

# 변형률속도에 따른 일정변형률시험의 압밀특성 비교연구

## A Study of Consolidation Characteristics of Constant Rate of Strain Consolidation tests with Rates of Strain

장 병 옥(서울대) · 차 경 섭\* (서울대) · 원 정 윤(서울대)

Chang, Pyoung Wuck · Cha, Kyung Seob · Won, Jeong Yun

### Abstract

This study was performed to establish the characteristics of constant rate of strain consolidation(CRSC) tests. The values obtained by the CRSC tests were compared with oedometer tests. From the comparison of the results of oedometer and CRSC tests for soft soil from Haenam, Korea, it was concluded that.

1. When rate of strain is 0.9mm/hr, compression curve of CRSC test was not coincided with those of the oedometer test, then preconsolidation stress was larger than those of other rates of strain.
2. Permeabilities from CRSC tests and direct measurements were about same each other, but permeabilities from Oedometer tests were lager than those from others.

### I. 서론

압밀해석을 위한 실험은 지금까지 주로 Terzaghi의 연구에 바탕은 둔 전통적인 표준압밀시험에 의존해 왔다. 대부분의 시험실에서 표준압밀시험을 수행하고, 또 그 데이터를 해석하기 위하여 표준절차를 이용한다. 일반적으로 하중증가비는 1을 적용하며, 시간침하곡선을 얻기 위하여 24시간 재하시험을 실시한다. 그리고, 그것으로부터 압밀계수  $C_v$ 를 계산한다<sup>1)</sup>. 하지만, 이러한 절차를 따를 경우 약 2주간의 시간이 소요되며, 경계조건을 다양하게 변화시키기 힘들며, 다양한 하중조건을 반영시키기에는 부족한 면이 많은 것이 사실이다. 또한, 이 장치에서 응력상태에 따른 투수계수를 측정하기 위해서는 별도의 시험장치를 장착해야 하는 불편함이 있다.

1960년대 말 표준압밀시험을 대신할 새로운 압밀시험방법이 개발되었다. Lowe 등은 일정하중 재하시험(Constant Rate of Loading test)을 제안하였고, Crawford 등은 일정변형률시험(Constant Rate of Strain test)을 제안하였으며<sup>1)</sup>, 그외에도 동수경사제어시험(Controlled Gradient test)등이 제안되었다<sup>2)</sup>. 그 중에서 일정변형률시험이 가장 널리 사용되고 있다. Rowe Cell 압밀시험장치는 다양한 경계조건이 구현이 가능하며, 짧게는 24시간 안에 압축성에 관한 실험을 끝낼 수 있을 정도로 빠른 실험이 가능하며, 연속적인 자료를 얻을 수 있다. 또한 응력상태에 따른 투수성의 변화를 직접 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그런데, 일정변형률시험은 표준압밀시험에 비해 경계조건 및 하중조건이 다르므로, 새로운 해석법이 요구되었으며,

1998년도 한국농공학회 학술발표회 논문집 (1998년 10월 24일)

Crawford(1959)등에 의해 제안된 후 Smith(1969), Wissa(1970), Yoshikuni(1995)등에 의하여 발전해왔다.

국내에서는 유(1993)<sup>3)</sup>등에 의해서 소개된 바 있으며, 최근 점차 사용이 많이 되고 있는 추세이나, 일정변형률시험에 의한 결과를 표준압밀시험결과와 비교하고 그 변형률속도에 따른 각종 지수들의 변화에 대한 국내의 연구는 거의 없는 상황이다.

본 연구에서는 해남 해성점토에 대해 일정변형률 속도시험에서 변형률속도의 압축성 및 투수성에 미치는 영향과 각종지수들의 변화 그리고, 투수계수를 직접 측정하여 표준압밀시험결과와 비교하여 일정변형률압밀시험(Constant Rate of Strain Consolidation Test, CRSC)의 특성을 고찰하고자 한다.

## II. 재료 및 시험방법

### 2.1 재료 및 시험장치

본 연구에 사용된 시료는 전라남도 해남군 해남간척지의 내부개답지에서 채취한 불교란 시료이다. 시료의 물성치는 Table 1과 같고, 시료에 대한 입도분석 결과는 Fig. 1과 같다.

Table 1 Physical Properties of HaeNam soil

Depth(m)	2~3
$G_s$	2.653
$W_n(\%)$	54.41
$LL(\%)$	44.26
$PR(\%)$	21.21
U.S.C.S.	CL

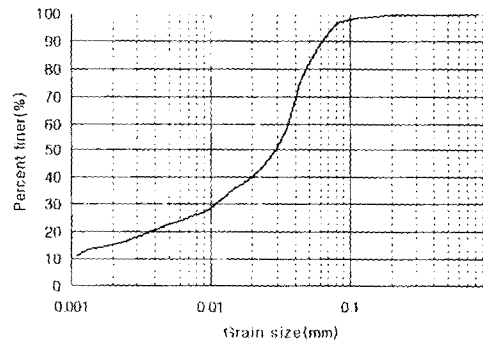


Fig. 1 Particle Size Distribution Curve

본 연구에서는 Rowe Cell 압밀시험장치의 일종인 GDS type의 압밀시험기를 사용하였다. Fig. 2는 압밀시험기에 대한 개략도이다. 본 시험장치는 수압으로 Diaphragm에 하중을 가하는 방식이며, 배수를 조절할 수 있으며, 하부에 설치된 간극수압계를 통하여 압밀도중에 간극수압을 측정할 수 있다. 또한, B값이 일정해질 때까지 축차 배압을 가하거나 압밀을 시작하기 전에 가한 유효응력을 조절하여 포화시킬 수 있으며, 초기의 낮은 압력단계를 포함하여 미세한 하중조절이 쉬운 장점이 있다.

GDS type의 시험기를 사용한 CRSC(Constant Rate of Strain Consolidation) 시험에서, 압밀링의 직경은 63.5mm이고, 높이는 19.1mm였다. 디지털 서보제어장치를 갖춘 모터를 사용하는 재하 시스템으로 임의의 변형률속도(Rate of Strain)를 시료에 가할 수 있었다.

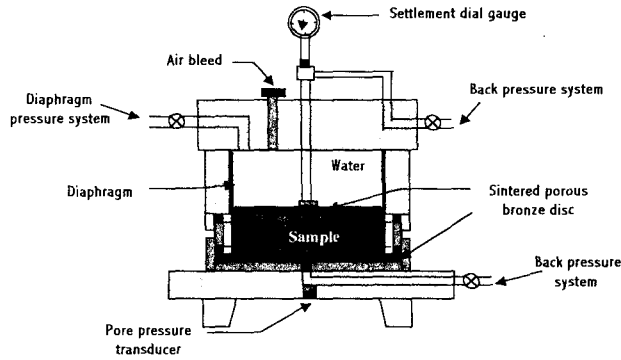


Fig. 2. Schematic diagram of Rowe Cell(GDS-type) apparatus.

## 2.2 시험방법

모든 시험에서 포화를 위해 100kPa의 배압을 가하였다. 본 연구에서는 변형률 속도에 따른 일정 변형압밀시험의 압축성 및 투수성을 살펴보고자, 변형률 속도를 각각 0.5, 0.7, 0.9mm/hr로 3단계로 변화시키면서 시험을 수행하였다. 표준압밀시험과 그 결과들을 비교하고자, 하중비 1, 재하시간 24시간으로 하여 표준압밀시험을 수행하였다.

또한, 압밀시험중에 투수계수를 직접 측정하여 이론적인 일정변형률속도 압밀시험 및 표준압밀시험의 투수계수와 비교하고자 하였다. 이때 투수계수 측정방식은 표준압밀시험과 동일하게 각 하중단계마다 일정변형률압밀시험을 중단시킨 후, 그 응력상태를 유지시키면서 Fig. 2에서처럼 두 개의 배압밸브를 통하여 하단에서 상단으로 동수경사를 주어 투수계수를 측정하였다. 투수계수는 다음으로부터 계산하였다.

$$k = \frac{L}{AH_L} \frac{Q_2 - Q_1}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

여기서,  $A$ 는 시료의 단면적이며,  $L$ 은 시료의 높이이고,  $H_L$ 은 공시체를 통한 정수두 손실이며,  $Q$ 는 경과시간  $t$ 동안 유출량이다. 직접투수계수 측정에서 27~72범위에 있는 동수경사의 값으로, 1시간동안 측정하였으며,  $Q-t$ 관계는 선형적이었다.

Fig. 3에 변형률 속도가 0.5mm/hr인 경우를 예를 들어 유량과 시간과의 관계곡선을 표시하였다.

직접 측정한 투수계수와 비교를 위하여 CRSC 시험에서는 시료바닥의 간극수압을 측정하여 Yoshikuni(1995)<sup>4)</sup>등이 제안한 이론적인 식(2)에 의해서 투수계수를 계산하였다.

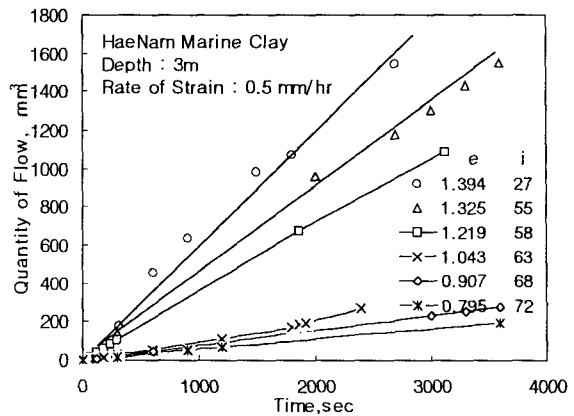


Fig. 3. Constant-head Permeability tests

$$k = \frac{\gamma_w L}{2u'_b} \frac{\Delta L}{\Delta t} \quad (2)$$

여기서,  $L$ 은 시료의 높이이고,  $\Delta L$ 은 높이의 변화량,  $\gamma_w$ 는 물의 단위중량,  $u'_b$ 는 과잉간극수압,  $\Delta t$ 는 시간의 변화량이다. 그리고, 표준압밀시험에서는  $\sqrt{t}$  법을 이용하여 구한 압밀계수를 사용하여 투수계수를 계산하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 3.1 변형률속도에 따른 압축성 및 투수성의 변화

일정변형률 압밀시험에서 변형률 속도에 따른 압축성 및 투수성의 변화양상을 살펴보았다. Fig. 4는 표준압밀시험과 변형률 속도를 변화시켜가면서 일정변형률 압밀시험을 수행한 결과를 비교한 것이다. Fig. 4에서 변형률 속도가 0.9mm/hr인 경우에는 오른쪽으로 이동하였음을 알 수 있다. 이는 변형률 속도가 빠를수록 소성저항이 증대되기 때문이다. Fig. 5는 변형률 속도에 따른 투수계수와 직접 측정된 투수계수 그리고 표준압밀시험에서 계산한 투수계수를 나타낸 것이다. 역시, 변형률 속도가 증가할수록 투수곡선은 왼쪽으로 이동하였다. 이는 변형률 속도가 증가할수록 시료의 바닥에서 발생하는 과잉간극수압의 증가속도가 커지기 때문에 결과적으로 낮은 투수계수를 나타내게 되는 것이다.

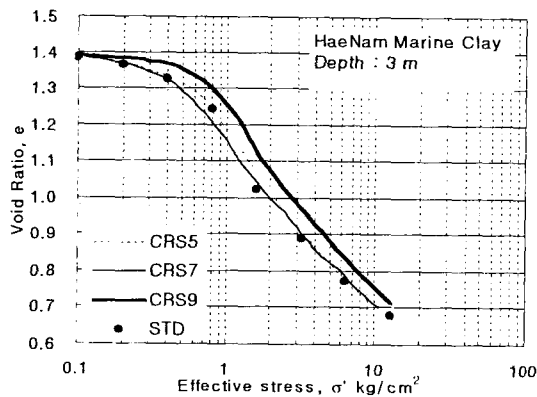


Fig. 4. Compressibility curves from CRSC tests and Oedometer tests

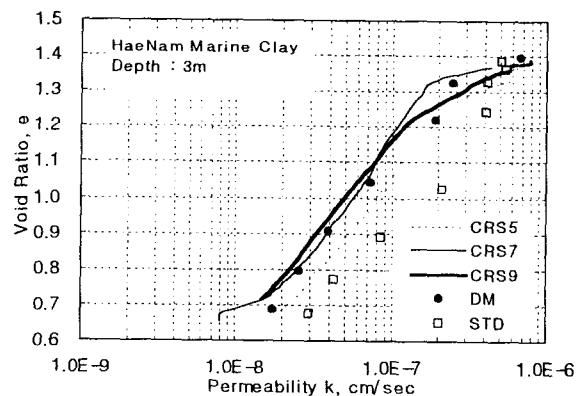


Fig. 5. Permeability curves from CRSC, Oedometer(STD) tests and direct measurements(DM)

또한, 표준압밀시험에 의한 투수계수와 직접측정된 투수계수 및 CRSC 시험후 식(2)에 의하여 계산한 투수계수는 두드러진 차이를 나타내었다. 즉, 표준압밀시험에서 계산에 의하여 구한 투수계수 값이 과다하게 계산됨을 알 수 있었다.

### 3.2 간극비-투수계수 관계

위의 Fig. 5에서처럼 직접 측정된 투수계수 값은 식(2)에 의한 값과 거의 유사하게 나타났다. Mesri(1994)등에 의하면 일정변형률 압밀시험에서 이론식에 의한 투수계수와 정수두 투수시험 및 변수두투수시험에서 구한 투수계수의 값이 일치한다고 하였으나, 본 실험에서는 조금의 차이가 나타났다. 변형률 속도가 0.5mm/hr인 경우, 직접 측정된 투수계수와 일정변형률압밀시험 및 표준압밀시험에 따른 투수계수의 차이를 Fig. 6에 나타내었다. 직접 측정된 투수계수의 값이 가장 작았고, 표준압밀시험에서 간접적으로 구한 투수계수의 값이 가장 컸다. 이는 Yoshikuni(1995)등이 주장한 바와 동일하다.

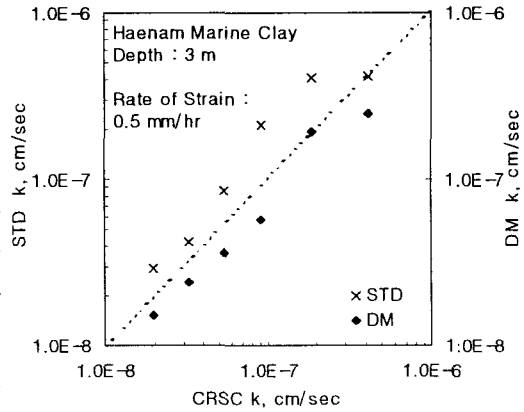


Fig. 6. Permeability from CRSC compared to DM and STD

### 3.3 선행압밀하중 및 압밀계수

본 연구에서는 변형률 속도에 따른 각종 지수들의 변화양상을 살펴보기 위하여 압축지수 ( $C_c$ ), 압밀계수 ( $C_r$ ), 선행압밀하중 ( $P_c$ ), 투수지수 ( $C_k$ )등을 구하여 Fig. 7에 나타내었다.

압축지수는 주어진 범위에서는 변형률 속도에 관계없이 약 0.45로 거의 동일하였으나, 변형률 속도가 더 커질수록 감소할 것이다. 투수지수는 변형률 속도가 증가할수록 감소하였으며, 따라서, 압밀계수의 지표인  $\frac{C_c}{C_k}$  값은 변형률 속도가 증가할수록 증가하는 양상을 나타내었다. 또한, 선행압밀하중은 작은 변형률속도의 범위에서는 두 값이 거의 동일하나 큰 변형률 속도에서는 그 값이 증가함을 보였다.

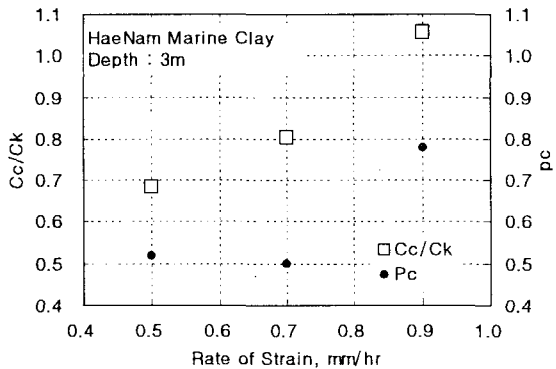


Fig. 7. Preconsolidation stress and  $C_c/C_k$  with rates of strain

## IV. 결론

전라남도 해남간척지에서 채취한 불교란 시료를 사용하여 일정변형률압밀시험과 표준압밀시험 그리고, 직접 투수시험을 수행하였으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 일정변형률압밀시험의 압축곡선은 변형률 속도가 낮은 경우에는 표준압밀시험과 동일하나, 변형률 속도가 큰 0.9mm/hr의 경우에는 오른쪽으로 이동하였다.
2. 주어진 변형률 속도조건 하에서 낮은 변형률속도하에서는 선행압밀하중이 약 0.5 kg/cm<sup>2</sup>로 일정하였으나, 0.9mm/hr의 변형률 속도로 재하하는 경우에는 0.78 kg/cm<sup>2</sup>으로 증가하였다.
3. 정규압밀 영역에서, 변형률 속도가 증가함에 따라서 압축지수는 거의 일정하였으나, 투수지수는 일정하게 감소하여  $\frac{C_c}{C_k}$ 는 증가하는 양상을 띠었다.
4. 변형률 속도가 증가할수록 동일한 간극비에 대하여 투수계수는 감소하였으며, 표준압밀시험에서 구한 투수계수는 일정변형률압밀시험에서의 투수계수보다 큰 값을 나타내었다.
5. 0.5mm/hr인 경우 CRSC 시험에서 계산에 의해 구한 투수계수와 직접 측정된 투수계수와 매우 일치하였으며, 직접 측정된 값이 조금씩 작은 값으로 나타났다.

## 참고문헌

1. Wissa, A. E. Z., Christian, J. T., Davis, E. H., Heiberg, S., 1969, "Consolidation at Constant Rate of Strain," Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE., Vol., No., pp.1393-1413
2. Lowe III, John, Jonas, Ernest, Vladimir Obrician, "Controlled Gradient Consolidation test", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE., 1969, pp.77-97.
3. 유남재외 3인, "일정변위 압밀시험에 의한 연약점토의 압밀특성 산정", 한국지반공학회 준설·매립 위원회 학술발표집 제2집, 1993년 11월, pp.20-29
4. Yoshikuni, H. , Moriwaki, T. , Ikegami, S. ,& Xo, T. , 1995, "Direct determination of permeability of clay from constant rate of strain consolidation tests" , Compression and Consolidation of Clayey soils, pp.609-614
5. Smith, Ronald E. , Wahls, Harvey E. , "Consolidation under constant rates of strain", 1971, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division Proceeding of the American Society of Civil Engineers, pp.519-539
6. Mesri, G., Feng, T.W., Ali, S., Hayat, T.M., 1994, "Permeability Characteristics of soft clays", XIII ICSMFE, New Delhi, India, pp.187-192