

시료의 교란이 압밀시험의 결과에 미치는 영향연구

Evaluation of The Degree of Disturbance on Clay Samples and Oedometer Testing

최 명 진

(한국통신 가입자망연구소 전임연구원)

김 팔 규

(충남대학교 토목공학과 정교수)

전 남 수

(충남대학교 토목공학과 석사과정)

1. 서 론

흙 특성의 지표를 나타내는 토질정수들은 대부분 실내시험으로 결정하고 있다. 이러한 토질정수들은 현장의 토질상태를 파악하거나, 토류 구조물의 설계, 지지력 산정, 침하량의 추정 등 토질 문제의 해결에 이용된다. 그러나, 토질정수들은 시료 채취 과정과 시험실까지 운반 과정, 성형 과정에서의 교란, 시험 기구의 정확도, 시험자의 숙련도 등에 의해 변화하게 된다. 변화된 토질정수들이 토질 문제 해결에 이용된다면 상당한 경제적 손실이나, 구조물의 파괴 등 심각한 문제를 유발할 수 있다. 그래서, 토질 공학자들은 보다 정확한 토질정수를 결정하기 위한 실내시험들을 개발하였고, 시험에 적당한 시험 방법들을 제시하고 발전시켜 왔다. 또, 토질정수의 결정에 있어서 앞에서 언급한 교란, 기구, 숙련도 등의 어떠한 요소들이 토질정수 결정에 영향을 주었는지를 파악하기란 쉽지 않다.

압밀 해석 문제에 관련된 팽창지수, 압축지수, 선행압밀하중, 체적변화계수 등은 실내시험인 표준압밀시험으로 결정한다. 시료채취 과정과 시험기구, 성형과정, 숙련도 등에 의해 영향을 받은 상수들은 선행 압밀 하중 결정과 장기 침하량 산정, 압밀 소요 시간 산정 등에 큰 오차를 유발시킬 수 있다. 만약, 압밀시험의 결과에 대한 신뢰성을 파악할 수 있다면 압밀 해석 문제에 많은 도움이 될 것으로 사료된다.

그래서, 점토의 교란이 압밀 곡선상의 상수들에 어떤 영향을 주는지를 추정하기 위하여 슬러리를 이용한 Rowe Cell 압밀시험을 수행하였고, 오이도미터 시험의 신뢰성을 평가하는 방법을 제시하기 위하여 Rowe Cell 압밀시험기를 사용하여 재하, 제하 시험을 실시하였다.

2. 점토의 압밀 특성과 교란의 영향

2.1 Loading, Unloading시 점토의 압밀 특성

배수가 이루어진 시료의 1차원 압축 시험시 거동은 Fig. 2.1과 같이 이상화된 압축선에 항상 접근하게 된다. 수직변형은 높이의 변화, 간극비의 변화, 체적 변화의 향으로 바꾸어 식 2.1로 표현할 수 있다.

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{\Delta e}{1+e} = \frac{\Delta v}{v} \quad \text{or}$$

$$\frac{-dh}{h} = \frac{-de}{1+e} = \frac{-dv}{v} \quad (2.1)$$

Fig. 2.1에서 $e - \log \sigma'$ 관계를 도식화할 때 압축선, 팽창선 그리고 재 압축선은 이상적으로 평행을 이룬다. 낮은 응력 상태와 높은 간극비를 가진 느슨한 점토를 서서히 압축을 진행시키면 이상적으로 정규 압밀선을 따라 거동할 것이다. 이어서 유효응력을 감소시키면, 직선의 팽창선을 따라 흙은 팽창할 것이다. 이 선을 팽창-재 압축선이라 한다. 항복점 Y에 이를 때까지 재 압밀 거동은 팽창-재 압축선을 따라 이상적 탄성거동을 보인다. 이때 항복점 Y는 정규 압밀선과 팽창-재 압축선의 분기점이 된다.

항복점에 대응되는 유효응력의 크기를 항복응력, 선행압밀응력, 혹은 선행압축응력이라 부른다. 항복응력은 현재 작용하고 있는 하중 이전에 흙이 받았던 최고의 응력을 나타낸다.

만약 현장의 간극비와 상재 하중의 값이 정규압밀선상에 있다면 그 흙은 정규 압밀이라 할 수 있고, 정규압밀선 아래에 있다면 과압밀된 것이다. 정규압밀선과 팽창-재압축선은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$NCL: e = e_0 - C_c \log \sigma' \quad (2.2)$$

C_c : 정규압밀선의 경사 (압축지수)

$$SRL: e = e_s - C_s \log \sigma' \quad (2.3)$$

C_s : 팽창-재압축선의 경사 (팽창지수)

2.2 압밀시험결과에 영향을 미치는 요소

실내실험에 사용하는 이상적인 시료는 원 지반 상태의 함수비와 유효 응력을 가지고 있어야 만족스러운 결과를 얻게 된다. 그러나, 대부분 시료 채취시에 시료의 교란이 발생한다. 또, 실내시험 중에도 하중의 재하 방법, 수행시간, 실험자의 숙련도, 기계 오차 등에 의해 다시 실험결과에 영향을 미치게 된다. 이처럼 압밀의 결과치에 영향을 주는 요인들은 크게 시료 채취시의 교란과 시험방법에 의한 영향으로 나눌 수 있다.

2.2.1 시료 채취시의 교란에 의한 영향

샘플링시의 교란 중 샘플러의 종류에 따라 압밀시험결과가 다르게 나타날 수 있다. Fig. 2.2는 샘플러의 종류에 따른 압밀시험의 결과를 나타내고 있다.

Fig. 2.2에서와 같이 최소 곡률 반경 점 부근의 곡선의 형태가 블록 샘플과 피스톤 샘플 사이의 차이가 명확히 구분된다. 피스톤 샘플러인 경우 선행압밀하중보다 작용하중이 적을 경우 간극비의 변화가 많으나, 선행하중 이후에서는 샘플러의 종류와 상관없이 비슷한 경향을 보인다. 즉, 압축지수는 샘플러와 상관없이 같다는 것이다.⁸⁾

Fig. 2.3은 샘플링 튜브의 직경에 따른 압밀곡선을 나타낸 그래프이다. Fig. 2.3에서 샘플링 튜브의 직경이 작아짐에 따라 각 압밀 곡선이 재 성형한 시료의 압밀곡선에 가까워짐을 알 수 있다. 이러

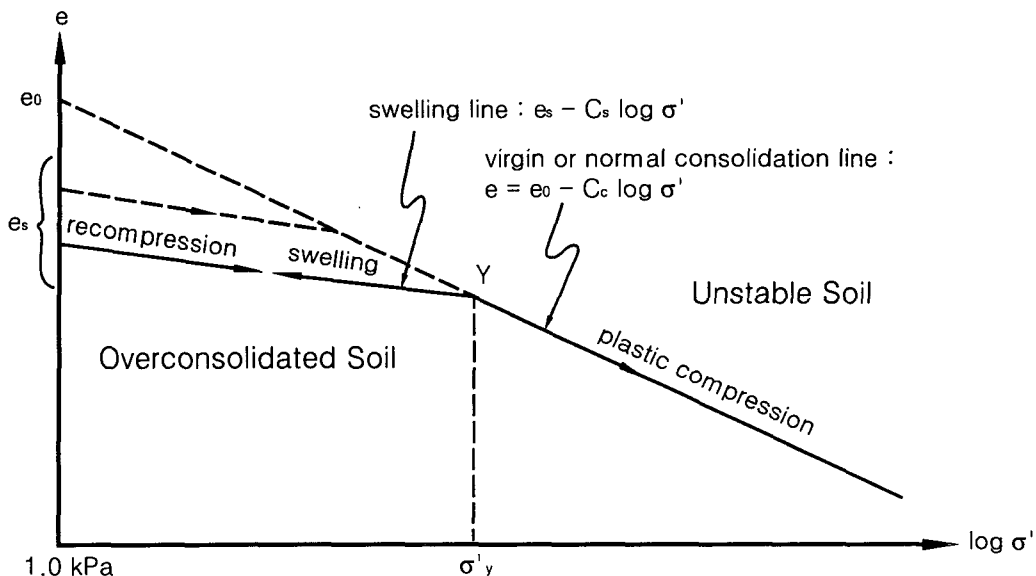


Fig. 2.1 Ideal compression curve for soil.⁷⁾

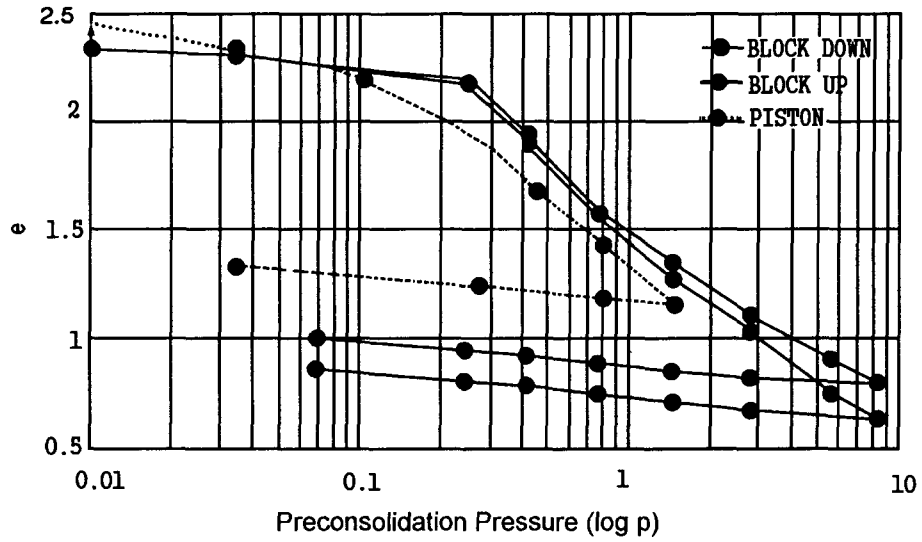


Fig. 2.2 Effect of sampling method for e-log p curve.⁸⁾

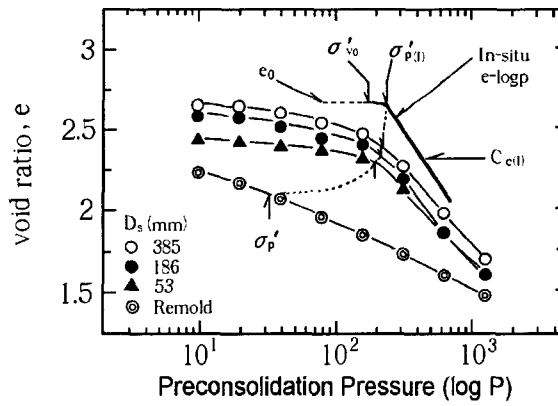


Fig. 2.3 Influence of sampling tube diameter for e-log p curve.⁹⁾

Table 2.1 Variation of sampling tube diameter for σ'_p and C_c

D_s (mm)	σ'_p (kpa)	C_c
385	218	1.07
186	217	1.01
53	196	7.7
Remold	37	0.83

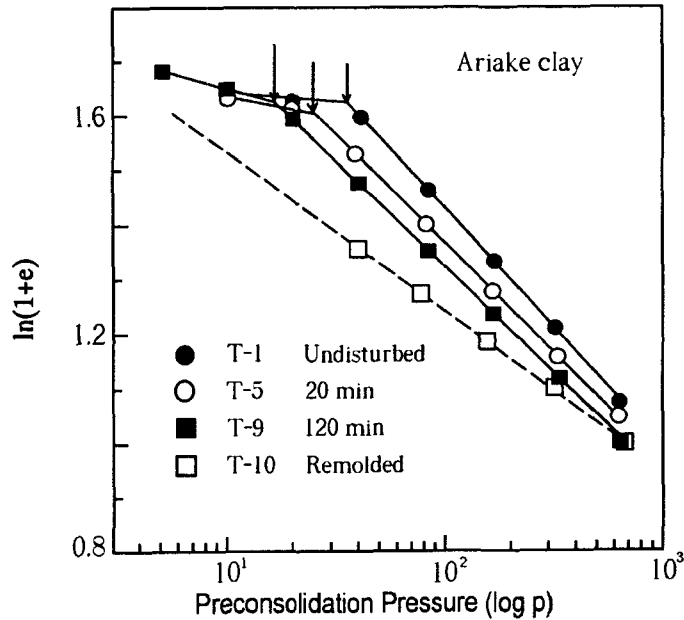


Fig. 2.4 Influence of vibration for e-log p curve.¹⁰⁾

한 사실은 샘플러 직경에 의한 시료 교란이 압밀 곡선에 영향을 미쳐 압밀 곡선 상에서 선행 압밀 하중(σ'_p)과 압축지수(C_c)의 감소를 야기 시킨 결과라 하겠다. 각 곡선의 선행 압밀 하중(σ'_p)과 압축지수(C_c)의 값을 비교한 값이 Table 2.1에 정리되어 있다.⁹⁾

Fig. 2.4는 시료에 진동을 가하여 나타나는 교란 정도를 추정하기 위하여 불교란 시료와 재 성형한 시료 및 진동 시간을 달리한 불교란 시료를 사용하여 압밀 시험을 실시하였다. 이 3가지 시료 형태의 압밀 시험 결과를 이용하여 교란 정도에 대한 압밀 곡선을 분석하였다. 시료 교란에 의한 선행 압밀 하중은 Fig. 2.4의 압밀 곡선에서의 결과와 같이 120분의 진동을 가한 시료의 선행 압밀 하중이 가장 작음을 쉽게 판별할 수 있다. 즉, 시료의 교란이 압밀 곡선에 영향을 미쳐 나타난 결과라 할 수 있다. 다음으로 간극비의

관점에서 압밀 곡선을 살펴보면 20분 및 120분의 진동을 가한 시료의 간극비가 임의의 하중에서 상당히 감소함을 알 수 있다. 이러한 사실 또한 시료 교란 영향이 압밀 곡선에 미쳐 나타난 결과임을 알 수 있다.¹⁰⁾

대부분의 시험 시료들이 그렇지만 현장의 상태를 그대로 유지한 시료를 채취하기는 불가능하다. Jamiolkowski et al(1985)은 점성토 시료의 샘플링 과정에서 교란 원인을 아래 Table 2.2와 같이 요약하였다.⁴⁾

2.2.2 압밀 시험 수행 과정에서 영향을 미치는 요소

Crawford(1964)는 Leda 점토를 가지고 하중 증가율이 $\Delta p/p = 1$ 일 때, 압밀 지속 시간을 변화시켜 시험을 실시하였다. 그 시험의 결과는 Fig. 2.5에 도시하

Table 2.2 Sources of sample disturbance in cohesive soils.⁴⁾

조건	항목	비고
응력해방	천공에 의한 응력해방	· 경천공수로 인한 σ_v 의 과도한 인장 변형유발 · 큰 천공압력이 과잉 압축변형 유발
	현장 초기 전단 응력의 제거	· 결과로 발생하는 전단변형률은 일반적으로 작음
	구속응력의 제거	· 조립체의 존재로 인한 부의 간극수압 손실 · 기포나 용해되지 않은 가스의 팽창
시료채취 기술	시료의 기하학	· 이 변수들은 다음에 영향을 미침: 회수율 시료 벽면을 따른 점착력 내부벽면을 따라 교란된 영역의 두께
	샘플러의 추진 방법	· 타격법보다 연속적인 추진방법이 좋음
	시료 회수 방법	· 시료의 바닥에 suction효과를 제거하기 위해 진공 브레이크 사용
핸들링 방법	운반	· 충격, 기온 변화 등을 피할 것
	저장	· 박테리아 성장을 최소화하기 위해 현장 온도로 저장 · 샘플링 튜브와의 화학적 반응을 피할 것 · 저장 시간 장기화에 따른 물의 이동증가
	시료 추출과 성형	· 더 변형되는 것을 최소화할 것 (주의해서 수행)

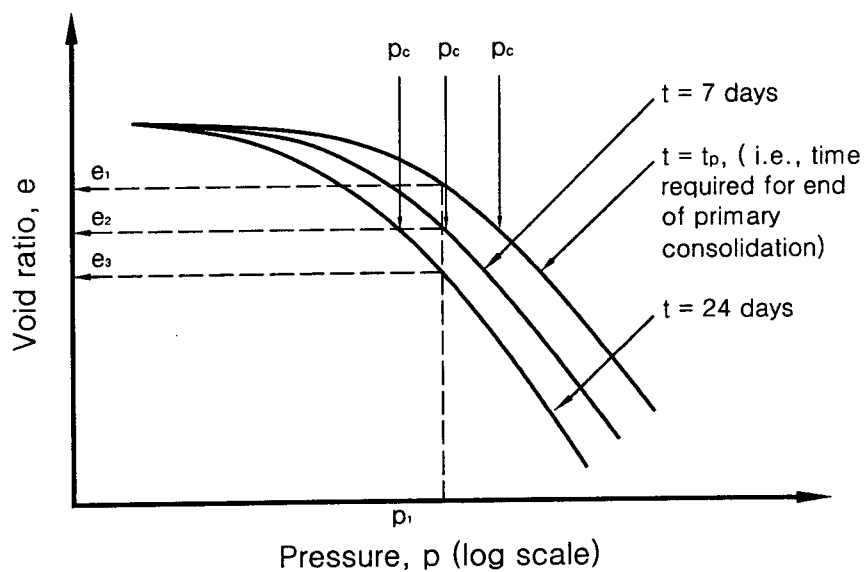


Fig. 2.5 Effect of duration on e -log p curve.¹⁾

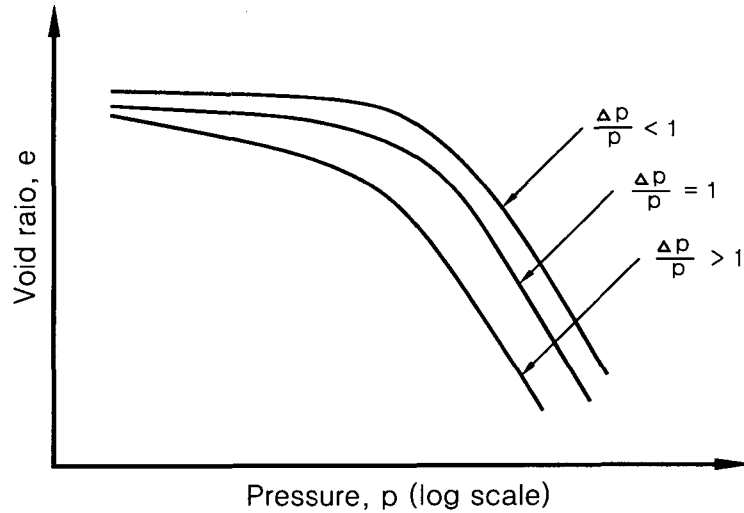


Fig. 2.6 Effect of load increment ratio on $e-\log p$ curve.³⁾

였다.

Fig. 2.5에서 시료에 대한 재하지속시간이 증가되었을 때 $e-\log p$ 곡선이 점차로 좌측으로 이동한다는 것을 알 수 있다. 이 사실은 압밀 지속시간을 증가시킬수록 압밀완료시의 간극비가 감소한다는 것을 의미한다. 이러한 곡선의 변화는 지속시간이 증가할수록 시료의 2차 압밀량이 증가하기 때문에 간극비가 작아지게 되는 것이다. 또, 선행압밀하중은 그래프에서 보는 바와 같이 각 지속시간이 증가할수록 압축량이 증가하기 때문에 압밀 그래프가 왼쪽으로 이동하게 된다. 즉, 선행압밀하중은 압밀지속시간이 증가할수록 감소한다.¹⁾

하중의 증가비도 $e-\log p$ 곡선에 영향을 미치게 된다. Leonard & Altschaeffl(1964)는 여러 $\Delta p/p$ 값에 대한 압밀시험을 실시하였다. Fig. 2.6은 $\Delta p/p$ 값에 대한 $e-\log p$ 곡선의 변화를 보여 주고 있다. 하중 증가율을 크게 할수록 $e-\log p$ 곡선이 좌측으로 이동하는 것을 보이고 있다. 하중 증가율이 작을 경우 점토입자가 평행상태로 재배열되는

능력이 감소하여 증가율이 감소하는 것이다.³⁾

3. 시험

3.1 시료의 물성시험

본 연구에 이용된 시료는 남해안의 상부 해성 퇴적층에서 채취하였으며 대부분 실트질 점토(CL/CH)로 분류되나, 상부가 매우 연약한 컨시스턴시를 보이는 반면, 하부로 갈수록 굳어지고 조립질 성분의 함량이 증가하는 경향을 보인다.

위치에 따라서 모래 또는 실트로 구성된 박층(Seam)이 존재하나 연속성은 없는 것으로 나타났다. 콘 지수는 10~15 사이에 존재하였고, 평균 액성한계가 약 53~59사이에 분포하며, 함수비는 전 지역에 걸쳐 액성한계에 근접하게 분포하고 있다. 소성지수는 약 30~34정도이고, 활성도는 대체로 1.0내외의 값을 보여 정상적인 상태에 있다.

과압밀비는 심도가 낮은 해저면 부분

Table 3.1 Standards of Laboratory Testing

항 목	Standards
자연함수비 시험	KS F 2306 (ASTM D-2216)
비중(Specific gravity test)	KS F 2308 (ASTM D-854)
체분석(Sieve analysis)	KS F 2309 (ASTM D-1140)
침강분석(Hydrometer test)	KS F 2302 (ASTM D-422)
아터버그 한계(Atterberg limit test)	KS F 2303, 2304 (ASTM D-4318)

Table 3.2 Results of Laboratory Testing

	깊 이(m)	USCS	G _s	LL(%)	PL(%)	M _c (%)
SITE 1	5	CL	2.71	49.6	24.1	51.2
	11	CL	2.73	47.3	24.0	46.7
	17	CH	2.71	59.3	25.9	49.1

에서는 대부분의 해성점토에서의 경우와 같이 과압밀 상태이고 심도가 깊어지면 과압밀비가 점차로 감소하여 정규압밀상태를 보이고 있다.

시료는 튜브샘플러를 이용하여 채취하였고, 임의의 지점 한곳을 선정하여 Table 3.1과 같은 종목의 시험을 KS 규정에 따라서 실시하였다. Table 3.2는 실내시험의 결과를 나타낸 것이다.

3.2 오이도미터 압밀시험

압밀시험결과에 대한 신뢰성 평가를 위하여, 튜브샘플러로 채취한 시료를 이용하여 오이도미터 압밀시험을 KS F2316, ASTM D-2435에서 제시하고 있는 방법에 준하여 시험을 실시하였다.

점토의 가장 큰 특징은 침하시 압밀을 한다는 것이다. 사질토의 경우 전응력

이 증가하면, 높은 투수성을 갖고 있어 빠른 시간에 간극수가 빠져나가 체적 변화가 발생한다. 그러나 점토는 아주 낮은 투수성을 갖고 있기 때문에 초기 전응력의 증가는 간극수압의 증가로 이어지게 된다. 오랜 시간이 경과하는 동안 서서히 배수가 진행되어 초기 간극수압은 유효 응력으로 완전히 전이된다. 이러한 과정에서 간극 안의 물이 빠져 나오면서 체적의 감소가 발생하여 압축되는데 이것을 압밀이라 한다. 이런 현상을 실내에서 재현하는 시험을 압밀시험이라 정의한다.

이 압밀시험은 Terzaghi의 1차원 압밀이론에 근거를 두고 있고, 압밀시험장치는 고정식압밀상자와 부동링식 압밀상자 두 가지로 구분할 수 있다. 고정식은 하부의 다공판으로 유출되는 간극수를 조절하여 투수시험을 할 수 있는 장점이 있다. 부동링식은 흙의 압축이 시료의 상, 하면에서 발생되므로 고정식에 비해

측면 마찰이 적게 발생하는 장점을 갖고 있다.

가장 보편적으로 쓰이는 시험방법은 표준 압밀시험으로, 24시간마다 하중을 증가시키는 방법이다. 이 시험방법은 쉽게 흙의 압밀 특성을 결정할 수 있는 장점이 있으나, 압밀시험 동안 간극수압 측정, 수평방향 압밀계수 결정, 연속하중 재하 등이 불가능하다는 단점이 있다.

압밀시험은 1차원 압밀시험을 실시하였다. KS F2316, ASTM D-2435에 의거하여 시료 추출기에서 시료를 추출한 후 트리머와 Wire Saw를 이용하여 원주형태로 성형한다. 성형시료는 압밀 링 속에 넣고, 시료에서 물만이 배수될 수 있도록 다공판 위에 놓는다. 시료는 직경 6.0cm,

높이 2.0cm로 성형하고, 이때 링의 안쪽 벽에는 마찰을 방지하기 위하여 실리콘 그리스를 얇게 바른다. 압밀상자의 조립 후, 재하장치에 올려놓고 규정 KS F2316에 의거하여 24시간동안 하중을 가하고, 적절한 간격으로 압축량을 기록한다. 제하는 모든 하중에 대하여 실시하지 않고 최종단계하중을 가하여 24시간 압밀을 시킨 후, 두 단계 건너 제하를 실시한다. 팽창량의 기록은 4시간마다 마지막의 팽창량만을 기록한다. 각 하중단계에서의 간극비 변화량을 구하여 그 결과를 $e-\log p$ 곡선에 그린다. $e-\log p$ 곡선에서 응력해방시의 팽창지수와 최종단계하중에서의 팽창지수를 결정한다.

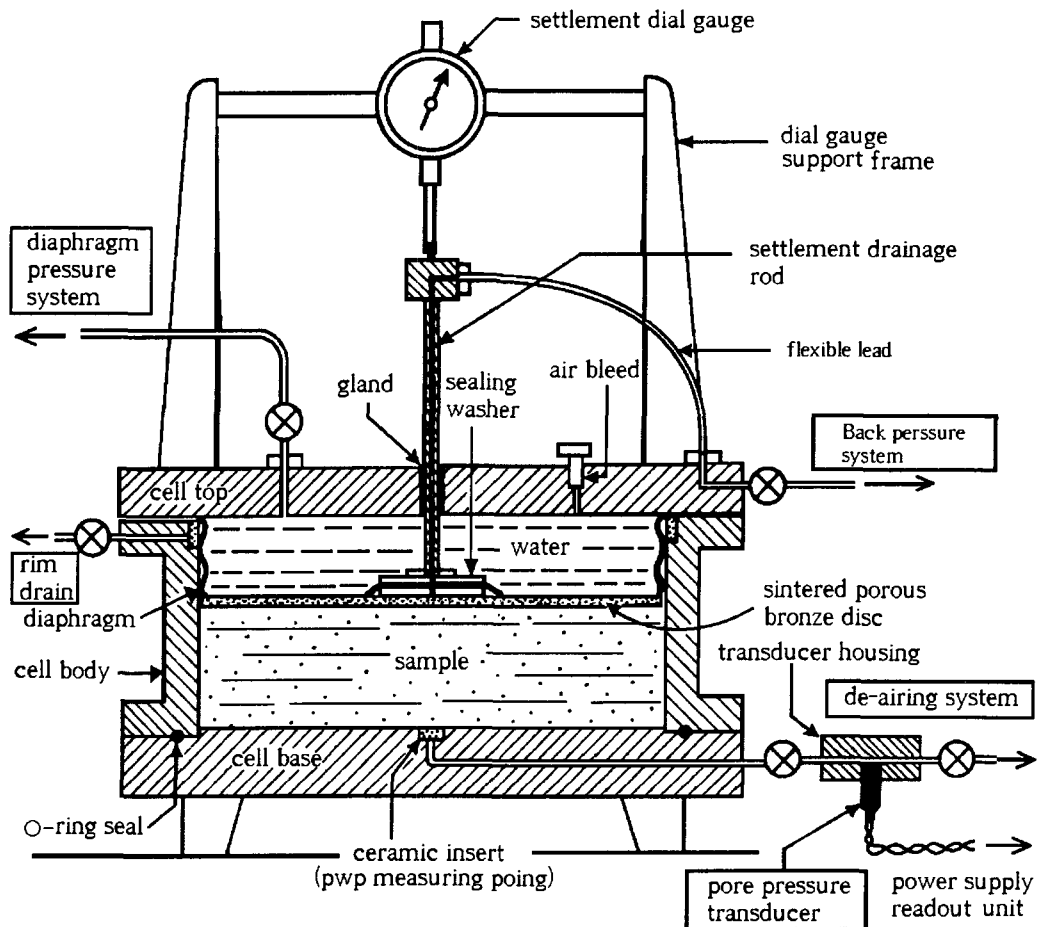


Fig. 3.1 Main Features of 150mm diameter Rowe hydraulic consolidation cell.

3.3 Rowe Cell 압밀시험

3.3.1 Rowe Cell 구조와 특징

일반적으로 Rowe Cell 압밀시험으로 알려진 이 압밀시험은 1966년 맨체스터 대학의 P. W. Rowe가 표준압밀시험의 단점을 극복하기 위하여 삼축 압축시험기를 변형하여 개발하였다. Fig. 3.1은 Rowe Cell 시험기의 단면을 나타낸 그림이다.

이 시험기의 특징은 다음과 같다.

1. 하중은 고정 가로막에 유압을 가한다.
2. Cell의 직경은 75, 150, 250mm으로 다양하다.
3. 압밀시 배수를 조절할 수 있고, 간극수압의 측정이 가능하다.
4. 시험 중에 Back Pressure를 가하여 시험을 수행할 수 있다.
5. 다양한 배수조건에서 시험을 수행할 수 있다.
6. 표준압밀시험에서 불가능한 수평 방향 압밀 계수를 결정할 수 있다.
7. 연속하중 재하 시험을 수행할 수 있다.
8. 투수 시험을 할 수 있다.
9. 완전히 교란된 시료를 Slurry로 만들어 시험을 수행할 수 있다.

3.3.2 시험방법

Slurry를 이용한 Rowe Cell 압밀시험은 시료의 추출과 성형, 기계적 교란의 영향을 배제할 수 있는 시험 방법이다. 오이도미터 압밀시험과 같이 1-D압밀시험을 실시하였고, Fig. 3.2는 Rowe Cell 압밀시험의 개요를 보여 주고 있다. 이 시험방법은 시험 수행 시일이 길다는 것이 단점이다. Slurry를 이용한 압밀시험

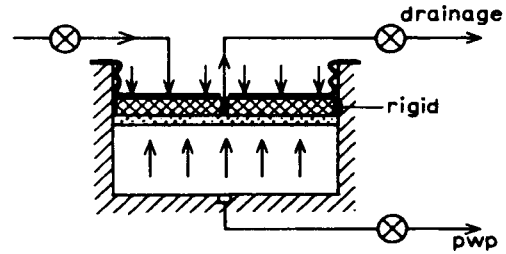


Fig. 3.2 Principle of Rowe hydraulic consolidation cell

의 과정은 다음과 같다.

추출시료를 공기의 이동을 허용할 만큼의 낮은 점성을 주기 위해, 액성한계의 약 2배의 함수비로 증류수를 가하여 진동식 Rotary를 사용하여 2~3시간동안 섞어서 Slurry로 만든다. 이 Slurry는 Sealing해서 약 일주일동안 저장한다. Sealing과정의 일주일동안 시료는 완전포화가 이루어진다.

완전포화가 이루어진 후, Rowe Cell 장치에 포화된 Slurry를 약 25mm ~ 45mm의 깊이로 Cell안에 안치하는 과정을 갖는다. 안치 과정에서 Slurry는 여러 층으로 나누어 안치되고, 각층마다 진공기계를 이용하여 공기를 제거한다. 최종층의 공기 제거 후 요구되는 샘플의 두께는 초기 압밀 후의 약 2배의 두께로 안치한다. 안치과정이 끝나면 포화된 Bronze Disc를 시료 위에 위치시키고, Cell은 공기가 제거된 물로 채워진다. Cell의 상부에는 물이 채워진 가로막을 꼭 맞게 위치시키고 초기간극수압을 측정한다. 다음단계로 Cell에 약 5kPa의 응력을 가한다. 초기압밀하중 5kPa의 재하는 해성점토가 퇴적되는 과정을 의미하는 것이다. 초기압밀이 완료되면, 임의의 선행압밀하중을 가정하여 1차원 압밀을 시킨다. 선행압밀하중의 재하기간은 축변형과 간극수압, 체적변형이 더 이상 발생

하지 않을 때 재하를 마치고, 시취공에서의 시료채취를 재현하기 위해 축하중을 제거한다. 축하중을 제거한 다음 축변형과 간극수압, 체적변형이 더 이상 발생하지 않을 때까지 방치를 하였다가 1차원 압밀시험을 수행하였다. 압밀시험 중에 320kPa의 하중과 640kPa의 하중에서 팽창지수를 비교하기 위하여 재하-제하시험을 수행하였다. 1차원 압밀시험은 표준 압밀시험과 같은 방법으로 수행하였다.

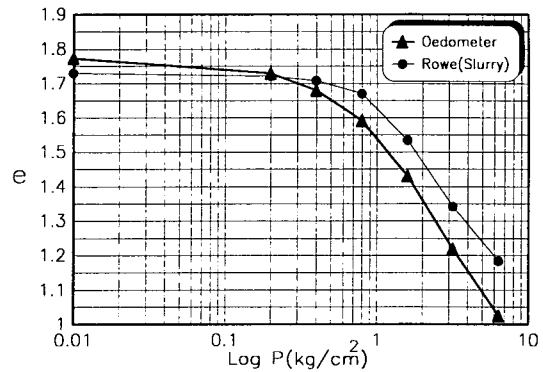


Fig. 4.1 시험방법에 따른 압밀곡선변화

4. 분석 및 고찰

4.1 Rowe Cell 압밀시험결과 분석

Fig. 4.1에서 삼각형의 점을 이은 실선은 오이도미터의 압밀곡선을 나타낸 것이고, 원의 점을 이은 실선은 slurry를 이용한 Rowe cell 압밀곡선을 나타낸 것이다. Fig. 4.1을 살펴보면 시험방법에 따른 압밀곡선의 차이를 발견할 수 있는데 간극비에 있어서는 초기 일부분을 제외하고는 임의의 하중에 있어서 오이도미터 압밀곡선의 간극비가 Rowe cell 압밀곡선의 간극비에 비하여 감소함을 알 수 있다. 이런 원인은 시료의 교란에 의한 영향이 압밀곡선에 영향을 미쳐 나타난 결과로 판단된다. 그리고 이 곡선의 초기 간극비가 일치하지 않고 오이도미터 압밀곡선의 초기 간극비가 더 큼을 알 수 있는데, 이는 시료 채취를 함에 있어서 교란의 효과를 반영하는 것으로 사료된다. 또한 곡선의 초기부분의 팽창지수(C_s)를 비교해 볼 때 오이도미터 압밀곡선의 팽창지수(C_s)는 Rowe cell 압밀곡선의 팽창지수(C_s)에 비해 약 3배 정도 크게 나타났다.

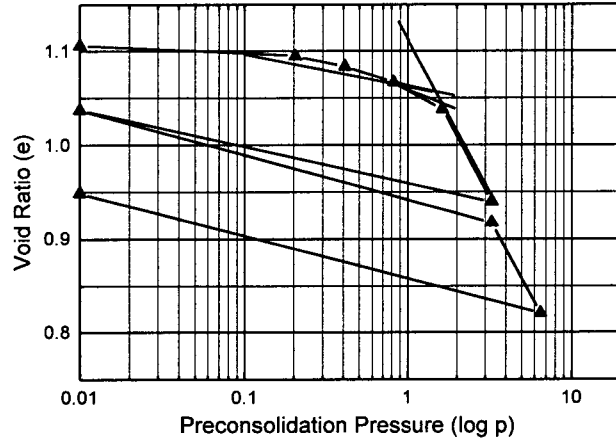
Fig. 4.1의 결과로부터 교란시료의 1차 팽창지수와 완전 불교란 시료의 1차

팽창지수와 상관계수에 의문을 가지게 되었다. 같은 경우, 1차 팽창지수와 2차 팽창지수간의 관계 또한 충분한 연관성이 있으리라 사료되어 아래와 같은 Slurry를 이용한 Rowe Cell 압밀시험을 실시하였다.

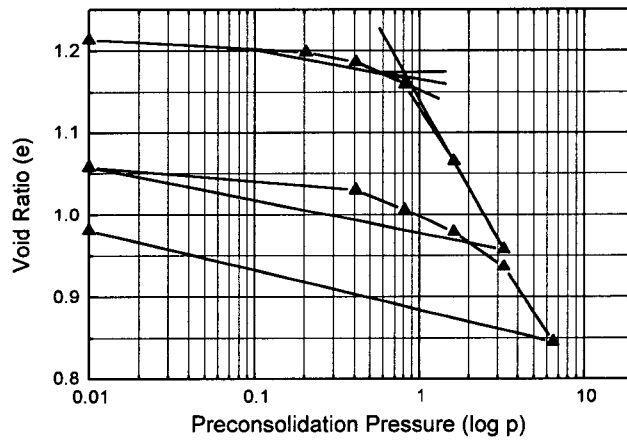
Fig. 4.2는 Rowe Cell 압밀시험결과에 대한 e-log p 그래프를 나타낸 것이다. 선행 압밀 하중은 각각 1.40kg/cm², 0.80kg/cm², 1.35kg/cm²으로 재하를 하였다.

(a)는 5m 깊이에서 샘플링한 시료의 압밀 결과를 나타낸 것이다. 원 심도에서의 P_0 의 값보다 더 큰 하중(1.40kg/cm²)으로 재하 하였다. 선행 압밀 하중(p_c)은 1.42kg/cm², 초기 간극비(e_0)는 1.107이고, 압축지수(C_c)는 0.319, 1차 팽창지수(C_s)는 0.0356, 2차 팽창지수는 0.0387, 재 압축지수(C_r)는 0.0479, 3차 팽창지수(C_s)는 0.0456으로 나타났다. 재 압축지수와 3차 팽창지수는 거의 일치하였고, 2차 팽창지수와 재 압축지수는 약 20%의 차이를 보였다.

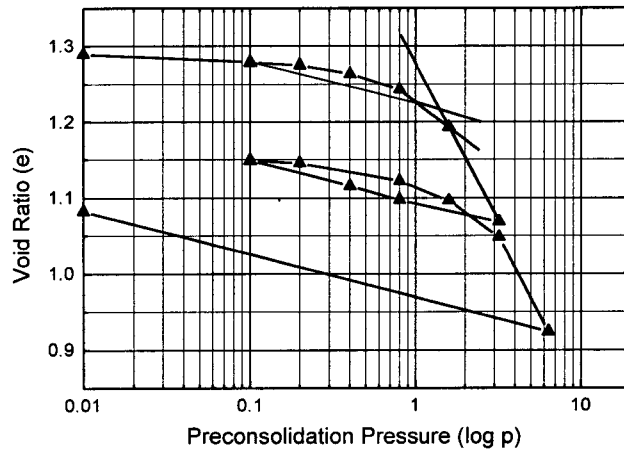
(b)는 11m 깊이에서 샘플링한 시료의 압밀 그래프로 선행 압밀 하중은 0.83kg/cm², 초기 간극비(e_0)는 1.213이고, 압축지수는(C_c) 0.359, 1차 팽창지수(C_s)는 0.0381, 2차 팽창지수는 0.0403, 재 압축지수(C_r)는 0.0487, 3차 팽창지수(C_s)는 0.0485으로 나타났다. 재 압축지수와 3차



(a) $P_c = 1.40 \text{ kg/cm}^2$ (5m)



(b) $P_c = 0.80 \text{ kg/cm}^2$ (11m)



(c) $P_c = 1.35 \text{ kg/cm}^2$ (17m)

Fig.4.2 선행압밀하중에 따른 e - $\log p$ 그래프.

팽창 지수는 거의 일치하였고, 2차 팽창 지수와 재 압축지수는 약 17%의 차이를 보였다.

(c)는 심도 17m에서 샘플링한 시료로 선행 압밀 하중(p_c)이 1.39 kg/cm^2 으로 선정 되었다. 초기 간극비(e_0)는 1.289, 압축 지수는(C_c) 0.415, 1차 팽창지수(C_s)는 0.0542, 2차 팽창지수는 0.0538, 재 압축 지수(C_r)는 0.0671, 3차 팽창지수(C_s)는 0.0563으로 나타났다. 재 압축지수와 3차 팽창 지수는 19%차이를 보였고, 2차 팽창지수와 재 압축지수는 약 24%의 차이를 보였다.

1차 팽창지수는 $e-\log p$ 곡선에서 재하 처음 단계 하중과 선행 압밀 하중의 기울기로 정의하였다. 초기 간극비를 기준으로 결정된 1차 팽창지수는 2, 3차 팽창지수와 많은 차이를 보이나 재하 처음 단계 하중을 기준으로 결정한 팽창지수는 2, 3차 팽창지수와 거의 같은 기울기가 나타났다.

위의 결과로 재 압축지수(C_r)와 팽창지수(C_s)는 약 20% 내외의 차이를 보이는 것으로 나타났다.

4.2 오이도미터 압밀시험결과 분석

Fig. 4.3~Fig. 4.5는 약 330개의 표준 압밀 시험(Oedometer)에 대한 결과이다. 1차 팽창 지수의 결정은 5.1절에서 서술한 바와 같이 압밀 처음 단계 하중에서 선행 압밀 하중에 대한 기울기로 결정하였다. 2차 팽창 지수는 압밀 마지막 단계 하중에서 팽창과정에서 마지막 단계 하중에 대한 기울기로 결정하였다.

정규압밀 점토 시료가 원 지반 상태로 실험실에서 오이도미터 시험을 실시하였다면, Fig. 4.2의 결과와 압밀응력의 차를 감안하여 팽창지수의 차이가 약 30%이내면 압밀시험이 적절히 수행되었다고 사료된다.

이것을 확인하기 위하여, 1차 팽창지수와 2차 팽창지수를 비교하여 30% 이하, 60% 이하, 60%이상 3가지로 분류하여 다시 그래프를 작성하였다.

Fig. 4.3는 2차 팽창 지수와 압축 지수의 관계를 보이는 그래프이다. 2차 팽창지수와 압축 지수는 서로 밀접한 관계를 보이고 있으나, Fig. 4.3에서 1차 팽창 지수와 압축 지수는 분산된 모양을 보이고 있다. 즉, 점토시료가 샘플링이나 시험중에 교란을 받아서 팽창 지수의 분산이 발생한 것이라 생각 할 수 있다.

Fig. 4.4는 깊이에 따른 선행 압밀 하중의 그래프를 나타낸 것이다. (a)는 전체 압밀시험 결과를 나타내고, (b)는 30%이하, (c)는 60%이하, (d)는 60%이상의 팽창지수 차이가 나는 것들의 그래프이다. 깊이에 대한 선행 압밀 하중의 선형 회귀식은 아래와 같다.

$$p_c = 0.0522D + 0.1112 : \text{전체} \quad (4.5)$$

$$p_c = 0.0504D + 0.1641 : 30\% \text{ 이하} \quad (4.6)$$

$$p_c = 0.0485D + 0.1729 : 60\% \text{ 이하} \quad (4.7)$$

$$p_c = 0.0534D + 0.1047 : 60\% \text{ 이상} \quad (4.8)$$

Fig. 4.4의 그래프에서 팽창지수들의 차가 적게 나타날수록 선형 회귀식에 접근하는 것을 알 수 있었다. 즉, 팽창지수들의 차이가 작은 $e-\log p$ 그래프일수록 압밀 실내 시험이 잘되었다고 할 수 있을 것이다.

Fig. 4.5는 깊이 15m인 시료들의 오이도미터 시험결과이다. (a)는 팽창지수의 차이가 30%이하인 시료로 1차 팽창지수는 0.0937, 2차 팽창지수는 0.0937로 0%의 차이를 보였다. (b)는 60%이하인 시료로 1차 팽창지수는 0.0931, 2차 팽창지수는 0.0634로 47%의 차이를 보였다. (c)는 팽창지수의 차이가 60%이상인 시료로 1차 팽창지수는 0.1863, 2차 팽창지수는 0.0816으로 128%의 차이를 보였다.

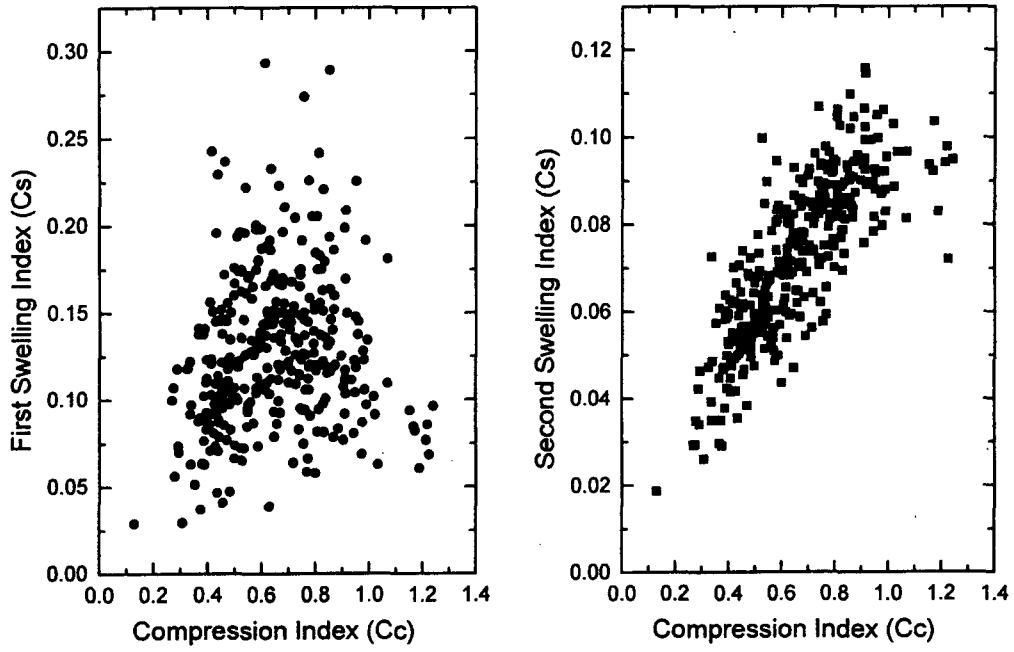


Fig. 4.3 압축지수 - 팽창지수 그래프.

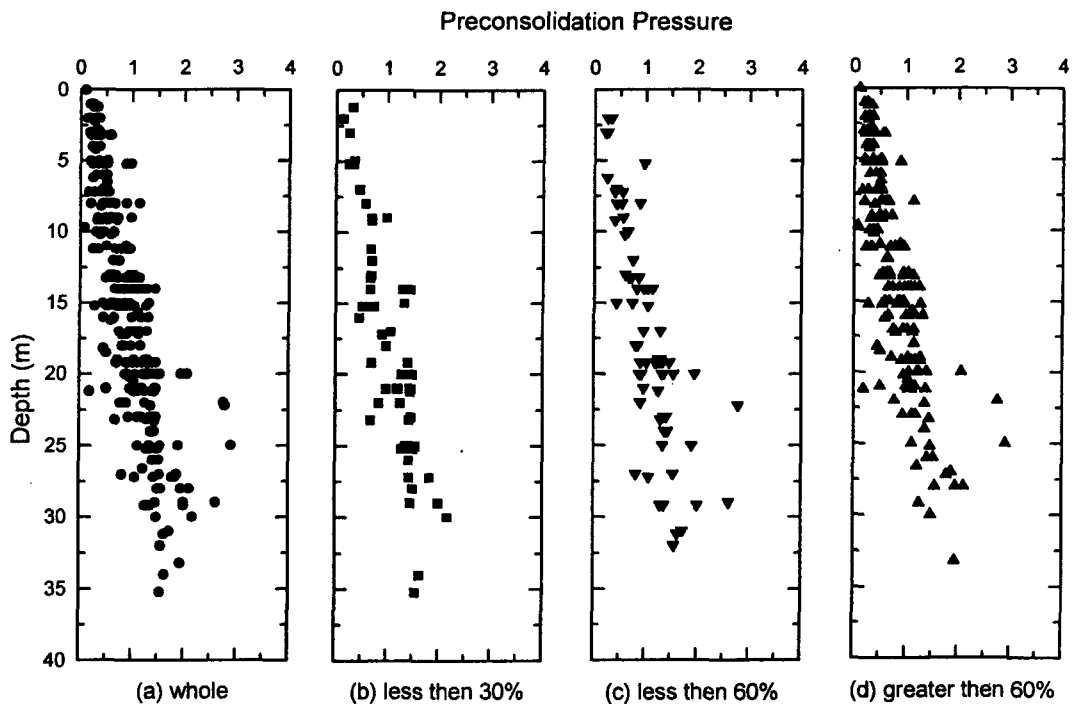
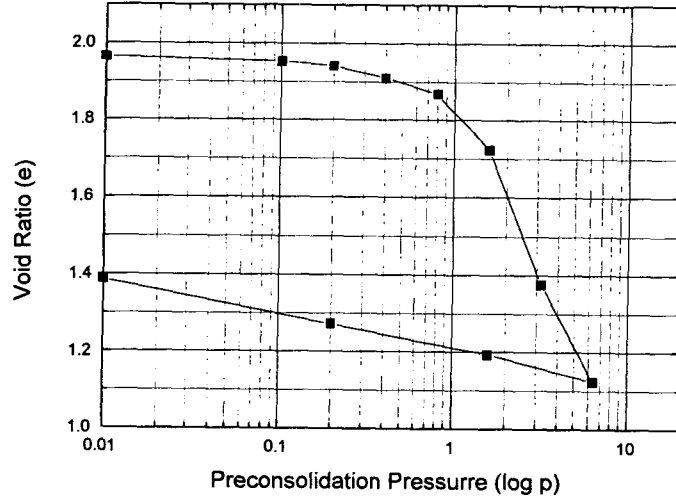
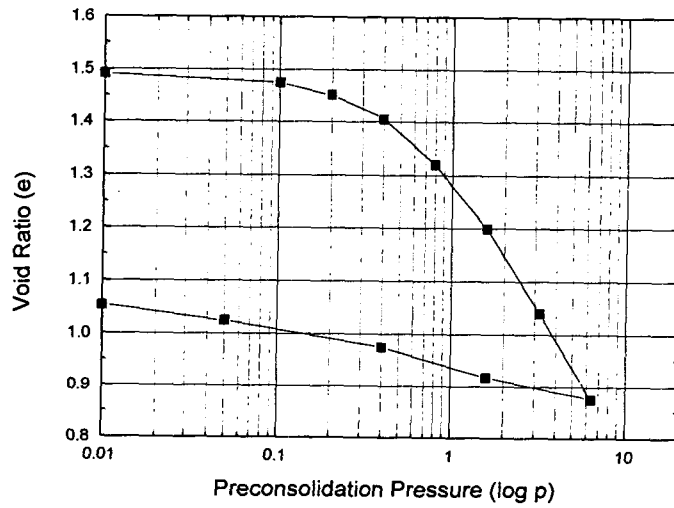


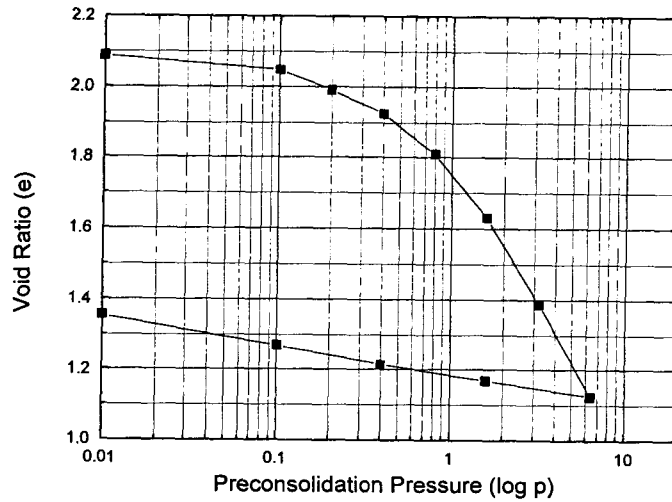
Fig. 4.4 깊이에 따른 선행압밀하중의 분포



(a) D=15m, $P_c=1.32\text{kg/cm}^2$



(b) D=15m, $P_c=0.74\text{kg/cm}^2$



(c) D=15, $P_c=0.88\text{kg/cm}^2$

Fig. 4.5 Fig. 4.4에서 15m 깊이에서 대표적인 e-log p 그래프

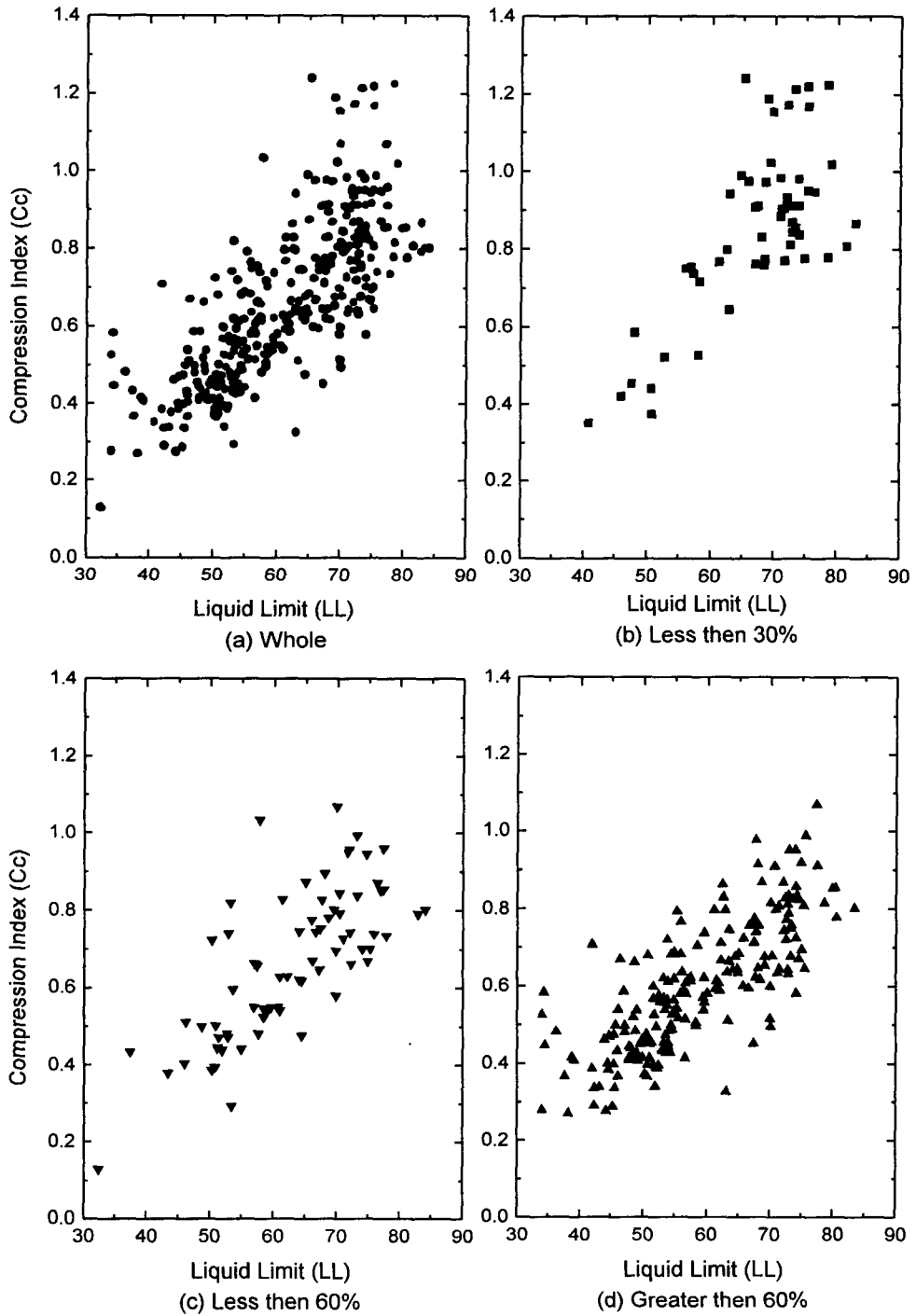


Fig. 4.6 액성한계와 압축지수의 관계

Fig. 4.6은 압축 지수와 액성한계의 상관 관계를 나타내는 그래프이다. (a)는 시료 전체에 대한 관계 그래프로 대체적으로 액성한계와 압축지수가 수렴 관계에 있다. (b)는 30%이하, (c)는 60%이하, (d)는 60%이상의 팽창지수들의 차이가 보이는 시료들에 대한 그래프이다. 3가지의 팽창지수-액성한계의 관계식은 다음과 같다.

$$C_c = 0.0136 (LL - 12.7) : \text{전체} \quad (4.1)$$

$$C_c = 0.0166 (LL - 15.7) : 30\% \text{이하} \quad (4.2)$$

$$C_c = 0.0129 (LL - 11.9) : 60\% \text{이하} \quad (4.3)$$

$$C_c = 0.0115 (LL - 6.9) : 60\% \text{이상} \quad (4.4)$$

그래프를 살펴보면 분산 정도가 가장 심한 것이 60%이하, 30%, 60%이상 순서인 것을 알 수 있다. 따라서, 압축지수의 값은 교란에 영향을 적게 받는 것을 알 수 있다.

5. 결론

점성토의 압축특성을 이용하여 표준 압밀시험 결과에 대한 점토 시료의 교란 정도를 추정하기 위하여 실시한, Rowe Cell 재하-제하 압밀시험 결과로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 오이도미터 시험의 결과로부터 압밀 최종 단계 하중에서의 팽창지수와 압축지수의 그래프에서 상당한 연관성을 보였으나, 압밀 처음 단계 하중과 선행 압밀 하중의 팽창지수의 관계 그래프에서 많은 분산을 보였다.
2. 지반 재현 Rowe Cell 압밀시험에서 압밀 처음 단계 하중에서의 팽창지수와 압밀 최종 단계 하중의 팽창지수는 시험결과 약 20%의 차이를 보였다

3. 1의 결과와 2의 결과로부터 실내 오이도 미터 e-log p 곡선에서 압밀 처음 단계 하중에서의 팽창지수와 압밀 최종 단계 하중의 팽창지수의 비교로 압밀시험의 신뢰성을 추정하기 위해 두 팽창지수들의 차이를 계산하였고, 깊이 에 따른 선행압밀하중의 그래프에 대하여 회기분석을 실시하였다. 그 결과 시료의 교란은 선행압밀하중의 크기에 영향을 주었으며, 팽창지수의 차이가 30%내외일 때 압밀시험 수행결과가 적합하다는 결과를 얻었다.

4. 팽창지수들의 차를 이용하여 분류한 압밀 결과를 액성한계와 압축지수에 적용한 결과로부터 점토시료의 교란은 압축지수의 변화에 큰 영향을 미치지 못하였다.

이 시험은 정규압밀상태의 점토에 대한 압밀시험의 신뢰성을 평가할 수 있는 방법을 제시한 것이다. 그러나, 과압밀점토인 경우에는 선행압밀하중이 제거되고 오랜 시간이 지났으므로, 구조적 안정과 변화가 발생하여 위의 결론을 적용하기에는 부적절할 것으로 사료된다. 그러므로, 과압밀점토 시료에 대해서는 다른 신뢰성 평가방법의 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. Crawford, C.B., Interpretation of The Consolidation Tests, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 90, No. SM5, pp. 93-108, 1964
2. Lacasse. S., Berre. T., and Lefebvre. G., "Block sampling of

- sensitive clays”, Proc. of the 11th international conference on soil Mechanics and Foundation Engineering, Sanfrancisco, pp. 887-892, 1985
3. Leonads, G.A., & Altschaeffl, A.G., Compressibility of Clay, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 90, No. SM5, pp. 133-156, 1964
 4. Jamiokowski, M., Ladd, C.C., Germaine, J.T. Lancellotta, R., “New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils”, Proc. 11th ICSMF, San Fransico. Vol. 1, pp. 57-153. 1985
 5. K. H. Head, “Manual Of Soil Laboratory Testing Volume 3”, Pentech Press London, pp 1129-1196, 1992
 6. Mcmanis. K.L., and Arman. A., “Evaluation of design parameters obtained by conventional sampling”, Design parameters in geotechnical engineering, BGS, London, Vol.2, pp. 81-86, 1979.
 7. R. Whitlow, “Basic Soil Mechanics”, Longman Scientific & Technical, Third Edition, pp. 154-156, 1995
 8. Young-Gil Lee and Young-Nam Lee, “Study on Sampling Disturbance Effects on Soil Properties”, 한국 지반 공학회, 98' 봄 학술 발표회 논문집, pp. 67-74, 1998
 9. T. Shogaki, Y. Maruyama, “Estimation of in-situ Undrained samples withing thin-walled samplers”, Geotechnical site characterization, Robertson and Mayne, pp.419-424, 1998
 10. Zhenshun Hong & Katsutada Onitsuka., “Effect of sample disturbance on yield stress and compressibility of Ariake clay”, Geotechnical site characterization, Robertson and Mayne, pp.371-376, 1998
 11. 김민욱, “Rowe Cell을 이용한 점토시료 샘플링의 교란도 추정”, 충남대학교, 석사논문, 1998
 12. 이상덕, “토질시험”, 새론, pp 164-204, 1997