

과압밀 및 정규압밀영역의 응력상태에 따른 부산점토 장기압밀특성

김윤태* · 조상찬**

*부경대학교 해양공학과

**삼성중공업

Long-term Consolidation Characteristics of Busan Clay considering OC or NC States

Yun-Tae Kim* and Sang-Chan Jo**

*Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National Univ., Busan, Korea

**Samsung Heavy Industries, Korea

KEY WORDS: Busan clay 부산점토, Long-term consolidation 장기압밀, Secondary compression index 이차압축지수, Creep rate 크리프 속도

ABSTRACT: Numerous long-term consolidation and secondary compression settlements may occur in Busan clay, which is a structured soft clay and consists of a thick clay deposit. As a surcharge load is applied to soils, soils experience different stress paths with depth. Therefore, it is necessary to study the long-term consolidation behavior of Busan clay considering stress conditions such as OC or NC states. In this study, a series of long-term consolidation tests were performed to investigate the consolidation characteristics of Busan clay for 20 days. The undisturbed clay samples were taken from 3 sites located in the Nakdong River estuary. The results showed that the creep rate of the Busan clay gradually decreased with time, which indicated that the secondary compression settlement decreased with time. In addition, the experimental results for 3 samples showed that the ratios were about 0.0363 and 0.051, respectively.

1. 서 론

낙동강 하구 일대(Fig. 1(a))는 두터운 층적층이 약 70m 전후의 두께로 분포하는 대심도 연약지반으로 구성되어 있다. 최근 이러한 연약지반에 공업단지 및 주거단지 등을 확보하기 위한 개발이 진행되고 있다. 부산점토는 고결작용이 발달한 장년기(Young) 정규압밀점토로서 예민비가 10정도인 구조화된 점토이다. 이와 같은 연약지반의 압밀특성을 파악하여 정확한 압밀 침하 기간과 압밀 침하량을 산정하는 것은 매우 중요한 일이다. 특히 부산점토와 같은 대심도 연약지반 위에 각종 구조물을 시공할 경우 장기압밀침하량이 크게 발생할 것으로 예상된다.

Rito et al(2004)은 교토점토(Kyoto clay)와 오사카만 점토(Osaka Bay clay)에 대해 수행한 장기압밀시험 결과로부터 시료에 작용하는 압밀응력이 과압밀영역, 선행압밀하중 부근 또는 정규압밀영역이냐에 따라 침하특성이 서로 다르게 나타난다고 보고하였다. 부산점토의 깊이에 대한 유효응력과 선행압밀하중의 분포를 살펴보면 일반적으로 Fig. 1(b)와 같이 나타난다. 즉 지표면 부근에서는 건조(Desiccation), 산화(Oxidation) 및 지하수 변동 등의 영향으로 선행압밀하중이 유효응력보다 크게 나타나고, 깊이가 깊어짐에 따라 유효응력과 선행압밀하중이

거의 같은 값을 보인다. 이와 같은 지반에 일정한 크기의 구조물 성토하중이 가해지면 유효응력은 압밀에 의해서 시간이 경과함에 따라 증가하게 된다. 이때 구조물 성토하중의 크기에 따라 혹은 깊이에 따라 각 지반이 경험하는 응력경로는 서로 다르게 된다. 즉 지중응력 증가량에 따라 Fig. 1(b)와 같이 과압밀상태(A), 항복상태(B) 및 정규압밀상태(C)로 변하게 된다. 따라서 부산점토에 대한 장기압밀침하를 보다 정확하게 예측하기 위해서는 과압밀영역 및 정규압밀영역과 같은 응력상태에 따른 장기압밀거동에 대한 연구가 필요하다.

일반적으로 이차압축(Secondary compression)은 과잉간극수압의 소산이 완료된 이후 Creep에 의한 체적변화를 의미하며 오랜 기간 동안 발생하게 된다. 이차압축 침하량에 대한 평가는 대수시간에 대한 간극비의 감소량으로 정의되는 이차압축지수(Secondary compression index, C_α)를 사용하게 되는데, C_α 가 시간에 따라 일정하지 아닌지에 대한 논란은 현재까지도 계속되고 있다. Mesri and Vardhanabhati(2005)은 C_α 는 시간 경과에 관계없이 일정하며 압밀응력(consolidation pressure, σ_v')에 따른 C_c 값의 크기와 직접적으로 관련이 있다고 주장하였다. 또한 C_α 가 zero가 된다는 어떠한 지질학적인 근거도 없다고 밝히고

있다. 반면에 Berre and Iverson(1972), Leroueil et al(1985)은 대수시간(Logarithmic time)과 간극비 변화의 관계가 선형이 아니라고 보고하였다. Yin(1999)은 이차압축에 의해 발생하는 침하량의 끝(End)은 있으며 대수함수(Logarithmic function)로 표현하는 C_α 는 장기압밀을 평가하는데 있어서 한계가 있다고 보고하였다. 즉 일정한 C_α 값을 사용할 경우 시간경과에 따라 침하가 무한히 계속 발생한다. Yin(1999)은 이러한 한계를 극복하기 위해 C_α 를 쌍곡선 함수(Hyperbolic function)로 표현해야 한다는 연구결과를 발표하였다.

따라서, 본 연구에서는 과압밀영역 및 정규압밀영역과 같은 응력상태에 따른 장기압밀특성을 평가하기 위해 낙동강 하구의 불교란 점토를 사용하여 과잉간극수압의 측정이 가능한 수정된 Oedometer cell을 사용하여 단계재하 장기압밀시험을 실시하였다. 시험 결과를 통하여 과압밀영역과 정규압밀영역에서 시간에 따른 이차압축지수와 Creep rate의 변화를 살펴보고 각 응력단계별 $C_{v'}$, C_s 및 C_α 를 산정하여 이들의 관계를 살펴보았다.

2. 시험 개요

2.1 시험 시료

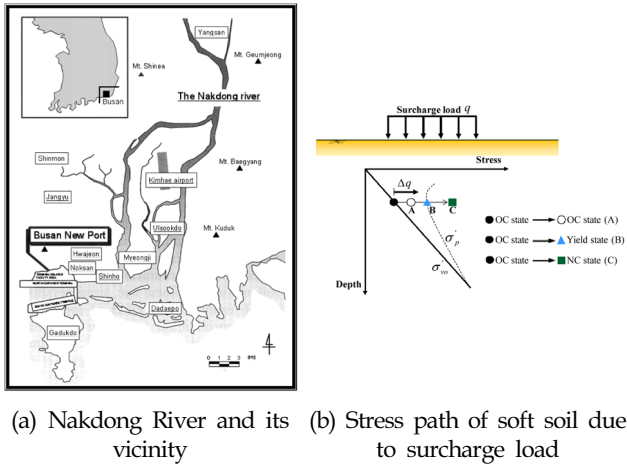


Fig. 1 Map of Busan and stress path

장기압밀특성 분석을 위해 본 연구에 사용된 시료는 부산 신항만 건설현장의 말무교 하부 깊이 20m의 불교란 점토(LTC-1), 부산 신항만 건설현장 남컨부두 하부 20m의 불교란 점토(LTC-2)와 화전 지역의 깊이 15m의 불교란 점토(LTC-3)이다 (Fig. 1(a)). 불교란 시료는 외경이 76.2mm인 얇은 관(Thin wall tube)을 이용하여 각 현장에서 채취하였다. 선 천공된 홀(Hole)에 얇은 관을 삽입한 후, 채취하고자 하는 깊이에서 수압에 의해 얇은 관을 지중으로 관입함으로써 시료를 채취하고, 채취된 시료는 교란되는 양도록 주의하여 실험실로 옮겨졌다. 압밀시험에 사용된 시편의 직경은 60mm, 높이는 20mm이다. 시험에 사용된 시료의 물리적 특성은 Table 1과 같으며 각각의 표준압밀특성은 Table 2와 같다.

Table 1 Physical properties of tested specimens

Property	Water content (%)	Liquid limit (%)	Plasticity index (%)	Specific gravity	Unit weight (kN/m ³)	USCS
LTC-1	50.3	47.4	28.3	2.67	17.7	CL
LTC-2	52.4	49.2	25.7	2.67	17.8	CL
LTC-3	50.1	43.0	25.0	2.61	17.6	CL

Table 2 Consolidation properties of specimens

	LTC-1	LTC-2	LTC-3
C_c	0.9	0.76	0.45
C_s/C_c	0.09	0.12	0.13
σ_p'	150kPa	140kPa	130kPa
k (cm/sec)	$2.7 \times 10^{-7} \sim 3.4 \times 10^{-8}$	$1.1 \times 10^{-7} \sim 7.3 \times 10^{-8}$	$4.4 \times 10^{-8} \sim 5.7 \times 10^{-9}$
$c\alpha$ (cm ² /sec)	$4.0 \times 10^{-3} \sim 6.0 \times 10^{-4}$	$1.9 \times 10^{-3} \sim 4.8 \times 10^{-4}$	$2.1 \times 10^{-3} \sim 9.4 \times 10^{-4}$

2.2 시험 장치 및 방법

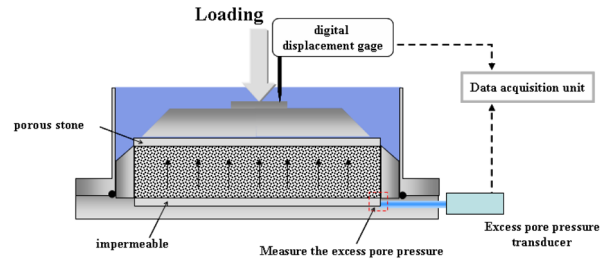


Fig. 2 Advanced automated oedometer test

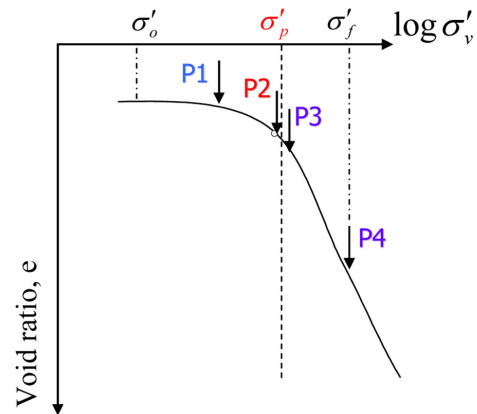


Fig. 3 Schematic diagram for long-term consolidation

본 연구에서 사용된 압밀시험기는 Fig. 2와 같이 기존의 고전적인 Oedometer cell에 디지털 변위계(Digital displacement gage)와 간극수압계(Pore pressure transducer)를 설치한 자동화된 표준압밀시험기이다. 변위는 0.001mm의 정확도로 정밀하게 연속적으로 측정이 가능하다. Fig. 2와 같이 하중재하시 배수는 시료 상부로 이루어지며 하부는 불투수층으로서 시료 바닥면에서

과잉간극수압을 측정할 수 있다.

부산 점토의 장기압밀특성을 파악하기 위해 약 20일 동안의 장기압밀시험이 4 ~ 5의 하중단계로 각각 실시되었다. 하중은 Table 3 및 Fig. 3과 같이 과압밀영역, 선행압밀하중 부근 그리고 정규압밀영역에 대해 각 단계별로 재하하였다. 각 단계에서 재하시간은 24시간이고 단계하중이 끝난 후에 20일 동안 장기압밀응력(P1~P4)을 재하하였다. 즉 P1 시험의 경우 10kPa, 20kPa 및 40kPa의 단계하중을 각각 1일동안 재하한 후 장기압밀응력 80kPa를 20일 동안 재하하여 응력, 간극수압, 변위 등을 계속하였다.

Table 3 Loading procedure and duration for long-term consolidation test

Consolidation test	NO	Loading[duration] (kPa) [days]
LTC-1	P1	10[1] → 20[1] → 40[1] → 80[20]
	P2	10[1] → 20[1] → 40[1] → 80[1] → 150[20]
	P3	10[1] → 20[1] → 40[1] → 120[1] → 200[20]
LTC-2	P1	10[1] → 20[1] → 40[1] → 80[20]
	P2	10[1] → 20[1] → 40[1] → 80[1] → 140[20]
	P3	10[1] → 20[1] → 40[1] → 80[1] → 160[20]
LTC-3	P1	10[1] → 20[1] → 40[1] → 80[20]
	P2	10[1] → 20[1] → 40[1] → 130[20]
	P4	10[1] → 20[1] → 40[1] → 80[1] → 160[1] → 320[20]

3. 시험 결과 및 분석

3.1 시간 - 변형률 곡선

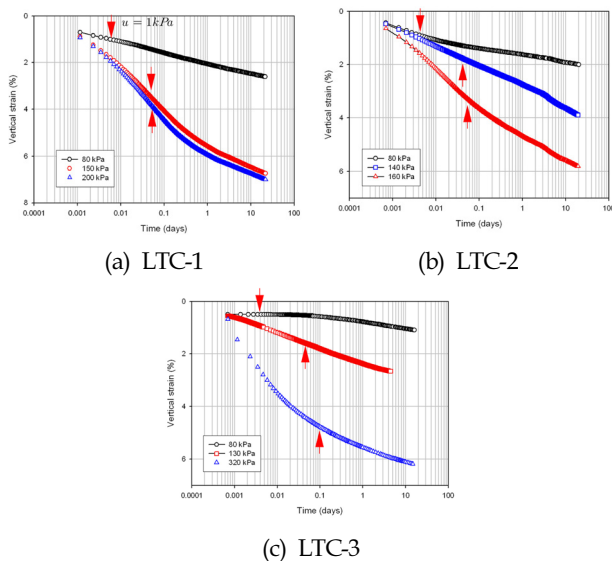


Fig. 4 Time-strain curve of long-term consolidation test

장기압밀시험 LTC-1, 2 및 3에 대한 시간-변형률 곡선은 Fig. 4와

같다. 그림에서 보듯이 압밀응력이 80kPa일 때 세 시료의 변형은 다른 압밀하중에서 유발되는 변형에 비해 무시할 수 있을만큼 작다. 하지만 최종압밀응력이 선행압밀하중 부근 또는 그 이상일 때 압밀 침하는 $\log t$ 에 대해 점차적으로 크게 증가함을 알 수 있다. 즉, 선행압밀하중 이전의 과압밀영역에서는 장기침하가 그리 크지 않지만 선행압밀하중 부근 또는 이후의 정규압밀영역에서는 장기적으로 압밀 침하가 크게 발생함을 알 수 있다. 그리고 그림에 표시된 화살표는 잔류 과잉간극수압이 1kPa 일 때를 나타낸다. 과잉간극수압은 선행압밀하중 부근 및 정규압밀영역의 응력상태 보다 과압밀영역 응력상태에서 빨리 소산됨을 알 수 있다.

3.2 과잉간극수압 변화 곡선

Fig. 5는 LTC-2 시료에 각각 80kPa, 140kPa 및 160kPa의 압밀응력을 재하하였을 때 유발되는 과잉간극수압의 변화 ($\Delta u / \Delta \sigma$)를 나타낸 곡선이다. 유발되는 과잉간극수압의 크기는 과압밀상태(80kPa), 선행압밀하중(140kPa) 및 정규압밀상태(160kPa)에 따라 다르며 정규압밀상태에서 과잉간극수압이 가장 크게 유발되는 것을 알 수 있다. 또한 최대값이 나타나는 시점도 과압밀상태, 선행압밀하중 및 정규압밀상태 순으로 커지는 경향을 보인다.

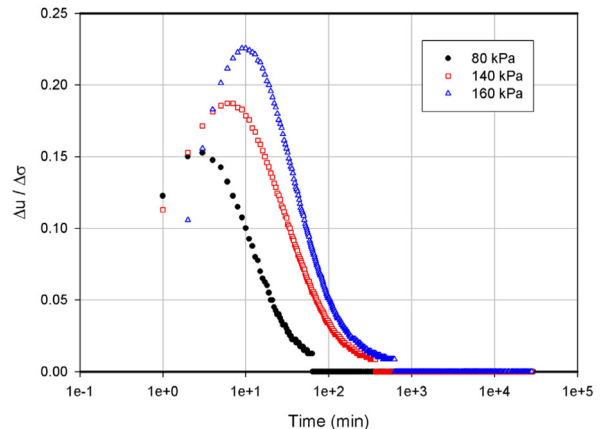


Fig. 5 Excess pore pressure dissipation curve

3.3 시간에 따른 이차압축지수의 변화

본 연구에서는 부산점토의 시간에 따른 C_α 의 변화를 살펴보기 위해 과잉간극수압의 소산이 완료되는 시점(약 1kPa 이하)부터 임의의 시간간격에 대한 간극비의 변화량($\Delta e / \Delta \log t$)을 연속적으로 구하였다. 그리고 이차압축이 시작되어 경과되는 시간(t)을 이차압축이 시작되는 시간(t_{EOP})으로 정규화시킨 값($T_s = t / t_{EOP}$)에 대해 C_α 의 변화를 살펴보면 Fig. 6과 같다. 그림에서와 같이 과압밀영역(OC state)에서의 C_α 는 거의 일정한 값을 나타내었다. 반면에 선행압밀부근(Yield state) 및 정규압밀영역(NC state)에서의 C_α 는 초기에 약간 크게 나타나고 시간이 갈수록 점차 감소하는 경향을 보였다. 이와 같은 이유는 유효응력이 선행압밀하중 부근 및 정규압밀영역으로 증가함에 따라 점토 흙 구조가

초기에 크게 붕괴되고 시간이 지남에 따라 흙 입자들 사이의 결합력(Bonding)으로 인해 점점 안정화되기 때문에 사료된다. 즉 정규압밀점토의 대수시간에 대한 간극비 변화 크기는 약간씩 감소하는 것으로 판단된다.

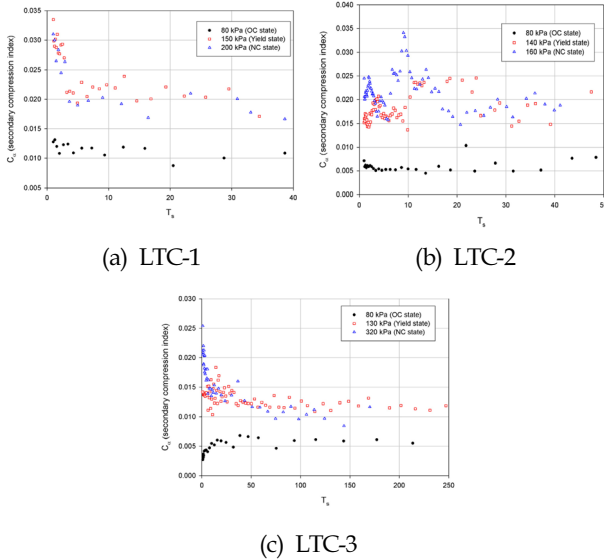


Fig. 6 Variation of C_α with time

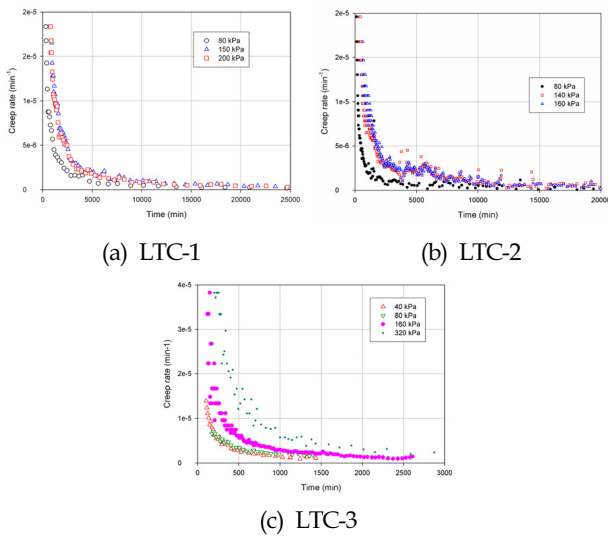


Fig. 7 Variation of $\dot{\Delta e}/\Delta t$ with time

Fig. 7은 시간에 따른 creep rate ($\dot{e} = \Delta e / \Delta t$)의 변화를 나타낸다. 과압밀영역, 선행압밀하중 부근 및 정규압밀영역의 응력 상태에 따라 Creep rate 곡선은 분명한 차이를 보이며 시간이 지날수록 점점 Zero에 가까워지는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 Fig. 8의 $\log t$ 와 $\log \dot{e}$ 의 관계를 통해서도 확인할 수 있다. 그림에서 보듯이 $\log \dot{e}$ 은 $\log t$ 에 대해 선형적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 이와 같은 결과를 바탕으로 이차압축에 의한 간극비의 감소량(또는 이차압축 침하량)은 시간이 지남에 따라

점차적으로 작아진다는 것을 알 수 있다.

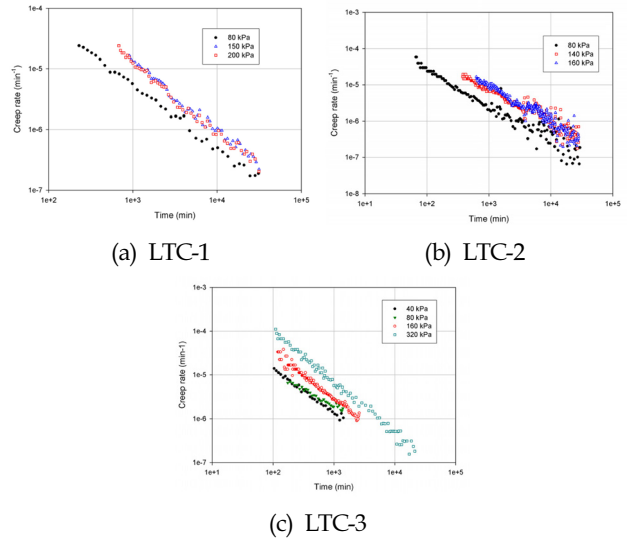


Fig. 8 $\log t - \log \Delta e / \Delta t$ relationship

Table 4 C_α/C_c of natural clays (Mesri and Godlewski, 1977)

Grouping	Soil Type	C_α/C_c
Inorganic Clays and Silts	Whangamarino clay	0.03 ~ 0.04
	Leda clay	0.025 ~ 0.06
	Soft blue clay	0.026
	Portland sensitive clay	0.025 ~ 0.055
	San Francisco mud	0.04 ~ 0.06
	New Liskeard varved clay	0.03 ~ 0.06
	Silty clay	0.032
	Neatshore clays and silts	0.055 ~ 0.075
Organic Clays and Silts	Mexico city clay	0.03 ~ 0.035
	Hudson River silt	0.03 ~ 0.06
	Norfolk organic silt	0.05
	Calcareous organic clay	0.035 ~ 0.06
	Postglacial organic clay	0.05 ~ 0.07
Peats	Organic clays and silts	0.04 ~ 0.06
	New Haven organic clay silt	0.04 ~ 0.075
	Amorphous and fibrous peat	0.035 ~ 0.083
	Canadian muskeg	0.09 ~ 0.1
	Peat	0.075 ~ 0.085
Peat	0.05 ~ 0.08	
Fibrous peat	0.06 ~ 0.085	

3.4 이차압축지수와 압축지수의 비

일반적인 이차압축지수 C_α 는 Table 4에서 볼 수 있듯이 압축지수 C_c 에 대해 일정한 값을 가진다. Mesri and Castro(1987)는 여러 종류의 흙에 대해서 C_α/C_c 가 0.02 ~ 0.1의 값을 가진다고 보고 하였고, 무기질 점토에 대해서는 $C_\alpha/C_c = 0.04 \pm 0.01$, 유

기질 점토에 대해서는 $C_{\alpha}/C_c=0.05\pm 0.01$ 의 범위에 존재한다고 발표하였다.

부산점토의 C_{α}/C_c 를 결정하기 위해 압밀응력 단계별로 압축지수(C_c)와 이차압축지수(C_{α})를 산정하였다. C_c 는 응력증가량에 대한 과잉간극수압의 소산이 완료될 때까지의 간극비의 감소량으로 계산하였고 C_{α} 는 Fig. 6에 나타난 값을 평균하여 구하였다. C_c 와 C_{α} 의 관계를 도시한 결과는 Fig. 9와 같이 선형적으로 나타났다. 즉 부산점토의 C_{α}/C_c 는 0.0363의 일정한 값을 보였고 이는 Mesri and Castro(1987)가 제안한 비유기질 점토에 대한 값 $C_{\alpha}/C_c=0.04\pm 0.01$ 과 유사한 결과를 나타내었다. 부산점토의 일반적인 압축지수(C_c) 값은 0.4~1.3 정도의 범위에 있다(곽정민 등, 2003; 홍성진 등, 2011). 또한 각각의 초기간극비에 대한 $C_c/(1+e_o)$ 와 $C_{\alpha}/(1+e_o)$ 의 관계도 Fig. 10과 같이 선형적으로 나타났고, 이들의 평균값은 C_{α}/C_c 값과 거의 동일하다.

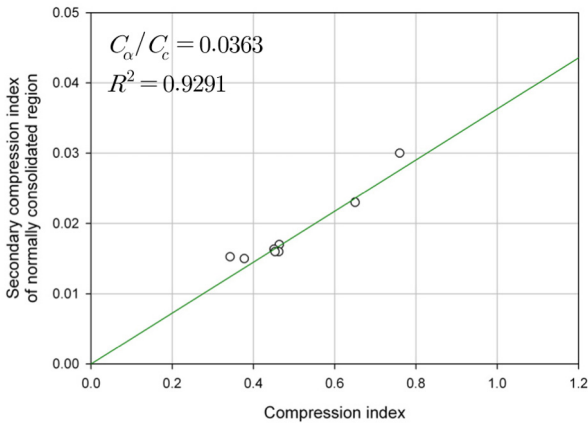


Fig. 9 C_{α}/C_c of Busan clay

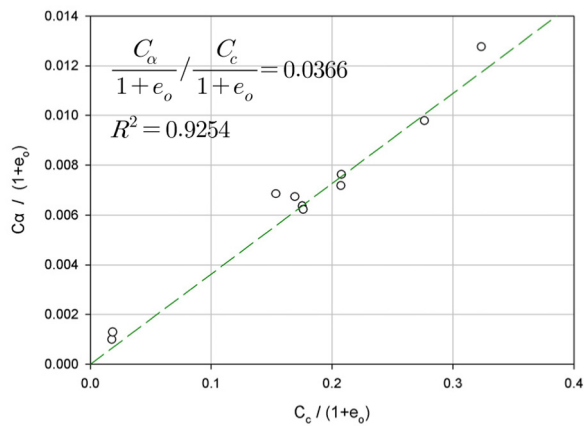


Fig. 10 $C_c/(1+e_o)-C_{\alpha}/(1+e_o)$ relationship

정규압밀지반에 대한 C_{α}/C_c 의 개념과 동일하게 과압밀영역의 이차압축지수($C_{\alpha(oc)}$)와 재압축지수(또는 팽창지수)의 관계를 분석한 결과 Fig. 11과 같이 선형적이며 $C_{\alpha(oc)}/C_s$ 는 0.051의

값을 가진다. 즉 과압밀영역에서도 과잉간극수압이 소산되는 동안의 변형과 이차압축 변형량은 밀접한 관계를 가지는 것을 알 수 있다. 마찬가지로 $C_s/(1+e_o)$ 와 $C_{\alpha(oc)}/(1+e_o)$ 의 비도 Fig. 12와 같이 $C_{\alpha(oc)}/C_s$ 와 유사한 값을 가지는 것으로 나타났다. 그리고 C_c 와 $C_{\alpha(oc)}$ 의 평균적인 관계를 살펴보면 Fig. 13과 같이 선형적으로 나타나며 그 비는 0.006이다.

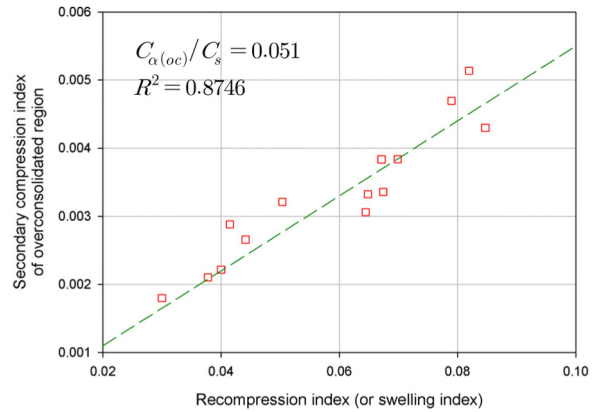


Fig. 11 $C_{\alpha(oc)}/C_s$ of Busan clay

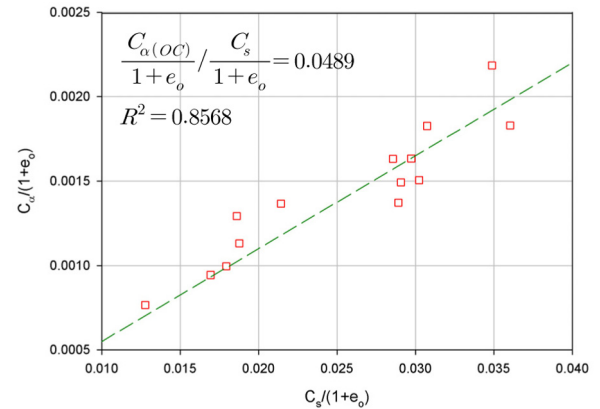


Fig. 12 $C_s/(1+e_o)-C_{\alpha(oc)}/(1+e_o)$ relationship

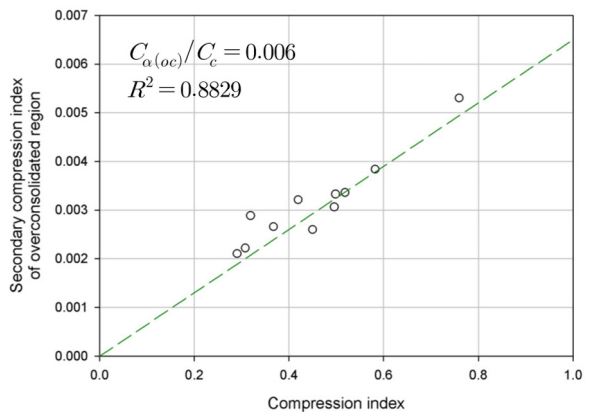


Fig. 13 $C_{\alpha(oc)}/C_c$ of Busan clay

4. 결 론

본 연구에서는 부산점토의 과압밀 및 정규압밀 상태와 같은 응력상태에 따른 장기압밀특성을 파악하기 위하여 과잉간극수압을 측정할 수 있는 자동화 표준압밀시험기를 사용하여 장기간의 하중단계 압밀시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 부산점토의 시간에 따른 C_α 의 변화를 살펴본 결과 과압밀영역의 C_α 는 거의 일정하고 정규압밀영역의 C_α 는 다소 감소하는 경향을 나타낸다.

(2) 시간에 따른 Creep rate는 점차 감소하며, $\log t$ 에 대한 $\log \dot{\epsilon}$ 는 선형적으로 감소한다. 이와 같은 결과를 바탕으로 이차압축에 의한 침하량은 시간이 지날수록 점차 감소한다는 것을 알 수 있다.

(3) 부산점토에 대한 정규압밀영역에서의 이차압축지수와 압축지수의 관계는 선형적이며 C_α/C_c 는 평균 0.0363으로서 Mesri and Castro(1987)가 제안한 비유기질 점토에 대한 값 $C_\alpha/C_c=0.04\pm 0.01$ 과 유사한 결과를 나타내었다. 정규압밀지반의 C_α/C_c 의 개념과 동일하게 과압밀영역의 이차압축지수와 재압축지수(또는 팽창지수)의 관계도 선형적이며 $C_{\alpha(oc)}/C_s$ 는 0.051의 값을 가진다. 또한 $C_{\alpha(oc)}/C_c$ 는 0.006정도 이다.

시험에 사용된 비교란 시료는 부산 신항만 건설현장 2개소(LTC-1, LTC-2) 및 화전 지역 1개소(LTC-3)에서 채취된 시료에 대한 제한된 연구결과이며, 부산점토의 장기 압밀특성에 대한 보다 일반화된 자료(D/B)를 얻기 위해서는 추후에 많은 연구가 계속되어야 한다.

참 고 문 헌

곽정민, 정성교, 백승훈, 이영남, 조기영 (2003). "부산점토에 대한 시료채취 기술에 따른 시료교란과 시험방법에 따른 압밀정수의 비교", 한국지반공학회 논문집, Vol 19, No 4, pp 43-53.

김규선, 임형덕, 이우진 (1999). 실내압밀시험에 의한 남해안 해성점토의 C_α/C_c , 한국지반공학회 논문집, 제 15권 6호, pp 87-98.

홍성진, 최영민, 우원택, 이우진 (2011). "PVD로 개량된 부산신항만 연약지반 압밀해석", 2011년 ATC 7 / 한국지반공학회(지역특별위원회)공동 심포지엄, pp 211-228.

Berre, T. and Iverson, K. (1972). "Oedometer Tests with Different Specimen Heights on a Clay Exhibiting Large Secondary Compression", Geotechnique, Vol 22, No 1, pp 53-70

Rito, F., Ohmukai, N. and Tanaka, H. (2004). "Long-term Consolidation Characteristics of Natural Clays", IS-OSAKA 2004, pp 7-10.

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.

Mesri, G. and Castro, A. (1987). "The C_α/C_c Concept and Gurguring Secondary Compression", Journal of geotechnical Engineering, ASCE, Vol 113, No.GT3, pp 230-247.

Mesri, G. and Vardhanabhuti, B. (2005) "Secondary Compression, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering", ASCE, Vol 131, No 3, pp 398-401.

Yin, J.H. (1999). "Non-linear Creep of Soils in Oedometer Tests, Geotechnique", Vol 49, No 5, pp 699-707

2011년 10월 18일 원고 접수

2011년 12월 9일 심사 완료

2011년 12월 23일 게재 확정