

# 장기압밀시험에 의한 광양항 점성토의 응력이력 특성 연구

## A Study on the Characteristics of Stress History of Kwang-Yang Port Clayey Soil Based on the Long-term Consolidation Test

김진영<sup>1</sup> Kim, Jin-Young

류승석<sup>2</sup> Ryu, Seung-Seok

백원진<sup>3</sup> Baek, Won-Jin

심재록<sup>1</sup> Shim, Jae-Rok

오종신<sup>2</sup> Oh, Jong-Shin

김승곤<sup>2</sup> Kim, Seong-Gon

### Abstract

In this present study, the long-term consolidation tests were performed using the remolded Kwang-Yang port clayey soil to clarify the effect of stress history and over-consolidation ratio (OCR) on the long-term consolidation characteristics of the soft clayey soil. For the over-consolidated state clayey soils, in case OCR exceeds 1.5, there are no great differences of secondary consolidation settlement and final settlement even if OCR increases from 2.0 to 3.0. Therefore, it has been understood that the value of OCR applied on the field site to reduce the secondary consolidation settlement and the final settlement is about 1.5. In addition, in order to investigate the relationship between the pre-loading period and the characteristics of long-term consolidation behavior obtained from the test results using the remolded Kwang-Yang port clayey soils, the influence on long-term consolidation behavior was not large though the pre-load was unloaded with the consolidation degree 70~80% exceeded.

### 요 지

본 연구에서는 재성형한 광양항 점성토를 이용하여 응력이력과 OCR이 연약 점성토의 장기압밀특성에 미치는 영향을 규명하기 위해 표준압밀시험기를 개조하여 장기압밀 시험을 수행하였다. 과압밀상태의 점토 시료에 대해, OCR이 1.5를 초과한 경우, 이차압밀 및 최종침하량은 OCR이 2.0에서 3.0으로 증가함에도 큰 차이를 보이지 않았으며, 이로부터 이차압밀과 최종침하량을 저감하기 위해 현장적용 OCR은 1.5로 나타났다. 더욱이 선행하중 재하기간과 장기압밀 거동 특성사이의 관계를 알아보기 위해 광양항 재성형 점토를 이용한 실험결과로부터 압밀도 70~80%를 초과하여 재하하중을 제거하여도 장기압밀에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

**Keywords :** Long-term consolidation, Overconsolidation ratio, Pre-loading period, Secondary consolidation, Stress history

### 1. 서 론

최근 급속한 산업발달과 국토의 효율적인 이용을 위해, 구조물의 대형화와 축조위치가 양호한 양질 지반에

서 점차 해안, 항만, 매립지 등으로 확대되고 있는 추세이다. 또한 국가경제 발전의 거점이 되는 공항, 항만, 공단부지 등 대단위 기반시설을 수용하기 위한 해안지역 준설·매립으로 대규모 부지조성이 증가되고 있는 추세

1 정회원, 전남대학교 지역·바이오시스템공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Rural & Bio-Systems Engr. Chonnam National Univ.)

2 정회원, 전남대학교 토목공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engr. Chonnam National Univ.)

3 정회원, 전남대학교 지역·바이오시스템공학과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Rural & Bio-Systems Engr., Chonnam National Univ., (Tel: +82-62-530-2151, Fax: +82-62-530-2159, bwj215@jnu.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

이다. 이와 같은 대규모 부지의 대부분이 퇴적지반상에 위치하게 되며, 이러한 퇴적지반에서는 많은 공학적 문제점을 가지고 있으나 특히 시공성, 경제성, 공용후의 안정성과 관련된 가장 큰 문제로 대두되는 것이 점성토 지반의 침하문제이다. 최근 들어 구조물의 대형화와 더불어 연약지반상에 구조물 건설 증가로 사회기반시설물의 안정성 및 유지관리, 건설비용의 감액 관점에서 연직배수공법을 병행한 사전압밀공법에 의한 지반개량이 활발히 행해지고 있다. 그러나 연약점성토 지반에서의 침하와 관련된 문제로서 압밀침하는 점토의 낮은 투수계수로 1차압밀과 유효응력이 일정한 상태에서 장기간에 걸쳐 발생하는 이차압밀이 있다. 그러나 현장에서의 압밀해석은 Terzaghi(1948)의 탄성압밀이론을 이용한 경험식이 주로 이용되고 있으며 2차압밀을 고려할 수 없다. 따라서 구조물 축조후의 공용하중에 의한 잔류침하(2차압밀 포함)로 인한 유지관리에 막대한 경비가 소요된다. 이와 같은 점토의 압밀침하와 관련된 기존의 연구에서 탄성압밀이론은 국외 연약지반 변형특성과 관련하여 토질역학의 이론을 정립한 Terzaghi(1948)의 1차원 탄성압밀이론과 선형압밀하중의 결정, 재하기간 등을 파라메타로 한 복수의 압축 곡선군으로 표현한 시간효과와 이차압밀현상을 통일적으로 표현할 수 있는 Bjerrum(1967) 등이 연구를 시행하였으며, 그 후 점토의 유변학적 모델을 이용한 점토의 시간의존성 거동을 지연탄성으로 정의한 Taylor(1948), 점-소성 모델에 기초한 Adachi & Oka(1982)의 점-탄-소성모델로서 크리프(creep) 현상에 관한 연구가 행해졌다. 그러나 이들 이론들은 정규압밀상태에서의 변형특성을 다루고 있다. 선형재하와 같은 과압밀 이력을 받은 점토에 대한 연구로서, 中野(1966)는 점토층의 배수면측에서는 정규압밀영역으로 되어 정(+)의 간극수압발생으로 침하가 진행되고, 비배수면측에서는 과압밀영역으로 되어 부(-)의 간극수압이 발생함으로써 공시체의 흡수팽창에 의해 부상이 발생한다고 제안하였으며, 선형재하 후에 발생하는 침하량을 산정하였다. Olson and Lade(1979) 등은 점토층을 여러층으로 분할하여 재하~제하과정의 해석을 행하고, Terzaghi 이론에서 고려할 수 없었던 제하의 영향과 대변형률, 불균일 변형률의 영향을 고려할 수 있도록 하였다. 또한 재하에 따른 정규압밀영역과 과압밀영역을 고려하여 침하량의 산정을 행한 점토는 무응력 상태 이외에서는 항상 항복하고 있다고 가정한 모델을 제안한 Kutter & Sathialingam(1992), 점토를 점성액체(Maxwell 액체)로 가정하여 유

변학적 모델을 제안한 Yoshikuni(1994)의 1차원 탄-점성 압밀이론, Isotach법칙에 근거한 Imai(2003)의 1차원 압밀이론이 제안되어져 왔다. 그러나 이들 과압밀 상태에 대한 이론들도 과압밀비의 변화특성에 따른 장기압밀 특성에 대한 실험결과와의 적용성 검증에 대해서는 그다지 다루어지지 않았다. 한편, Fukuzawa & Kuriihara(1991)는 과압밀비(OCR)와 반발비( $\epsilon_r$ )가 선형적인 관계를 가진다고 보고하였으며, Kamao et. al.(1995)은 자신들의 연구결과와 Fukuzawa & Kuriihara(1991)의 연구결과를 함께 분석하여 OCR과 PI와 반발비가 선형적인 관계를 가진다고 보고하였다.

따라서 본 연구에서는 광양항에서 채취한 해성점토를 재성형한 균일 점토를 이용하여 과압밀비를 변화시킨 실내실험을 수행하여 과압밀비와 최종침하량과의 관계를 명확히 하고자 하였다. 또한 현장에서 지반 개량시 일반적으로 적용되고 있는 OCR=1.5를 대상으로 선형하중 제거시기를 결정하기 위한 선형하중 재하기간(방치기간)의 차이에 따른 압밀도와 잔류침하 발생량과의 관계를 실내시험 결과를 이용하여 비교/분석하고 현장에 적용 가능한 하중제거시기에 적합한 압밀도와 과압밀비를 제안하고자 하였다.

## 2. 사용재료 및 실내실험 방법

### 2.1 공시체 작성 및 물리적 특성

본 연구에서는 동일 조건하에서의 압밀특성을 파악하기 위해 균일한 재성형 점토시료를 작성하여 사용하였다. 재성형 점토시료의 작성방법은 광양항 준설매립 현장에서 채취한 점성토를 이물질 제거를 위해 0.42mm 체로 체가름한 점성토를 액성한계의 2배(90%±5%)의 함수비로 장시간 교반하여 대형 토조(220mm×1,200mm×600mm: 폭×길이×높이)에 투입하였다. 투입이 완료된 후, 토조내의 점성토의 안정화를 위해 4일간 방치하여 자중압밀을 통해 안정화 시키고, 초기 점성토시료의 교란의 영향을 최소화하기 위해 0.05kgf/cm<sup>2</sup>, 0.1kgf/cm<sup>2</sup>, 0.2kgf/cm<sup>2</sup>을 재하한 후, 최종 압밀하중 단계인 0.4kgf/cm<sup>2</sup>의 압밀하중을 실제지반과 같은 안정화된 균일점토 제작을 위해 약 90일간 재하 하였다(0.4kgf/cm<sup>2</sup>의 최종압밀하중을 선정한 이유는 정규압밀상태의 심도 9m의 평균유효상재하중에 상당하는 값을 선정하였으며, 90일간의 재하는 현장에서 1차압밀이 종료된 안정된 점토가

얻어지는 재하시간(Kim, 2011 참조)을 이용하여 선정하는 것이다). 압밀종료 후의 시험용 시료 제작을 위해 블록으로 분절하여 각 시료의 함수비 변화를 방지하기 위해 랩과 호일로 도포한 후, 파라핀으로 도포하여 항온상태에서 보존하였다. 본 연구에서 사용한 실내시험용 해성 점토의 물리특성을 나타낸 것이 Table 1이다. 본 연구에서는 이물질 제거를 위해 0.42mm 체로 체가름한 점성토를 사용하였으며, 원지반 점토의 물성과 비교하여 조개껍질 등의 이물질과 모래질토의 제거로 인해 액성한계와 소성지수가 약간 증가함을 알 수 있다. 그러나 원지반토와 물성에 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

## 2.2 응력이력에 따른 장기압밀 시험 방법

본 연구에서는 최종압밀하중 단계에서의 간극수압 소산과정을 살펴보기 위해, 표준 압밀 시험장치를 개조하여 압밀셀 바닥면에서 간극수압을 측정할 수 있도록 간극수압센서를 장착하였으며, 최종하중단계 이외의 단계에서는 간극수압 측정용 밸브를 개방하여 양면배수로

압밀을 진행하고 최종압밀단계에서 밸브를 폐쇄하여 간극수압을 측정할 수 있도록 하였다.

본 연구에서 수행한 압밀시험의 정규압밀 상태에 대한 하중재하방법과 실험결과는 참고문헌(Kim, 2011)을 참고하기 바란다. 과압밀 상태에 대한 장기압밀특성을 알아보기 위해 Table 2에 나타낸 바와 같이 동일 최종하중 단계에 대한 정규압밀상태와 과압밀 상태의 거동특성을 비교하기 위하여 Case 1-1~1-3의 실험을 수행하고 과압밀비의 차이에 따른 거동특성을 비교하기 위하여 나머지 조건에 대한 장기압밀시험을 수행하였다. 최종하중 단계이전의 각 단계별 재하-제하시간은 24시간을 표준으로 하였으며, 최종하중 단계는 충분한 2차압밀 거동이 나타나는 14일 이상을 재하하였다.

또한 연약지반 개량시 주로 사용되는 선행재하공법과 관련한 실내시험 방법으로 선행하중(OCR=1.5) 재하후의 방치기간 (압밀도 U=25, 35, 50, 70, 80, 90, 100%:  $U = St/Sf \times 100\%$ )에 따른 공용하중 재하시의 이차압밀거동 특성을 명확히 하기 위해 Table 3에 나타낸 하중재하방법으로 장기압밀시험을 수행하였다.

Table 1. The physical properties of marine clay for laboratory test

| Liquid Limit (%) | Plastic Limit (%) | Plasticity Index | Specific Gravity | Percent finer by 0.074 mm | Remarks               |
|------------------|-------------------|------------------|------------------|---------------------------|-----------------------|
| 43.33            | 29.79             | 13.54            | 2.68             | 83.54%                    | original ground clay  |
| 46.91            | 31.19             | 15.72            | 2.69             | 87.3%                     | 0.42mm passing sample |

Table 2. Loading patterns of over-consolidated states

|          | Initial Cons. Pres. (kg/cm <sup>2</sup> ) | Unloading Cons. Pres. (kg/cm <sup>2</sup> ) | Applied Pres. (kg/cm <sup>2</sup> ) | Overcons. Ratio (OCR) | Remarks  |
|----------|---|---|-------------------------------------|-----------------------|----------|
| Case 1-1 | 1.6                                       | -   | 3.2                                 | -                     | NC       |
| Case 1-2 | 3.2                                       | 1.6   |                                     | 1.0                   |          |
| Case 1-3 | 6.4                                       |   |                                     | 2.0                   |          |
| Case 2-1 | 3.2                                       |   |                                     | 1.0                   | Case 1-2 |
| Case 2-2 | 3.52                                      |   |                                     | 1.1                   |          |
| Case 2-3 | 3.84                                      |   |                                     | 1.2                   |          |
| Case 2-4 | 4.16                                      |   |                                     | 1.3                   |          |
| Case 2-5 | 4.8                                       |   |                                     | 1.5                   |          |
| Case 2-6 | 6.4                                       |   |                                     | 2.0                   | Case 1-3 |
| Case 2-7 | 8.0                                       |   |                                     | 2.5                   |          |
| Case 2-8 | 9.6                                       |   | 3.0                                 |                       |          |

Table 3. Loading patterns by difference of degree of consolidation

|          | Initial Cons. Pres. (kg/cm <sup>2</sup> ) | Unloading Cons. Pres. (kg/cm <sup>2</sup> ) | Applied Pres. (kg/cm <sup>2</sup> ) | Overcons. Ratio (OCR) | Degree of Cons. (U, %) |
|----------|---|---|-------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| Case 3-1 | 4.8                                       | 1.6   | 3.2                                 | 1.5                   | 25                     |
| Case 3-2 |   |   |                                     |                       | 35                     |
| Case 3-3 |   |   |                                     |                       | 50                     |
| Case 3-4 |   |   |                                     |                       | 70                     |
| Case 3-5 |   |   |                                     |                       | 80                     |
| Case 3-6 |   |   |                                     |                       | 90                     |
| Case 3-7 |   |   |                                     |                       | 100                    |

Figure 1은 본 연구에서 사용한 개조된 표준압밀시험기를 나타낸 것으로 표준압밀시험기의 하부에 간극수압계를 장착하여 밸브의 개폐로 배수/비배수를 조절할 수 있다.

### 3. 실내시험 결과 및 고찰

#### 3.1 과압밀 영역에서의 압축곡선

Figure 2는 압밀이력에 따른 압축곡선의 차이를 알아보기 위해 (a) 정규압밀상태와 과압밀 상태의 비교를 위한 것이며, (b)는 과압밀 영역(초기하중 1.6kgf/cm<sup>2</sup>)에서 OCR을 1.0~3.0까지 변화시킨 경우에 대한 압축곡선을 나타낸 것으로 초기 간극비에 약간 차이는 있으나, 압축지수에는 큰 차이가 나타나지 않음을 알 수 있다.

Figure 3는 과압밀이력을 가진 OCR=1.5에 대한 제하압력 1.6kgf/cm<sup>2</sup>에서 하중방치기간의 차이에 따른 e-logp 곡선을 나타낸 것으로 이 결과 또한 초기 간극비에 약간

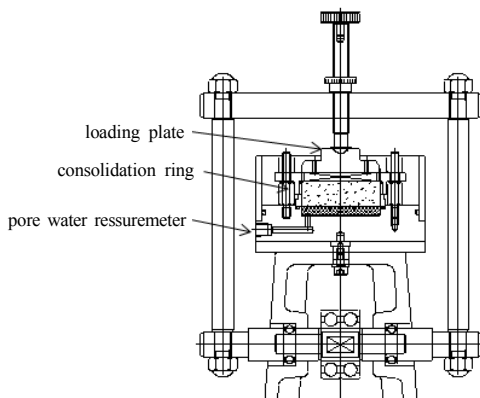
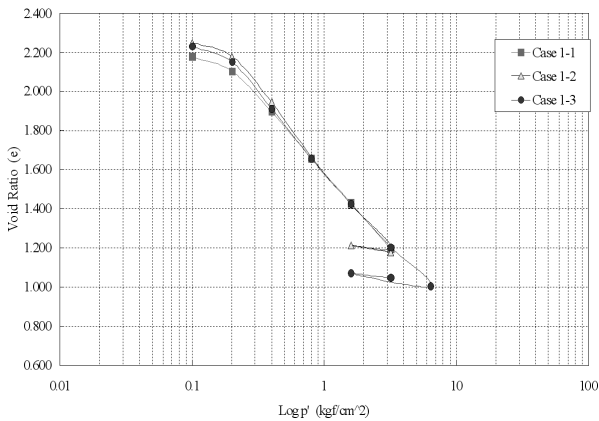


Fig. 1. Schematic diagram of rebuilt standard consolidation apparatus



(a) Comparison of NC and OC states

의 차이는 있으나 압축지수에는 큰 차이가 나타나지 않음을 알 수 있다. 또한 최종압밀하중인 3.2kgf/cm<sup>2</sup>의 하중 단계에서의 선행하중 재하기간(방치기간=압밀도 증가)이 길어질수록 약간의 간극비 감소가 있으며, 이는 재하기간의 경과에 따른 압밀진행의 영향이라고 할 수 있다.

#### 3.2 과압밀비 변화에 따른 장기압밀특성

과압밀영역에서 OCR의 차이에 따른 압밀특성을 비교하기 위해 수행한 시간-침하곡선을 나타낸 것이 Figure 4이다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 동일한 최종압밀하중(3.2kgf/cm<sup>2</sup>)이 적용되었으나 제하이력을 갖지 않는 정규압밀(NC1->1)과 과압밀이력을 갖는 결과와 비교한 결과, 응력이력에 따른 OCR의 증가와 더불어 과압밀 영역에서 최종침하량 및 장기압밀침하량이 크게 감소함을 알 수 있다.

Figure 5는 제하이력을 가진 과압밀영역에서의 OCR의

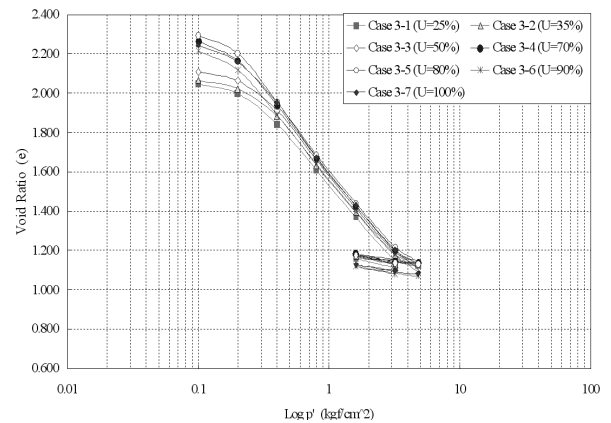
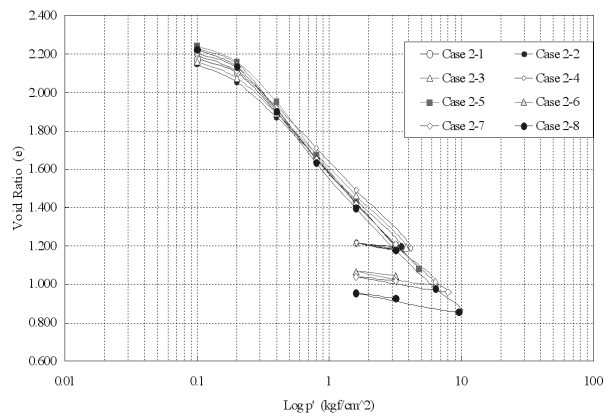


Fig. 3. e-logp curves by difference of loading periods



(b) Comparison of the difference of OCR

Fig. 2. Compression curves on the over-consolidated states

차이에 따른 장기압밀침하량의 거동특성을 명확히 하기 위해 OCR을 1.1~3.0까지 변화시킨 시간-침하곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 OCR이 1.5를 초과하면 OCR의 증가에 따른 이차 압밀량 및 최종침하량에 큰 차이를 나타내지 않았다. 본 연구에서와 같이 해성점토를 재성형한 점토에 대한 적용 가능한 OCR의 크기는 1.5 정도로 설정하여도 장기적인 허용 침하에는 큰 차이가 없을 것으로 판단된다. 이를 현장에 적용하기 위해서는 물리 특성(초기간극비, 함수비, 소성지수 등)변화에 따른 다양한 시험이 수행되어야 할 것이다. 또한 그림에서 이차압밀 개시 후 침하량이 주기적으로 침하→팽창(감소)→침하의 과정을 반복하고 있다. 이 원인은 공시체와 압밀링과의 주변마찰에 대한 영향이 있을 수 있으나, 초기에 충분한 그리스의 도포로 주변마찰에 대한 영향을 최소화 한 점을 고려할 때, KO 압밀조건에 따라 측방의 변위가 구속된 상태에서 시간경과에 따른 정(+)과 부(-)

의 다이렉탄시의 주기 발생으로 인한 과잉간극수압의 소산, 발생 과정이 반복되어 유효응력의 증가, 감소가 함께 이루어지고 있는 것으로 판단할 수 있다. 이러한 결과는 24시간 재하후 1차압밀이 종료되었다고 판단되는 2,000분 이후의 간극수압 소산곡선을 통해서도 간극수압의 소산과 발생이 주기적으로 반복되고 있는 결과로부터도 알 수 있다(Figure 6). 이와 같은 결과는 정규 압밀 영역에 대한 실험결과에서도 동일한 결과가 얻어졌다(Kim, 2011). 또한 기존의 Baek et. al, (2004)의 논문에서는 연직 배수재로 개량된 점토지반의 요소실험에서 공시체 내부에 매입한 자석을 이용한 수평변위 측정결과로부터 장기압밀시험시의 수평변위의 반복적인 변형에 대해서 나타냈으며, 이 결과도 압밀후반부의 시간-수평변위 관계가 반복적인 파형을 나타냄을 제시하였다. 그의 제안에 따르면, 수평방사방향의 흐름에 따라 배수재 부근에서는 압밀초기에 간극수압이 소산되고

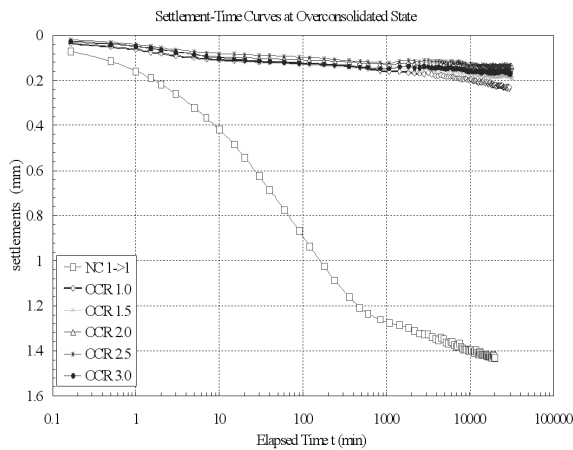


Fig. 4. S-logt curves by difference of OCR

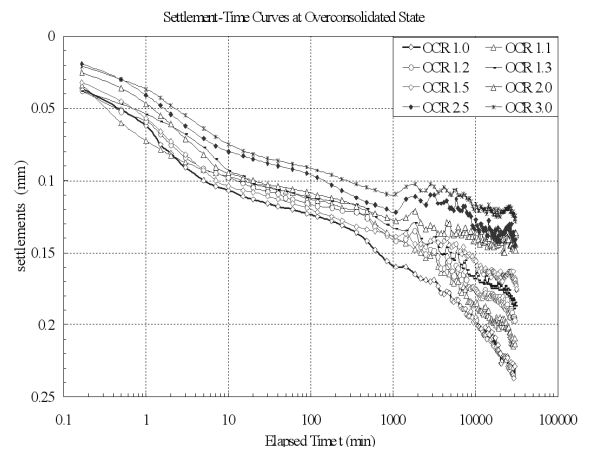


Fig. 5. S-logt curves by difference of OCR (OC states)

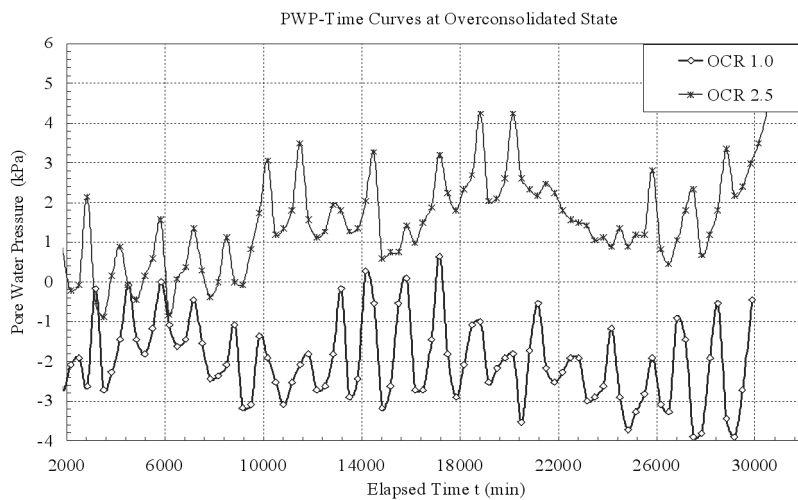


Fig. 6. Dissipation of pore water pressure on OC states

비배수면에서는 시간과 더불어 압밀이 진행되므로 등변형률 조건하에서 배수면과 비배수면의 간극수압 소산의 지연에 따른 부의 다이레탄시 발생에 기인한 것으로 나타내고 있다. 그러나 아직까지 명확한 메카니즘에 대한 결론은 제시되지 않았다. 다만, 그는 주기변화에 따른 온도, 센서에 미치는 전압차, 인간활동에 따른 영향 등을 배제한 시험결과를 통해서도 동일한 경향을 나타냄을 제시하고 있다.

### 3.3 하중 재하기간에 따른 압밀특성

Figure 7(a), (b)는 선행하중 재하기간을 정규압밀상태에서 24시간 재하시의 최종압밀침하량을 이용하여 침하-시간관계로부터 계산한 하중재하기간에 대해 최종압밀하중 3.2kgf/cm<sup>2</sup>에서 침하-시간곡선을 나타낸 것이다. Figure 7(a), (b)에서 알 수 있는 것처럼, 하중재하기간(압밀도)이 증가할수록 최종침하량 및 이차압밀침하량이 감소함을 알 수 있다. 그러나 압밀도가 70~80%를 초과하면 큰 차이는 없음을 알 수 있다. 또한 Figure 7(b)에서 알 수 있는 것처럼, 이차압밀 과정에서는 침하-팽창-침하를 반복하며 서서히 침하가 진행됨을 알 수 있다. 전술한 바와 같이, 압밀과정중의 부의 다이레이탄시의 영

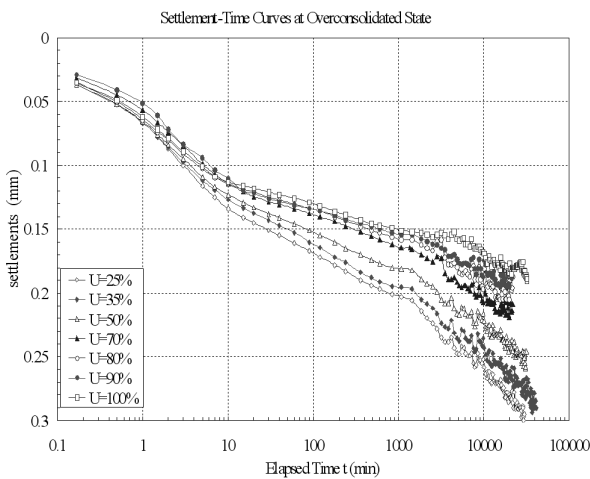
향에 의한 간극수압의 발생 또는 유효응력완화 현상에 의한 유효응력의 감소시에 팽창과정을 거치고, 다시 점토골격이 안정화를 진행하며 유효응력이 증가되어 침하가 진행되는 과정을 반복하고 있는 것으로 판단된다.

## 4. 응력이력을 받은 점성토 지반의 압밀거동 예측

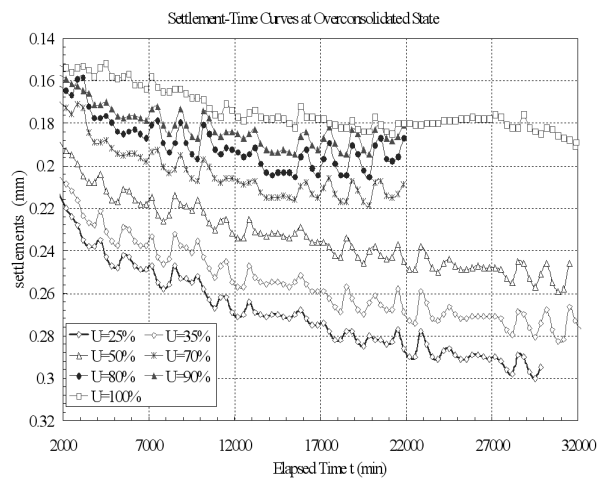
### 4.1 과압밀 이력과 최종 침하량과의 관계

과압밀비에 따른 침하-시간곡선으로부터, 과압밀 상태에 대한 1차압밀 종료시점으로 예상되는 2,000분 재하 후와 압밀종료시점 30,000분에서의 압밀속도( $\Delta S/\Delta t$ )를 비교하기 위해 각각의 과압밀비에 대한 침하량과 시간과의 관계를 나타낸 것이 Table 4이다. 표에서 알 수 있는 것처럼 과압밀비가 증가할수록 침하속도가 미소하나 감소하고 있음을 알 수 있다. 이로부터 과압밀비를 크게 하면 장기에 걸친 잔류침하량의 감소에도 기여함을 알 수 있다.

Figure 8은 과압밀 이력을 받은 점토시료를 기준으로 하여 각각의 OCR에서의 최종침하량과의 비를 정리한 것으로 OCR에 따른 최종침하량이 크게 감소됨을 알 수 있다. 이를 3차식으로 근사시켰을 경우,  $S_f(OCR)/S_f(OCR=1.0) =$



(a) S-t curves



(b) S-t curves (End of primary)

Fig. 7. S-logt curves by pre-loading period (OCR=1.5)

Table 4. Relation between OCR and settlement rate at end of primary

|                                |        | Over-Consolidation Ratio |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |
|--------------------------------|--------|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                                |        | 1.0                      | 1.1                    | 1.2                    | 1.3                    | 1.5                    | 2.0                    | 2.5                    | 3.0                    |
| consolidation time (min)       | 2,000  | 0.168                    | 0.150                  | 0.146                  | 0.144                  | 0.140                  | 0.129                  | 0.117                  | 0.107                  |
|                                | 30,000 | 0.237                    | 0.211                  | 0.195                  | 0.186                  | 0.170                  | 0.148                  | 0.134                  | 0.123                  |
| $(\Delta S/\Delta t)$ (mm/min) |        | $2.464 \times 10^{-6}$   | $2.178 \times 10^{-6}$ | $1.750 \times 10^{-6}$ | $1.500 \times 10^{-6}$ | $1.071 \times 10^{-6}$ | $6.780 \times 10^{-7}$ | $6.070 \times 10^{-7}$ | $5.710 \times 10^{-7}$ |

$-0.1722x^3+1.1615x^2-2.6403x+2.6325$ 을 이용해 임의의 OCR에 대한 최종침하량을 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

Figure 9는 초기압밀하중이 동일한 정규압밀상태의 최종 장기압밀침하량을 기준으로 각각의 OCR에서의 최종침하량과의 비를 정리한 것으로 OCR의 변화에 따라 침하량이 크게 감소됨을 알 수 있다. 이때의 근사식은  $Sf_{(OCR)}/Sf_{(OCR=1.0)}=-0.0341x^3+2.298x^2-0.5223x+0.5208$ 을 이용해 정규압밀 상태의 점토에 대해 개량하고자 하는 선행재하하중을 결정시에 OCR의 변화에 따른 최종침하량을 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4.2 압밀도와 최종침하량과의 관계

Figure 10은 표준압밀시험법에 제시된 각 단계별 하중재하시간인 선행하중 24시간 재하시의 침하량을 기준(압밀도 100%에 해당:  $Sf_{(u=100)}$ )으로 각 선행하중 재하기간(압밀도 변화:  $Sf_{(u)}$ )에 따른 최종침하량과의 비( $Sf_{(u)}/Sf_{(u=100)}$ )를 계산한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 압밀도가 증가할수록 최종침하량은

선형적으로 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 압밀도  $U=70\%$ 를 초과한 시점에서 최종침하량이 압밀도 100%로 하였을 경우의 잔류침하량이 20% 정도를 나타냄을 알 수 있다. 이들 결과로부터 현장에서의 선행하중 재하기간을 압밀도 70~80% 부근에서 제거하여도 장기압밀침하에 미치는 영향은 미미할 것으로 판단된다. 다만, 본 연구는 광양항 해성점토를 재성형한 점토에 대해 수행된 결과를 검토한 것으로 다양한 현장에 적용하기 위해서는 물리특성(초기 간극비, 함수비, 소성지수 등)의 변화에 따른 추가시험이 수행되어야 할 것이다.

Figure 11은 압밀도의 변화에 따른 침하곡선의 변화양상을 살펴보기 위해 하중재하기간의 차이에 따른 압밀도의 차이와 s-logt 곡선에서 구한 이차압밀계수( $Ca=(\Delta s/\Delta \log t)$ )의 관계를 나타낸 것으로 선행압밀하중 재하기간의 증가와 더불어(압밀도의 증가) 이차압밀계수도 선형적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한 이차압밀계수와 압밀도의 변화가 좋은 상관성을 나타내고 있으므로 현장 적용시의 선행하중 재하기간 및 허용잔류침하량과 압밀도의 설정에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

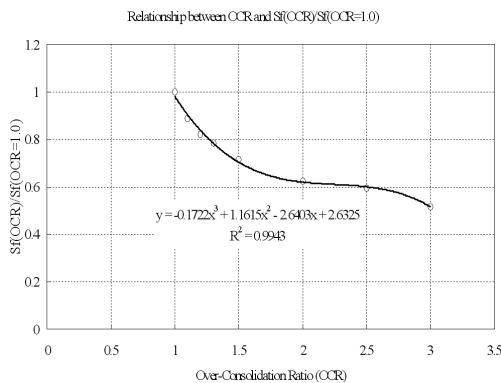


Fig. 8. Relation between OCR and final settlements (basis of OC clay)

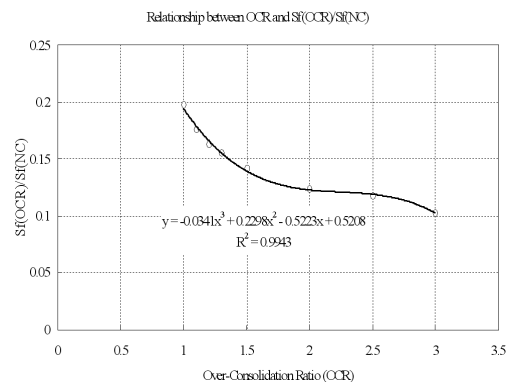


Fig. 9. Relation between OCR and final settlements (basis of NC clay)

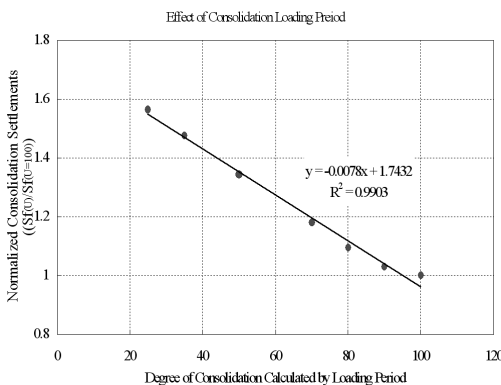


Fig. 10. Relation between the degree of Loading period and final settlements

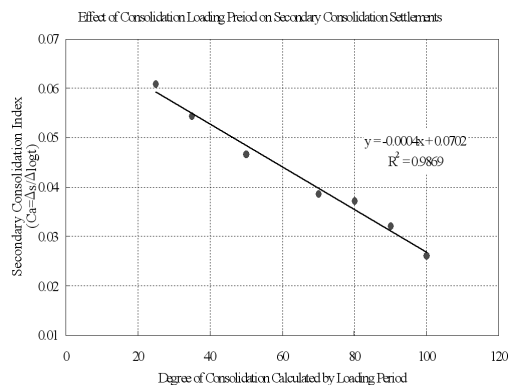


Fig. 11. Relation between the pre-loading period (degree of consolidation) and the coefficient of secondary consolidation

## 5. 결 론

본 연구에서는 광양항 재성형 점토시료를 이용하여 과압밀 상태에 대한 OCR의 크기에 따른 압밀특성과 선행하중 재하기간과 압밀특성의 관계를 규명하기 위한 개조된 표준압밀시험기를 이용한 장기압밀시험을 수행하고, 과압밀비와 최종침하량과의 관계 및 하중재하기간에 따른 압밀도와 최종침하량과의 관계를 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 응력이력의 차이가 압축곡선 e-logp 곡선의 압축지수에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다.
- 2) 과압밀 영역에 대한 실험결과, OCR의 증가와 더불어 최종침하량 및 이차압밀침하량이 크게 감소되며, 현장에서의 적용 가능한 OCR의 크기는 1.5 정도로 설정 가능함을 알았다.
- 3) 실내시험 결과를 이용하여, OCR에 따른 최종침하량에 대한 근사식으로서  $Sf_{(OCR)}/Sf_{(OCR=1.0)} = -0.1722x^3 + 1.1615x^2 - 2.6403x + 2.6325$ 을 이용해 임의의 OCR에 대한 최종침하량을 추정할 수 있을 것으로 판단된다.
- 4) 선행압밀하중 재하기간이 증가할수록 최종침하량 및 이차압밀침하량이 감소하고, 선행하중 재하기간의 압밀도 70~80% 도달시에 하중을 제거하여도 장기압밀에 미치는 영향은 크지 않았다.

본 연구에서 얻어진 결과는 광양항 재성형 점토를 이용한 장기압밀시험에서 얻어진 결과로 현장 적용을 위해서는 다양한 물리특성 변화에 따른 추가실험을 실시할 필요가 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. Kim, J. Y. (2011), "Characteristics of 1D-Consolidation for Soft Clay Ground based on a Elasto-Viscous Model", *Master Thesis*, Chonnam National University.
2. 中野 坦. (1969), "サーチャージ工法に関する一考察", *土質工学会誌*, Vol.14, No.5, pp.39-43.
3. Adachi, T. and Oka, F. (1982), "Constitutive equations for normally consolidated clay based on elsto-viscoplasticity", *Soils and Foundations*, Vol.22, No.4, pp.57-70.
4. Baek, W. J. and Moriwaki, T. (2004), "Internal behavior of clayey ground improved by vertical drains in 3D consolidation process", *Soils and Foundations*, Vol.44, No.3, pp.25-37.
5. Bjerrum, L. (1967), "Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clays as related to settlements of buildings", *Geotechnique*, Vol.17, pp.81-118.
6. Fukuzawa, E. and Kurihara, H. (1991), "Field measurements of long-term settlement", *Tchi-to-Kiso, JSSMFE, Series 403*, Vol.39, No.8, pp.103-117.
7. Kamao, S., Yamada, K., and Aita, K. (1995), "Characteristics of long-term resettlement of soft ground after removal of the pre-load", *Proceedings of International Symposium on Compression and Consolidation of Clayey Soil (IS-Hiroshima'95)*, Hiroshima, Balkema, pp.75-78.
8. Imai, G., Tanaka, Y. and Saegusa, H. (2003), "One-dimensional consolidation modeling based on the isotache law for normally consolidated clays", *Soils and Foundations*, Vol.43, No.4, pp.173-188.
9. Kutter, B. L. and Sathialingam, N. (1992), "Elastic-visco plastic modeling of the rate-dependent behaviour of clays", *Geotechnique*, Vol.42, No.3, pp.427-441.
10. Olson, R. E. and Ladd, C. C. (1979), "One dimensional consolidation problems", *Proc. ASCE*, Vol.105, No.GT1, pp.11-33.
11. Taylor, D. W. (1948), "Fundamentals of soil mechanics." John Wiley & Sons, pp.208-249.
12. Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1948), "Soil mechanics in engineering practice", John Wiley and sons.
13. Yoshikuni, H. and Kusakabe, O., Hirao, T. & Ikegami, S. (1994), "Elasto-viscous modeling of time dependent behaviour of clay", *Proc. of the 13th ICSMFE, New Delhi*, Vol.1, pp.417-420.
14. Yoshikuni, H. and Okada, M., Ikegami, S. & Hirao, T. (1995), "One-dimensional consolidation analysis based on an elasto-viscous liquid model", *Proc. of the International Symposium on Compression and Consolidation of Clayey Soils, IS-Hiroshima'95*, Vol.1, pp.233-238.

(접수일자 2011. 9. 30, 심사완료일 2012. 6. 4)