

일정변형률 및 표준압밀시험을 이용한 해성점토의 압밀특성 연구

Study on the Consolidation Characteristics of Marine Clay
by CRS and Conventional Tests

이 우 진*¹

Lee, Woo - Jin

임 형 덕*²

Lim, Hyung - Duk

이 원 제*³

Lee, Won - Je

Abstract

A series of conventional tests and CRS consolidation tests with different rates of strain were performed to investigate the consolidation characteristics of marine clay. Preconsolidation pressures were evaluated by applying previously proposed methods for both the conventional tests and CRS tests results in order to check the legitimacy of these methods. The effects of strain rate on effective consolidation stress - strain relationship, porewater pressure, and preconsolidation pressure were also discussed.

It was found that the effective stress - strain relationship and the preconsolidation pressure are a function of strain rate imposed during consolidation test, but compression index isn't. The preconsolidation pressure ratio ($\alpha_2 = \sigma'_{p, CRS} / \sigma'_{p, Conv}$) of marine clay appears proportional to the logarithm of strain rate, with average values ranging from 1.11 to 1.30 for strain rates between 1×10^{-4} %/sec and 4×10^{-4} %/sec. The porewater pressure ratio during CRS tests does not exceed 6.0% except when the strain rate is 6.67×10^{-4} %/sec. Coefficient of consolidation or coefficient of permeability at normally consolidated range was not affected by the type of consolidation tests and the strain rate. Typical values of compression index (C_c), coefficient of consolidation (C_v), and coefficient of permeability (k_v) at normally consolidated range were $0.56 \sim 0.95$, $0.56 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-3}$ cm²/sec, and $2.0 \times 10^{-8} \sim 7.0 \times 10^{-7}$ cm/sec, respectively.

*1 정희원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 조교수

*2 정희원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 박사과정

*3 정희원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 박사과정 수료

요 지

본 연구에서는 남해안 해성점토의 일정변형률 압밀특성을 파악하기 위해 표준압밀시험과 변형률 속도가 다른 일정변형률 압밀시험을 수행하고 이들 결과를 비교·분석하였다. 표준압밀시험 및 일정변형률 시험에서 선행압밀하중을 산정하기 위하여 여러 제안된 방법을 사용하였으며 각 방법의 적용성을 검토하였다. 또한, 변형률 속도가 응력-변형률 관계, 간극수압, 그리고 선행압밀하중에 미치는 영향을 분석하였다.

해석결과에 의하면 압밀곡선의 분포와 선행압밀하중은 변형률 속도의 영향을 받지만, 정규압밀구간의 압축지수는 상대적으로 변형률 속도의 크기와 무관한 것으로 나타났다. 해성점토의 선행압밀하중비($\alpha_2 = \sigma'_{pCRS} / \sigma'_{pConv}$)는 변형률 속도의 대수축척에 비례하여 증가하는 것으로 나타났으며, $1.0 \sim 4.0 \times 10^{-4}$ %/sec의 변형률 속도에서 평균적으로 1.11~1.30의 분포를 보였다. 일정변형률 압밀시험에서 간극수압비는 변형률 속도가 6.67×10^{-4} %/sec일 때를 제외하고는 6.0%를 초과하지 않는 것으로 나타났다. 정규압밀구간의 압축지수, 압밀계수와 투수계수는 각각 0.59~0.95, $0.56 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-3}$ cm²/sec, 그리고 $2.0 \times 10^{-8} \sim 7.0 \times 10^{-7}$ cm/sec의 분포를 보였다.

Keywords : CRS consolidation test, Conventional test, Rates of strain, Preconsolidation pressure, Preconsolidation pressure ratio

1. 서 론

국토의 대부분이 산지로 구성되어 있고 삼면이 바다로 둘러싸여 있는 우리나라 지형특성상 인구증가와 고속성장애 따른 토지수요의 증가와 국토의 효율적인 이용측면에서 준설·매립된 인공지반 뿐만 아니라 해안 연약지반의 활용이 점차 증가하고 있다. 최근에는 영종도 신 국제공항, 서해안 고속도로, 남해안 항만건설 등 대규모 국토개발사업이 시행되고 있다. 따라서 이들 연약지반의 경제적이고 효율적인 처리를 위하여 대상지반의 정확한 역학적 특성을 파악하는 것이 무엇보다 중요하다.

일반적으로 연약점토지반의 압밀정수의 산정에 널리 이용되고 있는 Terzaghi의 1차원 압밀이론에 근거한 표준압밀시험(conventional test)은 시험기간이 오래 걸린다는 단점 외에도 선행압밀하중과 압밀계수의 산정에 문제점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 일정변형률 압밀시험(Constant Rate of Strain consolidation test: CRS)을 포함한 여러 형태의 급속압밀시험(continuous loading test)이

제안되었다. Hamilton과 Crawford(1959)가 선행압밀하중을 구하기 위하여 CRS 시험을 수행하였으며, Smith와 Wahls(1969)는 처음으로 개략적인 이론해를 발표하고 CRS 시험을 표준압밀시험으로 제안하였다. Wissa 등(1971)은 small strain에 근거한 이론해를 발표하였으며, 그 이후로 large strain에 근거한 여러 이론해들이 제안되었다. CRS 시험은 시험기간을 단축할 뿐만 아니라, 배압(back-pressure)을 이용하여 시료를 완전 포화시키며, 연속된 data를 얻을 수 있는 장점 때문에 최근에 압밀시험으로서 널리 사용되고 있는 추세이며, ASTM(1982)에 압밀시험으로서 등재되었다. 그러나 국내에서는 CRS 시험이 도입된 지 얼마되지 않아, 이에 대한 연구가 미비한 실정이다.

본 연구에서는 대표적 해안연약지반인 남해안에서 채취된 해성점토를 이용하여 기존의 표준압밀시험 및 CRS 시험을 수행하여 각각의 압밀특성결과를 비교, 분석함으로써 변형률 속도(strain rate)가 선행압밀하중과 압밀곡선에 미치는 영향, 압밀하중에 따른 과잉간극수압분포, 선행압밀하중 산정법의 적용성 등을 파악

하였다.

2. 일정변형률 압밀이론

2.1 CRS 해석이론

CRS 시험은 배압을 이용하여 시료를 완전히 포화시킨 상태에서 시간에 대한 변형률을 일정하게 주는 시험으로, 배수조건은 일면배수이며, 시료하단에서 과잉간극수압을 측정한다. 따라서 표준압밀시험과는 시험과정 및 경계조건(boundary condition)이 다르기 때문에 기존의 Terzaghi의 해석방법 대신에 여러 학자들에 의해서 CRS 압밀이론이 제시되었다. 본 연구에서는 일반적으로 CRS 압밀해석에 널리 이용되고 있는 Wissa 등(1971)이 제시한 방법을 사용하였다. 이 방법은 미소변형이론에 근거하여 압밀계수(c_v)는 일정하고, 시료내의 간극수압의 분포를 포물선으로 가정하였다. 기본방정식은 식(1)과 같으며 간극비(void ratio)가 변형률(strain)로 대체된 것 이외에는 Terzaghi의 압밀방정식과 유사하다.

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

거리와 시간의 무차원 변수($X = z/H$, $T_v = c_v t/H^2$)를 사용하고 초기조건과 경계조건을 고려하면 거리와 시간에 대한 무차원 변형률은 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

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

여기서,

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

γ 와 H 는 각각 일정변형률 속도와 시료의 높이이다.

식(2)는 정상상태(steady condition)와 비정

상상태(transient condition)로 구분되며 응력-변형률의 관계를 이용하여 선형 및 비선형상태의 압밀정수를 각각 산정할 수 있다. 정상상태에서 시료의 평균변형률은 식(3)과 같으며 시료가 선형거동을 하는 경우 평균유효응력과 압밀계수는 각각 식(4)와 (5)로 표현될 수 있다.

$$\varepsilon_{ave} = \frac{1}{3}[2\varepsilon(H, t) + \varepsilon(0, t)] = \gamma t \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sigma'_{v,ave} &= \frac{1}{3}[2\sigma'_v(H, t) + \sigma'_v(0, t)] \\ &= \sigma_v - \frac{2}{3}u_b \end{aligned} \quad (4)$$

$$c_v = (H_0^2/2u_b)(\Delta\sigma/\Delta t) = \frac{\gamma H^2}{2u_b m_v} \quad (5)$$

시료가 비선형거동을 하는 경우 평균유효응력과 압밀계수는 각각 식(6)과 (7)로 표현된다.

$$\sigma'_{v,ave} = [\sigma_v^3 - 2\sigma_v^2 u_b + \sigma_v u_b^2]^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} c_v &= -\frac{H^2 \log[\sigma_v + \Delta\sigma_v]/\sigma_v}{2\Delta t \log\left[1 - \left(\frac{u_b}{\sigma_v}\right)\right]} \\ &= -\frac{0.434\gamma H^2}{2\sigma'_v m_v \log\left(1 - \frac{u_b}{\sigma_v}\right)} \end{aligned} \quad (7)$$

2.2 변형률 속도의 산정

CRS 시험을 통해 점성토의 압밀특성을 추정하는 경우 적절한 변형률 속도(strain rate)를 산정하는 것이 매우 중요하다. 변형률 속도가 너무 작으면 시료하단에서 과잉간극수압이 발생하지 않아 압밀정수를 산정할 수 없으며, 반대의 경우 상대적으로 큰 과잉간극수압이 발생하게 되면 시료 양단의 응력차이의 증가로 인하여 실험결과와 신뢰도가 떨어진다.

일반적으로 변형률 속도의 산정은 시료의 투수 및 압축성에 따라 다르지만 최대 간극수압비(pore pressure ratio, u_v/σ_v)의 제한치를 초과하지 않는 범위에서 결정하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 지금까지 제시된 여러 방법들 중에서 점토의 액성한계(liquid limit)와 변형률 속도와의 관계를 제시한 Gorman 등(1978)의 방법을 참고하였으며, 이 방법은 ASTM(D4186-82)에 채택되었다. 그러나 이후에 수정된 방법(D4186-89)에서는 변형률 속도의 산정시 액성한계의 사용을 추천하지 않고 있다. 표 1과 2는 각각 ASTM에서 제시한 액성한계에 따른 변형률 속도의 추천치와 여러 학자들에 의해 제시된 최대 간극수압비의 제한치를 나타내고 있다(Feng, 1991).

표 1. 액성한계에 따른 변형률 속도의 추천치 (ASTM, D4186-82)

액성한계(%)	변형률 속도 (%/min)
0 ~ 40	0.04
40 ~ 60	0.01
60 ~ 80	0.004
80 ~ 100	0.001
100 ~ 120	0.0004
120 ~ 140	0.0001

표 2. 최대 간극수압비

참고문헌	$(u_v/\sigma_v)_{max}$ 제한치(%)
Smith & Wahls(1969)	50
Wissa 등(1971)	5
Gorman 등(1978)	50
Janbu 등(1981)	70
Lee (1981)	70
Armour and Drneвич(1986)	40-50
Larsson and Sallfors(1986)	15
Sandbaekken 등(1986)	5-10
Znidaricic 등 (1986)	30-50
ASTM D4186 (1989)	3-30

3. 시료준비 및 압밀시험

3.1 실험시료

본 시험에 사용한 시료는 남해안의 해성점토이며, 지층구조는 크게 상부해성퇴적층, 하부해성퇴적층과 기반암층이 분포하는 단순한 층서를 보이고 있다. 해성퇴적층은 전반적으로 실트질 점토(CL/CH)로 분류되지만 상부가 매우 연약한 컨시스턴시(consistency)를 보이는 반면, 하부로 갈수록 굳어지고 조립질 성분의 함량이 증가하는 경향을 보인다. 표준관입시험 결과 해수면에 인접한 부분에서는 대부분 N치가 1이하이며 하부퇴적층에서는 N치가 15이상으로 매우 굳은 상태를 나타내는 경우도 있다.

직경이 76mm인 샘플러를 이용하여 불교란 시료를 채취하였으며, 샘플러의 양 끝단을 파라핀으로 봉하여 보관기간동안 수분이 증발하는 것을 방지하였다. 실내시험에 의해 산정된 각 시료의 물리적 특성은 표 3에 요약되어 있다.

3.2 실험 기기 및 방법

본 연구에서 사용된 압밀시험기는 GEOCOMP사에서 제작한 것으로 CRS 시험 및 표준압밀시험뿐만 아니라 일정동수경사 압밀시험(controlled gradient test), 일정하중률 압밀시험(constant rate of loading test)과 일정압력비 압밀시험(constant pressure ratio test)등을 수행할 수 있는 다기능 자동시험기이다. 본 실험기는 본체, 압밀셀, 마이크로 컴퓨터, 자료입출력장치 등으로 구성되어 있다. 변형률 속도 및 시료의 초기조건을 입력한 후 실험을 시작하면 간극수압측정장치(pore-pressure transducer), 하중측정장치(load cell)와 변위측정장치(LVDT)로부터 실험측정치를 읽고, 컴퓨터에 저장하며 실험조건에 따라 자동적으로 실험이 종료된다.

본 연구에서는 일정변형률 압밀특성을 분석

하기 위하여 동일한 샘플링 튜브에서 여러 개의 시료를 준비하고 이들 시료에 대해 표준압밀시험과 CRS 시험을 수행하였다. 시료준비시 각 시료의 초기간극비는 동일한 튜브에서 얻은 시료라도 약간의 차이를 보였으며, 시료내부에 산재하는 어패류로 인해 실험결과에 약간의 영향을 미쳤을 것으로 추정된다. 표준압밀시험은 시료를 24시간 침수시킨 후 하중증가비(Load Increment Ratio, LIR)와 재하시간을 각각 1.0과 24시간으로 단계별로 하중을 가하는 기존 방법을 사용하였다. CRS 시험은 100 kPa의 배압(back-pressure)을 가하여 시료를 완전히 포화시킨 상태에서 수행하였으며 변형률 속도(strain rate)는 $6.67 \times 10^{-4} \% / s$ 와 $6.67 \times 10^{-5} \% / s$ 의 범위 내에서 산정하였다. 또한 압밀링 주변에 grease를 발라서 시료와 압밀링의 주변 마찰을 감소시켰다. 표준압밀시험에 사용된 시료의 직경과 높이는 각각 6cm와 2cm이며, CRS 시험에 사용된 시료의 직경과 높이는 각

각 6.35cm와 2.54cm이다. 본 연구에서 수행한 표준압밀 및 CRS 시험은 표 3과 같이 요약된다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 변형률 속도의 영향

일반적으로 변형률 속도는 압밀곡선 또는 선형압밀하중의 크기에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 그림 1은 SB-5A, SB-13A와 B 시료의 표준압밀시험과 CRS 시험의 결과를 압밀하중-변형률 또는 압밀하중-간극비의 관계로 나타낸 것이다. 그림 1에서 알 수 있듯이 변형률 속도가 증가하면 동일한 압밀하중에서의 변형률은 감소하며, 정규압밀구간의 압축지수는 변형률 속도에 관계없이 비슷한 것으로 나타났다. SB-13 A와 B 시료의 경우 유효응력-변형률의 관계와 유효응력-간극비의 관계가

표 3. 표준압밀 및 CRS 시험방법

공 번	깊이(m)	시험번호	ϵ'_v (%/sec)	σ'_{vo} (KPa)	e_0	w_n (%)	w_L (%)	w_p (%)	G_c
NB-3	6~6.8	IL-1		38.4	1.344	53.1	41.2	15.9	2.70
NB-74	23~23.8	CRS-1	4.17×10^{-4}	160.0	1.645	57.7	53.5	28.5	2.75
		CRS-2	1.67×10^{-4}		1.634	58.0			
		CRS-3	9.50×10^{-5}		1.582	56.3			
		IL-2			1.762	61.7			
SB-5A	15~15.8	CRS-4	6.67×10^{-4}	100.0	1.896	67.6	58.2	33.4	2.73
		CRS-5	1.67×10^{-4}		1.985	69.7			
		CRS-6	6.67×10^{-5}		1.911	69.5			
		IL-3			2.024	71.3			
SB-5B	20~20.8	CRS-7	1.17×10^{-4}	136.7	1.481	55.4	51.7	29.0	2.71
		IL-4			1.522	56.3			
SB-13A	9~10	CRS-8	4.17×10^{-4}	61.8	1.964	72.5	61.4	31.5	2.72
		IL-5			1.958	70.0			
SB-13B	23~24	CRS-9	3.50×10^{-4}	160.0	1.622	58.2	47.8	24.6	2.73
		IL-6			1.646	59.2			

유사한 경향을 보이나, SB-5A 시료의 경우 간극비와 변형률로 나타낸 압밀곡선의 경향이 약간 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 시료의 초기간극비 차이 때문인 것으로 판단된다. 본 시료의 초기간극비의 차이는 원지반의 비균질성과 시료 내에 산재한 어패류 때문인 것으로 판단되며, 동일한 샘플러에서 채취한 시료의 초

기간극비는 최대 0.18 정도 차이가 나는 것으로 나타났다. 일반적으로 변형률 속도를 달리 한 일련의 CRS 시험의 압밀곡선은 응력-변형률의 관계로 나타내는데, 이는 간극비 대신 변형률을 사용할 경우 초기간극비의 영향을 배제할 수 있기 때문이다.

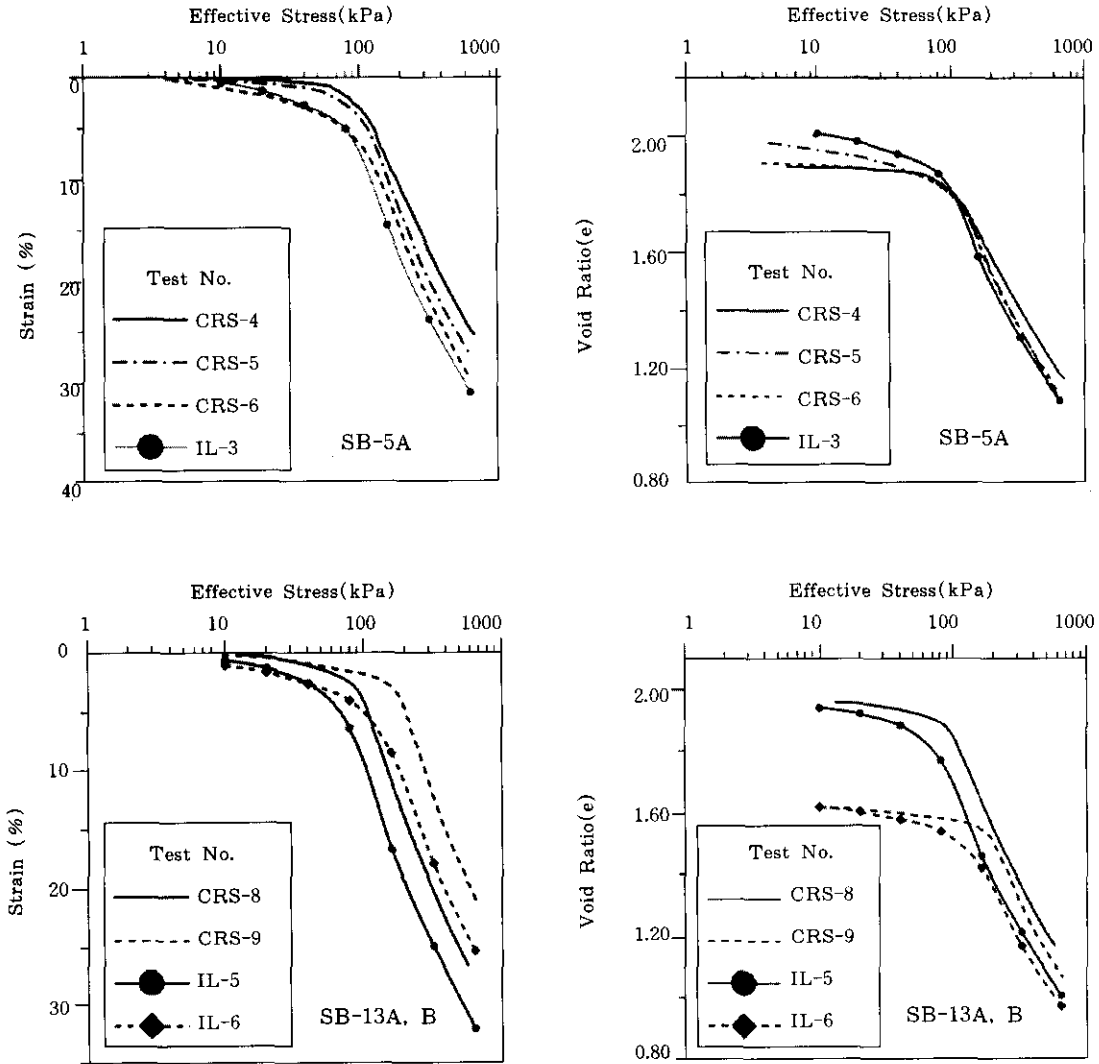


그림 1. 표준압밀 및 CRS 시험의 압밀곡선의 비교

본 연구에서는 표준압밀시험의 하중단계별로 1차 압밀이 종료되는 시점과 24시간을 기준으로 각각 변형률 속도를 추정하였다. 24시간을 기준으로 표준압밀시험의 변형률 속도는 $6.0 \times 10^{-6} \sim 1.2 \times 10^{-4} \%$ /sec의 분포를 보였으며, 처녀압축구간(virgin compression)에서는 평균 $8.5 \times 10^{-5} \%$ /sec로 나타났다. 처녀압축구간에서의 1차 압밀의 변형률 속도는 평균 $1.6 \times 10^{-3} \%$ /sec로 이는 24시간 기준의 변형률 속도의 약 10~20배 정도이다. 그러나 표준압밀시험에서는 1차 압밀의 종료시간을 과잉간극수압을 측정하여 산정한 것이 아니라, $\log t$ 또는 \sqrt{t} 법 등의 도식법을 이용하였으므로 신뢰성은 상대적으로 떨어진다고 판단된다.

4.2 간극수압 및 간극수압비(u_v/σ_v)

CRS 시험은 압밀시험중 시료의 하단부에서 과잉간극수압을 측정하여 압밀정수를 산정하는 시험이다. 과잉간극수압은 그림 2에서와 같이 하중재하 초기 단계에서는 거의 발생하지 않지만 선행압밀하중 근처에서부터 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 변형률 속

도가 클수록 최대 과잉간극수압의 크기도 증가하는 것으로 나타났다. 그림 3은 압밀시험 동안의 간극수압비(u_v/σ_v)를 나타내고 있다. 간극수압과 마찬가지로 재압축구간에서는 매우 작은 값을 보이지만 선행압밀하중 근처에서 급격히 증가한 후 일정한 값을 보이는 것으로 나타났다. 최대간극수압비는 변형률 속도가 $6.67 \times 10^{-4} \%$ /s일 때를 제외하고는 6.0% 이하인 것으로 나타났다.

4.3 선행압밀하중 (P'_c)

선행압밀하중은 연약점토지반의 거동에 영향을 미치는 매우 중요한 특성치이다. 일반적으로 선행압밀하중은 cement 및 aging 효과를 고려하지 않는다면 과거에 받았던 최대하중으로 표현된다. 실내압밀시험에서 선행압밀하중을 산정하는 방법에는 Casagrande의 방법이 널리 이용되고 있으며 그 이외에 여러 학자들이 제안한 방법들이 있다. 본 연구에서는 표준압밀시험 및 CRS 시험에서 Casagrande 방법(1936), Janbu 방법(1969), Oikawa 방법(1987), 그리고 Energy 방법(1987) 등을 사용

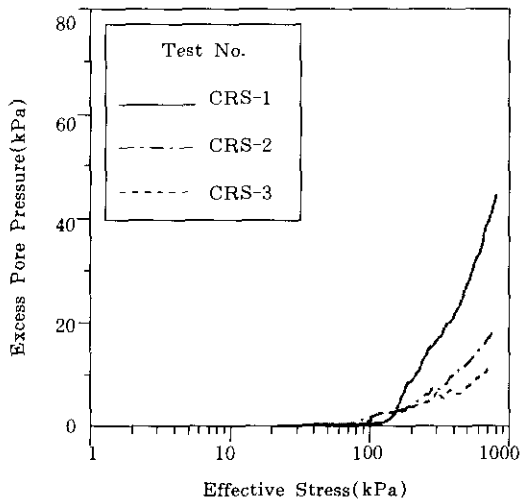


그림 2. 압밀하중-간극수압($\log \sigma'_v - u_v$)

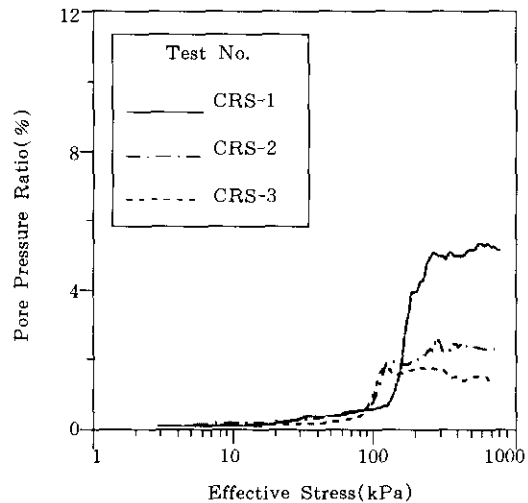
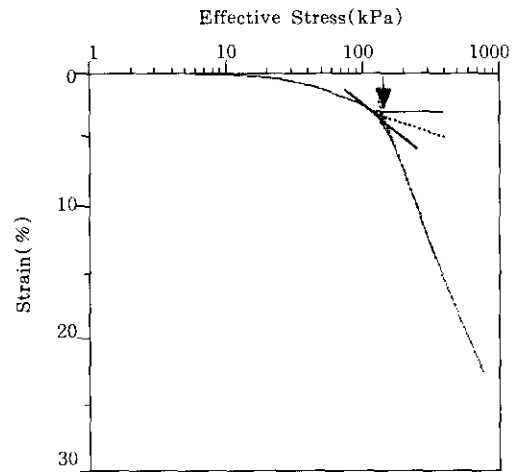
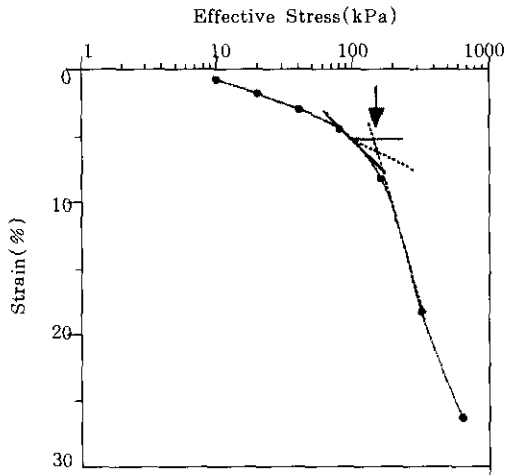


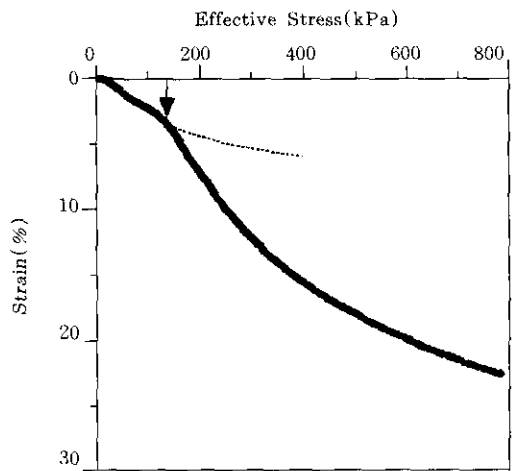
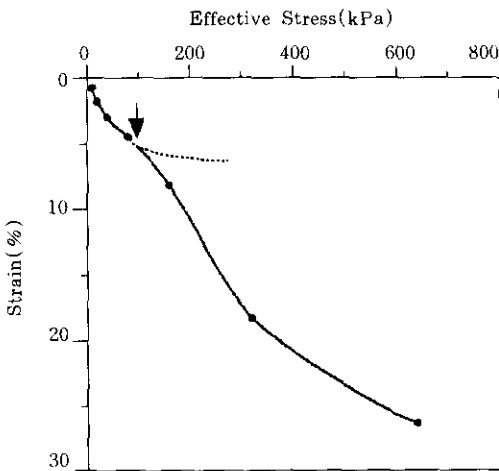
그림 3. 압밀하중-간극수압비($\log \sigma'_v - u_v/\sigma_v$)

하여 선행압밀하중을 각각 산정하였으며, 이를 비교하여 각 방법의 적용성을 검토하였다. 그림 4에 나타난 바와 같이 CRS 시험은 연속적인 data를 얻을 수 있기 때문에 표준압밀시험보다 선행압밀하중을 산정하는 과정에서 발생 가능한 오차를 줄일 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서 검토한 방법중 기존의 $e-\log \sigma'_v$ 곡선 대신 $\log e-\log \sigma'_v$ 곡선을 사용한 Oikawa 방법은

은 CRS 시험 및 표준압밀시험에서 선행압밀하중을 가장 손쉽게 구할 수 있는 방법으로 나타났다. 그 값이 실제 현장의 선행압밀하중과 어느 정도 일치하는지는 아직 규명되지 않았다. 일반적으로 널리 이용되고 있는 Casagrande 방법은 표준압밀시험에서는 data의 불연속으로 인하여 최소반경점을 구하기가 어려워 오차가 크게 발생하는 것으로 판단된다.



(a) Casagrande 방법



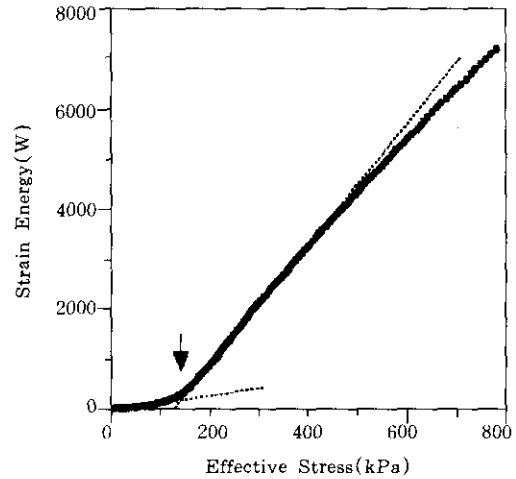
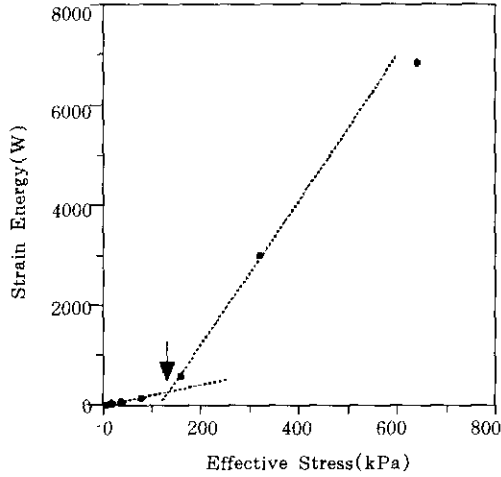
(b) Janbu 방법

이상의 결과로 볼 때 CRS 시험은 표준압밀 시험보다 선행압밀하중을 산정하는데 있어서 개인오차를 줄일 수 있다. 그러나 CRS 시험으로부터 산정된 선행압밀하중은 변형률 속도의 영향을 받는다. Morin 등(1983)은 CRS 시험으로 산정한 선행압밀하중으로부터 현장의 선

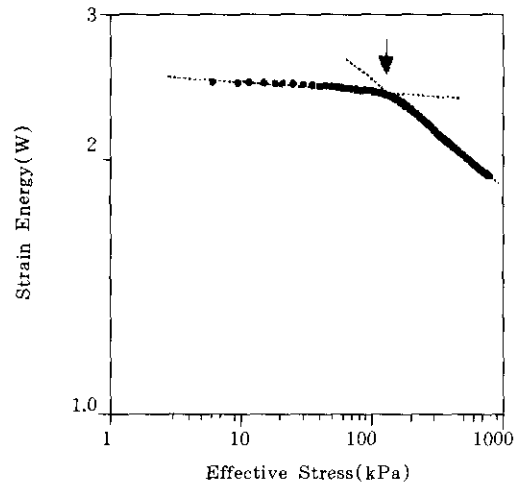
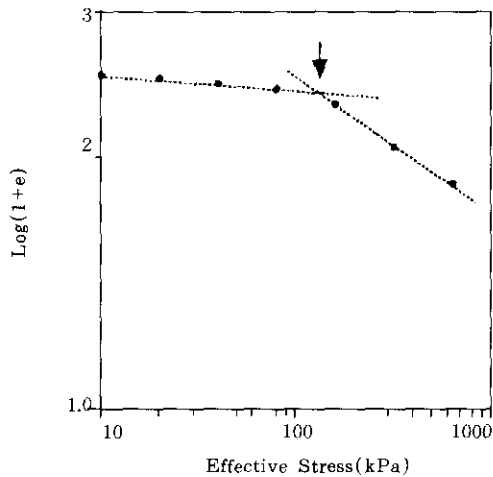
행압밀하중을 역으로 계산하는 공식을 다음과 같이 제안하였다.

$$(\sigma'_p)_{in-situ} = \alpha_1 \times (\sigma'_p)_{conv} \quad (8)$$

$$(\sigma'_p)_{conv} = \frac{(\sigma'_p)_{CRS}}{\alpha_2} \quad (9)$$



(c) Strain energy 방법



(d) Oikawa 방법

그림 4. 선행압밀하중의 산정(IL-4 & CRS-7)

여기서 α_1 은 과압밀비와 관련된 상수로 아래와 같이 계산되며, α_2 는 변형률 속도와 관련된 상수이며, 표준압밀시험과 CRS 시험으로 산정된 선행압밀하중비이다. 또한 표준압밀시험시 재하시간은 24시간을 기준으로 한다.

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 1.1 \text{ for } \text{OCR} < 1.2 \\ \alpha_1 &= 1.0 \text{ for } 1.2 < \text{OCR} < 2.5 \\ \alpha_1 &= 0.9 \text{ for } 2.5 < \text{OCR} < 4.5 \end{aligned}$$

그림 5는 변형률 속도에 따른 표준압밀시험과 CRS 시험으로부터 여러 가지 선행압밀하중 결정법을 이용하여 산정된 선행압밀하중비

(α_2)를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 α_2 는 변형률 속도의 대수축적에 비례하여 증가하는 것을 알 수 있으며, 이는 변형률 속도가 증가하면 선행압밀하중의 크기도 증가하기 때문이다. 또한 α_2 값이 1.0일 때의 변형률 속도는 대략 $6.0 \times 10^{-5} \text{ \%}/\text{sec}$ 이며, 이 값은 표준압밀시험의 24시간 하중단계를 기준으로 할 때의 변형률 속도와 유사한 값이다. 표 4는 외국에서 $1.0 \times 10^{-4} \sim 4.0 \times 10^{-4} \text{ \%}/\text{sec}$ 의 변형률 속도로 수행된 CRS 시험과 표준압밀시험의 선행압밀하중비의 분포를 나타내고 있다. 그림 5에 보이는 바와 같이 $1.0 \times 10^{-4} \sim 4.0 \times 10^{-4} \text{ \%}/\text{sec}$

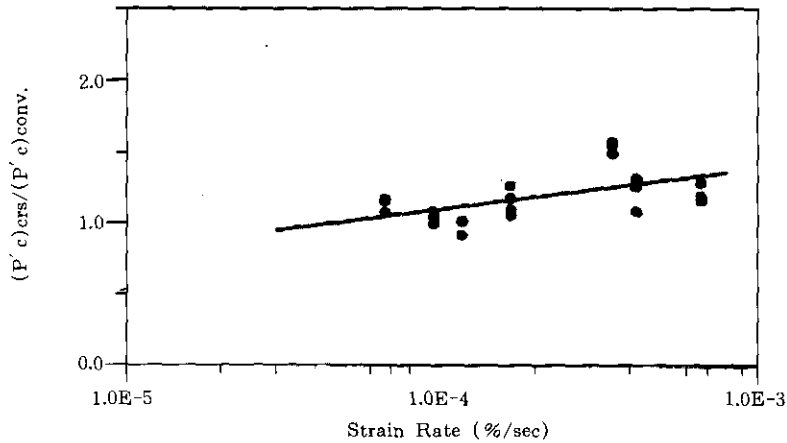


그림 5. 변형률 속도에 따른 선행압밀하중비 (α_2)

표 4. 선행압밀하중비 (α_2)의 분포

시험시료	$\sigma'_{pCRS}/\sigma'_{pconv}$	참고문헌
Quebec	1.28	Leroueil 등(1983)
Finland	1.16	Kolisoja 등(1989)
Osaka, Japan	1.3-1.5	Hanzawa 등(1990)
Fucino, Italy	1.2	Burghignoli 등(1991)
Ariake & Kuwana, Japan	1.3-1.4	Hanzawa(1991)
Yokohama, Japan	1.25	Okumura와 Suzuki(1991)
Finland	1.3	Hoikkala(1991)
Japan	1.18	Mizukami와 Motoyashiki(1992)
Bothkennar, U.K.	1.33	Nash 등(1992)

의 변형률 속도에서 α_c 값은 평균적으로 1.11~1.30의 분포를 보였다. 이는 외국의 연구결과(표 4.)와 유사하며 또한, 변형률 속도 1log cycle 증가시 선행압밀하중은 표준압밀시험에 의한 선행압밀하중값에 비해 평균 32.5%정도 증가하는 것으로 나타났다.

그림 6은 깊이에 따른 선행압밀하중과 압축지수(C_c)의 분포를 나타내고 있다. 본 지역의 과압밀비는 깊이가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났으며, 특히 20m 이하에서는 표준압밀시험 및 CRS 시험결과 모두 미압밀의 특성을 보이는 것으로 나타났다. 또한 압축지수는 0.56~0.95의 분포를 보였다. 그러나 실내압밀시험에 의한 과압밀비의 산정은 시료 교란뿐만 아니라 시험과정 및 해석에서의 오차 등으로 인하여 신뢰성이 떨어지므로, 본 지역의 미압밀특성은 차후에 좀더 정밀한 연구가 요구된다.

4.4 압밀정수

실내압밀시험으로부터 산정될 수 있는 압밀

정수는 구속탄성계수(M), 투수계수(k)와 압밀계수(c_v)등이 있다. CRS 시험에서는 시료 하단부에서 발생하는 과잉간극수압을 측정하여 투수계수와 압밀계수를 산정하는 반면, 표준압밀시험에서는 일반적으로 1차 압밀이 종료되는 시점(End Of Primary)을 logt 법 또는 \sqrt{t} 법 등을 사용하여 압밀계수를 산정하며 투수계수는 압밀계수와 체적변화계수(m_v)와의 관계를 이용하여 산정한다. 그림 7은 CRS 압밀시험과 표준압밀시험에서 각각 산정된 NB-74와 SB-5A 시료의 투수계수와 압밀계수를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 CRS 시험에서 산정된 압밀정수가 상대적으로 약간 큰 값을 보이지만, 대체로 비슷한 경향을 나타내고 있다. 특히 정규압밀구간에서의 투수계수와 압밀계수는 시험방법이나 변형률 속도에 관계없이 거의 동일한 값을 보이고 있다.

그림 7에서 나타나 있듯이 CRS 시험의 재압축구간, 즉 압밀시료가 현장에서 받고있는 유효상재하중(σ'_{vo}) 이하의 압밀하중에서는 압밀정수가 일정한 경향을 보이지 않고 불규칙적

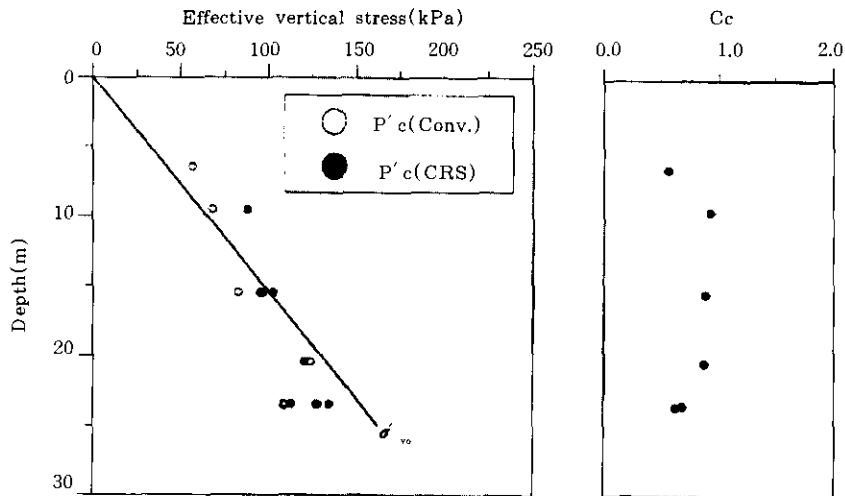


그림 6. 깊이에 따른 선행압밀하중과 압축지수의 분포

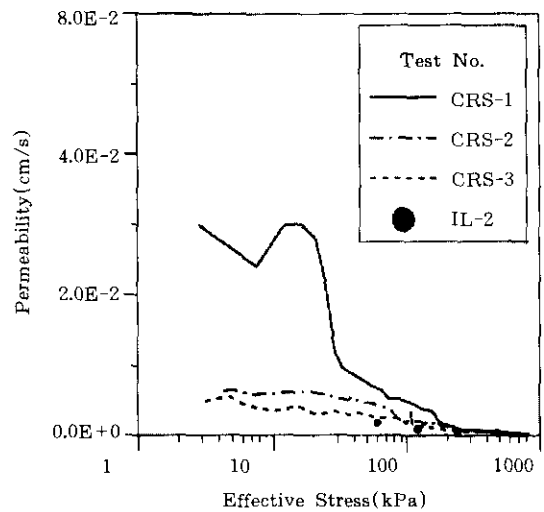
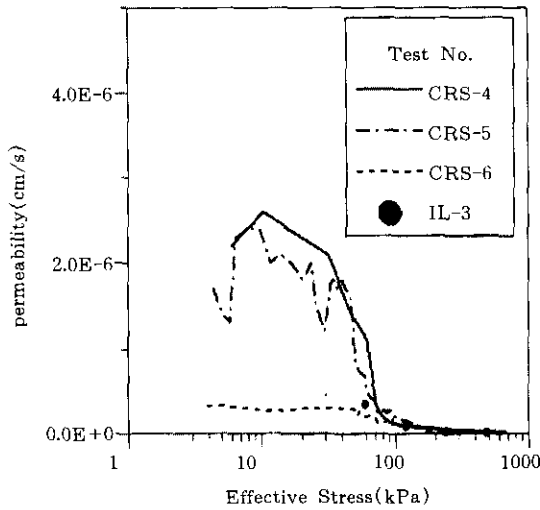
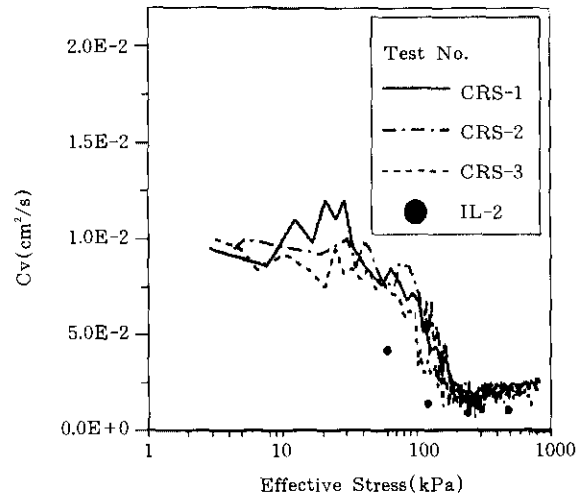
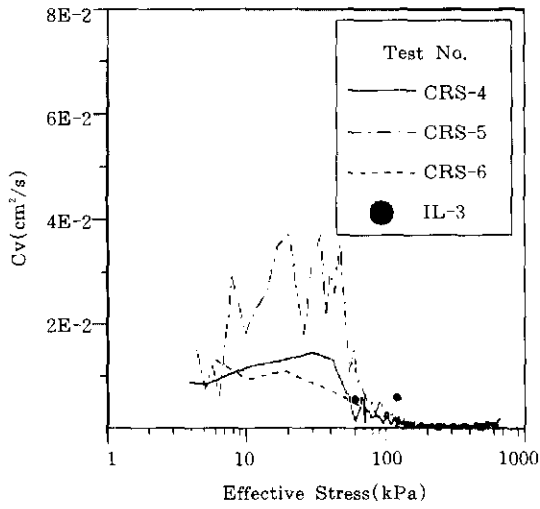


그림 7. CRS 및 표준압밀시험의 압밀계수와 투수계수

으로 변동하는 것을 알 수 있다. 이는 일정변형률 속도의 차이에 의한 것이 아니라 시료와 하중 장치의 불완전한 접촉, 미소 변위의 발생, 압밀기계의 오차, 그리고 시료교란 때문인 것으로 판단되며, 이러한 결과는 Larsson과 Sällfors (1986)의 실험결과에서도 관찰되었다. 본 실험에서 정규압밀구간에서 산정된 압밀계수와 투수계수는 각각 $0.56 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 와 $2.0 \times 10^{-8} \sim 7.0 \times 10^{-7} \text{ cm}/\text{sec}$ 의 분포를 보였다.

5. 결 론

본 연구에서는 남해안의 해성점토를 시료로 사용하여 여러 크기의 변형률속도를 사용한 CRS 시험과 표준압밀시험을 수행하여 각각의 해석에 의해 산정된 압밀특성을 비교·분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 변형률 속도는 압밀하중-변형률로 구성된 압밀곡선의 분포에 영향을 미치며, 변형률 속도가 증가할수록 동일한 유효응력에서의 변형률은 감소한다. 그러나 정규압밀구간의 압축지수는 상대적으로 변형률 속도의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.
- 2) CRS 시험에서 간극수압비(u_v/σ_v)는 변형률 속도가 $6.67 \times 10^{-3} \text{ \%}/\text{s}$ 일 때를 제외하고는 6%를 초과하지 않았으며, 변형률 속도와 압밀하중의 크기에 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 CRS 시험에서의 적절한 변형률 속도는 시료의 물리적 특성, 압밀특성, 그리고 간극수압비의 크기 등을 고려하여 산정되어야 한다.
- 3) 선행압밀하중을 여러 제안된 방법을 사용하여 산정한 결과, 연속적으로 data를 주는 CRS 시험이 표준압밀시험보다 개인적인 오차를 줄이는 것으로 나타났다. Casagrande 방법은 최소반경점 추정시 오차가 발생하며, 특히 동일한 샘플러에서 연속된 시료를 사용하는 CRS 시험의

경우 초기간극비의 차이로 인하여 변형률 속도가 선행압밀하중의 크기에 미치는 영향을 정확하게 파악할 수 없는 단점이 있다.

- 4) 표준압밀시험과 CRS 시험으로 산정된 선행압밀하중비(α)는 변형률 속도의 대수축척에 비례하는 것으로 나타났으며, CRS 시험에서의 선행압밀하중은 변형률 속도 1 log cycle 증가시 표준압밀시험의 선행압밀하중값에 비해 평균 32.5% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 또한 $(1.0 \sim 4.0) \times 10^{-4} \text{ \%}/\text{sec}$ 의 변형률 속도에서 국내 해성 점토의 평균 α 값은 1.11~1.30의 분포를 보였으며 이는 외국의 사례연구와 유사한 결과이다.
- 5) 남해안 해성점토의 과압밀비는 하부로 갈수록 감소하는 경향을 보이며, 상부에서는 정규압밀의 특성을 보이나, 20m 이하에서는 미압밀의 경향을 보이고 있다. 그리고 연약지반 변형의 대부분이 발생하는 정규압밀구간에서 압축지수, 압밀계수, 그리고 투수계수는 각각 0.56~0.95, $0.56 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 와 $2.0 \times 10^{-8} \sim 7.0 \times 10^{-7} \text{ cm}/\text{sec}$ 의 분포를 보였다.

참 고 문 헌

1. 채영수, 방의석(1997), "일정변위압밀시험에 의한 한강오니토의 압밀특성에 관한 실험적 연구", '97 가을 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 123~130
2. ASTM Designation: D4186-82, Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Controlled-Strain Loading
3. Becker, D. E., Crooks, J. H. A., Been, K., and Jefferies, M. G., (1987), "Work as a Criterion for Determining In-Situ and Yield Stresses in Clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 24, No. 4, pp. 549~564
4. Casagrande, A.(1936), "The Determination of

- the Preconsolidation Load and Its Practical Significance, *Proceedings of 1st ICSMFE*, Cambridge, Vol. 3, pp. 60~64
5. Feng, T. W.(1991), "Compressibility and Permeability of Natural Soft Clays and Surcharging to Reduce Settlements", Ph. D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign
 6. Gorman, C. T., Hopkins, T. C., Deen, R.D., and Drnevich, V. P.(1978), "Constant Rate of Strain and Controlled Gradient Consolidation Testing", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 1, No. 1, pp. 3~15
 7. Hamilton, J. J. and Crawford, C. B.(1959), "Improved Determination of Preconsolidation Pressure of a Sensitive Clay". *STP 254, ASTM*, pp. 254~271
 8. Janbu, N.(1969), "The Resistance Concept Applied to Deformations of Soils", *Proceedings of 6th ICSMFE*, Mexico City, vol. 1, pp. 191~196
 9. Larsson, R. and Sällfors, G.(1986), "Automatic Continuous Consolidation Testing in Sweden", *STP 892, ASCE*, pp. 299~328
 10. Leroueil, S.(1996), "Compressibility of Clays: Fundamental and Practical Aspects", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 7, pp. 534~543
 11. Leroueil, S., Kabbaj, M., Tavenas, F., and Bouchard, R.(1985), "Stress-Strain-Strain Rate Relation for the Compressibility of Sensitive Natural Clays", *Geotechnique*, Vol. 35, No. 2, pp. 159~180
 12. Leroueil, S., Tavenas, F., Samson, L., and Morin, P.(1983), "Preconsolidation Pressure of Champlain Clays. Part II. Laboratory Determination", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 20, pp. 803~816
 13. Lim, H. D.(1997), "Comparison of Consolidation Characteristics of Gaduk-do Clay by CRS and Conventional Tests", M.S.C.E. Thesis, Korea University
 14. Morin, P., Leroueil, S., and Samson, L.(1983), "Preconsolidation Pressure of Champlain Clays. Part I. In-situ Determination", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 20, pp. 782~802
 15. Oikawa, H.(1987), "Compression curve of soft soils", *Soils and Foundations*, Vol. 27, No. 3, pp. 99~104
 16. Smith, R. E. and Wahls, H. E.(1969), "Consolidation under Constant Rates of Strain", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 95, SM2, pp. 519~539
 17. Wissa, A. E. Z., Christian, J. T., Davis, E. H., and Heiberg, S.(1971), "Consolidation at Constant Rate of Strain", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 97, SM10, pp. 1393~1413

(접수일자 1998. 2. 25)