

준설매립지반의 장기압밀 특성

Long-term consolidation characteristics of dredged and reclaimed ground

이충호¹⁾, Choong-Ho Lee, 김주현²⁾, Ju-Hyun Kim, 백원진³⁾, Won-Jin Baek, 채영수⁴⁾, Young-Su Chae

1) 알지오 이엔씨 대표이사, President, R-geo E&C Co. Ltd

2) 알지오 이엔씨 기술연구소 책임연구원,

Chief Researcher, Institute of Engineering Research, R-geo E&C Co. Ltd

3) 전남대학교 생물산업공학과 조교수,

Assistant Professor, Dept. of Bio-Systems&Agricultural Eng., Chonnam National University

4) 수원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., The University of Suwon

SYNOPSIS : Consolidation settlements on marine dredged clays are often greatly and potentially damaging to structures. Currently, large-scale projects are in planning or progressing in Korea. These projects has been performed on thick and soft clay layers. So, the evaluation of long-term consolidation settlement is very important in design and construction. Therefore, In this study, a long-term consolidation characteristics of marine dredged clays are investigated. First, the relationship of C_a/C_c on marine dredged clays near Gwang-yang Port was evaluated. Second, long-term consolidation characteristics of the pseudo-preconsolidated ground were evaluated.

Key words : long-term consolidation settlement, pseudo-preconsolidation, marine dredged clay

1. 서 론

최근 항만, 공항, 택지, 산업기지 등의 수요가 확대됨에 따라 해안 인근 연약지반 상의 건설이 늘어나고 있으며, 이 중에서도 광양 인근 지역에서는 연약한 해성점토층 위에 대규모 매립작업을 실시한 부지 조성공사가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 지반의 경우, 압밀특성에 따라 장기간 방치에도 불구하고 압밀이 완료되기 어려우므로 준설매립이 완료된 지역에 추가 성토에 의한 지반개량을 수행할 경우에는 준설매립지반에 대한 압밀특성을 정확하게 파악하는 것이 지반의 효율적인 개량을 위해서 중요하다고 할 수 있다. 특히, 일반적으로 준설매립에 의해 조성된 지반에서는 상당량의 이차압밀침하가 장기적으로 발생될 것으로 예상된다. 따라서, 본 연구에서는 부지 조성후 공용기간 동안에 발생하는 이차압밀 침하량을 합리적으로 평가하기 위하여, 각 압밀하중 단계별로 이차압축지수(C_a)와 압축지수(C_c)를 산정하여, 두 압축지수간의 선형관계를 평가하였다. 또한, 준설매립지반의 상부고결층에 대한 유사 과압밀 특성을 규명하기 위하여, 각 하중단계별로 재하기간 60일을 적용하여 장기압밀시험을 실시하였다.

2. 문헌연구

2.1 이차압축지수의 산정

Terzaghi 압밀이론에 따르면, 과잉간극수압의 소산이 완료 이후에는 1차압밀이 완료되었다고 보나 그 후에도 계속하여 발생하는 침하를 이차압축침하라고 하고, 그림 1에서 A점 이후 곡선의 접선기울기를

이차압축지수라고 한다.

이차압축은 일반적으로 대수시간(log t)과 간극비(e) 또는 변형률($\Delta H/H_p$)간에 거의 선형적인 관계를 가지고 있으므로 이차압축 침하량을 구하기 위한 이차압축지수는 시간과 간극비 및 변형률의 관계를 이용하여 구할 수 있다.

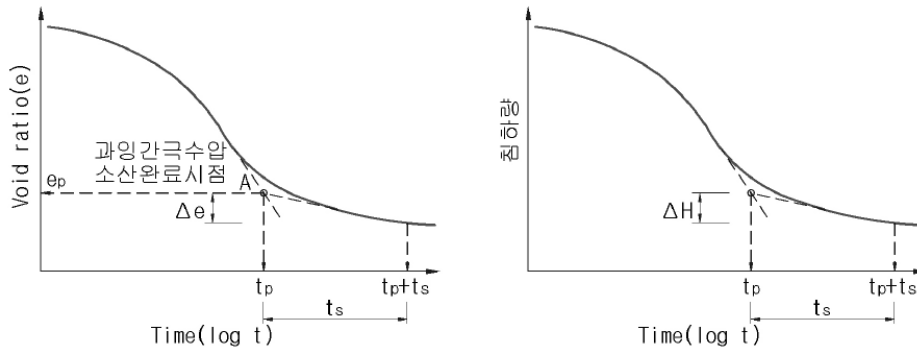


그림 1. 이차압축지수의 정의

$$C_a = \frac{\Delta e}{\Delta \log t} \quad (1), \quad \varepsilon_a = \frac{\Delta H/H_p}{\Delta \log t} \quad (2)$$

여기서, $\frac{\Delta H}{H_p} = \frac{\Delta e}{1 + e_p}$ 이므로, $\varepsilon_a = \frac{C_a}{1 + e_p}$ (3)

위에서 구한 이차압축지수를 이용하여 이차압밀침하량을 구하는 식은 각각 식 (4), (5)와 같다.

$$S_s = \frac{C_a}{1 + e_p} \times H_p \times \log\left(\frac{t_p + t_s}{t_p}\right) \quad (4), \quad S_s = \varepsilon_a \times H_p \times \log\left(\frac{t_p + t_s}{t_p}\right) \quad (5)$$

- 여기서, C_a : 간극비에 의한 이차압축지수
- ε_a : 변형률에 의한 이차압축지수
- e_p : 1차압밀 완료후의 간극비
- H_p : 일차압밀 완료후의 연약층 두께
- t_s : 일차압밀 완료후의 이차압축침하 산정기간
- t_p : 일차압밀이 종료되는 시점

2.2 압밀압력에 따른 압축지수(C_c)와 이차압축지수(C_a)의 평가

이차압밀은 일반적으로 과잉간극수압의 대부분이 소산된 후 발생하는 체적변화로 정의되는데, 이차압밀이 발생하는 시점에 대한 논의는 Terzaghi가 압밀이론을 발표한 후 수 십년 이상 지난 지금까지 논란이 되고 있는 주제이기도 하다. Jamiolkowski 등(1985)은 과잉간극수압의 소산 이후, 즉, 일차압밀 종료시점(EOP) 이후에 이차압밀이 발생한다고 주장하는 Hypothesis A를, Leroueil 등(1985), Kabbaj 등(1988)은 과잉간극수압의 소산이 발생하는 동시에 이차압밀이 유발된다고 하는 Hypothesis B를 주장하고 있다.

Mesri&Godlewski(1977)은 C_a 와 C_c 사이의 관계에 대해 연구를 통하여, 일차압밀과 이차압밀은 동일한 메커니즘에 기인한다고 결론지었다. 따라서, C_a/C_c 의 개념을 제안하였으며, 특정한 흙에 대하여 시간, 유효응력, 간극비에 관계없이 C_a/C_c 의 비는 일정하다고 결론지었다.

Mesri&Castro(1987)은 여러 종류의 흙에 대해서 C_a/C_c 가 0.02~0.1의 값을 가진다고 하였으며, 무기질 점토에 대해 $C_a/C_c=0.04\pm 0.01$, 유기질 점토에 대해서 $C_a/C_c=0.05\pm 0.01$ 의 범위에 존재한다고 제시하였다. 기존 연구에 따르면, 이차압축지수는 그림 2에 나타난 바와 같이, 선형압밀하중을 약간 벗어난 위치에서 최대값을 나타낸 후, 다시 감소하거나 일정한 값을 갖는 것으로 알려져 있다.

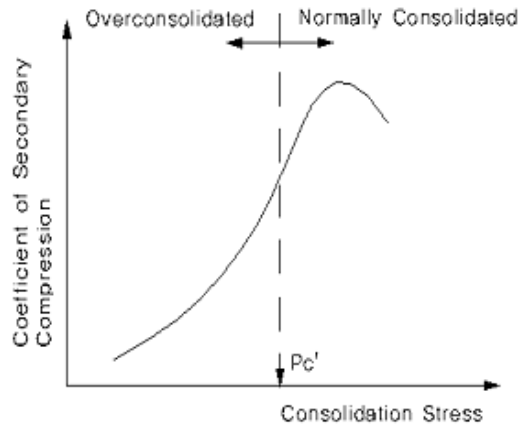


그림 2. 압밀압력에 따른 이차압축지수의 변화

2.3 유사과압밀 지반의 장기압밀특성

Tanaka(2004) 등은 오사카만 지역에서 채취한 점토시료와 교토 인근 구릉성의 내륙지역에서 채취한 점토시료에 대해 압밀압력 단계별로 약 70일간을 재하하여 장기압밀특성을 평가하였다. 퇴적이력에 대해 살펴보면, 두 지역은 홍적세 점토층으로 구성되어 있으며, 동일한 지질학적 연대 동안에 퇴적되었지만, 서로 다른 압밀이력을 경험한 것으로 평가되었다. 오사카만 지역의 점토는 예전에 유효상재압 이상의 압밀압력을 경험한 적이 없는 반면에, 교토 지역의 점토는 상부점토의 침식 작용에 의하여 과압밀 상태에 놓여 있는 것으로 알려졌다. 그러나, 오사카만 점토는 유효상재압 이상의 응력을 경험하지 않은 것으로 평가되었으나, 이차압밀과 cementation 작용에 의하여 유사과압밀 특성을 나타낸다는 것을 장기 압밀시험을 통하여 규명하였다. 두 지역 점토의 과압밀 영역에서의 압밀특성을 분석한 결과, 그림 3에 나타난 바와 같이, 오사카만 지역의 점토는 과압밀 영역에서 침하가 크게 발생하는 반면에, 교토 지역의 점토는 과압밀 영역에서 거의 침하가 발생되지 않는 것을 알 수 있다.

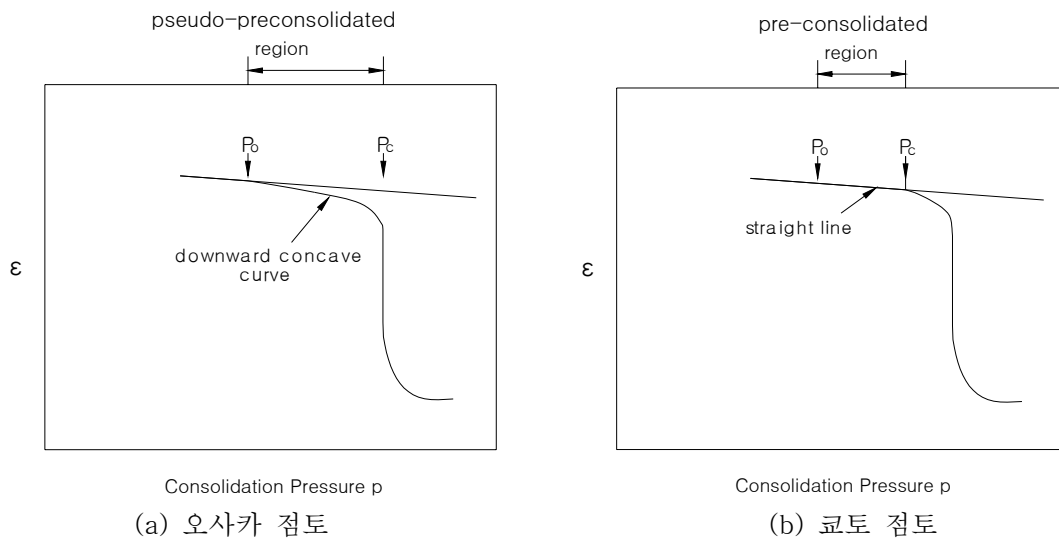


그림 3. 과압밀 영역에서의 압밀특성

3. 실험결과 및 분석

본 현장은 원지반상에 약 7m 두께의 준설토가 투기된 이후에, 방치기간이 약 10년 정도 경과한 상태이다. 부지 조성후 공용기간동안 발생하는 장기침하량을 보다 정도 높게 평가하기 위하여 장기압밀 시험(하중단계별 3일 동안 재하)을 실시하였다. 준설패립층은 A, B, C로, 원지반층은 A-1, B-1, C-1로 각각 표시하였다. 또한, 준설패립 상부층의 유사과압밀 특성을 분석하기 위하여, 준설패립층과 원지반층에서 각각 1개의 시료를 채취하여 하중단계별로 60일 동안 재하하는 장기압밀시험을 실시하였다.

3.1 압밀압력에 따른 압축지수(C_c)와 이차압축지수(C_{α}) 산정

압밀시험을 통하여 얻어진 압밀곡선에서 각 하중단계의 접선에 해당하는 C_c 를 구하고, 각 응력단계별로 이차압밀 유발부분에 대한 C_{α} 를 구하였다. C_{α} 는 시간-간극비 곡선에서 직선부가 나타나는 부분에서의 간극비와 시간의 관계로부터 구하였다. 그림 4는 준설패립층과 원지반층에서 산정된 압밀압력에 따른 이차압축지수와 압축지수의 변화를 나타내고 있다. 각 시험에 대해서 압밀압력에 따른 각각의 지수의 변화를 살펴보면, 초반에는 일정한 값을 보이다가 선행압밀하중에 가까워짐에 따라 급격히 증가한 이후에 선행압밀하중 부근을 지나면서 다시 감소하여 평형을 이루는 경향을 보인다. 그림에서 알 수 있듯이 두 지수는 서로 비슷한 거동을 보이며, 동일한 시료에 대해서는 지수의 분포가 압밀압력에 따라 비슷한 값을 나타냄을 알 수 있다. 이는 두 지수간의 관계가 선형관계를 가진다는 것을 의미한다.

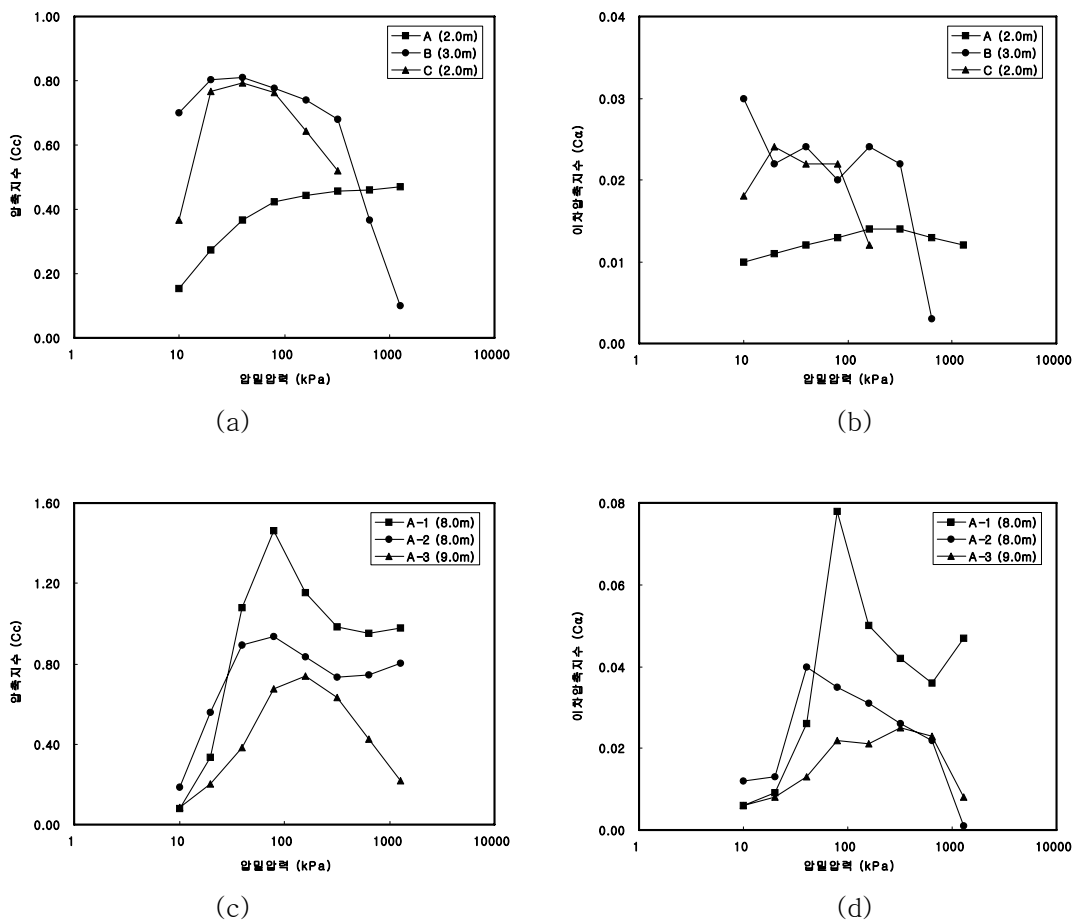


그림 4. 압밀하중에 따른 C_{α} 와 C_c

이러한 압밀시험을 통해서 각 응력단계별 일차압축지수와 이차압축지수의 관계를 준설 매립층과 원지반층에 대해 도시한 결과는 그림 5와 같다. C_{α}/C_c 는 각각 준설매립층과 원지반에 대해 0.0299, 0.0382의 값을 나타내었으며, 이는 Mesri&Castro(1987)가 제안한 비유기질 점토에 대한 값 $C_{\alpha}/C_c=0.040\pm 0.01$ 과 유사한 결과를 나타내었다.

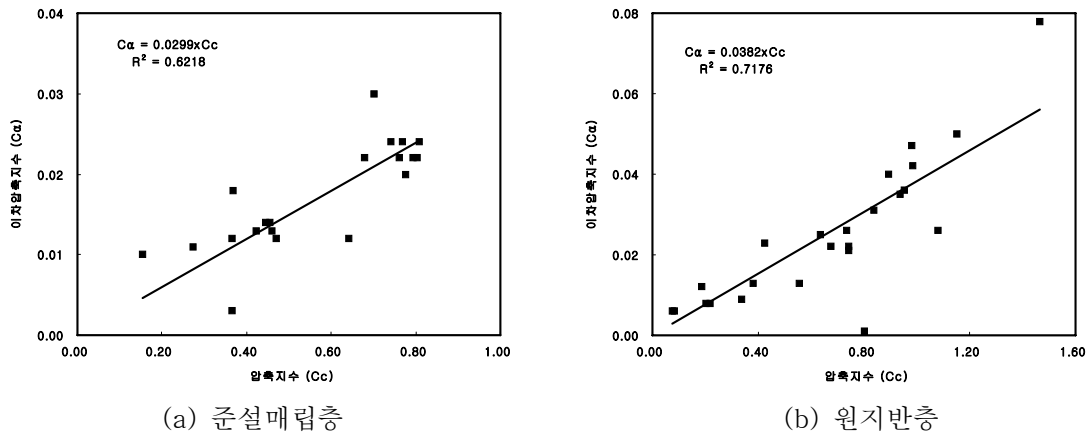


그림 5. 일차압축지수와 이차압축지수의 관계

한편, 연직배수재 타설후 선행재하 공법 적용시, 선행재하에 의해 원지반이 소요 압밀도에 도달한 경우, 선행재하토를 제거하고 나면, 원지반은 과압밀 상태에 놓이게 된다. 따라서, 이러한 경우, 원지반에 대한 이차압밀 침하량을 산정할 경우에는 정규압밀영역에서 산정한 압축지수(C_c)를 이용하여 앞에서 제시한 관계를 이용하여 이차압축 지수를 산정하는 것이 아니라, 과압밀 영역에서 산정한 재압축지수(또는 팽창지수)와의 관계를 이용하여, 이차 압축지수를 산정해야 한다. 다시 말하면, 그림 5에 제시한 관계식은 과압밀 영역 및 정규압밀 영역을 모두 포함하여 제시된 식이므로, 과압밀 영역에서는 관계식 적용시 압축지수 대신 재압축지수를 적용해야 할 것이다.

3.2 준설매립지반의 장기압밀 특성

준설매립층과 원지반층에서 각각 채취한 시료에 대해 각 응력단계별로 60일 동안 장기압밀 시험을 실시하였다. 본 연구에서는 선행압밀하중 산정시 Casagrande 방법외에 기존에 제시된 방법들을 적용하여 표 1에 나타난 바와 같이 선행압밀하중을 산정하였다. 특히, 준설매립지반과 같이, 미압밀 특성을 나타내는 경우에는 Casagrande 방법을 이용할 경우, 그림 6에 나타난 바와 같이, 선행압밀하중 산정이 불가능한 경우도 있었으며, 최소곡률반경을 합리적으로 평가하기 어려운 경우가 발생되기도 하였다.

표 2. 각각의 방법을 이용하여 산정된 선행압밀하중

구 분	심 도 (m)	선행압밀하중(Pc, kPa)								평 균
		Casagrande	Janbu1	Janbu2	Becker	Sällfors	Sridharan	Silva	Schmertmann	
A	2.0	34	40	80	42	-	41	33	40	44
B	3.0	-	20	20	-	11	-	-	23	21
C	2.0	25	40	40	40	-	24	19	32	31
A-1	8.0	48	80	80	70	30	35	35	85	58
B-1	8.0	30	40	80	22	-	26	23	47	38
C-1	9.0	90	160	80	64	-	52	60	110	88
D-1	11.0	40	80	-	32	36	37	42	135	57

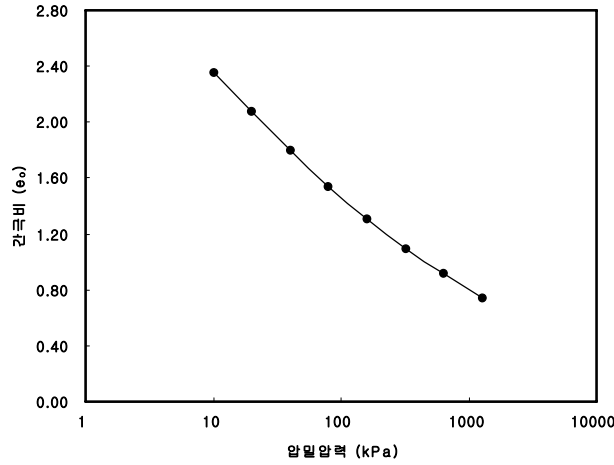


그림 6. B (심도 3.0m, 준설패립층)에 대한 압밀시험결과

본 연구에서는 장기압밀시험시 준설패립층의 경우, 심도 2m 깊이에서 채취한 A 시료를, 원지반층의 경우, 심도 8m 깊이에서 채취한 A-1 시료를 이용하였다. 그림 7(a)는 준설패립층에 대한 실험결과를 나타내고 있으며, 유효상재압(P_o)과 선행압밀하중(P_c)은 각각 23kPa, 44kPa로 산정되었다. 실험결과를 살펴보면, 5kPa와 10kPa를 적용하여 실시한 유효상재압 이하의 압밀압력에서는 시간경과에 따른 침하가 거의 발생되지 않는 것을 알 수 있다. 그러나, 20kPa와 40kPa를 적용한 압밀압력, 즉, 유효상재압과 선행압밀압력 사이의 응력단계에서는 과압밀 영역임에도 불구하고 시간 경과에 따라 압밀침하가 점차 증가하는 경향을 나타냈다. 한편, 그림 7(b)의 원지반층은 준설패립하중에 의해 유효상재압 이상의 압밀압력을 경험하였으며, 유효상재압(P_o)과 선행압밀하중(P_c)은 각각 37kPa, 58kPa로 산정되었다. 유효상재압 이하 및 유효상재압과 선행압밀압력 사이의 응력단계, 즉, 과압밀 영역에서는 60일간의 장기압밀시험 결과, 장기압밀침하가 거의 발생되지 않은 것을 알 수 있다. 본 현장은 원지반상에 약 7m 두께의 준설토가 투기된 이후에, 방치기간이 약 10년 정도 경과한 상태이므로, 유효상재압 이상의 압밀압력을 경험하지 않았다. 그러나, 준설패립 상부층에서는 desiccation 과 cementation 작용에 의해 형성된 고결층의 영향으로 지금까지 유효상재압 이상의 압밀압력을 경험하지 않았음에도 불구하고, 그림 8에 나타낸 바와 같이, 상부층 4m 두께에서는 과압밀비가 평균 1.2로 산정되어, 과압밀 특성을 나타내는 것을 알 수 있다. 한편, 준설패립층의 하부층 4m 두께는 과압밀비가 평균 0.5로 산정되어, 준설패립층 상부와 달리 미압밀 특성을 나타내고 있다. 따라서, 대상지반의 장기압밀 침하량을 고려할 때, 대상지반이 과압밀 상태에 놓여있는지 아니면 유사과압밀 상태에 놓여있는지에 대한 평가가 매우 중요하다고 할 수 있다.

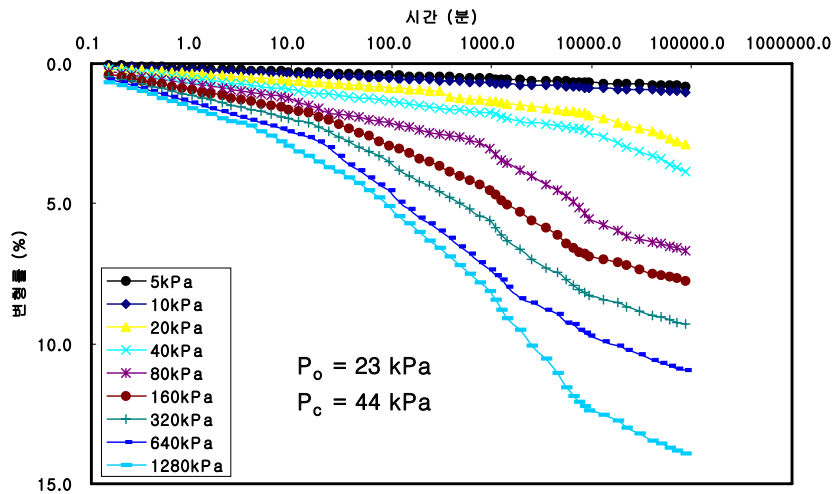


그림 7(a) 준설패립층의 장기압밀시험

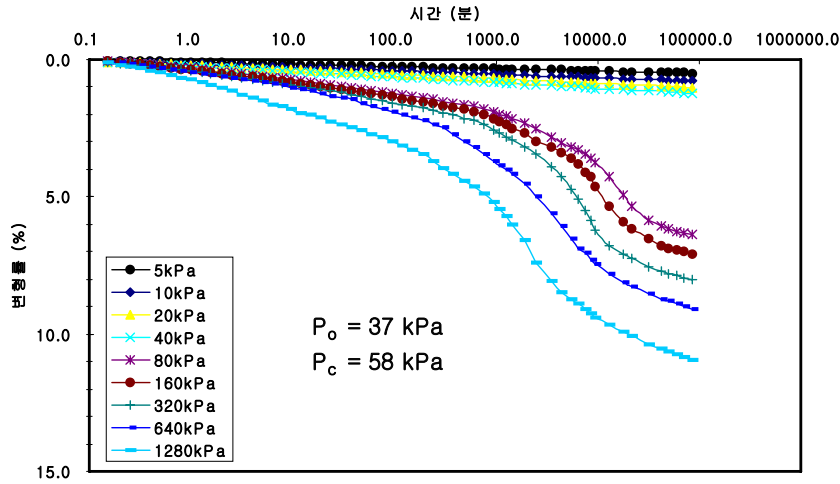


그림 7(b) 원지반층의 장기압밀시험

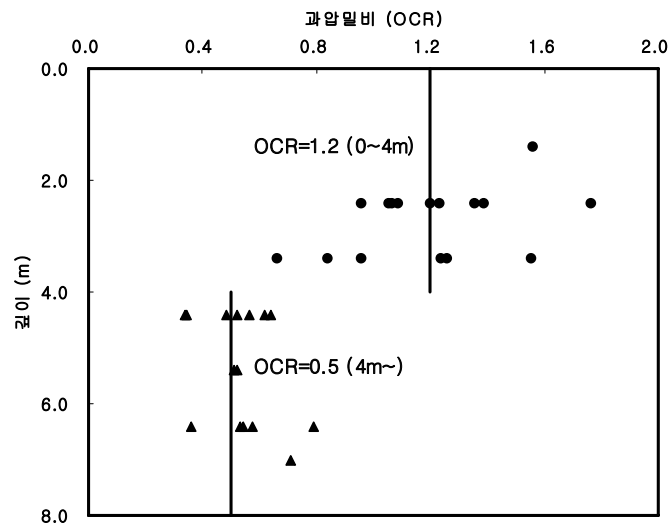


그림 8. 준설패립층의 과압밀비

4. 결론

광양항 인근의 준설패립층과 원지반층에서 채취한 해성점토 시료에 대해 장기압밀 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 압밀하중에 따른 C_u/C_c 변화 양상은 선형압밀하중 근처에서 급격히 증가한 후, 감소하는 경향을 나타냈다. 본 연구를 통해서, 광양항 인근지역의 C_u/C_c 값은 원지반 기준으로 0.0382로 평가되었으며, 이는 Mesri&Castro(1987)가 제시한 비유기질 점토에 대한 추천값 $C_u/C_c=0.040\pm 0.01$ 과 유사한 경향을 나타냈다.

2) 준설패립층의 과압밀 영역에서의 장기압밀침하는 시간경과에 따라 점점 증가하는 경향을 나타내었는데, 이는 지금까지 유효상재압 이상의 압밀압력을 경험하지 않은 준설패립 상부층이 desiccation 및 cementation 작용에 의해 발생된 유사과압밀 점토의 전형적인 장기압밀특성을 나타내고 있다. 한편, 원지반 층에서는 과압밀 영역에서 시간경과에 따라 발생하는 장기압밀 침하는 거의 미비한 것으로 나타났다. 따라서, 특별히 점토지반의 장기압밀침하를 고려할 경우에는, 대상점토지반의 유사 과압밀 여부를

판단하는 것이 매우 중요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김규선, 임형덕, 이우진(1999), “실내압밀시험에 의한 남해안 해성점토의 C_a/C_c ”, 한국지반공학회 논문집, 제15권 제6호, pp. 87~98
2. 김주현, 이충호, 채영수(2007), “준설매립지반의 선행압밀산정에 관한 연구”, 한국지반공학회 준설매립위원회, pp. 105~117
3. Mesri, G., Godlewski, P. M.(1977), "Time and Stress Compressibility Interrelationship". vol. 103, No. GT5, pp. 417~430
4. Mesri, G., Castro, A.(1987), "The C_a/C_c Concept and K_o During Secondary compression", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 113, No. GT3, pp. 230~247
5. Fusao Rito, Naoki Ohmukai, Hiroyuki Tanaka(2004), "Long-term consolidation characteristics of natural clays", Proceedings of The International Symposium on Engineering Practice and Performance of Soft Deposits(IS-OSAKA 2004), pp. 7~10