치를 보일 가능성이 있음을 알 수 있다. 한편, 설계시 일정변위

압밀실험결과를 사용하게 되면 2차 압밀량의 효과가 포함되지 않기 때문에 현장조건 보다 작은 압밀침하량의 산정 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

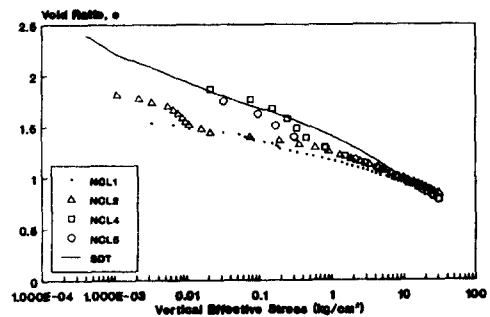


Fig. 3  $e-\sigma_v'$  Relation for NCL.

Fig. 4는 NCL 실험에서 획득한 간극비 변화에 따른 투수계수의 산정 결과를 도시한 것이다. Fig. 3의 유효응력-간극비 관계에 나타난 바와 같이 간극비가 큰 경우에는 분산된 결과를 보이나 간극비가 작아질수록 수렴하는 경향을 보이고 있다. 대체적으로 주어진 간극비에 대하여 재하속도가 빠를수록 투수계수가 작게 산정됨을 알 수 있다. 이는 재하속도가 빠를수록 큰 과잉간극수압이 발생하여 작은 투수계수가 산정된 결과로 판단된다. 이를 표준압밀실험 결과와 비교한 결과 전반적으로 주어진 간극비에 대하여 일정 변위 압밀실험 결과에서 얻은 투수계수가 큼을 알 수 있다.

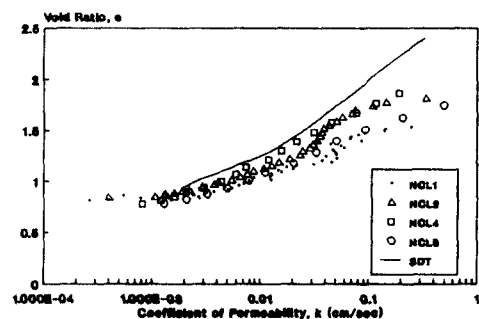


Fig. 4  $e-k$  Relation for NCL.

Fig. 5는 연직유효응력의 변화에 따른 압밀계수  $C_v$ 를 나타낸 것으로 연직유효응력의 변화에 따라 대체적으로 일정한  $C_v$  값을 보여줌을 알 수 있다. 한편, 재하속도의 변화에 대하여 재하속도가 증가할수록  $C_v$  값이 감소함을 알 수 있다. 이는  $C_v = k/m_v \gamma_w$  이므로 주어진 연직유효응력에 대하여 재하속도가 증가할수록  $m_v$  값이 증가(Fig. 3에서  $C_c$  값이 증가)하며  $k$  값이 감소(Fig. 4 참조)함에 기인하는 것으로 판단된다. 한편, 표준압밀실험 결과와 비교할 때, 일정 변위 압밀실험에서 얻은  $C_v$  값이 대체적으로 작은 값이 산정되고 있다. 이는 주어진 간극비에 대하여 표준압밀실험에서 얻은  $m_v$  값이 일정변위 압밀실험 결과에서 얻은 값보다 크게 산정되고  $k$  값이 작게 산정된 결과이다.

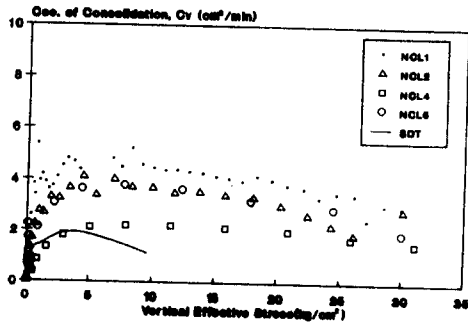


Fig. 5  $\sigma'_v - C_v$  Relation for NCL.

그러므로 일정변위 압밀실험 결과를 바탕으로 현장 조건하의 지반의 압밀침하량 및 압밀도 산정시 적은 압밀량과 빠른 압밀도의 산정 결과를 얻을 수 있다.

일련의 NCM 실험에서는 NCL 실험에 비하여 시료의 초기 간극비 상태를 약간 조밀하게 하여 실험을 실시하였다. Fig. 6은 유효응력-간극비 관계를 나타낸 것으로 Fig. 3의 NCL 실험결과와 매우 근접한 결과를 보여준다. 초기 간극비가 큰 상태, 즉 연직유효응력이 작은 경우에는 실험결과가 분산을 보일과 동시에 하중이 증가하여 압밀이 진행될수록 유효응력-간극비 곡선이 수렴됨을 알 수 있다. NCL 실험결과와 비교하여 연직유효응력이 작은 경우에 시료의 분산이 적음을 알 수 있다. 초기 간극비가 감소할수록 압밀링에서 유발되는 마찰력의 영향에 의한 실험오차가 감소됨을 알 수 있다. 따라서 초기 간극비가 큰 매우 연약한 시료의 실험에서는 큰 압밀링의 사용이 필수적임을 알 수 있다.

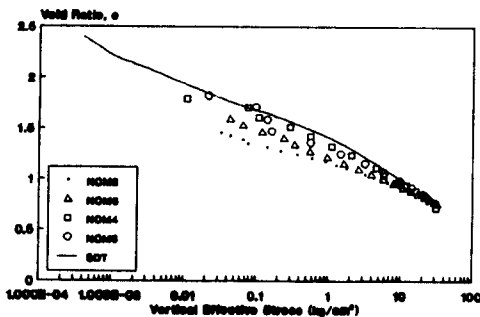


Fig. 6  $e - \sigma'_v$  Relation for NCM.

Fig. 7 및 Fig. 8은 NCM 실험의 간극비-투수계수 관계와 연직유효응력 변화에 따른 압밀계수의 변화를 나타낸 것으로 전반적으로 NCL 실험결과와 같은 경향을 보이나 실험결과와 분산이 적음을 알 수 있다.

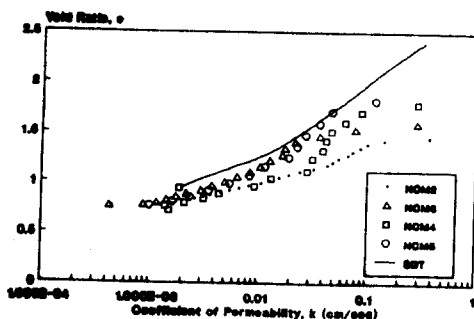


Fig. 7  $e - k$  Relation for NCM.

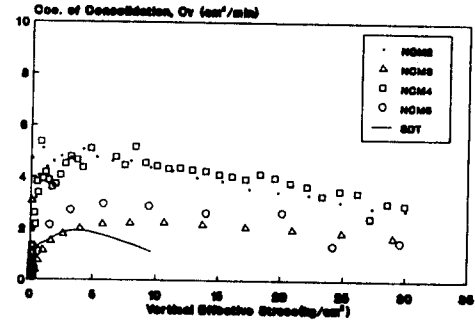


Fig. 8  $e - \sigma'_v$  Relation for NCM.

한편, 정규압밀상태에서 시료의 초기 간극비를 비교적 조밀하게 하여 일련의 NCD 실험을 실시하였다.

Fig. 9, 10, 11은 각각 간극비-연직유효응력, 간극비-투수계수, 연직유효응력-압밀계수의 변화를 나타낸 것이다. NCL실험에 비하여 매우 일관성 있는 실험 결과를 보여주고 있다. 이와 같은 일련의 초기 간극비가 비교적 큰 Slurry 상태의 정규 압밀토를 사용하여 일정변위 압밀실험시에 시료의 초기 간극비에 따른 일관성 있는 실험결과와 획득 여부가 중요한 변수가 됨을 알 수 있으며, 재하속도는 크게 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

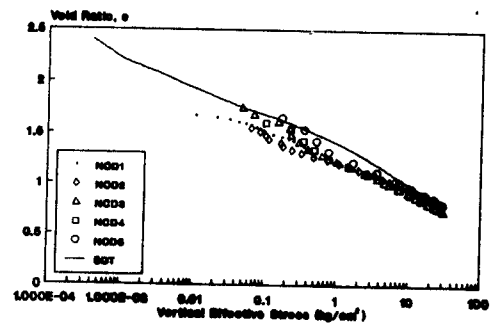


Fig. 9  $e - \sigma'_v$  Relation for NCD.

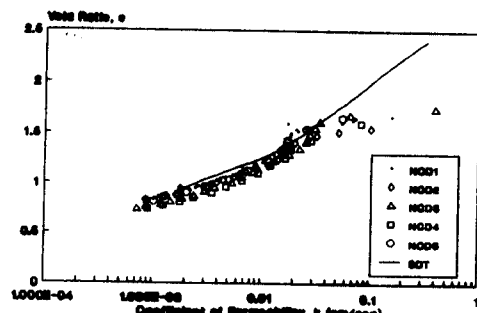


Fig. 10  $e - k$  Relation for NCD.



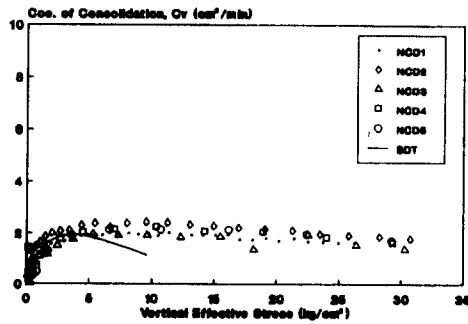


Fig. 11  $\sigma_v' - C_v$  Relation for NCD.

#### 4.2 과압밀토

과압밀토 실험에서는 압밀실험전의 Kaolinite의 응력상태를 과압밀토 상태로 유지하기 위하여 완전분쇄 및 교반된 Slurry 상태의 시료를 CBR 시험기 몰드에 투입하여 수조안에 방치한 후 하중을 점차적으로 가함으로써 시료의 압밀을 유도하고 최종적으로 가해지는 선행하중의 크기를 변화시켜 CBR 몰드에 가해진 선행압밀하중이 2.8 kg/cm<sup>2</sup> (Over Consolidation : OC28), 5.6 kg/cm<sup>2</sup> (Over Consolidation : OC56), 8.4 kg/cm<sup>2</sup> (Over Consolidation : OC84)인 시료를 다시 하중을 제거함으로써 과압밀토로 성형시킨 후 CBR 시험기 몰드에서 추출하여 선단부가 예각의 Knife 상으로 제작되어 있는 압밀링에 관입시켜 직경 60 mm, 높이 20 mm의 시료를 성형한 후 각각의 시료에 대하여 하중재하 속도를 0.1 - 0.5 mm/min 까지 0.1 mm/min 씩 변화시킴으로써 과압밀 상태하의 연약점토의 재하속도 변화에 따른 일정변위 실험 실시 후의 압밀 정수 변화에 대한 연구를 실시하였다.

Fig. 12는 일련의 OC28 실험결과에서 하중속도를 변화시켰을 때 구한 유효응력-간극비의 변화상태를 보여준다. OC284 실험결과를 제외한 모든 실험결과에서 선행하중  $\sigma_o = 2.8$  kg/cm<sup>2</sup> 을 중심으로 현저한  $C_c$  값의 변화가 있음을 알 수 있다.  $\sigma_o < 2.8$  kg/cm<sup>2</sup> 의 응력범위에서는 과압밀토 상태임을 나타내며  $\sigma_o \geq 2.8$  kg/cm<sup>2</sup> 에서는 정규 압밀토 상태임을 알 수 있다. 비교적 초기 간극비가 작은 상태에서 압밀실험이 수행되었으므로 정규압밀토 실험에서와 같이 실험결과에 분산이 적음을 알 수 있고, 재하속도의 변화에 따라  $C_c$  값에 미치는 영향이 적음을 알 수 있다. 이는 정규 압밀토인 경우에 비하여 과압밀토에서는 초기간극비 상태에서 발생하는 과잉간극수압의 증가속도가 전응력의 증가속도에 비하여 작아서 과잉간극수압의 변화가 유효응력의 변화량에 미치는 영향이 적은 것에 기인한다. 한편, 표준압밀실험 결과와 비교할 때 일정변위 압밀실험의 정규압밀곡선이 표준압밀 실험 결과에 수렴하고 있음을 알 수 있다.

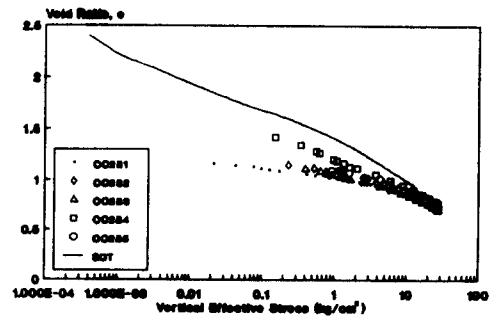


Fig. 12  $e - \sigma_v'$  Relation for a Soil with 2.8 kg/cm<sup>2</sup> of Preconsolidation Pressure.

Fig. 13은 간극비-투수계수 관계를 나타낸 것으로 실험결과가 매우 일관성 있음을 알 수 있다. 정규압밀토 실험결과와 투수계수-간극비 구성관계와 비교하여 볼 때, 주어진 간극비에 대하여 동일한 투수계수 값을 보여주고 있음을 알 수 있다. 따라서 투수계수는 시료가 정규 압밀토 또는 과압밀토와 무관하게 간극비의 함수로 표시할 수 있음을 나타낸다.

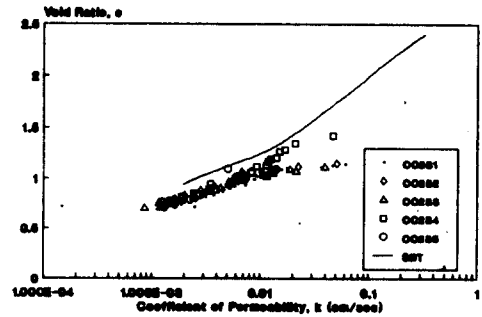


Fig. 13  $e - k$  Relation for a Soil with 2.8 kg/cm<sup>2</sup> of Preconsolidation Pressure.

Fig. 14는 연직응력 변화에 따른 압밀계수의 변화를 나타낸 것으로서 전체적으로 일정한 압밀계수값을 나타내나 연직유효응력이 증가할 수록  $C_c$  값이 미소하게 감소하는 경향을 보인다. 이는 연직유효응력의 증가에 따라 투수계수( $k$ )와 체적변화율( $m_v$ )은 동시에 감소하나 체적변화율 감소속도에 비하여 투수계수의 감소속도가 큰 것에 기인한다. 한편 정규압밀상태의 압밀계수 값과 비교할 때 갖는 범위의 일정한 압밀계수를 보여주고 있다.

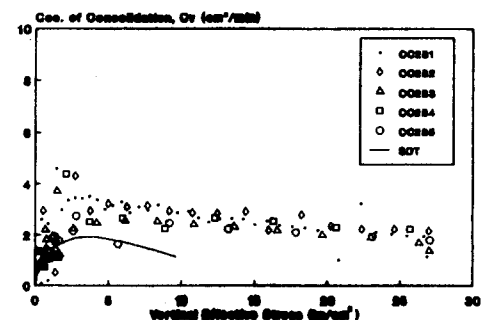


Fig. 14  $\sigma_v' - C_c$  Relation for a Soil with 2.8 kg/cm<sup>2</sup> of Preconsolidation Pressure.

Fig. 15는 OC56 실험중 간극비 변화에 따른 연직유

효용력의 변화를 나타낸 것으로 연직유효응력이 5.6 kg/cm<sup>2</sup> 을 전후하여 C<sub>c</sub> 값이 변화하고 있음을 알 수 있다.

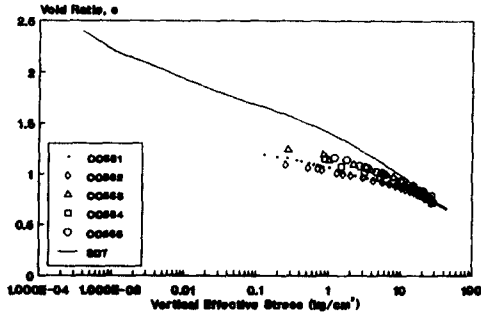


Fig. 15.  $e-\sigma'_v$  Relation for a Soil with 5.6 kg/cm<sup>2</sup> of Preconsolidation Pressure.

Fig. 16과 Fig. 17은 간극비-투수계수와 연직유효응력-압밀계수의 변화를 나타낸 것으로 전반적으로 재하속도가 증가함에 따라 투수계수값이 감소하며 압밀계수가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 현상은 재하속도 증가에 따라 발생하는 과잉간극수압의 증가율이 커짐에 따라 투수계수 및 압밀계수가 작게 산정된 결과이다. 따라서 과압밀토에서 압밀계수의 산정은 재하속도에 따른 과잉간극수압의 전응력의 크기와 더불어 과잉간극수압과 전응력의 증가비율이 미치는 영향이 큼을 알 수 있다.

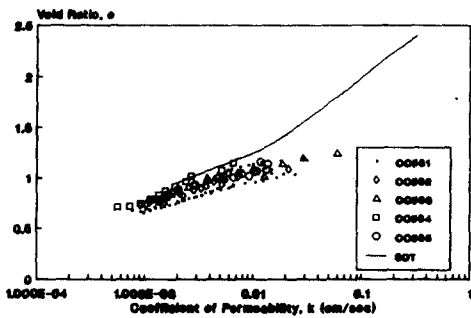


Fig. 16  $e-k$  Relation for a Soil with 5.6 kg/cm<sup>2</sup> of Preconsolidation Pressure.

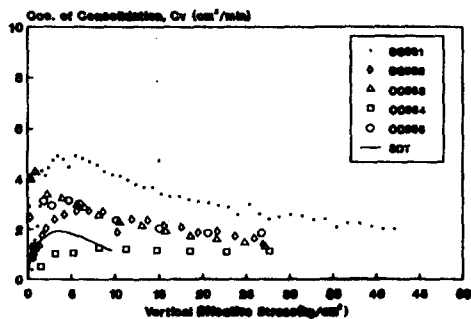


Fig. 17  $\sigma'_v-C_v$  Relation for a Soil with 5.6 kg/cm<sup>2</sup> of Preconsolidation Pressure.

Fig. 18은 OC84 실험결과중 간극비-유효응력 관계를 나타낸 것으로 대부분의 응력상태가 과압밀토 상태에 있음을 알 수 있다. 이는 실험중 연직 전하중과 과잉간극수압이 매우 빠른 속도로 증가함에 따라 Proving Ring의 용량 한계성 때문에 실험을 중단하

여 유효응력이 12 kg/cm<sup>2</sup> 범위 이내에서 실시된 결과이다. 선형하중이 커서 과압밀비가 큰 과압밀토의 경우에 초기 간극비가 비교적 작은 관계로 하중재하에 따라 과잉간극수압의 발생속도가 큼을 알 수 있었다. 따라서 OC28 실험결과에 비하여 비교적 일관성 없는 실험결과를 얻을 수 있었다. 재하속도에 따라서 대응하는 유효응력 값이 큰 값으로 변화하고 있으며 재하속도가 클 수록 과잉간극수압의 발생속도가 크므로 연직유효응력이 작게 산정되어 C<sub>c</sub> 값이 크게 산정됨을 알 수 있었다.

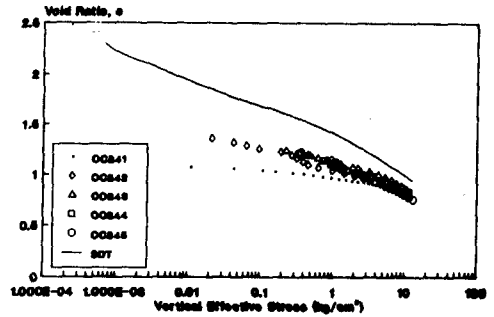


Fig. 18  $e-\sigma'_v$  Relation for a Soil with 8.4 kg/cm<sup>2</sup> of Preconsolidation Pressure.

이와 같은 현상은 초기 간극비가 비교적 큰 정규압밀토에서의 유사한 실험결과를 보여준다. 따라서 초기간극비가 조밀한 시료에 대하여 재하속도에 미치는 영향이 큼을 알 수 있다.

Fig. 19는 간극비 변화에 따른 투수계수 값의 변화를 나타낸 것으로 OC28 실험결과에 비하여 주어진 간극비에 대하여 투수계수 값이 작게 산정되었음을 알 수 있다. 이는 과잉간극수압 발생률이 크게 되어 투수계수 값이 작게 산정되었으며 그와 같은 영향이 Fig. 20에서 알 수 있듯이 연직유효응력-압밀계수 관계에서 보여진다. 투수계수 값이 작게 산정됨에 따라 압밀계수가 다른 실험결과에 비하여 작은 값으로 산정됨을 알 수 있다.

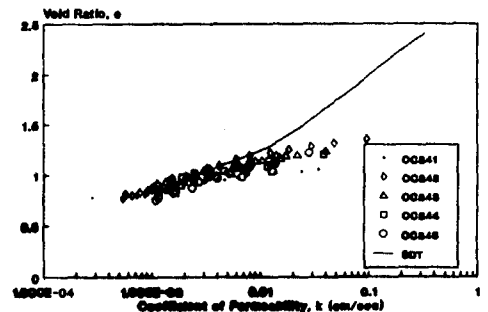


Fig. 19  $e-k$  Relation for a Soil with 8.4 kg/cm<sup>2</sup> of Preconsolidation Pressure.

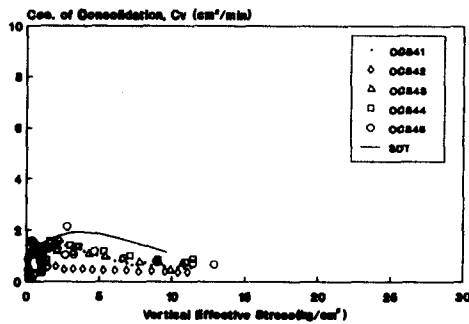


Fig. 20  $\sigma_v'$ - $C_v$  Relation for a Soil with 8.4  $\text{kg/cm}^2$  of Preconsolidation Pressure.

## 5. 결론

짧은 시간에 연약 점토의 압밀특성을 구하기 위하여 Kaolinite를 사용하여 시료의 초기간극비, 용력이력, 재하속도를 변화시키면서 일정변위 압밀실험을 수행한 후, Wissa 등이 제안한 해석기법을 도입하여 실험결과를 분석하고 그 결과를 표준압밀 실험결과와 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 일정변위 압밀실험에서 시료의 초기 간극비, 용력 이력 상태에 관계없이 재하속도가 증가할수록  $C_v$  값이 증가하며 투수계수가 감소하여  $C_v$  값이 감소되는 경향이 있다.
2. 동일한 재하속도하에서 시료의 초기 간극비가 압밀정수 산정에 미치는 영향은 작으나 초기 간극비가 클수록 압밀링과 시료사이 유발되는 마찰 효과에 따른 실험오차를 유발할 수 있다.
3. 과압밀토 시료 사용시, 정규압밀토 시료에 비하여 일관성 있는 간극비-유효용력-투수계수 관계를 얻을 수 있었다.
4. 일정변위 압밀실험 결과를 표준압밀실험 결과와 비교한 결과, 표준압밀실험에 비하여 일정변위 압밀실험에서 작은  $C_c$  값과 큰  $C_v$  값이 산정되어 설계시 적은 침하량과 빠른 압밀도가 산정될 수 있다.

### 감사의 글

본 CRSC 실험장치 제작에 힘써 주신 동명기술단의 유건선 상무님과 삼보 컨트롤의 이종인 사장님께 깊이 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Terzaghi, K., and Frohlich, O. K., "Theorie der Sitzung von Tonschichten", Ein Einfuhrung in die Analytische Tonmechanik, Deuticke,

Leipzig(1936)

2. Davis, E. H., and Raymond, G. P., "A Non-Linear Theory of Consolidation", Geotechnique, 15, pp. 161-173(1965)
3. Schiffman, R. L., and Gibson, R. E., "Consolidation of Nonhomogeneous Clay Layers", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 90(SM5), Proceedings Paper 4043, pp. 1-30(1964)
4. Biot, M.A., "Le Probleme de la Consolidation des Matieres Argileuses sous une Charge", Annales de la Societe Scientifique de Bruxelles, Series B, 55, pp. 110-113(1935)
5. Rendulic, L., "Porenziffer und Porenwasserdruck in Tonen", Der Bauingenieur, 17(51/53), pp.559-564(1936)
6. Gilboy, G., "Improved Soil Testing Methods", Engineering News-Record, May 21(1936)
7. Taylor, D. W., "Research on Consolidation of Clay", Massachusetts Institute of Technology, Serial 82(1942)
8. Lowe, John, III, Jonas, E., and Obrcian, V., "Controlled Gradient Consolidation Test", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 95(SM1), Proceedings Paper 6327, pp.77-97(1969)
9. Crawford, C. B., "The Influence of Rate of Strain on Effective Stresses in Sensitive Clay", ASTM, Special Technical Publication No.254, pp.36-61(1959)
10. Smith, R. E., and Wahls, H. E., "Consolidation Under Constant Rates of Strain", Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 95(SM2), Proceedings Paper 6452, pp. 519-539(1969)
11. Wissa, A. E. Z., Christian, J. T., Davis, E. H., and Heiberg, S., "Analysis of Consolidation at Constant Strain Rate", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 97(SM10), Proceedings Paper 8447, pp. 1393-1413(1971)
12. Aboshi, H., Yoshikuni, H., and Maruyama, S., "Constant Loading Rate Consolidation Test", Soils and Foundations, 10(1), pp. 43-56(1970)
13. 유남재, 정윤화, 이명옥, "Column Test를 통한 연약점토의 자중압밀 특성에 관한 실험적 수치적 연구", 대한토목학회, 학술발표회 개요집(I), pp. 473-476(1992)