하중재하기간이 재성형 점토의 압밀특성에 미치는 영향 - 광양항 해성점토를 중심으로 -

Effects of Various Loading Periods on the Consolidation Characteristics of Remolded Clay - With Special Reference to Gwangyang Marine Clayey Soil -

홍 재 철¹ Hong, Jae-Cheol

김 진 영¹ Kim, Jin-Young

심 재 록² Shim, Jae-Rok

강 권 수³ Kang, Kwon-Soo

김 주 현⁴ Kim, Ju-Hyun

백 원 진⁵ Baek, Won-Jin

Abstract

This study sets it's face to define effects of the various loading periods in normal consolidation area on clay's compression and long-term consolidation characteristics through a laboratory test using homogeneous remolded clay. Moreover, by carrying out a long-term consolidation test which diversifies initial consolidation applicable to effective overburden loading in the various loading period. This study intended to suggest the method predicting the final settlement on the basis of loading periods by comparing and analyzing compression curve's characteristics according to loading weight of each stage and increase in loading period when carrying out the standard consolidation test. From the test results, the study shows that as of the soft clay's compression characteristics on the basis of various loading periods, preconsolidation load has a tendency to be decreased slightly as the loading period is getting more and more longer at each step after initial consolidation load puts on the remolded clay which is caused by secondary consolidation's increase in the latter part of each phase. And those effects have an weaker influence on compression index in normal consolidation area at the same time as secondary consolidation brought out quasi-overconsolidation and stabilization of clay's structure, have an influence re-compression index is increased in overconsolidation area on the other hand.

요 지

이 연구에서는, 균질한 재성형 점토를 이용한 실내시험을 통해 정규압밀 영역에서의 하중재하기간이 점성토의 압축 및 장기압밀 특성에 미치는 영향을 명확히 하고자 하였다. 또한 각 하중재하기간에 따른 현장에서의 유효상재하중에 해당하는 초기압밀하중을 변화시킨 장기압밀 시험을 수행하여 표준압밀시험시의 하중단계별 재하방법과 하중재하기간의 증가에 따른 압축곡선의 특성을 비교/분석하여 하중재하기간에 따라 최종침하량을 예측하는 방법을 제안하고자

1 정회원, 전남대학교 지역바이오시스템공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Rural & Bio-Systems Engrg., Chonnam National Univ.)

2 비회원, 전남대학교 지역바이오시스템공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Rural & Bio-Systems Engrg., Chonnam National Univ.)

3 정회원, 서남대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Seonam Univ.)

4 비회원, 일본, 야마구치대학교 대학원 이공학연구과, 박사과정 (Graduate Student, Graduate School of Science and Engrg., Yamaguchi Univ., Japan)

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

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

하였다. 연구 결과 하중재하기간에 따른 점성토의 압축특성은 초기압밀하중을 가한 후 하중재하기간이 증가할수록 주어진 단계에서의 압밀후반부의 2차압밀의 증가로 선행압밀하중이 약간씩 감소하는 경향을 나타내었다. 그와 동시에 2차압밀이 유사과압밀 현상 및 점토골격의 안정화를 유발하여 정규압밀영역에서의 압축지수에 미치는 영향은 미미했으며 과압밀영역에서는 유사과압밀 현상으로 재압축지수의 증가를 유발하는 것으로 나타났다.

Keywords : Creep, Overconsolidation, Initial consolidation loads, Loading periods

1. 서 론

연약점토 지반상에 구조물을 구축할 때에는 점성토 지반이 가지는 구조물의 안정성 문제와 낮은 투수계수로 인해 간극수의 배수지연에 따른 장기간에 걸친 압밀 침하가 문제가 된다. 점토지반에서 발생하는 압밀침하는 간극수의 배제에 따른 1차압밀과 일정 유효응력하에서 장기간에 걸쳐 발생하게 되는 2차압밀로 구분할 수 있다. 여기서 1차압밀은 점토의 투수성, 압축성 및 배수거리에 의해 영향을 받는 수리학적 지연과 관계가 되며, 2차압밀은 일정 유효응력하에서 변형이 시간과 함께 증가하는 creep 성질과 관계를 가지고 있다. 특히 2차 압밀은 공사중 또는 공사 준공후에도 보수 및 유지/관리에 있어 경제적으로 많은 어려움을 발생시키고 있어, 이에 따른 압밀 진행 메카니즘에 대한 세밀한 연구와 이론정립이 필요한 실정임에도 불구하고 현재까지도 2차 압밀에 대한 명확한 이론 정립이 이루어지지 않아 현장에서의 최종침하량 계산시에 어려움이 있는 실정이다.

또한, 일반적으로 연약점토 지반상에서의 총침하량을 산정할 경우에 이용되는 Terzaghi의 탄성압밀이론은 점성에 대한 영향을 고려하지 않아 유효응력 일정하에서 발생하는 크리프에 의한 2차압밀을 고려하지 못한다는 한계성을 지니고 있어 이를 보완할 수 있는 새로운 연구성과물이 도출되어야만 한다. 이와 같이 압밀침하의 해석방법은 계속 연구중인 과제이지만, 실질적으로 계산과정이 복잡 할 뿐만 아니라, 시간, 온도, 시료의 두께, 시료의 교란정도, 지속하중, 선행압밀응력, 압밀응력 등도 이차압축지수 산정 시 고려해야 할 요소들이다. 그 중에서도 현장의 응력조건은 실험실과 상이하기 때문에 다양한 응력조건과 하중재하기간에 따른 압축곡선 및 2차압밀 특성을 파악하는 것이 무엇보다도 중요하다. 따라서 본 논문에서는 간극수압을 측정할 수 있도록 간극수압계가 부착된 개조된 표준압밀시험기를

이용하여 실제 현장에서 발생할 수 있는 다양한 응력조건과 하중재하기간을 고려한 이차압축 특성을 알아보고자 하였다.

2. 기존 압밀해석이론

2차압밀의 과정을 토립자 구조골격의 시간의존성에 따른 결과로 보고 구조골격의 구성식에 유변학적 모델을 적용해서 설명하고자 하는 연구가 Taylor(1948)에 의해 시도되어졌다. Ladd(1977)의 경우 이러한 점토의 압밀에 대한 견해를 1차압밀이 끝난 후에 2차압밀이 일어난다고 하는 것으로 보고 1차압밀 중에는 점성변형을 일으키지 않는다고 하는 가정 A(가정 A)와 1차압밀은 2차압밀과 관계없이 전 과정 동안 일어나는 것으로 보고 1차압밀 중에 점성변형이 발생하는 것으로 보는 가정 B(가정 B)로 나타내었다. 가정 A의 경우 압밀은 배수거리에 영향을 미치는 시료두께 H의 제곱에 비례해서 발생하므로 압밀침하 변형률-시간곡선은 층두께의 증가와 더불어 오른쪽으로 평행하게 이동하는 형태를 취하게 된다. 가정 B는 1차압밀 중에 점성변형이 발생하지만 최종적으로는 수렴하게 된다는 주장이다. 또한 Aboshi and Matsuda(1981)은 장기간에 걸친 공시체의 두께를 변화시킨 실내시험결과를 이용하여 가정 A와 가정 B의 사이에 변형률-시간곡선이 존재한다는 가정 C를 주장하였다.

이와 같이 많은 학자들이 2차압밀의 메커니즘을 설명하기 위해 많은 모델들을 제안했지만, 2차압밀은 정규압밀 단계 동안에 발생하는 구조적 재배열에 따른 입자의 상호작용과 관련이 있다는 이론이 가장 설득력이 있다. 이는 Fig. 1과 같이 선행압밀응력 이하의 하중 단계에서는 흙은 과압밀 상태에 있게 되고 주로 탄성변형만 발생하기 때문에 2차압밀의 영향은 작다. 하지만 선행압밀응력을 초과하는 하중 단계에서는 소성변형이 발생하기 때문에 2차압밀지수의 값은 크다는 결과가 이론

을 뒷받침 한다. 즉, 2차압밀의 이와 같은 개념은 일반적으로 고압축성의 흙은 자연압밀비(시간의 경과에 따른 점토 골격의 안정화에 따른 압밀 자연현상에 의해 발생된 압밀량의 비)와 2차압밀비(간극수압 소산과정에서 발생되는 1차압밀에 대해 유효응력 일정인 상태에서 발생된 크리프 침하의 발생량의 비로 표현)가 크다는 것을 의미한다. 그러므로 점착응력이 상대적으로 큰 정규압밀 영역에서의 2차압밀비는 점착응력이 상대적으로 작은 과압밀 영역보다 클 것이다. 또한 아주 예민한 점토는 상대적으로 큰 2차압밀비를 나타낼 것이다.

또한 Kim(2011)은 재성형 점토를 이용하여 하중증분비의 영향을 고려하여 장기압밀시험을 수행하고 탄-점성 압밀이론을 이용하여 장기간에 걸친 침하특성을 수

Fig. 1. Effects of pre-consolidation stress

(a) Definition of compression

(b) Consolidation path of long-term consolidation

Fig. 2. Concept of consolidation by Bjerrum

치해석결과와 비교하여 그 적용성을 검증한바 있다. 다만 이 연구에서는 압밀단계에서의 하중재하기간이 압밀 특성에 미치는 영향에 대해서는 고려되지 않았다. 또한 Bjerrum(1967)은 Quick Clay(예민성 점토) 지반상의 건물의 침하해석을 수행한 결과로부터, 하중증가율이나 재하기간의 상이에 의해 압축곡선이 다른 형태를 나타냄을 보고하였다. 더욱이 그는 장기간에 걸친 압축이 압밀특성에 어떠한 영향을 미치는 지에 대해서도 검토를 행하였다.

일반적으로 압밀현상은 과잉간극수압의 소산에 근거하여 1차압밀과 2차압밀로 분류되어지나, Bjerrum은 과잉간극수압의 소산에 필요한 시간은 점토층의 두께, 투수성, 배수조건 등에 의해서 다르게 됨을 지적하고, 유효응력에 따른 토립자 골격구조의 압축거동의 분류로서는 부적당하다고 판단하였다.

그 결과, “즉시 압축”과 “자연 압축”이라고 하는 새로운 개념으로 점토의 압축거동을 2가지로 분류하고, 즉시압축과 자연 압축을 다음과 같이 정의하였다.

- ① 즉시 압축(instant compression) : 유효응력의 증가와 더불어 순간적으로 발생하며, 구조가 유효상재하중을 지지하는 상태에 도달할 때까지 간극비의 감소를 일으키는 압축.
- ② 자연 압축(delayed compression) : 일정 유효응력 하에서 시간에 의존해서 발생하는 압축.

또한, Bjerrum에 의한 압밀 개념은, 균일한 응력이 순간적으로 가해진 경우에 Fig. 2에 나타난 것과 같은 개

념도로 설명이 가능하다. Fig. 2에서 점선으로 나타난 곡선(a→b→c→d)은 간극수의 유출에 지연현상이 없이 가해진 하중이 순간적으로 유효응력으로 점토구조에 전달되어지는 경우에 발생하는 흙의 골격구조의 반응을 나타낸다. 이때, 재하와 동시에 일어나는 압축을 즉시압축, 그 이후의 압축을 지연압축으로 규정하고 있다. 그러나 실제로는 점토의 투수성이 작고 물의 점성 때문에 실선으로 나타난 곡선(a→c'→d)에 따라서 압밀이 진행하게 된다. 또한, Bjerrum은 압축의 정의에서 즉시압축과 지연압축의 개념을 $e\text{-log}\sigma'$ 의 관계로도 표현하였다.

또한, 즉시압축과 지연압축에 관한 체적압축을 표현하는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$de = \left(\frac{\partial e}{\partial \sigma'} \right)_t d\sigma' + \left(\frac{\partial e}{\partial t'} \right)_{\sigma'} dt \quad (1)$$

식 (1)에서, 우변 제 1항을 투수계수 $k=\infty$ 로 가정하고 시간 $t=0$ 에서 순간적으로 점토골격이 압축된다고 고려한다. 이 경우, $t=0$ 일 때의 $e \sim \sigma'$ 곡선이 그려진다. 이것이 순간압축곡선이다. 다음으로 우변 제 2항에서 점성을 고려하면, 시간 t 가 일정한 평행한 $e \sim \sigma'$ 곡선이 그려진다. Bjerrum의 모델에 의하면 2차압밀 및 그에 따른 골격의 경화 등의 현상을 설명할 수 있다. 다만, 층두께가 달라지면 압밀에 필요한 시간 t 가 달라지게 되므로 $e \sim \sigma'$ 곡선 상에서 공통의 파라메타로서 이용할 수 없게 된다. 즉, Bjerrum 모델의 난점은 완전 압밀시험이 실행 불가능하여, 순간압축선과 항복응력 P_c 를 결정할 수 없는 점이다. 또한, 2차압밀을 설명하기 위하여 여러 연구자들에 의해 2차압밀에 대한 서로 다른 정수들이 사용되어 왔고 충분한 정보의 부족과 연구 목적의 차이로 인해 2차압밀에 대한 통합된 정수를 결정하는 것은 일반적으로 불가능하다. 그 중에서도 2차압밀계수는 2차압밀의 크기를 설명하기 위해 가장 유용하고 광범위하게 사용되고 있다. 일정유효응력 상태에서 시간과 더불어 발생하는 2차압밀은 대수시간에 비례해서 발생하는 것으로, 2차압밀의 정도는 다음에 정의하는 침하량-시간곡선의 구배 C_{ae} 로 나타내며, 이것을 2차압밀계수라고 부른다.

$$C_{ae} = \Delta e / \Delta \log t \quad (\text{침하변형률 } e\text{-log } t \text{ 관계곡선}) \quad (2)$$

$$C_{ae} = \Delta e / \Delta \log t \quad (\text{간극비 } e\text{-log } t \text{ 관계곡선}) \quad (3)$$

Ladd(1977) 등은 Mesri(1973, 1997)의 결과를 일부 이용하여, 2차압밀 속도(침하곡선의 $e\text{-log } t$ 곡선에서의 침하곡선의 후반부의 기울기로 표현) C_{ae} 와 압축지수 C_c 의 관계를 조사하여 압축지수는 압밀항복응력의 증가와 더불어 증가하고, 압밀항복응력을 초과한 부분에서 최대치를 나타내며, 그 이후에는 감소하는 경향을 보고하였다. 한편, 2차압밀 속도 C_{ae} 는 과압밀영역, 정규압밀영역에 관계없이 압축지수 C_c 와 일정한 관계가 있으며, 유기질토에서는 $C_{ae}/C_c = 0.07 \pm 0.02$, 점성토에서는 $C_{ae}/C_c = 0.05 \pm 0.02$ 의 경험값을 보고하였으며, 상호간의 상관관계를 제안하였다. 이로부터 압축성이 큰 점토에서는 2차압밀 속도도 크다는 것을 알 수 있다.

또한, Kim and Oshima(2006)은 원지반 불교란 시료를 이용한 실내시험에서 점토의 1차원 압밀과정에서 재하시간에 관한 상사법칙의 연구를 통해 압밀시간이 길어질수록 $f\text{-log } p$ 관계가 아래쪽으로 이동하며 압밀계수, 투수계수 등이 작아짐을 제안하였다.

따라서 본 연구에서는 장기간에 걸친 압밀침하 거동을 분석하기 위해 각 압밀하중단계에서의 하중재하기간이 압축곡선에 미치는 영향과 2차압밀 특성에 미치는 영향을 명확히 하기 위해 실내시험을 수행하고 그 경향을 분석하고자 하였다.

3. 실내시험 재료 및 방법

3.1 실험장치

압밀하중 재하시의 과잉간극수압 발생 및 소산과정이 하중재하기간에 따른 점성토의 압축특성 및 2차압밀 특성에 미치는 영향을 파악하는 것은 중요하다. 본 연구에서 사용한 개조된 표준압밀시험기는 기존 표준 압밀 시험장치를 개조한 자동 압밀시험기로서 최종압밀하중 단계에서 일면배수 상태로 압밀셀 바닥에 설치된 밸브 조작을 통해 간극수압을 측정할 수 있도록 간극수압센서를 장착하였다. 최종하중단계 이외의 단계에서는 간극수압 측정용 밸브를 개방하여 양면배수로 압밀을 진행하였다. $0.8 \rightarrow 1.6 \text{ kgf/cm}^2$, $1.6 \rightarrow 3.2 \text{ kgf/cm}^2$, $3.2 \rightarrow 6.4 \text{ kgf/cm}^2$ 하중단계의 최종압밀단계에서 밸브를 폐쇄하여 간극수압을 측정하였다.

본 연구에서 사용한 압밀시험기의 사진과 압밀셀의 개념도를 Fig. 3에 나타내었다.

3.2 재료 및 방법

본 연구에서 이용한 시료는 광양항 컨테이너부두 매립 시에 발생된 해성 준설향점토 채취 후 실험실에 반입하여 조개껍질 등 불순물을 제거하기 위해 #40번체(0.42mm)를 이용하여 체가름 한 원지반 점성토를 액성한계의 약 2배에 해당하는 함수비($90 \pm 5\%$)로 교반하여 재성형 점토를 제작하였다. 재성형 점토시료의 제작 방법은 다음과 같다. 먼저 액성한계의 2배의 함수비로 교반한 슬러리상 점토를 토조내에 공기가 혼입되지 않도록 주의 깊게 투입하고 토조상단부까지 점토를 채운 후에 초기 안정화를 위해 2-3일간의 자중압밀 후, 초기하중의 재하로 인한 점토시료 교란의 영향을 방지하기 위해 재하판(강제)을 올리고 초기하중은 0.05kgf/cm^2 로 침하-시간곡선으로부터 2차압밀 개시시점을 확인한 후에 다음 단계인 0.1kgf/cm^2 , 0.2kgf/cm^2 를 재하하도록 하였다. 마지막으로 원지반 점성토의 심도 약 5.0m에 해당하는 유효상재하중과 유사한 최종압밀하중 0.4kgf/cm^2 의 압밀하중에서 실제지반과 같은 안정된 재성형 점토를 얻기 위하여

1차압밀이 종료된 시점을 3 te법(일본 지반공학회 토질시험법, 2000년)을 적용하여 압밀종료시점으로 하고, 블록($20\text{cm} \times 10\text{cm} \times 12\text{cm}$)으로 제작하여 장기간에 걸친 압밀시험의 특성을 고려하여 각 시료의 함수비 변화를 방지하기 위해 랩으로 도포하고 다시 호일로 도포한 후, 최종적으로 표면을 파라핀으로 도포하여 공기와의 접촉을 방지한 상태로 실온에서 보관하는 것으로 하였다. 이 연구에서 이용한 재성형 점토의 원지반 상태에서의 물리특성을 나타낸 것이 Table 1과 같다. 표에서 알 수 있는 것처럼 자연함수비는 약 52%, 통일분류법에 의해 저압축성 점토인 CL로 분류되며, 200번체 통과량이 87%를 초과하고 있으며 소성지수 15% 정도의 약간 저소성 상태의 저압축성 점토의 특성을 가지고 있으며, 선행압밀하중은 0.34kgf/cm^2 이며 압축지수는 0.79의 값을 나타내고 있다.

Fig. 4는 재성형시의 최종압밀하중단계에서의 시간-침하곡선을 이용하여 1차압밀 종료시점을 결정하는 방법을 나타낸 것으로, 초기 s-logt 곡선의 직선부의 연장선과 시간축이 만나는 점 te를 결정하고 그와 동일한 기울기로 te의 3배가 되는 시간축에서 연장한 직선과 침하곡선이 만나는 점을 1차압밀 종료시점으로 규정하였다 (최종단계 총 재하기간 약 83일).

(a) Consolidation apparatus photo

(b) Concept of consolidation cell

Fig. 3. Oedometer tester for pore water pressure measurement

Table 1. Physical and mechanical properties of remolded marine clay

Water content (%)	Liquid limit (%)	Plasticity Index	Specific gravity	Percent finer by 0.074 mm	USCS	Compression index (Cc)	Preconsolidation stress (Pc) (kgf/cm ²)	Remarks
52.34	46.91	15.72	2.69	87.3%	CL	0.79	0.34	0.42 mm transit sample

Table 2. Loading method with the loading period change

Sections	Initial cons. pressure (kgf/cm ²)	Final cons. pressure (kgf/cm ²)	Applied pressure (kgf/cm ²)	Loading period (hr)
Case 1-1	0.8	1.6	0.8	24 (1days)
Case 1-2	1.6	3.2	1.6	
Case 1-3	3.2	6.4	3.2	
Case 2-1	0.8	1.6	0.8	72 (3days)
Case 2-2	1.6	3.2	1.6	
Case 2-3	3.2	6.4	3.2	
Case 3-1	0.8	1.6	0.8	144 (6days)
Case 3-2	1.6	3.2	1.6	
Case 3-3	3.2	6.4	3.2	
Case 4-1	0.8	1.6	0.8	216 (9days)
Case 4-2	1.6	3.2	1.6	
Case 4-3	3.2	6.4	3.2

Fig. 4. Settlements-time curve at remolding (final loading stage)

Table 2는 실내시험을 통한 초기압밀하중(압밀이력의 차이)에 따른 압축특성과 장기재하에 따른 점성토의 2차압밀 특성을 알아보기 위해 본 연구에서 수행한 압밀시험의 압밀하중 재하방법을 나타낸 것이다.

4. 실내시험 결과 및 분석

4.1 하중재하기간에 따른 압축곡선의 변화

자동압밀시험기를 이용하여 표준압밀시험 및 단계별 하중재하기간을 달리한 장기압밀 시험을 수행한 Case 1~4에 대한 각각의 압축곡선(e - $\log p'$ 곡선)을 나타낸 것이 Fig. 5이다. 본 연구에서 사용한 재성형 점토의 제작과정은 3.2절 Fig. 4에서 나타낸 것처럼 원지반 유효상재하중(0.4kgf/cm^2)하에서 83일간의 하중재하를 통해 1차압밀이 종료된 것을 확인하였으며 이를 통해 안정화

된 균일 점토가 제작되었다고 판단하였다. 다만, 그림에서 알 수 있는 것처럼, 재성형 점토를 작성할 때의 토조의 상부점토와 하부점토의 응력전달의 차이로 초기 간극비에 약간의 차이를 나타내지만 정규압밀영역의 압축지수는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

Fig. 6(a), (b), (c)는 현장에서의 유효상재하중 p'_0 에 해당하는 초기압밀하중을 0.8 및 $1.6, 3.2\text{kgf/cm}^2$ 로 변화시킨 상태에 대해 하중증분비($\Delta p/p_0$)를 1.0 으로 하여 장기간 재하시의 압축곡선의 변화를 나타낸 것으로, 하중재하기간의 증가와 더불어 선행압밀하중(p_c)이 왼쪽으로 약간씩 감소해가는 경향을 나타내었다. 이는 Crawford (1964)가 예민성 점토를 이용하여 동일한 하중 증가율의 경우에도 각 하중단계에서의 하중재하시간의 차이에 따라 선행압밀하중이 하중재하기간의 증가와 더불어 압축곡선이 오른쪽으로 이동한다고 하는 주장과 동일한 결과를 보여주고 있다. 이와 같이 주어진 하중단계에서의 하중재하기간이 증가할수록 다음 단계의 하중증분을 재하하기 이전에 이미 2차압밀에 해당하는 침하가 증가하게 되고 이로부터 Casagrande(1936)법을 이용하여 구한 선행압밀하중이 변화하게 된다. 그림에서 정규압밀 영역에서의 압축지수가 변화하지 않는 이유로는 전단계에서 장기간 재하로 발생된 2차압밀침하가 점토에 유사과압밀 현상으로 작용하여 다음단계 하중이 가해질 경우의 압축지수(C_c)는 동일한 값을 가지는 것으로 판단된다.

Fig. 7(a), (b)는 초기압밀하중 3.2kgf/cm^2 에서 최종압밀하중 6.4kgf/cm^2 까지 재하 한 경우의 압축곡선인데, 그림에 선행압밀하중 이전의 재압축지수와 정규압밀영

(a) 24hr (1,440min) loading

(b) 72hr (4,320min) loading

(c) 144hr (8,640min) loading

(d) 216hr (12,960min) loading

Fig. 5. Relationship between void ratio and effective stress

역에서의 압축지수를 나타낸 것으로 Fig. 6에서 언급한 바와 같이 압축지수의 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 7(b)는 과압밀영역에서의 e - $\log p$ 곡선을 확대하여 나타낸 것으로 재압축지수 (C_s)를 각 하중재하 시간에 따라 기울기로 표기한 값으로부터 하중재하 시간이 증가할수록 전단계에서의 하중재하기간중의 장기간에 걸친 유효응력 일정 상태에서의 준치기간의 증가로 2차압밀량이 증가하여 유사과압밀 현상을 유발하여 재압축지수가 약간씩 증가하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 최종압밀하중 6.4kgf/cm^2 에 대한 24시간 재하시의 표준압밀시험에 의한 간극비 변화와 각 하중단계에서의 하중재하시간을 216시간으로 재하한 경우의 압축곡선을 병기한 것으로 그림에서 알 수 있는 것처럼, 표준압밀시험에서의 24시간 재하시를 1차압밀 종료로 판단하고 간극비의 변화량을 크립 침하로 나타낸 것이다. 정규압밀 영역에서의 각 하중단계에서의 평균 간극비 감소량은 0.093 으로 나타났으며, 하중 재하기간이 감소함에 따라 144시간 재하시 0.08 , 72시간 재하시 0.025

의 간극비 변화를 나타내었다. 이들 결과로부터 하중 재하시간의 증가에 따라 각 하중단계에서의 크립의 영향이 증가함을 알 수 있다. 이는 Bjerrum이 제안한 압밀 개념에서의 장기압밀에 대한 압밀경로에서 나타낸 하중 재하기간의 영향과 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있다.

4.2 초기압밀하중이 시간-침하곡선에 미치는 영향

원지반 점성토 지반에서의 유효상재하중(σ'_0)에 해당하는 실험실에서의 초기압밀 하중의 차이에 따른 점성토의 장기압밀 특성을 명확히 하기 위해, 각 하중재하 시간에 따른 초기 압밀하중을 0.8 , 1.6 , 3.2kgf/cm^2 로 설정하고 각 경우에 대해 24시간~216시간의 하중 재하기간을 변화시켜 장기압밀 시험을 수행하였다.

Fig. 9(a), (b)는 각 단계별로 24시간 재하 한 경우와 216시간 재하 한 경우의 시간-침하곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것처럼, 초기압밀하중의 증가와 더불어 전 단계에서의 침하의 진행과 더불어 점토골

(a) Initial load 0.8 kgf/cm²

(b) Initial load 1.6 kgf/cm²

(c) Initial load 3.2 kgf/cm²

Fig. 6. Relationship between loading period and compression curve

격의 안정화(간극비 감소)로 최종압밀단계에서의 침하량이 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한 표준압밀시험의 24시간 재하에 비해 216시간 재하시의 동일 초기압밀하중에서의 침하량이 감소하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 앞에서 설명한 바와 같이 최종압밀하중 이전단계에서의 재하기간이 증가할수록 이에 따른 유효응력 일정한 크리프 상태에서의 2차압밀량의 증가에 기인

(a) Compression index group (Cs, Cc)

(b) Re-compression index at OC state

Fig. 7. Change in re-compression index by pseudo overconsolidation phenomenon

Fig. 8. Method of separation of creep at compression curve

한 것으로 판단된다. 72시간, 144시간 재하에서도 유사한 경향을 나타내었다. 또한 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 하중재하기간과 초기압밀하중의 차이에도 불구하고 1,000분 이후의 시간-침하곡선의 기울기(이차압밀계수)는 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 Yoshikuni 등(1995)의 연구결과와도 일치하는 결과이다.

(a) 24 hr loading

(b) 216 hr loading

Fig. 9. Shape of settlements-time curves by initial load

(a) 24 hr loading

(b) 216 hr loading

Fig. 10. Settlements-time curves with loading period

4.3 하중재하기간이 시간-침하곡선에 미치는 영향

Fig. 10(a), (b)는 각각 Case 1-3의 24시간 재하와 Case 4-3의 216시간 재하시의 각 하중단계별 시간-침하(s-logt) 곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것처럼, 이 연구에서 재성형시의 유효상재하중을 0.4kgf/cm^2 으로 설정하고 있으므로, 과압밀영역에 해당하는 0.2kgf/cm^2 까지는 침하량이 극히 미소하게 나타났다. 그러나 24시간 재하시에 비해 216시간 재하시의 압밀하중 초반부의 0.1, 0.2, 0.4kgf/cm^2 에서 장기재하로 인해 상대적으로 큰 침하가 발생되어 점토 골격의 안정화의 진행으로 이후의 압밀하중 단계에서의 침하량은 감소함을 알 수 있다.

Fig. 11(a), (b), (c)는 압밀하중 $0.8 \rightarrow 1.6$, $1.6 \rightarrow 3.2$, $3.2 \rightarrow 6.4\text{kgf/cm}^2$ 에 해당하는 장기압밀시험시의 시간-침하곡선을 나타낸 것으로, 그림에서 알 수 있는 것처럼 단계별 하중재하기간이 증가할수록 초기단계에서의 간극비의 감소로 점토 골격이 안정화 되어 최종압밀하중 작용시의 침하량이 감소함을 알 수 있다. 또한 초기압밀

하중이 증가할수록 압밀후반부의 최종침하량이 감소하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12는 Fig. 11(c)에서 장기압밀과정을 비교하기 위해 경과시간 20,000분에서의 최종침하량(S_f)을 기준으로 경과 시간별 침하량(S_t)의 비를 이용하여 정규화한 침하량비와 시간곡선이다. 그림에서 알 수 있는 것처럼, 압밀 곡선 중반부에 약간의 차이가 있으나 경과시간 1,000분 이후에서는 거의 일치하고 있다. 초기압밀하중 0.8, 1.6 kgf/cm^2 의 결과에서도 동일한 결과가 얻어졌다. 이로부터 하중재하기간에 따른 2차압밀계수에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

Fig. 13(a), (b), (c)는 각각 압밀하중 $0.8 \rightarrow 1.6$, $1.6 \rightarrow 3.2$, $3.2 \rightarrow 6.4\text{kgf/cm}^2$ 에 해당하는 장기압밀시험시의 과잉간극수압의 발생과 소산과정을 나타낸 것이다. 이 연구에서 사용한 개조된 압밀시험기의 경우 하중재하와동시에 간극수의 배제가 발생하는 조건이므로 가해진 압밀하중에 도달하기 전에 과잉간극수압이 피크 값을 보인 후에 배수가 발생하는 형태를 보이고 있다. 각각의 그림에서 알 수 있는 것처럼 압밀응력이 증가할수

(a) 0.8 → 1.6 kgf/cm²

(b) 1.6 → 3.2 kgf/cm²

(c) 3.2 → 6.4 kgf/cm²

Fig. 11. Settlements-time curves with initial load and loading period

(a) 0.8 → 1.6 kgf/cm²

(b) 1.6 → 3.2 kgf/cm²

(c) 3.2 → 6.4 kgf/cm²

Fig. 13. Generation and dissipation of pore water pressure

Fig. 12. Normalized settlement ratio and time curves

록 발생된 과잉간극수압이 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 하중재하기간이 증가할수록 피크 값 발생시간이 약간 지연되며, 간극수압의 피크 값이 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 앞서 나타낸 Yoshikuni 등(1995)이 수치해석 결과를 통해 제안한 각 하중단계에서의 시간경과에 따른 점토골격의 안정화와 간극비의 감소로 점토 공시체의 배수거리가 단축되어 발생된 현상으로 판단된다(Case 4-1, 4-3의 경우는 간극수압계의 오류로 데이터 취득 불가).

Fig. 14는 압밀하중 0.8 → 1.6, 1.6 → 3.2, 3.2 → 6.4

Fig. 14. Relationship between loading period and final settlements

kgf/cm²에 해당하는 장기압밀시험시의 각 케이스별 최종침하량과 하중재하시간과의 관계를 나타낸 것이다. 앞에서 설명한 것처럼, 초기압밀하중이 증가할수록 각 하중재하기간에 따른 최종단계에서의 침하량이 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한 각각 최종침하량이 압밀하중재하기간과 직선적인 관계를 보이고 있어, 이를 활용하여 표준압밀시험(24시간 재하)에서 얻어진 원지반 유효상재 하중하에서의 정규압밀 상태에 대한 하중재하기간(성토 후 방치기간)을 이용하여 최종침하량을 유익적으로 판단할 수 있을 것이다.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는, 균질한 재성형 점토를 이용한 실내시험을 통해 정규압밀 영역에서의 하중재하기간과 초기압밀하중이 점성토의 압축특성 및 장기압밀 특성에 미치는 영향에 대해 조사하고자 하였다. 이와 같은 실내시험 결과를 통해 표준압밀시험시의 하중단계별 재하방법과 하중재하기간의 증가에 따른 압축곡선의 특성을 비교/분석하여 재하기간에 따른 최종침하량을 예측하는 방법을 제안하고자 하였다. 이 연구를 통해 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 하중재하기간에 따른 점성토의 압축특성은 재하기간이 증가할수록 각 재하단계에서의 2차압밀의 증가로 선행압밀하중이 약간 감소하는 경향을 나타내었다.
- (2) 하중재하기간이 정규압밀영역에서 압축지수에 미치는 영향은 각 재하단계에서의 재하기간이 길어질수록 크리프 상태에의 재하기간의 증가로 인한 2차

압밀이 유사과압밀 현상 및 점토 골격의 안정화를 유발하여 미미한 것으로 나타났으며, 과압밀영역에서는 유사과압밀현상으로 재압축지수의 증가를 유발하는 것으로 나타났다.

- (3) 초기압밀하중이 증가할수록 과압밀영역에서의 장기재하로 인해 상대적으로 큰 침하가 발생되어 점토골격의 안정화(간극비의 감소)의 진행으로 정규압밀영역에서의 침하량은 감소한 결과를 나타냈으나, e-logt 곡선 후반부의 이차압밀계수에는 큰 차이가 없었다.
- (4) 하중재하기간이 증가할수록 점토골격의 안정화 및 간극비의 감소로 점토 공시체의 초기 배수거리가 단축되어 과잉간극수압이 감소하며 피크 값이 발생하는 시간이 약간 지연되는 결과를 나타냈다.
- (5) 초기압밀하중 및 하중재하기간에 따른 최종침하량의 크기를 비교한 결과, 하중재하기간이 증가할수록 최종침하량이 감소하는 경향을 나타내었으며, 이들 결과를 바탕으로 현장에서의 성토 후 방치기간을 이용하여 최종침하량을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 전남대학교 일반연구자 학술연구비 지원사업에 의하여 연구되었음.

참고문헌 (References)

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. Kim, J. Y. and Oshima, A. (2006), "A Study on Similarity Rule of Loading Period and Thickness with One-dimensional Consolidation Process for Clay", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.26, No.6C, pp.369-376.
3. The Japanese Geotechnical Society (2000), *Soil Laboratory Tests- Basic and Process-*, Showa Information Process Co., Ltd.
4. Aboshi, H. and Matsuda, H. (1981), "Secondary compression of clays and its effect on settlement analysis", *Soils and Foundations*, Vol.29, pp.19-24.
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. Casagrande, A. (1936), "The determination of the pre-consolidation load and its practical significance", *Proceedings, 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Cambridge, Vol.3, pp.60-64.

7. Crawford, C. B. (1964), "Interpretation of consolidation tests", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 90, No.SM5.
8. Ladd, C. C., Foott, R., Ishihara, K., Schosser, F., and Poulos, H. J. (1977), "Stress-deformation and strength characteristics", *Proc. 9th ICSMFE, Tokyo 2. State of the Art Report*, pp.421-494.
9. Mesri, G. (1973), "Coefficient of secondary compression", *Proc. ASCE*, Vol.99, SM1, pp.123-137.
10. Mesri, G. and Codlewski, P. M. (1997), "Time and stress compressibility interrelationship", *Jour. of Geotech. Eng. Div., ASCE* Vol.103, No.GT5, pp.417-430.
11. Taylor, D. W. (1948), "*Fundamentals of soil mechanics*", John Wiley & Sons.
12. Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1948), "*Soil mechanics in engineering practice*", John Wiley and Sons.
13. Yoshikuni, H. and Okada, M., Ikegami, S., and 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.
14. Yoshikuni, H. and Moriwaki, T., Ikegami, S., and Nishiumi, H. (1995), "Rebound due to partial unloading and subsequent recompression behavior in 1-D consolidation", *Proc. of the International Symposium on Compression and Consolidation of Clayey Soils, IS-Hiroshima '95*, Vol.1, pp.233-238.

Received : October 21st, 2013

Revised : January 6th, 2014

Accepted : February 3rd, 2014