

# 투수 및 압축에 대한 연약 점토지반의 물질함수 특성

## Characteristics of Material Function Related to Permeability and Compressibility for Soft Clay Ground

이 승\*      전 제 성\*\*      이 장 덕\*\*\*  
Lee, Song      Jeon, Je-Sung      Yi, Chang-Tok

### Abstract

It's essential process to study non-linear material function related to characteristics of compressibility and permeability when we predict the consolidation behavior of soft clay ground. In this study, laboratory tests were conducted to find out the material function using marine clay. Standard oedometer test and Rowe cell test were performed with conditions, which were classified into vertical drainage only, radial drainage only and vertical-radial drainage case. Modified oedometer test equipment was developed to find out the material function and special extrusion device was originated to minimize the sample disturbance effect. Reliability of the results in modified oedometer test could be confirmed by comparing with the Rowe cell's one. Effective stress - void ratio - permeability relations were analyzed using all testing results. As a result, void ratio with effective stress level could be expressed by the power function and permeability with void ratio could be expressed by exponential function. In soft clay with high initial water content and low shear strength, non-linear characteristics related to compressibility and permeability varied with wide range by the effective stress levels. It's important to note that non-linearity of the material function should be considered at prediction of the consolidation behavior.

### 요 지

연약점토지반의 압밀거동 예측시, 압축성과 투수성에 대한 비선형 물질함수 특성을 규명하는 것은 가장 중요하며 기본적인 선행 연구내용이라 할 수 있다. 본 연구에서는 압축성과 투수성에 대한 물질함수 특성을 파악하기 위해 해상점토를 이용한 실내 시험을 실시하였다. 실내시험은 수직배수조건 및 수평배수조건, 수직·수평배수조건으로 구분하되 표준압밀 시험과 로우셀 시험등을 실시하였다. 수평배수조건에 대한 물질함수 특성을 파악하기 위한 개량 표준압밀 시험장치를 개발하였으며, 시료교란영향을 최소화하기 위한 별도의 시료추출장치를 고안하였다. 또한 로우셀 시험결과와의 비교를 통해, 시험법에 있어 비교적 간편한 개량 표준압밀 시험결과와의 신뢰도를 확인할 수 있었다. 모든 시험결과를 통한 유효응력-간극비-투수계수등에 관한 물질함수 특성을 분석한 결과, 유효응력 단계별 간극비 분포는 누수함수의 형태로 표현될 수 있으며, 간극비 단계별 투수계수는 지수함수의 형태로 표현됨을 확인할 수 있었다. 초기 함수비가 높고 전단강도가 작은 연약점토의 경우, 유효응력단계별 압축성과 투수성의 비선형성이 매우 크게 나타났으며, 연약 점토지반의 압밀현상 예측에 있어 이러한 비선형성은 무시할 수 없는 큰 영향요소를 알 수 있었다.

**Keywords :** Material function, Permeability, Compressibility, Non-linearity

**핵심 용어 :** 물질함수, 투수성, 압축성, 비선형성

\* 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 교수

\*\* 정희원, (주)두우건설엔지니어링, 기술연구소, 부장

\*\*\* (주)두우건설엔지니어링, 기술연구소, 소장

E-mail : jesungjeon@hanmail.net 017-234-6697

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2004년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.



이 지역은 연약층의 심도가 약 20m~40m에 달하며, 원지반의 초기 함수비가 50%~80% 정도의 연약 점토로 구성되어 있다. 다양한 조건의 시험을 수행하는데 있어, 시험대상 시료의 균질성을 확보하고 충분한 양의 시료를 확보하기 위하여 한 채취지점에서 깊이별로 연속된 시료를 채취하였다.

사용 시료에 대한 토성시험 결과는 Table 3과 같고 비중계 시험에 의한 입도 분포 곡선은 Fig. 2와 같다.

Table 3 Properties of Po-hang clay used in the test

Gs	LL(%)	PL(%)	PI	#200 통과율(%)	USCS
2.70	62±3	30±2	32±3	99	CH

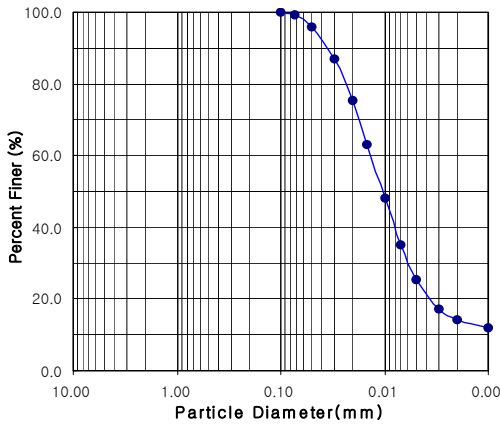


Fig. 2 Particle size distribution curve

### 2.3 수직배수 조건에 대한 표준압밀 및 로우셀 시험

재성형 시료에 대한 표준압밀시험은 초기 함수비를 66.5, 76.4, 85.5, 92.5, 98.1% 로 조정하여 시험을 실시하였다. 초기 함수비를 달리하여 시험을 실시한 이유는, 각 유효응력별 혹은 다양한 간극비 상태별 압축성과 투수성의 변화를 파악하기 위해서이다. 고함수비의 재성형시료는 aging effect가 발견되지 않은 상태에서 전단강도를 거의 기대할 수 없기 때문에 시험상에서의 최대 초기 함수비는 100%를 넘기지 못하였다.

유효응력별 간극비와 투수계수 관계를 살펴보는데 있어 기존의 표준압밀시험에 비해 다양하고 정밀한 시험이 가능한 로우셀 압밀시험 및 투수시험을 실시하였다.

Fig. 3은 로우셀 시험기의 개요도를 나타내며, Fig. 4는 로우셀 시험기의 주변 장치를 나타낸다. 그림에서 보듯이, 로우셀 시험기는 크게 셀상부와 셀몸체, 셀하부로 구성되어 있다. 시험에 사용된 셀은 직경이 150mm이며 diaphragm을 통해 유입된 수압에 의해 등변형률 또는 자유변형률 조건에 대한 압밀압을 줄 수 있고, 배수는 셀하부의 중앙에서 0.55R 되는 지점에 있는 ceramic insert를 통해 이루어지게 된다. 또한 이곳은 시료의 포화를 위한 back pressure system 및 압밀진행중의 체적변화를 측정할 수 있는 volume change gauge와 연결되어 있다.

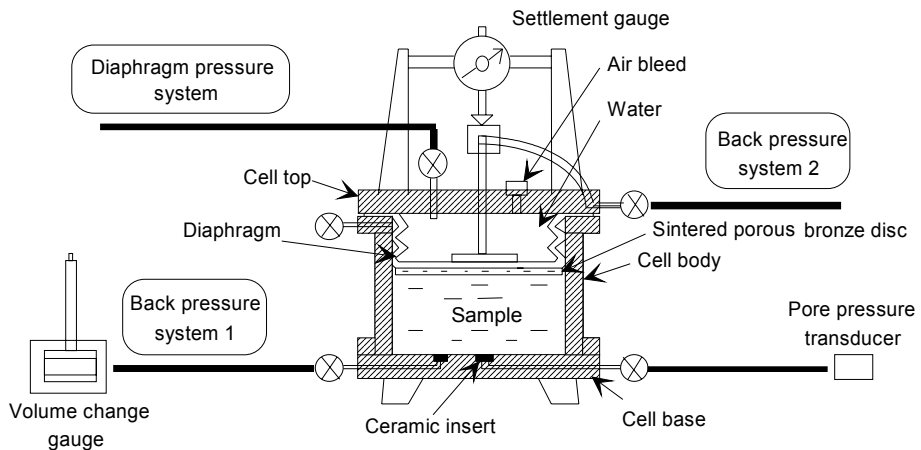


Fig. 3 Main features of 150mm diameter Rowe cell

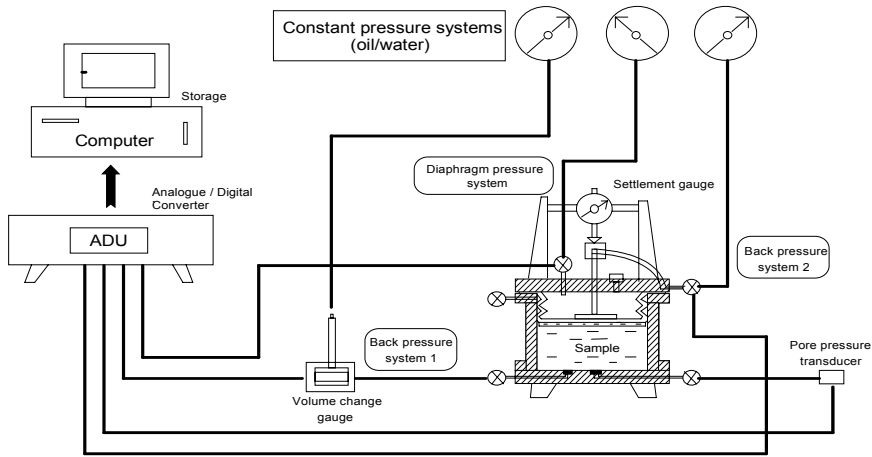


Fig. 4 General arrangement of ancillary equipment used with rowe cell

셀하부의 중앙 지점은 pore pressure transducer와 연결이 되어 있으며 이를 통해 압밀중 시료내부에 발생하는 간극수압을 측정할 수 있다.

로우셀 시험기에 의한 압밀시험 및 투수시험과정을 살펴보면 다음과 같다. 우선 재성형 시료를 셀안으로 투기하기 전, 셀물체와 셀하부를 tie bolt로 연결하여 조립하고, 압밀시 벽면마찰을 최소화하기 위하여 셀측벽에 그리스를 발라준다. 이때 모든 연결 라인의 공기는 제거된 상태가 되어 하며 각종 밸브를 또한 닫은 상태를 유지시킨다. 시료를 어느 정도 투기한 후, 시료 안에 포함되어 있는 공기를 제거하기 위하여 진공압을 가하게 된다. 시료의 투기는 시험높이에 해당하는 시료를 한번에 투기하는 것이 아니라, 적당히 등분된 시료를 단계적으로 투기하게 되며 각 투기 과정마다 위에서 언급한 공기제거 과정을 거치게 된다. 공기가 제거된 시료에 대해서 초기 함수비와 간극비를 측정하였으며, 그 상태에서 일단 투수시험을 먼저 실시하였다. 투수시험이 종료된 후에 다시 압밀시험을 실시하였으며, 시험중 측정된 volume change 값을 이용하여 압밀이 종료된 후의 간극비를 산정하였다. 또한 그 상태에서 다시 투수시험을 실시하게 되는데, 이러한 방식으로 하중 단계를 높이며 압밀과 투수시험을 반복하여 수행하였다. 초기 함수비 86.2%, 98.6%에 대한 압밀 및 투수시험을 실시하였으며 시료의 초기높이는 45mm로 하였다.

#### 2.4 수평배수 조건에 대한 개량 압밀시험장치

기존의 표준압밀시험은 수직방향으로의 1차원적 배수조건에 대한 시험이다. 그러므로 압밀계수나 투수계수같은 압밀시험 결과는 시료의 수직방향 특성을 나타내게 된다. 수평방향 압밀특성을 알아보기 위해 널리 이용되는 실내시험으로는 로우셀 시험을 들 수 있으나, 로우셀 시험기를 이용한 수평배수 압밀시험 및 투수시험은 그 시험법과 결과분석에 있어 많은 어려움을 요하는 것이 사실이다.

본 연구에서는 수평방향의 압축특성 및 투수특성을 파악하기 위하여 기존의 표준압밀시험기를 개량한 표준압밀 시험장치를 제작하였으며 그 형태는 Fig. 5와 같다.

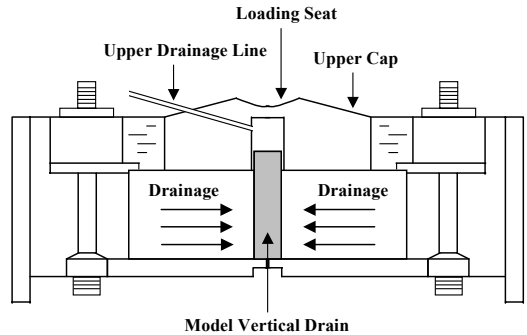


Fig. 5 Schematic layout of developed apparatus

이 장치는 Onoue에 의해 처음 고안되어 이용되었는데, Onoue는 이 장치를 이용하여 수평방향 압밀계수 및 연직배수재의 타설로 인한 교란영역의 수평방향 투수계수에 관한 연구를 수행하였다. 고안된 장치의 압밀셀은 기존의 표준압밀시험기와 동일한 크기이며, 시료 중앙부로의 수평배수를 유도하기 위하여 다공질의 모형 배수재를 별도로 제작하였다. 고안된 수평배수 압밀시험 장치는 전체적으로 상부캡과 중앙의 모형 배수재 두 부분으로 이루어져 있다. 상부캡은 압밀중 모형 배수재의 관입을 유도할 수 있도록 중앙부에 원형의 홀이 있으며, 모형 배수재로 유도된 간극수에 의한 압력생성을 방지하기 위하여 별도의 배수라인을 설치하였다.

모형 배수재는 직경의 크기를 각각 7.3mm, 11.5mm, 14.3mm로 달리하여 제작하였는데, 이는 수평배수 시험조건 중 직경비를 달리한 경우의 수평방향 압밀특성을 알아보기 위함이다. 고안된 수평배수 압밀시험 장치를 이용하여 수평배수에 의한 압밀시험을 실시하였다. 압밀시험조건 및 시험방법은 기존의 표준압밀시험 방법과 동일하게 실시하였으며, 동일한 시료를 이용한 수직배수 표준압밀시험을 동시에 실시하여 압축특성 및 투수특성과 관련된 시료의 이방성에 대해 알아보았다. 수평방향 압밀계수는 1947년 Barron의 수평배수 압밀이론에 기초한 시간계수  $T_{50}$  및  $T_{90}$  값을 이용하여 산정하였다. Fig. 6은 시료의 직경  $d_e$ 와 연직배수재의 직경  $d_w$ 의 비에 따른 시간계수  $T_{50}$  및  $T_{90}$  값을 나타내며, 이 때의 수평방향 압밀계수는 식 (1)과 같이 표현된다.

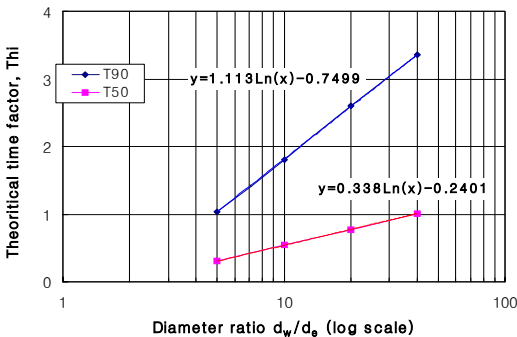


Fig. 6 Theoretical time factors with radially-inward drainage for  $\frac{d_e}{d_w}$  range

$$C_{hi} = \frac{0.131 d_e^2 T_{50}}{t_{50}} \quad m^2/year \quad (1)$$

식 (2)와 식 (3)은 각 직경비별 시간계수에 대한 회귀분석 결과를 나타내는데, 본 연구에서는 시료의 크기와 모형 배수재의 크기에 대한 직경비를 구한 후 이에 대한 시간계수 값을 위 식으로 구해 최종적인 수평방향 압밀계수를 산정하였다. 시료의 압밀현상을 살펴볼 때, 배수는 3차원적으로 발생하지만 그로인한 시료의 변형은 1차원적으로 발생하므로 수평방향 투수계수는 수평방향 압밀계수를 이용하여 직접 구할 수 있다. 한편, 본 장치를 이용한 모든 결과를 로우셀 시험기에 의한 결과와 비교해 보았다.

$$T_{90} = 1.113 \ln\left(\frac{d_e}{d_w}\right) - 0.7499 \quad (2)$$

$$T_{50} = 0.338 \ln\left(\frac{d_e}{d_w}\right) - 0.2401 \quad (3)$$

여기서,

$T_{90}, T_{50}$  : 시간계수

$d_e$  : 시료의 직경

$d_w$  : 연직배수재의 직경

## 2.5 수평배수 조건에 대한 로우셀시험

로우셀에 의한 수평배수 압밀시험 및 투수시험은 기본적으로 수직배수의 경우와 동일한 방법으로 시험을 실시하였다. 그러나 수직배수의 경우는 사용된 시료조건이 현장상태의 불교란 시료가 아닌 재성형 시료인 관계로 직경 150mm의 셀을 사용했으나, 수평배수의 경우, 원지반의 불교란 시료에 대한 시험을 위하여 직경 75mm의 셀을 사용하였다. 수평배수를 유도하기 위한 연직배수재는 시료의 중앙부에 설치하였는데, 일단 제작한 커팅링을 이용하여 시료 중앙부에 홀을 형성한 후 이곳에 연직배수재를 설치하였다. 배수재로는 주문진 표준사를 사용하였고, 커팅링에 의해 형성된 홀에 표준사를 자유낙하시키는 방법으로 연직배수재를 설치하였다.

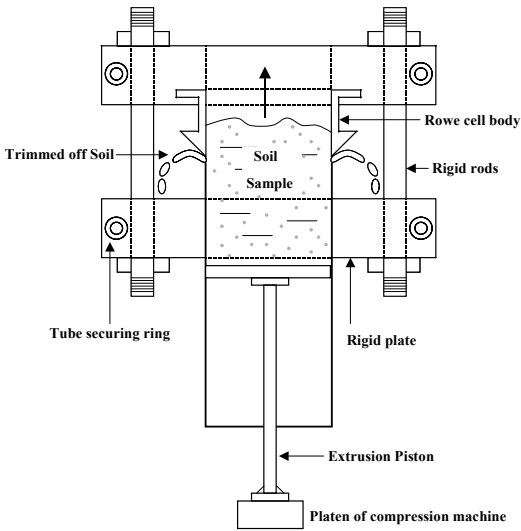


Fig. 7 General arrangement of an extrusion device

한편, 현장에서 채취한 시료를 실험실에서 추출하고 이를 로우셀 시험기의 셀에 안치시키는 과정에서 시료의 교란이 발생할 수 있다. 이러한 과정에서의 시료교란을 최소화하기 위하여 Fig. 7과 같은 별도의 시료 추출기를 제작하였다.

로우셀 압밀시험과 투수시험은 일단 시료의 초기상태에서 포화과정을 거친후 투수시험을 먼저 실시하였다. 투수시험이 종료된 후에 다시 압밀시험을 실시하였으며, 시험중 측정된 volume change 값을 이용하여 압밀이 종료된 후의 간극비를 산정하였다. 또한 그 상태에서 다시 투수시험을 실시하게 되는데, 이러한 방식으로 하중 단계를 높이며 압밀과 투수시험을 반복하여 수행하였으며 이는 수직배수의 경우와 동일하다.

### 3. 물질함수 구성관계

#### 3.1 응력-변형 관계

1967년 Gibson, England, Hussey등에 의해 처음으로 소개된 비선형 유한변형을 압밀이론과 기존 압밀이론의 가장 큰 차이점은 각 유효응력 단계별 지반의 압축성과 투수성의 변화를 고려한 것이다. 즉, 이들은 유효응력과 간극비의 관계는 유일한 함수형태를

갖는다는 기존의 연구결과 및 자신들의 연구결과를 바탕으로, 각 유효응력 단계별 간극비와 투수계수를 구하였고 이를 압밀현상 예측에 이용하였다. 이러한 관계를 설명하는데 있어 이들은 material function이라는 용어를 사용하고 있는데, material function이라는 것은 간극비 및 유효응력, 투수계수간의 비선형성을 고려한 상호 관계식을 의미한다.

기존의 Terzaghi 압밀이론에서는 간극비와 유효응력간의 관계를 압축계수  $a_v$ 로 표현하였는데, 일정한 전응력하에서는 압밀진행과정에 관계없이 고정된 상수로 그 값을 가정하였다. 그러나 실제 간극비 단계별 압축성을 나타내는 압축계수는 고정된 상수가 아닌 비선형성을 띠고 있으며, 지반의 초기함수비가 높을수록 그 비선형성이 증가된다는 사실이 기존의 여러 문헌 및 연구결과를 통해 발표되었다.

Gibson et al.(1981)은 간극비와 유효응력의 관계를 일정한 함수형태로 나타내는 대신 비선형 계수  $g$ ,  $\lambda$ 를 통해 간극비와 유효응력간의 비선형적 관계를 압밀해석에 도입하였다. 그러나 비선형 계수 역시 고정된 상수가 아니며 유효응력 단계에 따라 그 비선형성이 상당히 크게 변화하는 변수이므로, 유효응력 단계에 따른 적정 비선형 계수의 추정 및 간극비와 유효응력간의 비선형성을 압밀예측에 충분히 반영하기 위해서는 간극비와 유효응력의 관계를 일정한 함수형태로 표현하는 것이 필요하다.

간극비와 유효응력의 관계에 대한 기존의 연구결과를 살펴보면, Carrier, Beckman(1984)는 식 (4)와 같이, Sunara(1984)는 식 (8)과 같은 간극비-유효응력의 관계를 제안하였다.

$$e = a \cdot \left( \frac{\sigma'}{p_o} \right)^\beta + \varepsilon \quad (4)$$

여기서,  $a$ ,  $\beta$ ,  $\varepsilon$  : 경험상수

$$a = 0.0208 \cdot I_p(1.192 + A^{-1}) \quad (5)$$

$$\beta = -0.143 \quad (6)$$

$$\varepsilon = 0.027 \cdot w_p - 0.0133 \cdot I_p(1.192 + A^{-1}) \quad (7)$$

여기서,  $I_p$  : 소성지수

$w_p$  : 소성한계

$A$  : 활성도

$$e = \frac{A + B (\ln \sigma')}{1 + C (\ln \sigma') + D (\ln \sigma')^2} \quad (8)$$

여기서,  $A, B, C, D$  : 회귀분석 계수

한편 Schiffman(1981)등은 유효응력과 간극비의 관계를 구하기 위해 다양한 실내시험을 실시하였는데, 회귀분석 결과 지수함수 형태로 이들의 관계를 표현하는 것이 가장 근사적으로 이들의 비선형적 관계를 표현하는 것임을 제안하였으며, 이와 아울러 압밀이 진행되기 전의 간극비 및 압밀이 종료된 상태에서의 간극비를 통해 이들의 관계를 표현할 수 있는 경험식을 식 (9)와 같이 제안하기도 하였다.

$$e = (e_{\infty} - e_0) \exp(-\lambda \cdot \sigma') + e_0 \quad (9)$$

기존의 각종 연구결과 및 본 연구에서 실시한 실내 표준압밀시험과 로우셀시험의 결과로부터 간극비와 유효응력의 관계는 유일한 함수로 나타낼 수 있다는 것을 알았으며, 본 연구에서는 이를 근거로 하여 간극비와 유효응력의 관계를 식 (10)과 같은 누승함수 형태로 표현하여 비선형 압밀거동 예측에 이용하였다.

$$e = A_{coe} \cdot \sigma'^{-B_{coe}} \quad (10)$$

여기서,

$A_{coe}, B_{coe}$  : 실내 압밀시험에서 구한 계수값

### 3.2 변형-투수계수 관계

간극비와 유효응력간의 관계가 유일한 함수형태로

표현될 수 있다면, 투수계수와 간극비 및 유효응력의 관계도 유일한 함수형태로 표현될 수 있다. Terzaghi의 압밀이론에서는 투수계수와 간극비 관계를 임의의 전응력하에서 일정하다고 가정하였는데, 기존의 연구결과 및 본 연구에서 실시한 실내시험결과에 의하면 간극비 단계에 따른 투수계수는 상당한 비선형성을 보임이 입증되었다. 특히 초기 지반상태가 매우 연약한 즉, 고함수비의 상당히 큰 간극비를 나타내는 경우에 있어서는 투수계수의 비선형성이 매우 크게 증가함을 알 수 있다. 이는 시간에 따른 압밀현상을 예측하는데 있어 매우 중요한 사항으로서, 압밀 초기부분에서는 압밀이 어느정도 진행된 부분에 비해 매우 빠른 압밀도 증가를 보인다는 사실을 의미하는 것이다.

Fig. 8은 Raymond와 Michaels, Lin등에 의해 발표된 간극비별 수직방향의 투수계수 값을 나타내고 있다. 결과에서 알 수 있듯이 투수계수는 간극비가 대략 0.7~2.0범위에서 감소함에 따라 일정한 값을 갖는 것이 아니라 큰 폭으로 변화하는 것을 볼 수 있다.

일반적으로 간극비에 대한 투수계수의 변화를 고려하는 것은 초기 간극비가 10이상인 초연약지반의 경우에만 해당된다고 생각할 수 있으나, 실제 초기 간극비가 2.0근처인 일반적인 연약지반의 경우도 간극비에 대한 투수계수의 변화를 고려하지 않으면 전체적인 압밀현상의 예측에 있어 큰 오차를 유발할 수 있는 것이다(Schiffman, 1980, Pane et al., 1945).

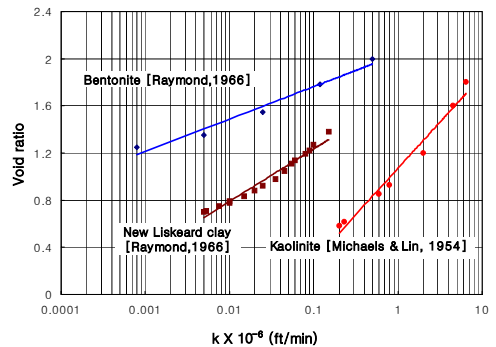


Fig. 8 Nonlinear relationship between  $e$  and  $\log k_v$

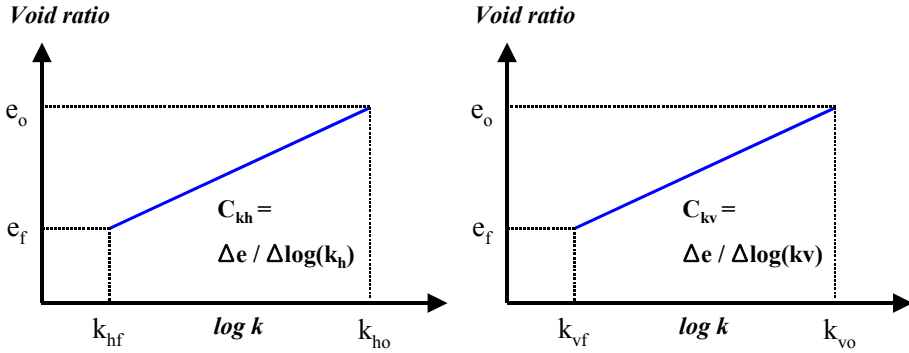


Fig. 9 Nonlinear relationship between  $e$  and  $\log k_h, \log k_v$

간극비별 투수계수의 변화를 압밀해석에 이용하기 위해서는 이들의 관계를 표현할 수 있는 함수식을 구성한 후, 이를 지배 방정식상에 도입시켜야 한다.

Mesri(1985)등은 간극비의 감소로 유발되는 수평 및 수직방향 투수계수의 변화량을 표현하는데 있어 Fig. 9와 같이 수평 및 수직방향의 투수계수 지수  $C_{kh}, C_{kv}$ 를 사용하였다. 즉 각각의 간극비와 그때의 투수계수 값에 로그를 취한 결과는 직선형태의 관계식으로 표현될 수 있다는 것이다.

본 연구에서는 실내 표준압밀시험 및 로우셀 압밀시험을 이용한 회귀분석 결과에 의해 간극비와 투수계수의 관계를 식 (11)과 같이 표현하여 비선형 압밀예측에 이용하였는데, 이는 Mesri의 경우와 동일한 형식의 관계를 이용하는 것이다.

$$k(e) = C_{coe} \cdot \text{Exp}(D_{coe} \cdot e) \quad (11)$$

여기서,

$C_{coe}, D_{coe}$  : 실내 투수시험에서 구한 계수값

#### 4. 수직배수조건에 대한 물질함수 특성

##### 4.1 표준압밀시험

재성형 시료에 대한 표준압밀시험은 초기 함수비를 66.5, 76.4, 85.5, 92.5, 98.1%로 조정하여 시험을

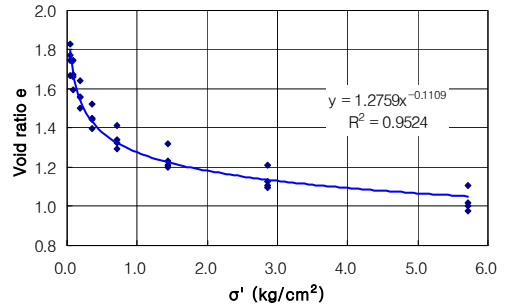


Fig. 10  $e-\sigma'$  curves by oedometer test

실시하였다. 5개의 초기상태에 대한 표준압밀시험 결과, 압축지수는  $0.34 \pm 0.02$ 의 분포를 보였으며, 각 유효응력 단계별 간극비 분포는 Fig. 10과 같다.

비선형 유한변형을 압밀이론에서는 유효응력과 간극비의 관계를 유일한 함수형태로 가정하였는데, 결과에서 알 수 있듯이 표준압밀시험에 의한 각 유효응력 단계별 간극비 관계가 누승함수의 형태로 표현될 수 있음을 알 수 있고 식 (10)에서의  $A_{coe}, B_{coe}$  값은 각각 1.2759와 0.1109가 됨을 알 수 있다.

##### 4.2 로우셀시험

로우셀 시험기를 이용한 압밀시험은 초기 함수비가 86.2%, 98.6% 인 경우에 대하여 실시하였는데, 일단 재성형한 시료를 압밀셀에 투기한 후, 약 5kPa의 압으로 압밀시켰다.



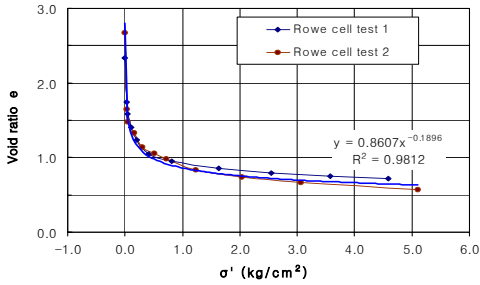


Fig. 11  $e-\sigma'$  curves by Rowe cell test

그 후 유효압을 10, 20, 40, 80, 160, 250, 350, 450, 650kPa로 변화시켜가며 압밀시험을 하였고 각각의 유효응력 상태마다 간극비를 계산하여 유효응력-간극비간의 관계를 구했다. 각 유효응력 단계별로 압밀이 종료된 시점에서 투수시험을 실시하였으며, 초기 상태가 상이한 시료에 대해 반복적인 실험을 실시하여 구한 유효응력별 간극비 관계는 Fig. 11과 같다.

로우셀 시험에서는 표준압밀시험에서 보다 두가지 초기조건에 대한 각 단계별 유효응력-간극비 관계가 더욱 유사하게 누승함수의 형태로 표현됨을 알 수 있다. 이때 식 (10)에서의  $A_{coe}$ ,  $B_{coe}$  값은 각각 0.8607과 0.1896으로 나타났다.

표준압밀시험과 로우셀 압밀시험에 의한 유효응력-간극비 관계를 비교할때 약간의 차이가 발생함을 알 수 있는데, 이는 표준압밀시험시 시료의 초기 포화과정 및 실하중의 재하로 인해 실제 시료에 전달되는 유효응력 값에 오차가 발생했기 때문이라고 판단된다. 또한 재성형 시료의 초기상태는 매우 작은 유효응력과 큰 간극비 값을 갖는 관계로 압밀 초기단계에서의 압밀압을 가하는데 있어 약간의 오차가 발생했다고 판단된다. 즉 10kPa 미만의 작은 압력범위에서는 로우셀 압밀시험기의 유압시스템 및 diaphragm pressure, LVDT의 정도가 높게 평가되지 않았다.

Fig. 12는 수직배수 조건에서의 표준압밀시험 및 로우셀 투수시험에 의한 간극비-투수계수 관계를 타나낸다. 일단 두 가지 시험결과에서 보듯이 간극비와 투수계수 관계는 식 (11)과 같은 지수함수의 형태로 표

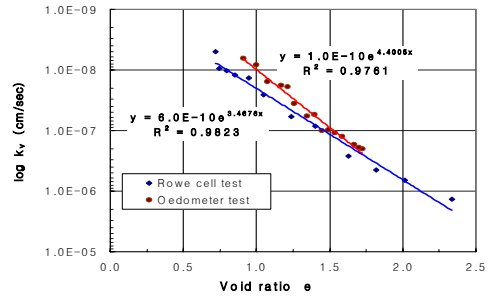


Fig. 12  $e-k_v$  curves by Oedometer and Rowe cell test

현될 수 있음을 알 수 있다. 이때의  $C_{coe}$ ,  $D_{coe}$  값은 표준압밀시험의 경우 1.0E-10과 4.4005이며, 로우셀 투수시험의 경우 6.0E-10과 3.4676으로 나타났다. 또한 투수계수는 간극비 상태 즉 유효응력 상태에 따라 크게 변하는 값이라는 기존의 연구결과를 다시한번 확인할 수 있었는데, 로우셀 시험의 결과 간극비가 2.0일때의 투수계수는 6.58E-07 인데 반해 간극비가 0.8일때의 투수계수는 1.03E-08 으로 약 63배의 차이를 보였다.

한편 표준압밀시험과 로우셀 투수시험에 의한 간극비-투수계수 관계는 전체적 경향에선 일치하지만 각 간극비 단계별로 약간의 차이를 보임을 알 수 있다. 이는 두시험 모두 간극비를 산정하는데 있어 앞서 구한 유효응력-간극비 관계를 이용하였으며 두 시험에서 구한 유효응력-간극비 관계의 차이에 기인한 것이라고 판단된다.

## 5. 수평배수조건에 대한 물질함수 특성

총 4개소(BH26, BH27, BH28, BH29)에서 채취한 불교란시료를 이용하여 수직배수에 의한 표준압밀시험 및 수평배수에 의한 개량 표준압밀시험, 로우셀 압밀시험, 로우셀 투수시험을 실시하였다.

원지반 불교란 시료에 대한 수직배수의 압밀특성과 수평배수의 압밀특성을 비교하기 위해 일단 채취한 시료를 이용하여 수직배수에 의한 표준압밀시험을 실시하였다.

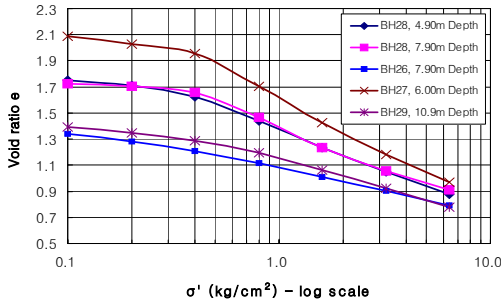


Fig. 13  $e-\sigma'$  curves by Oedometer test at each site

Fig. 13은 각 위치에서 채취한 시료별 수직배수에 의한 표준압밀시험 결과를 나타낸다.

위치별 유효응력-간극비 관계는 원지반의 선행압밀 하중의 크기 및 원지반의 불균질성으로 인해 약간 상이한 분포를 보였는데, BH28의 경우 각 심도별 압밀 시험 결과는 비슷한 경향을 나타내었다. 수평배수에 의한 개량 표준압밀시험 및 로우셀 투수시험은 BH28의 시료를 이용하여 실시하였다.

Fig. 14는 BH28의 정규압밀 구간에서의 시험종류별 유효응력-간극비 관계를 나타낸 것으로서, 표준압밀시험이 경우 이 지역의 선행압밀 하중값을 구하고, 이 보다 큰 유효응력에 대한 간극비를 대상으로 누습 함수 형태의 회귀분석을 실시하였다.

로우셀 압밀시험 역시 선행압밀 하중값보다 큰 정규압밀구간에서의 유효응력과 간극비 값으로 회귀분석을

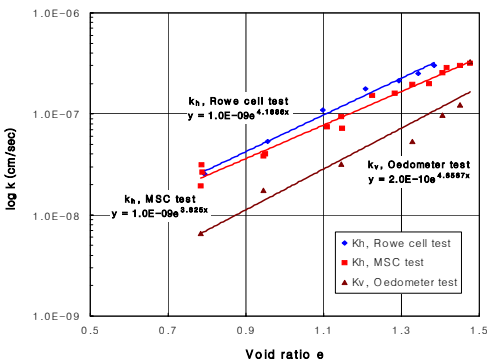


Fig. 15  $e-k$  curves by Oedometer, MSC and Rowe cell test

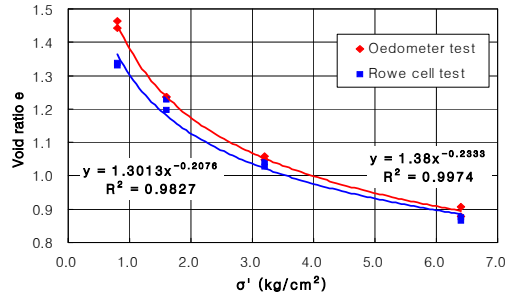
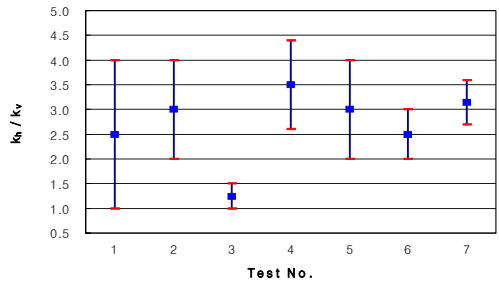


Fig. 14  $e-\sigma'$  curves by Oedometer and Rowe cell test

실시하였다. 표준압밀시험에서의  $A_{coe}$ ,  $B_{coe}$  값은 각각 1.3800과 0.2333으로 나타났으며, 로우셀 압밀시험에서의  $A_{coe}$ ,  $B_{coe}$  값은 각각 1.3013과 0.2076으로 나타났다. 본 시험결과 압축지수는 0.6으로 나타났다.

Fig. 15는 개량 표준압밀시험과 로우셀 투수시험을 통한 수평방향 투수계수 및 표준압밀시험을 통한 수직방향 투수계수를 함께 나타낸 결과이다. 개량 표준압밀시험과 로우셀 투수시험의 결과를 보면, 개량 표준압밀시험에 의한 수평투수계수는  $3.13E-08 \sim 2.57E-07$  cm/sec 범위의 값을 보였으며, 이때 수평투수계수에 대한  $C_{coe}$ ,  $D_{coe}$  값은  $1.0E-09$ 와 3.825로 나타났다. 로우셀 투수시험에 의한 수평투수계수는  $2.93E-08 \sim 2.73E-07$  cm/sec 범위의 값을 보였으며, 이때 수평투수계수에 대한  $C_{coe}$ ,  $D_{coe}$  값은  $1.0E-09$ 와 4.188로 나타났다.



1 : Bergado(1992) 2, 3 : Jamiolkowski(1983)  
4 : Onoue(1988) 5 : Kenney & Chan(1973)  
6 : Albakri(1990) 7 : Author(1999)

Fig. 16 Comparison of horizontal vs. vertical coefficient of permeability with each test result

두 시험결과 모두 간극비에 따른 투수계수가 비선형적으로 변화한다는 기존의 연구결과와 일치하였고, 각 간극비 상태별 수평 투수계수값 역시 비슷한 결과를 보였는데, 두 결과상의 차이는 시험 초기단계의 시료 포화 여부와 유효응력-간극비 관계의 차이에 기인한 것이라고 판단된다. 두 시험결과와 비교를 통해 개량 표준압밀시험에 의한 수평투수계수 값의 신뢰도를 검증할 수 있었는데, 개량 표준압밀시험은 시험절차 및 결과분석에 있어 기존의 로우셀 투수시험에 비해 매우 간편하다는 장점을 갖고 있다.

한편 투수특성에 관한 지반의 이방성을 알아보기 위해 동일한 시료를 이용한 수직배수 조건에서의 표준압밀시험을 실시하였는데, 그 결과 수직방향의 투수계수에 대한  $C_{coe}$ ,  $D_{coe}$  값은  $2.0E-10$ 과 4.6567로 나타났다. 각 간극비 상태에 따른 수평방향 투수계수는 수직방향 투수계수에 비해 2.7~3.6배 크게 나타났는데, Fig. 16은 수평방향 투수계수 및 수직방향 투수계수에 관한 기존의 연구결과와 본 연구에서의 시험결과를 비교한 것으로서, 포항지역의 수평 투수계수와 수직 투수계수의 비는 기존 연구결과와 비교하여 거의 비슷한 값을 나타냄을 알 수 있다.

## 6. 결론

연약점토의 압축성과 투수성에 관련된 비선형적 물질함수 특성을 규명하기 위한 실내시험을 실시하였다. 실내시험은 각 시료의 초기조건 및 시험시의 배수조건과 시험방법등을 달리하여 실시되었고, 각 시험결과와 회귀분석을 통해 다양한 조건별 물질함수 특성을 비교·분석하였다.

기존의 Terzaghi 1차원 압밀이론에서는 각 유효응력 단계마다 투수계수를 동일한 값으로 가정하고 있다. 해성점토에 대한 본 연구결과, 간극비가 2.0~0.8로 변화하는 동안 투수계수는 대략 65배정도 감소하였으며, 유효응력과 간극비의 관계를 나타내는 압축성 또한 일정한 값이 아닌 큰 폭으로 변화하는 함수임을 알 수 있었다.

특히 초기 간극비가 크고, 압밀과정 중 작용하는 유효

응력 변화폭이 클수록 압축성과 투수계수의 변화폭은 더욱 증가함을 알 수 있는데, 이는 해안 지역이나 준설·매립지반과 같은 고함수비의 연약지반에 대한 압밀거동을 예측하는 데 있어, 기존의 Terzaghi 압밀이론에서 사용하는 고정된 압축성과 투수성을 사용했다면 그 결과에 있어 큰 오차를 유발할 수 있다는 사실을 말해준다.

한편, 수평방향 투수특성을 살펴보기 위한 개량 표준압밀시험기를 고안하였는데, 로우셀 시험 결과와의 비교를 통하여 그 신뢰도를 확인할 수 있었다. 고안된 시험장치는 로우셀 시험에 비해 그 시험법이 간편한 관계로, 일반적인 수평방향 압밀특성을 시험하는데 있어 그 적용성이 우수한 시험장치임을 알 수 있었다.

배수조건별 투수시험을 통한 이방성을 살펴본 결과, 각 유효응력 단계별 수평방향 투수계수는 수직방향 투수계수의 2.7~3.6배로 나타났다.

## 참고문헌

1. Barron, R. A., "Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells", Transactions ASCE, Vol. 113, Paper No. 2346, 1948, pp. 718~742.
2. Barron, R. A., "The Influence of Drain Wells on the Consolidation of Fine-Grained Soils", Diss. Providence, U.S. Engineering Office, 1944.
3. Carrier, W. D., Beckman, J. F., "Correlations between Index Test and the Properties of Remoulded Clays", Geotechnique, Vol. 34, No. 2, 1984, pp. 211~228.
4. Gibson, R. E., England, G. L., and Hussey, J. L., "The Theory of One-dimensional Consolidation of Saturated Clays I. Finite Non-Linear Consolidation of Thin Homogeneous Layers", Geotechnique, Vol. 17, 1967, pp. 261~273.
5. Gibson, R. E., Schiffman, R. L. and Cargill K. W., "The Theory of One-dimensional Consolidation of Saturated Clays II. Finite Nonlinear Consolidation of Thick Homogeneous Layers", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 18, 1981, pp. 280~293.
6. Head, K. H., Manual of Soil Laboratory Testing, Pentech press, London, Vol. 3, 1986, pp. 1129~1196.
7. Mesri, G., and Rokhsar, A., "Theory of Consolidation for Clays", Journal of the Geotechnical Engineering

- 
- Division, ASCE, Vol. 100, No. GT8, 1974, pp. 889~904.
8. Mesri, G. and Godlewski, P. M., "Time and Stress Compressibility Interrelationship", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 103, No. GT5, 1997, pp. 417~430.
9. Onoue, A., "Consolidation of Multilayered Anisotropic Soils by Vertical Drains with Well Resistance", *Soils and Foundations*, Vol. 28, No. 3, 1988a, pp. 75~90.
10. Onoue, A., "Consolidation by Vertical Drains taking Well Resistance and Smear into Consideration", *Soils and Foundations*, Vol. 28, No. 4, 1988b, pp. 165~174.
11. Pane, V. and Schiffman, R. L., "The Permeability of Clay Suspensions", *Geotechnique*, Vol. 47, No. 2, 1997, pp. 273~288.
12. Schiffman, R. L., "Finite and Infinitesimal Strain Consolidation", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 106, No. GT2, 1980, pp. 203~207.
13. Schiffman, R. L., "One-Dimensional Consolidation of Saturated Clay Layers Nonlinear Finite Strain Primary Consolidation", *Press of University of Colorado, Boulder*, 1984, pp. 1-1~4-11.

(접수일자 : 2003년 11월 7일)