



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士學位論文

## 점토의 일차원 크리프 거동

Creep behavior of clay in 1D condition

蔚山大學校 大學院

建設環境工學科

盧 炘 甫

# 점토의 일차원 크리프 거동

指導教授 申浩成

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2024 年 02 月

蔚山大學校 大學院

建設環境工學科

盧 炅 甫

盧 炘 甫의 工學碩士 學位論文을 認准함

審 查 委 員    김    익    현 (인)

審 查 委 員    신    호    성 (인)

審 查 委 員    원    중    목 (인)

蔚 山 大 學 校 大 學 院

2024 年 02 月

# 국 문 요 약

## 점토의 일차원 크리프 거동

蔚山大學校 大學院

建設環境工學科

盧 炘 甫

최근 내륙에서 더 나아가 해저도시나 신공항과 같은 해저에 인프라 건설을 하면서 과거에 응력을 거의 받지 않은 점토의 연약지반 침하 발생에 대한 문제점이 중요시되고 있다. 또한 국내에서 고 준위 방사능 폐기물 처분하는데 안정성을 높이기 위해 사용되는 완충재 내부 점토 크리프 거동 연구가 필요시 되고 있다. 그러나 현재 국내외의 연구에서는 실험적, 수치 해석적으로 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 압밀 시험 결과를 통해 유효응력 변화, OCR의 변화에 따른 크리프 거동을 분석하고 보다 나은 크리프 모델을 개발하여 크리프 예측 방법을 제안하고자 한다. 해성 점토나 완충재 점토 관련하여 모델, 압밀, 크리프 등 여러 자료를 수집하였다. 또한 해성 점토와 비슷한 거동을 보이기 위해 벤토나이트와 풍화토를 혼합한 시료를 사용하였으며, 기본 물성 시험과 장기간 압밀에 따른 크리프를 예측하기 위해 압밀 시험기를 이용하여 1. 정규 압밀 시험 2. 유효응력 변화에 따른 크리프 특성을 확인하기 위해 각 상재하중별 크리프를 측정 3. OCR에 따른 크리프 특성을 확인하기 위해 하중을 증가 또는 감소하여 최종 하중을 동일한 상태로 크리프를 측정하였다. 이에 크리프가 발산하는지 수렴하는지, 압밀 특성, 강도 특성 등 분석하였다. 크리프 실험결과 유효응력이 커질수록 크리프 계수가 더 커지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 유효응력에서 커질수록 OCR의 영향이 커지는 것을 확인할 수 있었다. 이에 크리프 계수는 상수가 아닌 응력 조건에 따라 달라지는 것을 확인하였으며 보다 나은 크리프 모델을 개발할 수 있다고 판단된다.

# 목 차

국문 요약 .....	i
목 차 .....	ii
표 목 차 .....	iv
그림 목 차 .....	v
제 1 장 서론 .....	1
1.1 연구 배경 및 목적 .....	1
1.1.1 최근 국내에서 발생한 지반 침하 .....	1
1.1.2 연약 지반 구조물 .....	2
1.1.3 고 준위 방폐장 완충제 .....	4
1.2 연구 동향 .....	7
1.3 연구 방법 .....	8
제 2 장 압밀 이론 .....	11
2.1 Terzaghi 압밀 이론 .....	11
2.1.1 Terzaghi 기본 가정 .....	12
2.1.2 Terzaghi 압밀의 기본 미분 방정식 .....	13
2.1.3 압밀 계수 .....	17

2.2 압밀 분류.....	19
2.2.1 일차원 압밀 이론.....	20
2.2.2 즉시 침하.....	21
2.2.3 압밀 침하.....	21
2.2.4 크리프 침하.....	24
2.2.5 전체 침하.....	24
2.3 압밀 가설.....	25
<b>제 3 장 실험 결과.....</b>	<b>27</b>
3.1 압밀 시험 과정.....	27
3.2 표준 압밀 시험 결과.....	29
3.3 하중 별 크리프 시험 결과.....	33
3.4 하중 증감 시험 결과.....	35
<b>제 4 장 결론.....</b>	<b>37</b>
<b>참 고 문 헌.....</b>	<b>38</b>
<b>영 문 요 약.....</b>	<b>41</b>

## 표 목 차

1.1 압밀 시험 조건표.....	10
3.1 시료의 기본 물성표.....	27
3.2 표준 압밀 시험 결과표 .....	29



## 그림 목 차

1.1 연도별 지반 침하량 발생	1
1.2 연도별 지반침하 발생 현황	2
1.3 울산 바다 해저도시	2
1.4 부산 가덕도 신공항	2
1.5 연약지반 침하 피해 사례	3
1.6 원전별 사용 후 핵연료 포화도	4
1.7 방사성 폐기물 영구처분 개념도	5
1.8 온도변화에 따른 크리프 특성	5
1.9 OCR에 따른 크리프 특성	6
1.10 압밀 시험기	9
1.11 압밀 시료 성형기	9
1.12 조건 별 압밀시험 모식도	10
2.1 Terzaghi 압밀	13
2.2 $\log t$ 에 따른 침하량 그래프	17
2.3 $\sqrt{t}$ 에 따른 침하량 그래프	18
2.4 압밀 과정 개략도	19
2.5 시간-변형률에 따른 압밀 분류	20
2.6 일차원 압밀	22
2.7 시간에 따른 $\log t$ 그래프	25
2.8 크리프 가설 분류	26
3.1 압밀 성형기를 이용하여 시료 포화시키는 모습	27
3.2 포화된 시료를 압밀링에 넣는 모습	28
3.3 압밀 시험기에 하중을 가하는 모습	28
3.4 시간 경과에 따른 침하량	30
3.5 압밀 하중에 대한 간극비	30
3.6 압밀 하중에 대한 압밀계수	31

3.7 압밀 하중에 대한 체적 변화계수 .....	31
3.8 압밀 하중에 대한 투수계수.....	32
3.9 상재하중 별 시간에 따른 변형률 .....	33
3.10 상재하중 별 2차 압축률 .....	34
3.11 상재하중 별 크리프 변형률 .....	34
3.12 시간에 따른 간극비 곡선.....	35
3.13 시간에 따른 정규화된 간극비 곡선.....	36

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경 및 목적

### 1.1.1 최근 국내에서 발생한 지반 침하

국토교통부에 따르면 2018년부터 지난 2022년까지 최근 5년간 지반침하가 총 1,127건 발생하였다.[1] 그림 1.1을 보면 지난해에 2021년도 대비 증가하는 추세로 나타났다. 대체적으로 지반 침하 발생 원인으로는 상하수관 손상으로 인해 발생하는 지반 침하가 가장 많았고 이외 지하수의 흐름이 바뀌어 공동이 생기거나, 매립지 조성 과정에서 연약지반이 충분히 다져지지 않는 등의 경우가 대부분이다. 그림 1.2에 연도별 지반침하 발생 현황을 비율로 나타내었다.

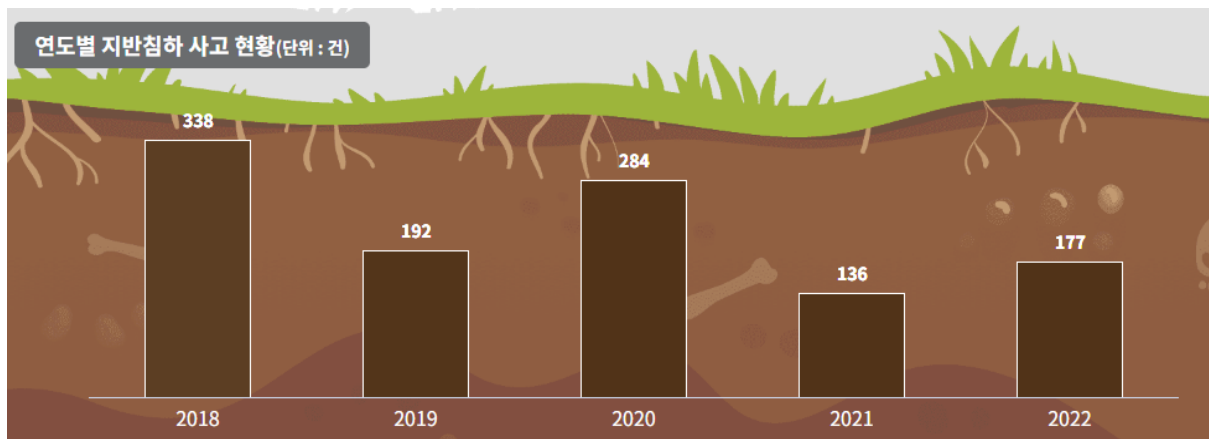


그림 1.1 연도별 지반침하 발생

원인별 지반침하 발생 현황(단위: 건)

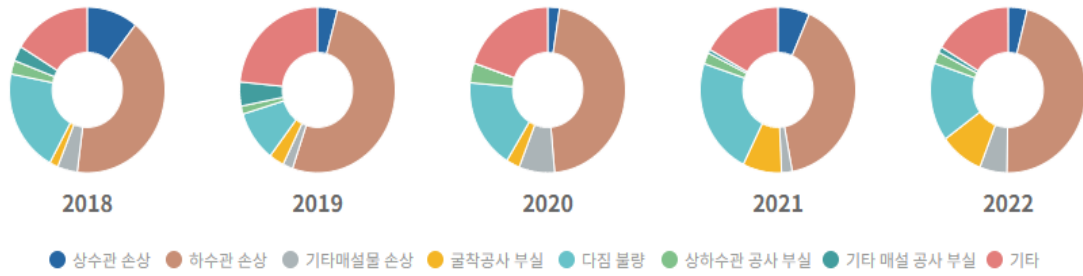


그림 1.2 연도별 지반침하 발생현황

### 1.1.2 연약지반 구조물

우리나라 뿐만 아니라 세계 각지에서 기존에 건설된 노후된 아파트, 주택, 교량 등 여러 구조물들을 매년 보수, 보강 중에 있다. 또한 급속한 개발에 따라 도시화가 되면서 인구밀도가 일정 지역에 집중되고 있다. 이에 따라 인프라 건설이 내륙 지역뿐만 아니라 더 나아가 주요 지역에서는 해안과 밀접한 곳에 공항이나 해저 터널 등으로 활발하게 진행되고 있다. 그림 1.3과 그림 1.4는 최근 우리나라에 계획 중인 해저 구조물 사례를 나타낸다.

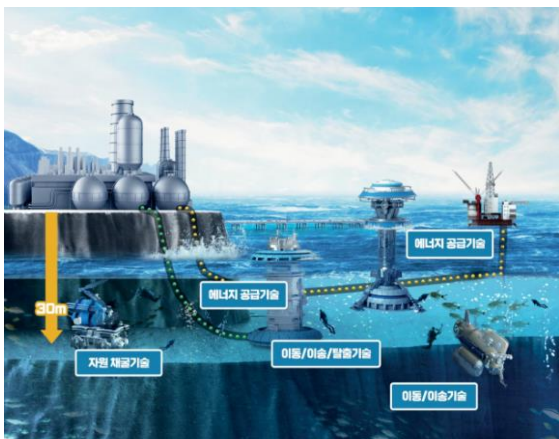


그림 1.3 울산 바다 해저도시



그림 1.4 부산 가덕도 신공항

하지만 이 지역의 대부분이 연약한 점토와 모래로 구성되어 있어 낮은 지지력과 높은 변형 거동으로 인해 주요 구조물 침하 및 유지 관리 문제가 발생한다. 또한 해성 점토 지반인 경우 일반적으로 내륙을 구성하는 점토와 달리 대부분 과거에 응력을 거의 받지 않은 상태이다. 이러한 지반 특성은 단위체적당 점토입자의 표면적이 매우 커서 중력의 작용보다는 입자 상호간의 작용하는 인력이나 반발력의 영향을 더 많이 받는다. 또한 실트와 사질토에 비해 전기적 결합으로 인해 간극비가 크고 투수계수가 작기 때문에 가해진 하중에 의해 점성토층 내에서 발생하는 압밀 침하량은 장기간에 걸쳐 크게 발생한다.[2] 이로 인해 구조물 설계 및 시공할 때 압밀에 의한 크리프 영향을 무시하지 못한다. 따라서 구조물 설계 및 시공할 시 장기간에 대한 크리프 거동을 고려하여 반영해야 한다. Mesri(1977), Yin(1999), Leroueil(2006) 등을 포함한 수많은 연구자들은 흙의 시간 의존 거동을 연구하기 위해 일축 및 삼축 시험을 수행하였다. 하지만 여러 연구를 바탕으로 간사이 공항의 침하량을 예측하였지만 침하량이 보다 크게 침하가 발생하여 큰 문제가 되었다. 또한 지각변동, 해면상승 등과 같은 자연적 요인과 굴착, 매립 하중 등과 같은 인위적 요인을 고려할 때 국내외에서 빈번하게 설계에 실패하여 침하 피해가 그림 1.5와 같이 발생한다. 따라서 여러 요인들과 흙의 거동 특성을 고려하여 구조물 설계를 할 필요가 있다.



그림 1.5 연약지반 침하 피해 사례

### 1.1.3 고 준위 방폐장 완충제

사용 후 핵연료(고 준위 폐기물)는 방사능 함유량이 높아서 10만 년 정도 지나야 자연 방사능 수준으로 줄어들기 때문에 생태계와 영구적으로 분리해서 보관해야 한다. 하지만 우리나라는 완전히 붕괴되어 안전해질 때까지 보관하는 방안을 찾지 못하였다. 또한 영구 저장 시설을 확보하지 못하여 그림 1.6과 같이 거의 원자력 발전소 자체적으로 임시로 저장하고 있다.[3] 현재 유일하게 시도되고 있는 방식이 그림 1.7과 같은 심층 처분이다. 심층 처분에서 폐기물을 감싸고 있는 완충체에 벤토나이트 점토가 사용된다. 이 벤토나이트에는 방사능 폐기물 발열 및 팽창과 같은 내부적인 요인이나 지진 등과 같은 외부적인 요인으로 인해 그림 1.7과 같은 온도변화에 따른 크리프가 발생하고, 그림 1.8과 같은 OCR에 따른 크리프가 발생한다. 특히 OCR에 따른 크리프의 경우 음의 크리프가 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 폐기물을 처리하는데 안정성을 높이기 위해 정확한 크리프 거동을 예측할 필요가 있다.

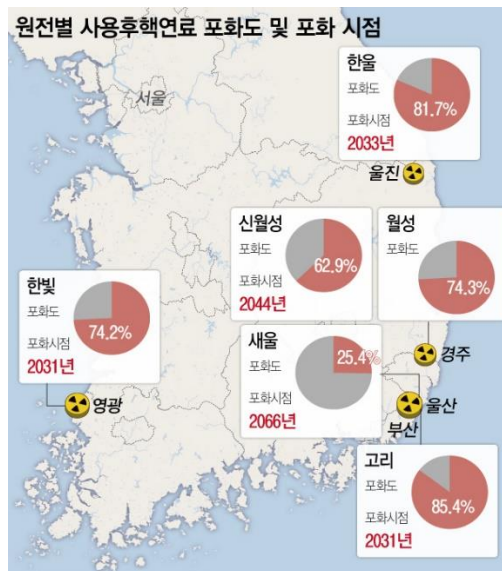


그림 1.6 원전별 사용 후 핵연료 포화도



그림 1.7 방사성 폐기물 영구처분 개념도

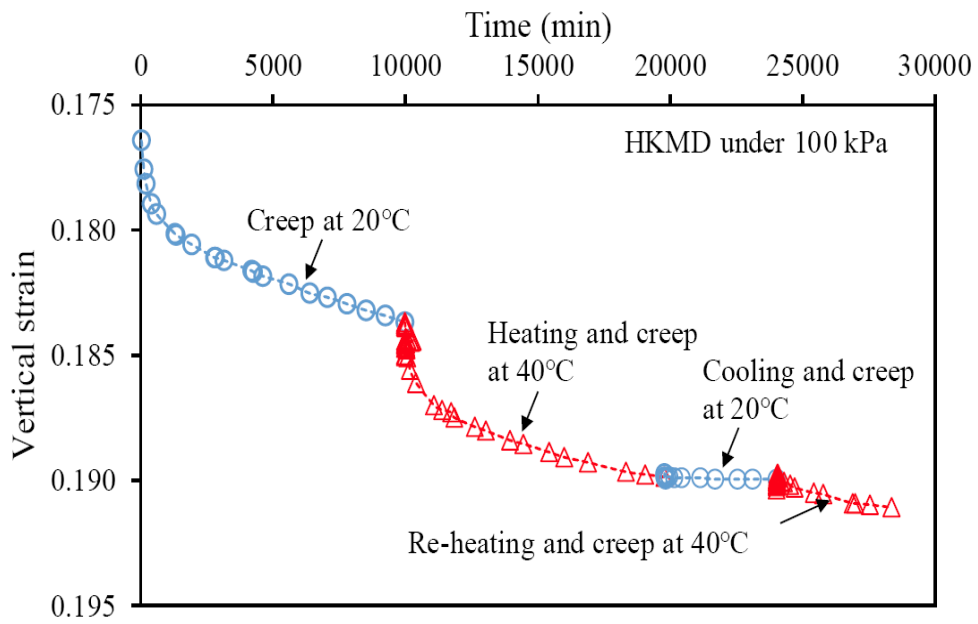


그림 1.8 온도 변화에 따른 크리프 특성

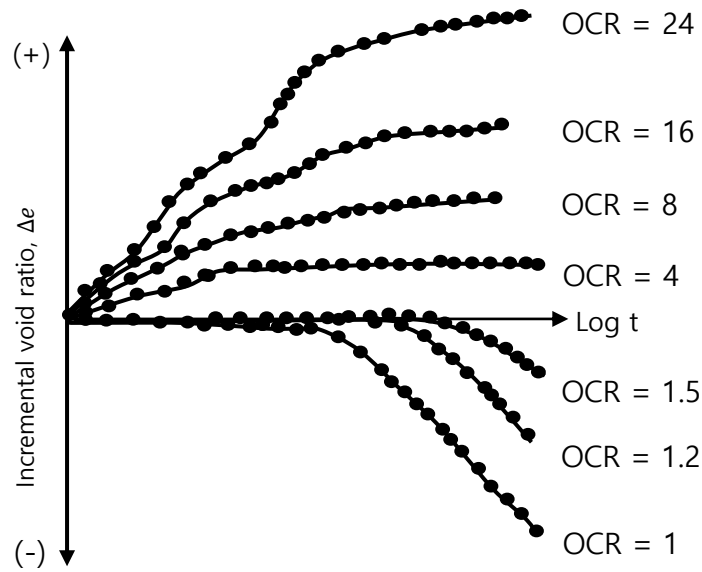


그림 1.9 OCR에 따른 크리프 특성

종합하자면, 연약지반에 구조물 설계 시 구조물의 안정성과 낮은 투수계수로 인해 간극수 배수 지연에 따른 장기 압밀 침하량이 중요하다. 또한 고 준위 방폐장의 영구적인 처리 안정성을 위해 정확한 크리프를 예측하는 것이 중요하다. 하지만 이에 관련한 점토에 대한 실험적, 수치해석적 연구가 미비하고 크리프에 대한 구분이 명확하지 않아 정확한 침하량을 예측하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 표준 압밀시험기(Oedometer tester)를 이용하여 점토의 일차원 크리프 시험을 수행하여 얻은 결과를 바탕으로 시간에 따른 유동학적 모델을 개발할 예정이다.



## 1.2 연구 동향

연약지반의 압밀이나 고 준위 방폐장 완충재의 크리프에 관한 문제는 오랫동안 연구 대상이었으며 현재까지도 계속해서 연구되고 있다. 1943년 Terzaghi의 압밀 이론이 발표된 이후 압밀실험기(Oedometer test)를 이용한 수많은 실험을 해왔다. 이 방법 장기간 시험과 각상재하중에 대한 간극수압과 응력 분포 불균형, 시료의 포화에 대한 문제점이 있다. 또한 상재 하중 증가에 따른 압밀 시험 방법은 실제 현장에 작용하는 거동을 정확하게 재현하기가 어렵다. 하지만 현재까지도 Terzaghi의 압밀 이론을 기반으로 연구가 진행중에 있다.

일정한 응력이나 하중이 작용하고 있는 임의의 지반 재료는 시간이 경과함에 따라 변형이 발생하는 크리프 거동을 나타낸다.[4] 연약지반 크리프는 오랜 연구 대상으로써 현재에도 지속적으로 연구되고 있다. 이에 지반 공학에서 크리프(Creep), 응력 완화(Stress relaxation), 변형률 의존성(Strain rate dependency)과 같은 지반 재료의 시간에 따른 거동을 예측하는 것은 큰 관심사이다. 시간에 따른 거동은 점토(Bjerrum, 1967; Leroueil et al., 1985; Leroueil, 2006; Le et al., 2015; Pineda et al., 2016; Kelly et al., 2017), 모래(Di Benedetto et al., 2002; Lade et al., 2009; Yamamuro et al., 2012), 암석(Hayano et al., 2001; Fabre and Pellet, 2006; Huang et al., 2015) 등 다양한 지반 재료에 따라 연구가 수행되어왔다.[5] Casagrande(1936)는 Oedometer 시험을 통해 배수, 비배수 실험 결과 흡에서 크리프 현상이 존재한다는 것을 증명하였으며, 반대수 그래프에 시간-변형률 의존성을 나타내어 크리프 지수를 결정짓는 방법을 제안한 최초의 연구자이다. Mesri(1973)은 크리프 계수값을 계산하였다. 더 나아가 Mesri와 Castro(1987)는  $C_a/C_c$ 을 통하여 2차 압축 거동을 증명하였으며,  $e - \log \sigma_v$  그래프에서 EOP(End of Primary)를 구분 지어 침하량을 산정하는 방법을 보여주었다. Havel(2004)는 Oedometer 시험기를 통해 교란되지 않는 시료와 재성형 시료에 대한 유기질 점토에 대한 연구 수행하였다. Augustesen(2004)은 1차 압밀기와 삼축 시험기를 이용하여 흡의 시간 의존 거동을 연구 수행하였다. 우리나라의 경우 Jung(1991)이 해성점토의 크리프 특성에 관한 연구를 수행하였으며, Kang(1993)은 이방 정규 압밀 점토에 대하여 비배수 크리프 파괴에 대한 연구를 수행하였다. 또한 Lee(1998)은 정규 압밀 점토에 대한 시간의존 변형거동을 연구하기 위하여 비배수 조건시 크리프 특성을 연구하였으며, Kim(2004)은 점토의 크리프 거동의 예측에 관하여 연구 수행

하였다.[4]

크리프 거동을 해석하는 방법으로는 Skempton(1964)은 흙의 전단강도와 관련된 지속하중의 영향으로 흙 입자사이에 존재하는 흡착수에 의한 구조적 점성의 작용을 해석하였다.[6] 실험적 연구와 병행하여, 경험적 모델(Bjerrum, 1967; Yin, 1999), 유변학적 모델(Murayama, 1961), 속도 의존적 점탄성-소성 구성 모델(Liingaard, 2004)을 포함하여 흙의 시간에 따른 거동을 보기위해 개발되었다.[6] 점탄성-소성은 점소성 이론(Perzyna, 1963,1966)과 비 정상흐름 이론(Naghdi, 1963)을 기초로 하여 개발되었다.[5] 이와 같이 연구자들 간 크리프를 바라보는 관점이 다르기 때문에 해석하는 방법들이 다르고 변형을 구간이나 크리프 계수 산정 방법 또한 다르게 나타난다.

### 1.3 연구 방법

본 연구는 연약지반 즉, 내륙의 하천부근의 점성토지반이나 한반도 해안 지역의 해상점토지반이 광범위하게 형성되어 있다. 해상점토 지반인 경우 점성토 지반보다 외부 응력을 덜 받은 상태에 있으며, 대부분은 OCR이 1이하의 정규압밀 또는 과소 압밀의 상태이다. 해상점토 지반 관련하여 현재 울산 동해연안에서 해저도시 건설 계획 중이다. 이에 점성토지반이 아닌 해상점토지반을 집중 고려하여 실험을 진행하였다.

연구 동향을 근거하여 기존에 제시된 시간 의존적 점성 현상(크리프, 응력 릴렉세이션, 변형률)을 예측하여 실제 설계에 반영할 수 있도록 점토의 크리프 관련 여러 자료를 수집하였다. 실내실험인 경우 해상점토로 시험할 때 적은 시료로 많은 결과를 분석해야 하는 제약이 있기 때문에 최대한 비슷한 거동을 나타내기 위해 울산시 문수산에서 채취한 화강 풍화토와 칼슘 벤토나이트를 혼합한 시료를 이용하여 장기간 압밀을 수행하였다. 실험장비로는 그림 1.11와 같은 압밀 시험기(Oedometer test)를 이용하였으며, 동일한 시료를 만들기위해 그림 1.12과 같은 시료성형기를 이용하여 시료를 재성형 하였다. 실험조건으로는 그림 1.13과 같이 세 가지 조건으로 실험 수행하였다. 첫번째는 학교에서 운용되는 실험장비의 개수 제한으로 인해 동일한 시료를 이용하여 실험하는지 확인하기 위해 가장 기본적인 표준 압밀 시험으로 각 하중을 하루마다 한 단계 증가시켜 측정하였다. 두번째는 하중 별 Creep 실험으로

Creep 실험 결과 나타내는 그래프가 수렴하는지 발산하는지 경향성을 확인하기 위해서 하중이 가장 작은 5kPa 부터 가장 큰 640kPa을 각 단계별 하중을 30일간 유지한 상태로 측정하였다. 세번째로는 하중 증감 실험으로 실험 도중 유효응력 변화에 따른 Creep 특성을 확인하기 위해서 하루마다 하중을 증가시켜 20kPa, 80kPa, 320kPa에 도달하였을 때 하중을 증가 또는 감소시켜 30일간 유지한 상태로 측정하였다. 실내실험으로부터 얻어진 크리프 결과를 통해 분석하고 결론을 내렸다.



그림 1.10 압밀 시험기



그림 1.11 압밀 시료 성형기

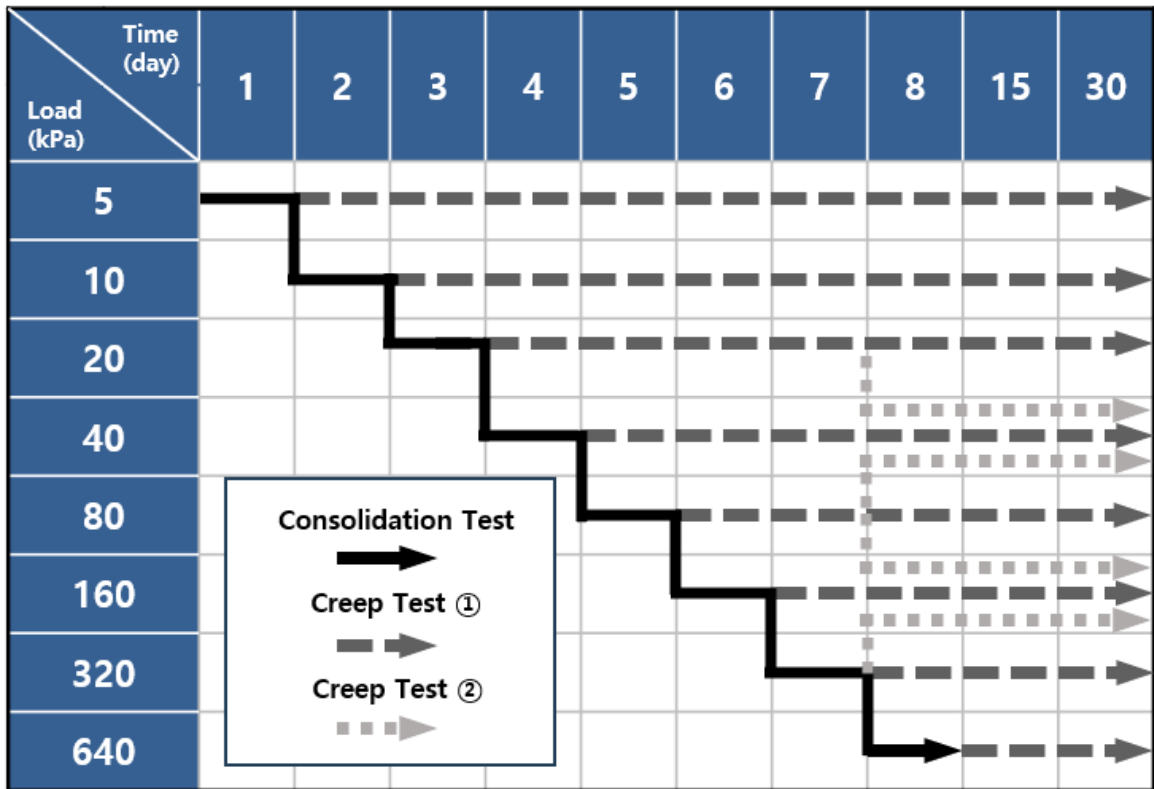





그림 1.12 조건별 압밀시험 모식도

표 1.1 압밀시험 조건표

조건	
<b>Consolidation Test</b> 	각 단계별 24시간 측정 후 하중을 증가시켜 침하량을 측정한다.
<b>Creep Test ①</b> 	각 단계별 30일 간 하중을 유지한 상태로 침하량을 측정한다.
<b>Creep Test ②</b> 	하중을 20kPa, 80kPa, 320kPa를 유지한 상태에서 동시에 하중을 증가 또는 감소시켜 침하량을 측정한다.

## 제 2 장 압밀 이론

일반적으로 모래, 점토와 같은 흙은 압축 특성을 가지고 완전포화나 부분포화 되어있어 지반에 하중을 가하게 되면 흙 입자사이 공극이 차지하고 있는 공기가 압축되거나 물이 빠져나가 체적이 감소하게 된다.

투수성이 큰 모래 지반인 경우, 점토지반에 비해 간극비가 작아 압축성이 낮으며 투수계수가 크다. 이에 물을 주입하면 순식간에 물이 빠져나가 압축이 빨리 발생한다. 하지만, 투수성이 작은 점토 지반인 경우, 간극비가 커 압축성이 높으며 투수계수가 매우 작아 물을 주입하면 모래지반에 비해 굉장히 오랜 기간에 걸쳐 압축이 발생한다. 이와 같이 오랜 기간에 걸쳐 흙 입자 내의 과잉 간극 수압이 빠져나가면서 흙이 천천히 압축되는 현상을 압밀(Consolidation)이라고 일컫는다. 이와 같이 압밀 하는 과정 동안에 미치는 영향에 따라 분류하고 이해할 필요가 있다.

### 2.1 Terzaghi 압밀 이론

압밀은 포화된 점토층이 상재하중을 받음으로써 장기간에 걸쳐 흙 입자 사이의 공극에서 물이 빠져나가는 동시에 침하가 발생하는 현상을 설명하기위 과잉 간극수압이라는 개념을 도입하였다.[7] 이는 압밀되는 과정에서 포화된 점토에 하중을 가하면 간극 수압이 발생하게 되고 압밀되는 동시에 간극 수압은 감소하고 끝날 때까지 점토의 흙 입자 자체가 받는 유효응력 증가한다. 이때 발생하는 흙 속의 간극수를 과잉 간극 수압이라고 한다. Terzaghi(1943)는 과잉 간극 수압이 압밀을 지배하는 주 매개변수로 생각하고 이에 관한 방정식을 다음 식 2.1 과 같이 확산방정식으로 유도하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.1)$$

여기에서,  $u$  : 과잉간극수압

$t$  : 시간

$C_v$  : 압밀계수

$z$  : 배수거리

### 2.1.1 Terzaghi 기본가정

Terzaghi는 압밀 이론을 유도하기 위해서는 다음과 같은 가정을 설정하였다.

- a) 흙은 균질(Homogeneous)하다.
- b) 흙 입자 사이의 공극은 완전히 포화(Saturated)되어 있다.
- c) 흙 입자와 물의 압축성은 무시한다.
- d) 흙 속의 물의 이동은 Darcy's Law를 따른다.

$$\mathbf{v} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{i} = -\mathbf{k} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.2)$$

여기에서,  $\mathbf{v} = \frac{Q}{A}$  : 수류의 걸보기 속도

$\mathbf{i}$  : 수두구배

$h$  : 전수두

- e) 압력의 크기와 관계없이 투수 계수는 일정하다.
- f) 흙의 압축은 1차원 연직 방향으로만 발생하며, 횡방향의 변위는 구속되어 있다.
- g) 물의 흐름은 1차원 연직 방향으로만 발생한다.
- h) 간극비는 유효응력 증가에 반비례하여 감소한다.
- i) 미소 흙요소의 거동은 흙이 받는 압력의 크기에 관계없이 일정하다.
- j) 2차 압밀(Secondary consolidation)은 무시한다.

### 2.1.2 Terzaghi 압밀의 기본 미분 방정식

압밀 점토층을 그림 2.1과 같이 임의의 미소요소로 나타내고 물이 연직 방향으로만 흘러간다면, Darcy's Law에 의해 물이 흡 속을 흐르는 속도는  $v = k \cdot i$  이고 동수경사  $i = -\frac{\partial h}{\partial z}$ 이다.

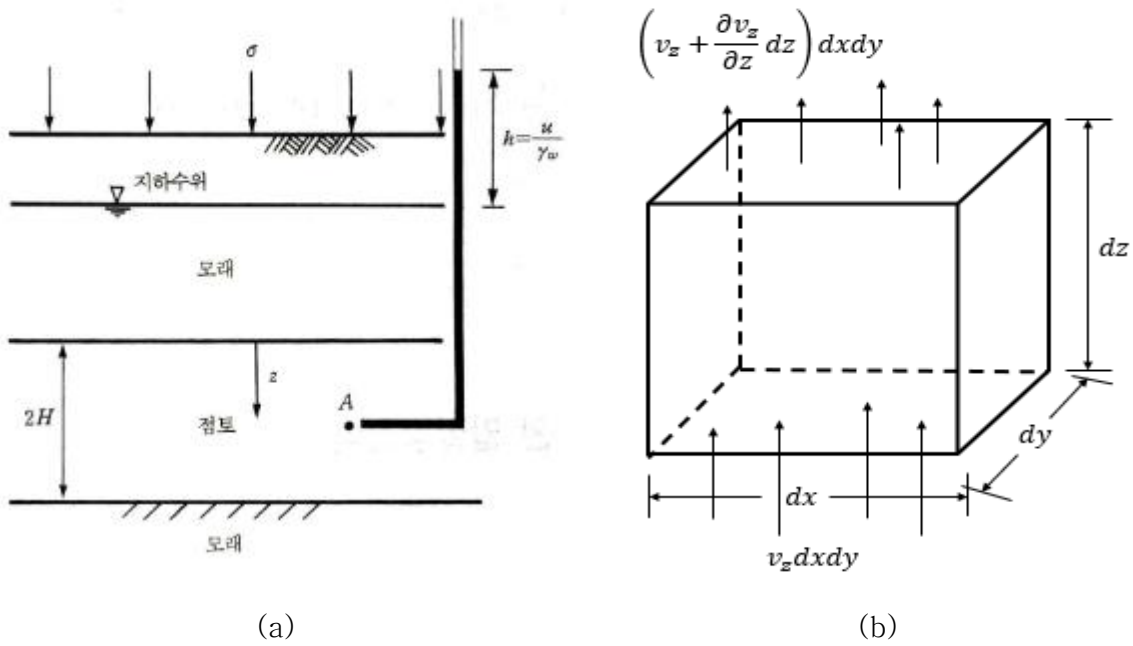


그림 2.1 Terzaghi 압밀 : (a) 점토층의 투수, (b) 점토 압밀층

$z$  방향으로의 부피 변화율을 식 2.3과 식 2.4 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz\right) dx dy - v_z dx dy = \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} dz dx dy = \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2.4)$$

여기에서,  $V = dx dy dz$  : 흡 요소의 부피

$v_z$  : 물의  $z$  방향으로의 속도

식 2.4인 Darcy's Law에 따라 식 2.5를 대입하여 식 2.6와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{v}_z = \mathbf{k} \cdot \mathbf{i} = k \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2.5)$$

여기에서,  $\mathbf{u}$  : 점토층에 작용한 응력증가로 인한 과잉 간극 수압

$$\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{dx dy dz} \frac{\partial V}{\partial t} \left( \because \frac{\partial v_z}{\partial z} dx dy dz = \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial z} dx dy dz = \frac{\partial V}{\partial t} \right) \quad (2.6)$$

이 요소에 유입, 유출하는 유량의 차이 즉, 압밀 도중 부피변화율과 간극의 부피 변화율을 같다는 것을 이용하여 식 2.8과 식 2.9로 나타낼 수 있다.

압밀 도중 부피변화율 = 간극의 부피변화율

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial V_v}{\partial t} \quad (2.7)$$

여기에서,  $V_v$  : 간극의 부피

$V_v = e \cdot V_s$  : 흙 입자의 부피

$$\frac{\partial V}{\partial t} = V_s \frac{\partial e}{\partial t} = \frac{V}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} = \frac{dx dy dz}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.8)$$

$$\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.9)$$

여기에서,  $(dx dy dz) \frac{e}{1+e}$ 는 흙 입자의 체적으로 일정하다.

간극비 변화가 유효응력의 증가에 선형적으로 증가한다면 압축계수  $\mathbf{a}_v$  (Coefficient of Compressibility)를 다음과 같이 식 2.10로 정의한다.

$$\partial e = -\mathbf{a}_v \partial \sigma' \quad (2.10)$$

여기에서,  $\mathbf{a}_v = -\frac{\partial e}{\partial \sigma'}$  : 압축계수 (-는 압력의 증가에 대한 간극비의 감소를 의미)

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2.11)$$

$\sigma$ 는 일정하므로  $\frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0$ ,  $m_v = \frac{\mathbf{a}_v}{1+e}$ 로 정의하면 식 2.12는 다음과 같다.

$$k \frac{\partial^2 u_e}{\gamma_w \partial z^2} = m_v \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad (2.12)$$



여기에서,  $m_v$  : 체적변화계수

따라서 식 2.12를 정리하면 다음 식 2.13 같다.

$$\frac{k}{\gamma_w m_v} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad (2.13)$$

$$C_v = \frac{k}{\gamma_w m_v} \quad (2.14)$$

식 2.12를 정리하면 최종적으로 1차 압밀의 기본방정식은 다음 식 2.15와 같이 유도된다.

$$C_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad (2.15)$$

여기에서  $C_v$ 는 압밀계수 (Coefficient of consolidation)으로 포화된 점토의 압밀되는 속도를 나타내는 계수로 정의된다.

투수계수에 대한 압밀이론 기본 방정식은 다음 식 2.16과 같다.

$$k = C_v \cdot \gamma_w \cdot m_v \quad (2.16)$$

위에 유도한 1차 압밀 기본방정식에서 시간계수  $T_v$ 를 도입하면 압밀 계수는 다음 압밀 미분방정식의 해인 식 2.17와 같이 압밀 소요 시간을 구할 수 있다.

$$C_v = \frac{T_v H^2}{t} \quad (2.17)$$

여기에서,  $t$  : 임의의 압밀도에 달하는 압밀 소요시간[sec]

$T_v$  : 연직방향에 대한 시간계수

$C_v$  : 연직방향의 압밀계수 [ $cm^2/sec$ ]

H : 압밀층의 두께 [cm]

사용되는 시간계수  $T_v$ 는 초기 과잉 간극 수압  $u$  이 깊이에 따라 일정하다는 조건하에 산출되었으며 초기조건에 따라 달라진다.

그리고 침하량을 다음 식 2.17~식 2.19으로 산출 가능해진다.

$$S_c = \frac{C_c}{1+e_0} H \cdot \log \frac{p_0+\Delta p}{p_0} \quad (2.17)$$

$$S_c = m_v \cdot \Delta p \cdot H \quad (2.18)$$

$$S_c = \frac{\Delta e}{1+e_0} H = \frac{e_0-e_1}{1+e_1} H \quad (2.19)$$

여기에서,  $S_c$  : 압밀침하량 [cm]

$e_0$  : 초기 간극비

$e_1$  : 재하후의 간극비

H : 침하가 발생하는 층의 두께 [cm]

$m_v$  : 체적압축계수 [ $cm^2/kgf$ ]

$C_c$  : 압축지수

$\Delta p$  : 재하에 의한 연직응력의 증가분 [ $kgf/cm^2$ ]

$p_0$  : 초기연직응력 [ $kgf/cm^2$ ]

또한, 임의의 시간에서의 압밀 침하량 산출식은 점토일 경우 식 2.20으로 계산할 수 있다.

$$S_t = S_c \cdot U \quad (2.20)$$

여기에서,  $S_t$  : 임의의 시간 t에서의 압밀 침하량 [cm]

$S_c$  : 압밀 침하량 [cm]

U : 임의의 시간에서의 압밀도 [%]

### 2.1.3 압밀 계수

압밀 계수는 압밀도나 압밀 소요 시간을 구하기 위함으로 시간-침하량 곡선으로부터 산정 가능하다. 압밀 계수를 산정하는 방법은 크게 두 가지로  $\log t, \sqrt{t}$ 이다.

- Casagrande & Fadum **log t** 방법

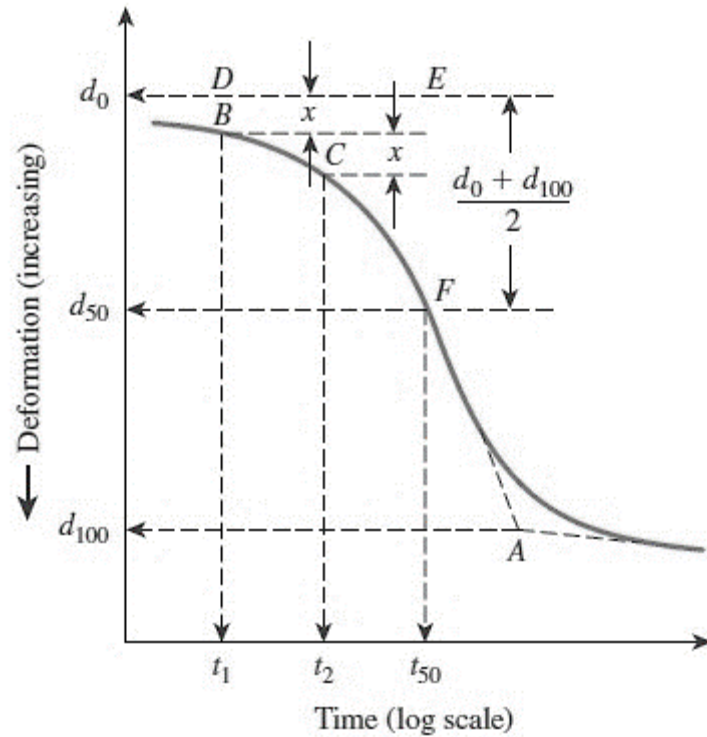


그림 2.2 log t에 따른 침하량 그래프

- a)  $t_2 = 4t_1$ 이 되도록 곡선상에 A, B 점 결정
- b) B, C의 변형량의 차= $x$ , B점 위 연직방향으로  $x$ 만큼의 점 D
- c) D점의 수평선에서 세로축(변형량)과 만나는 점  $d_0$ : 압축량이 0인 지점
- d) 변형량- $\log t$  곡선에서 두 직선이 만나는 교점 A: 1차 압밀이 100% 완료되었을 때의 압축량  $d_{100}$
- e) 변형량  $(d_0 + d_{100})/2 = d_{50}$ 에 해당하는 점 E: 압밀이 50% 완료된 시간  $t_{50}$
- f) 평균 압밀도  $U_{av} = 50\%$ 에 대한 시간계수: 0.197
- g) 압밀 계수:  $T_{50}(U_{av} = 50\%) = 0.197 = \frac{C_v t_{50}}{H^2}$

$$C_v = \frac{0.197H^2}{t_{50}}$$

-Taylor  $\sqrt{t}$  방법

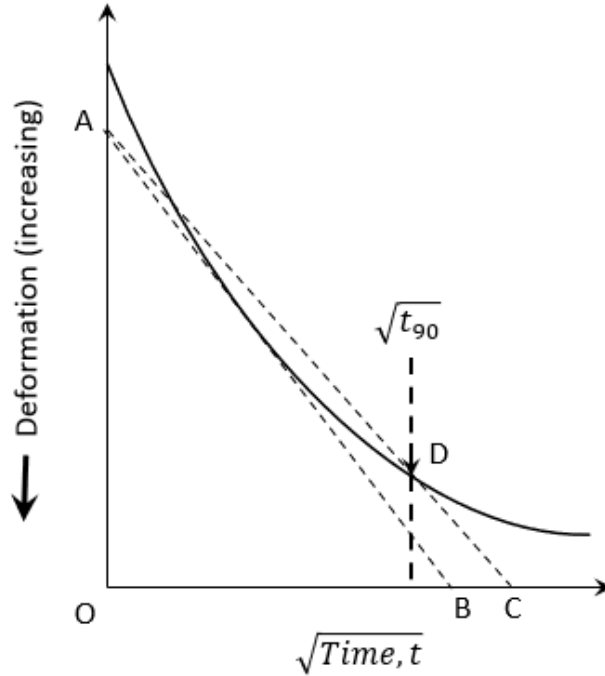


그림 2.3  $\sqrt{t}$ 에 따른 침하량 그래프

- a) 초기 직선부 AB선 결정
- b)  $OC=1.15OB$ 가 되는 AC선 결정
- c) 압밀 곡선과 AC선의 교점 D: 압밀이 90% 완료된 시간의 제곱근  $\sqrt{t_{90}}$
- d) 평균 압밀도  $U_{av} = 90\%$ 에 대한 시간계수 : 0.848

$$T_{90}(U_{ac} = 90\%) = 0.848$$

e) 압밀계수 :  $C_v = \frac{0.848H^2}{t_{90}}$

## 2.2 압밀 분류

압밀의 경우 그림 2.5과 같이 세 가지로 분류가 된다. 일차원 압밀인 경우 그림 2.4과 같이 1차 압밀이 끝난 시점 End of Primary consolidation(EOP)을 기준으로 두 가지로 분류된다.

EOP 이전의 곡선을 과잉 간극 수압이 소산되면서 유효응력에 따른 변형률이 변화하여 초기에 변형률이 점차 감소하는 구간으로 1차 압밀 또는 천이 크리프라고 부른다. EOP 이후의 곡선을 유효응력은 일정하되 시간에 따른 간극비가 변화하여 변형률이 일정한 구간으로 2차 압밀(크리프) 또는 고정 크리프라고 부른다. 3차원 압밀인 경우 그림 2.4에서 보시다시피 한 가지 더 분류된다. 2차 크리프와 마찬가지로 유효응력은 일정하되 변형률이 점차 증가하여 파괴되는 구간으로 3차 압밀(크리프) 또는 가속화 크리프라고 부른다.

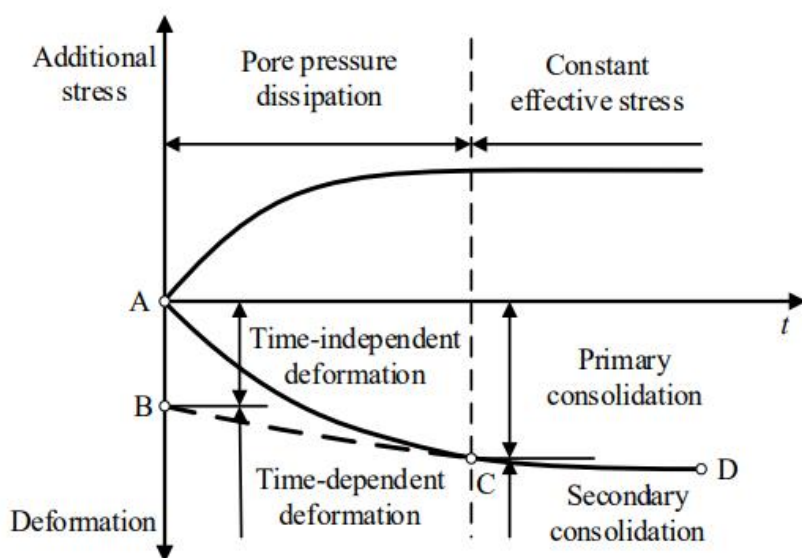


그림 2.4 압밀 과정 개략도

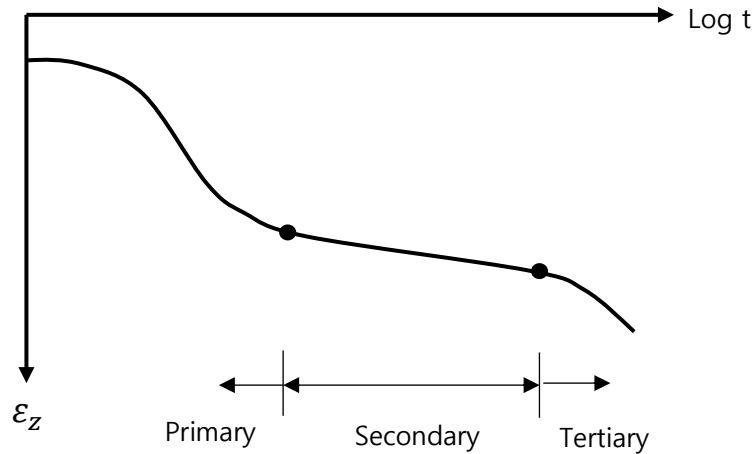


그림 2.5 시간-변형률에 따른 압밀 분류

### 2.2.1 일차원 압밀 이론

해안 근처의 해양 퇴적물과 큰 하천의 삼각주는 층적 특성으로 인해 층으로 나뉘어져 있다. 일반적으로, 지질학적 역사에 따라 두께가 좌우되고 모래와 점토층으로 이루어져 있다. 포화된 모래나 점토는 각각 다른 현상으로 지배된다. 포화된 모래지반의 침하량은 배수가 잘되어 일반적으로 즉시 침하이다. 포화된 점토지반의 침하량은 다음과 같은 과정으로 된 시간 의존적 거동을 나타낸다.[8]

1차 압밀 - 과잉 간극 수압이 소산되면서 물의 흐름으로 인해 공극의 체적이 감소  
즉, 유효응력에 따른 변형률 변화

2차 압축 - 크리프 발생으로 인한 공극의 체적이 감소  
즉, 시간에 따른 간극비의 변화

따라서 일차원 압밀이론에서 모래와 점토의 서로 다른 현상으로 인해 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$S_T(t) = S_I + S_C(t) + S_S(t) \quad (2.1)$$

여기에서,  $S_I$  : 즉시 침하(모래)

$S_C(t)$  : 압밀침하(점토)

$S_S(t)$  : 크리프 침하(점토)

### 2.2.2 즉시 침하

포화된 점토 지반의 일차원 압밀은 작은 공극과 비압축성의 간극 수압으로 인해 즉시 공극이 빠져나올 수 없다. 그러나 실제로 즉시 침하는 측면 변형을 무시할 수 없기 때문에 3차원적인 문제로 인해 발생된다. 이러한 측면 변형으로 인해 비압축성 조건에 따라 전체 부피의 변화 없이 수직 침하가 발생한다. 그러나, 압축성으로 인해 모래층에서는 충분한 공극을 가지고 있기 때문에 일차원에서도 즉시 침하가 발생한다. 다음과 같이 계산한다.

$$S_I = H \frac{\Delta\sigma}{M_E^{sand}} = H \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E(1-\nu)} \Delta\sigma \quad (2.2)$$

여기서,  $H$  : 두께

$M_e^{sand}$  : 모래의 압축 탄성계수

$E$  : 모래의 영률

$\nu$  : 모래의 포아송 비(= 0.2~0.3); 점토의 포아송 비(=0.5)

즉시 침하는 공사 진행 중에 이루어진다. 따라서 매립 설계 단계에서는 성토량을 정확히 추정하기 위해 중요하지만 구조물의 장기적인 거동에는 영향을 미치지 않기 때문에 적절히 분류하여야 한다.

### 2.2.3 압밀 침하

압밀이 끝나면 전체 응력 증가량과 유효 응력 증가량은 같을 것이다. 일반적인 점토 압밀의 최종 침하는 다음과 같다.

$$S_{inf} = \frac{H}{M_E^{clay}} \Delta\sigma \quad or \quad S_{inf} = \frac{H}{1+e_0} C_c \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma}{\sigma'_0} \quad (2.3)$$

여기서,  $\sigma'_0$  : 유효 응력

$e_0$  : 초기 간극비

$C_c$  : 압축지수

$M_e^{clay}$  : 점토의 압축 탄성계수

$C_c$ 와  $M_e^{clay}$ 의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{1}{M_e^{clay}} = \frac{C_c}{1+e_0} \frac{\log(\sigma'_0 + \Delta\sigma') - \log(\sigma'_0)}{\Delta\sigma'} \quad (2.4)$$

시간에 따른 압밀 침하량을 그림 2.6과 같이 개략적으로 나타냈다. 전체 응력 증가량(시간일정, 깊이에 따라 균일하게 분포) 먼저 간극수압이 응력을 받아낸다. 이는 점토층과 배수 경계 사이에 압력이 가해져 간극 수압이 발생된다. 그 과정에서 초기 과잉 간극 수압에 의해 더 큰 하중이 분산되고 유효응력 증가한다.

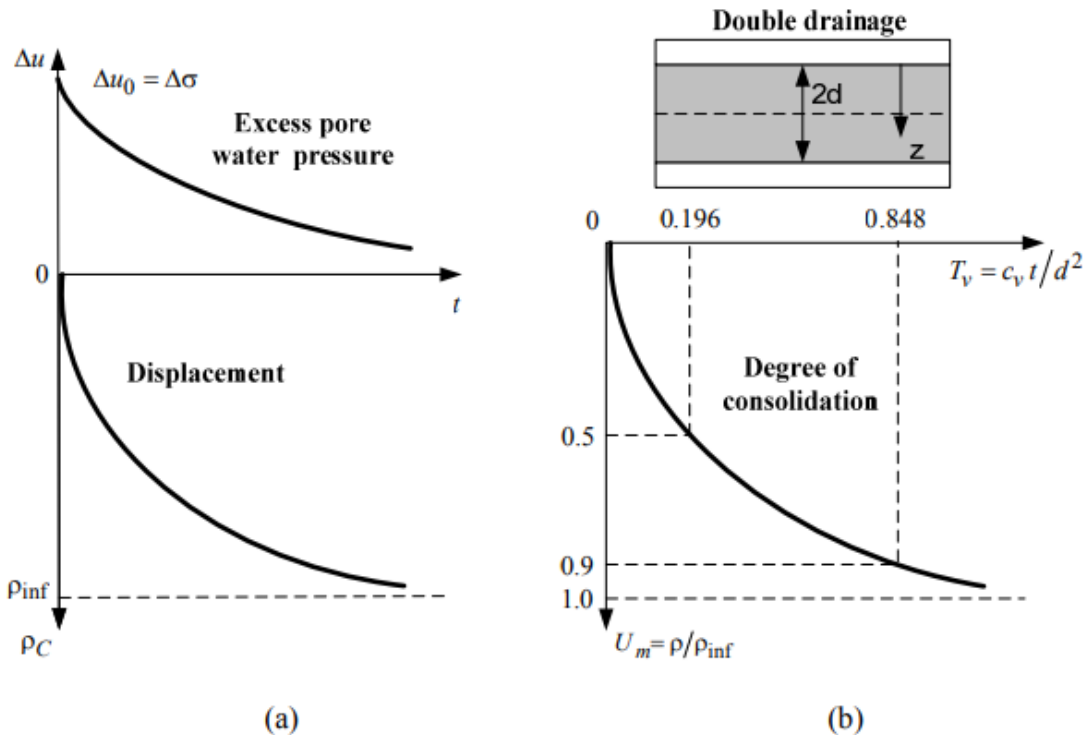


그림 2.6 일차원 압밀: (a) 과정, (b) 분석



그림 2.6(b)와 같이 Terzaghi(1943)을 기반으로 무차원 식을 다음과 같이 제안한다.

$$U_m(T_v) = \frac{S_c}{S_{inf}} = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} \exp(-M^2 T_v) \quad (2.5)$$

여기에서,  $U_m = \frac{S_c}{S_{inf}}$  : 평균 압밀도

$$T_v = \frac{c_v \cdot t}{d^2} : \text{시간(무차원)}$$

d : 배수 경로(양면배수)

$$c_v = \frac{k \cdot M_E^{clay}}{r_w} : \text{압밀계수}$$

k : 투수계수

$r_w$  : 물의 단위중량

$$M = \frac{\pi}{2}(2m + 1), m = 0, 1, 2, \dots, \infty.$$

식 2.6과 2.7은 식 2.5에서 압밀도에 따라 구분된다.

$$T_v \approx \frac{\pi}{4} U_m^2, \text{ for } U_m \leq 0.526 \quad (2.6)$$

$$T_v \approx -0.933 \cdot \log(1 - U_m) - 0.085, \text{ for } U_m > 0.526 \quad (2.7)$$

이러한 관계식을 이용하여 분석적으로 시간에 대한 압밀 침하 변화를 식 2.8, 2.9와 같이 구할 수 있다.

$$S_c(t) = S_{inf} \cdot U_m = S_{inf} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot T_v}{\pi}} = S_{inf} \cdot \frac{2}{d} \sqrt{\frac{c_v t}{\pi}}, \text{ for } U_m \leq 0.526; \quad (2.8)$$

$$S_c(t) = S_{inf} \cdot U_m = S_{inf} \cdot \left(1 - 10^{-\frac{c_v t + 0.085}{0.933}}\right), \text{ for } U_m > 0.526 \quad (2.9)$$

전체 압밀 침하는 각 점토층 별 침하 합으로 식 2.10과 같이 계산된다.

$$S_c(t) = \sum_{i=1}^n S_c^i(t) \quad (2.10)$$

## 2.2.4 크리프 침하

크리프 침하는 1차 압밀 침하와 함께 시작되지만 1차 압밀이 끝난 직후(EOP) 다음 식 2.11과 같이 예측하여 계산할 수 있다(Mesri, 2005).

$$S_s(t) = \frac{C_a}{1+e_0} H \log\left(\frac{t}{t_p}\right) \quad (2.11)$$

여기에서,  $C_a$  : 2차 압축계수

$t_p$  : 이론적으로 1차 압밀 끝나고 2차 압축이 시작되는 시점

## 2.2.5 전체 침하

식 2.8~식 2.11을 이용하여 식 2.12~식 2.14와 같이 시간에 따른 전체 침하 변화를 계산할 수 있다.

$$S_T(t) = S_{I+} S_{inf} \frac{2}{d} \sqrt{\frac{C_v t}{\pi}}, \text{ for } 0 \leq t \leq 0.217 \frac{d^2}{C_v}; \quad (2.12)$$

$$S_T(t) = S_{I+} S_{inf} \left(1 - 10^{-\frac{1.072 C_v t}{d^2} - 0.091}\right), \text{ for } 0.217 \frac{d^2}{C_v} < t \leq t_p; \quad (2.13)$$

$$S_T(t) = S_{I+} S_{inf} \left(1 - 10^{-\frac{1.072 C_v t}{d^2} - 0.091}\right) + \frac{C_a}{1+e_0} H \log\left(\frac{t}{t_p}\right), \text{ for } t > t_p \quad (2.14)$$

여기에서,  $S_{I+}$  : 초기 침하

$t_p$  : 2차 압축 시작 시간

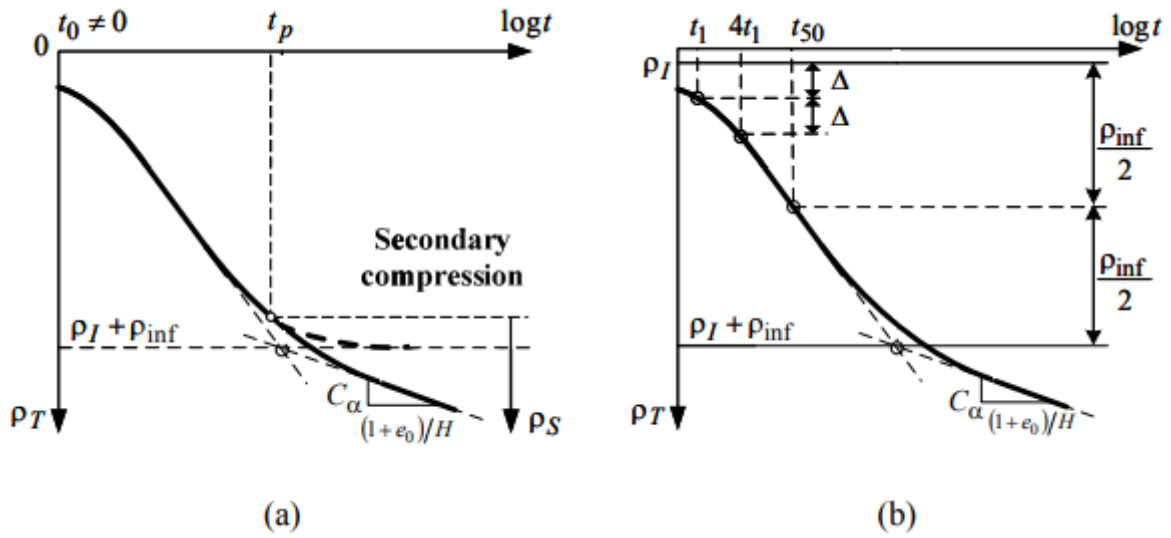


그림 2.7 시간에 따른  $\log t$  그래프: (a) 2차 압축, (b) 매개변수 역계산을 위한 그래프

### 2.3 압밀 가설

앞서 말한 2차 압밀(크리프)는 발생하는 시간에 따라 두 가지로 분류가 된다. 그림 2.8와 같이 가설 A는 1차 압밀이 끝난 이후 2차 압밀(크리프)가 발생하는 경우이고, 가설 B는 전체 압밀 과정 도중 크리프가 발생하는 경우로 1차 압밀과 2차 압밀이 동시에 발생하는 경우이다. 현재로서는 어느 가설이 맞는지 알 수는 없으나 A, B 가설 중간이 실제 흙의 거동을 보인다.[9] 대부분 Terzaghi의 압밀 이론으로 인해 A 가설을 채택하여 수많은 연구를 해왔지만 정확한 침하량을 예측할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 B 가설을 채택하여 크리프를 구분하였다.

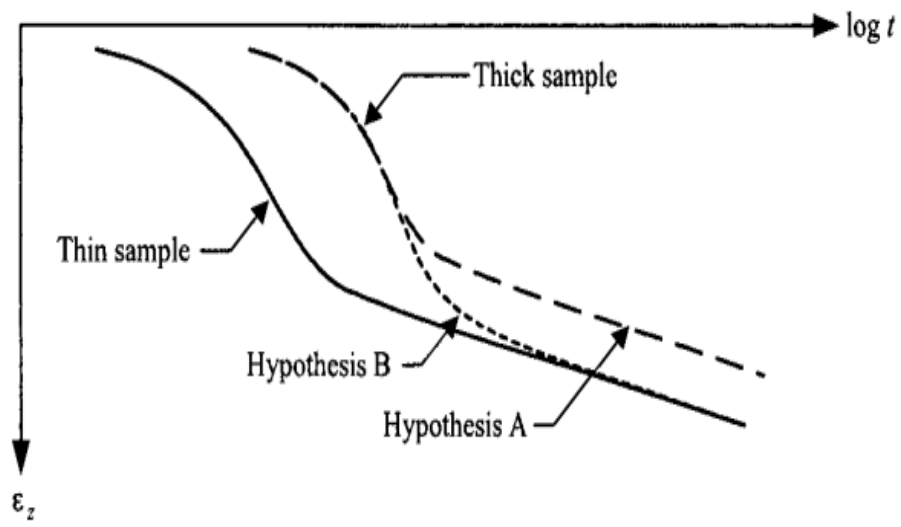


그림 2.8 크리프 가설 분류

## 제 3 장 시험 결과

실험 장비는 압밀 시험기(Oedometer)를 사용하였으며, 풍화토 : 벤토나이트 = 1 : 1 비율로 혼합한 시료를 이용하여 온도는 22℃로 유지한 상태에서 실험 수행하였다. 시료의 기본 물성치는 표 4.1과 같다.

표 3.1 시료의 기본 물성표

Specific Gravity [-]	Water Content(%)		Liquid Limit(%)
	Before	After	
2.46	32.92	55.91	41.06

### 3.1 시험 과정

어떻게 시험을 했는지 시험하는 순서를 간단하게 정리해보려 한다.

1. 풍화토와 벤토나이트 시료를 뭉치지 않게 골고루 섞는다.
2. 그림 3.1과 같이 압밀성형기에 시료를 넣고 포화시킨다.

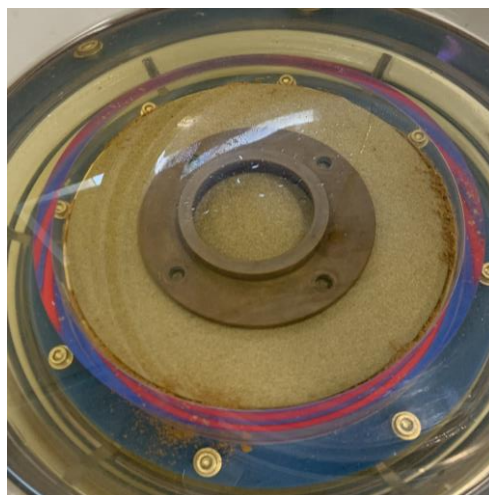


그림 3.1 압밀 성형기를 이용하여 시료 포화시키는 모습

3. 그림 3.2와 같이 포화된 시료에 압밀링으로 찍고 주위 점토를 제거한다.



그림 3.2 포화된 시료를 압밀링에 넣는 모습

4. 몰드에 넣고 조립한다.
5. 조립한 몰드를 압밀 시험기에 두고 물을 채워준다.
6. 침하 측정 변위계를 고정시키고 수평으로 맞춰준다.
7. 그림 3.3과 같이 하중을 단계적으로 가한다.



그림 3.3 압밀 시험기에 하중을 가하는 모습

### 3.2 표준 압밀 시험 결과

첫 번째 조건인 표준 압밀 시험으로 Sample 1, 2, 3 모두 동일한 조건에서 실시하였다. 실험 결과 표 3.2와 같은 결과 값을 나타낸다. 그림 3.4은 시간에 따른 침하량을 그래프로 나타내었으며 비슷한 경향성을 보여준다. 또한 초기 간극비는 대략 1.45로 나타내었으며, 대체적으로 NC 상태의 경향을 보였다. 그림 3.~4.는 압밀 실험 결과를 이용하여 압밀 하중에 대한 다양한 결과를 그래프로 나타내었다. 기존 연구와 비슷한 경향성을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

표 3.2 표준 압밀 실험 결과 표

하중 P	압축 변형률 $\epsilon$	체적 압축 계수 $m_v$	간극비 e	압축계수 $a_v$	압축지수 $C_c$	압밀계수 $C_v \log t$	압밀계수 $C_v \sqrt{t}$	평균 $C_v$	투수계수 k
[kgf/cm <sup>2</sup> ]	[%]	[cm <sup>2</sup> /kgf]	[-]	[cm <sup>2</sup> /kgf]	[-]	[cm <sup>2</sup> /sec]	[cm <sup>2</sup> /sec]	[cm <sup>2</sup> /sec]	[cm/sec]
0	0	-	1.50	-	-	-	-	-	-
0.05	0.0435	0.0087	1.39	2.08	0.26978	0.0315	0.0113	2.14E-02	1.86E-07
0.1	0.0351	0.007	1.31	1.62	0.44368	0.0257	0.00723	1.65E-02	1.15E-07
0.2	0.0613	0.0061	1.18	1.34	0.50594	0.0158	0.0102	1.3E-02	7.92E-08
0.4	0.0751	0.0038	1.03	0.76	0.47938	0.0233	0.00742	1.53E-02	5.83E-08
0.8	0.0767	0.0019	0.88	0.36	0.46444	0.0317	0.0112	2.15E-02	4.08E-08
1.6	0.0802	0.001	0.74	0.17	0.44742	0.0546	0.0133	3.39E-02	3.39E-08
3.2	0.0838	0.0005	0.61	0.08	0.45738	0.0521	0.00779	3.00E-02	1.50E-08
6.4	0.0936	0.0003	0.47	0.04	-	0.0576	0.00697	3.23E-02	9.68E-09

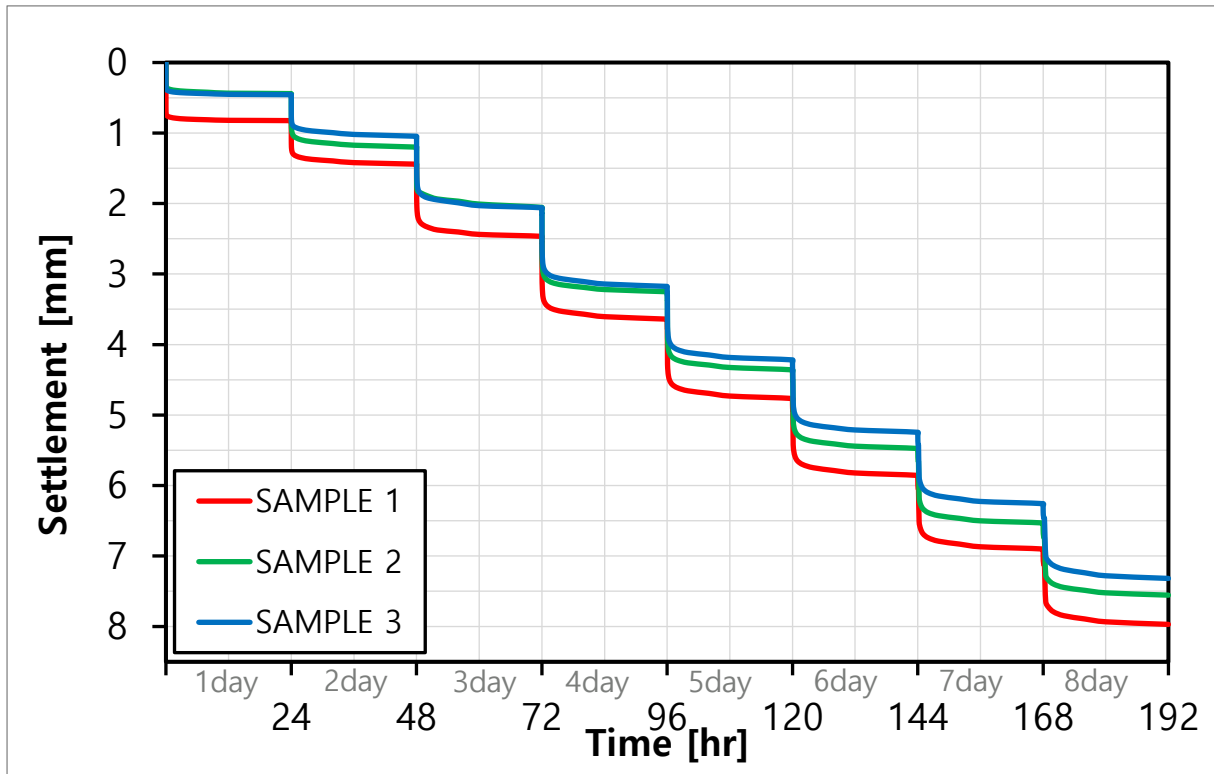


그림 3.4 시간 경과에 따른 침하량

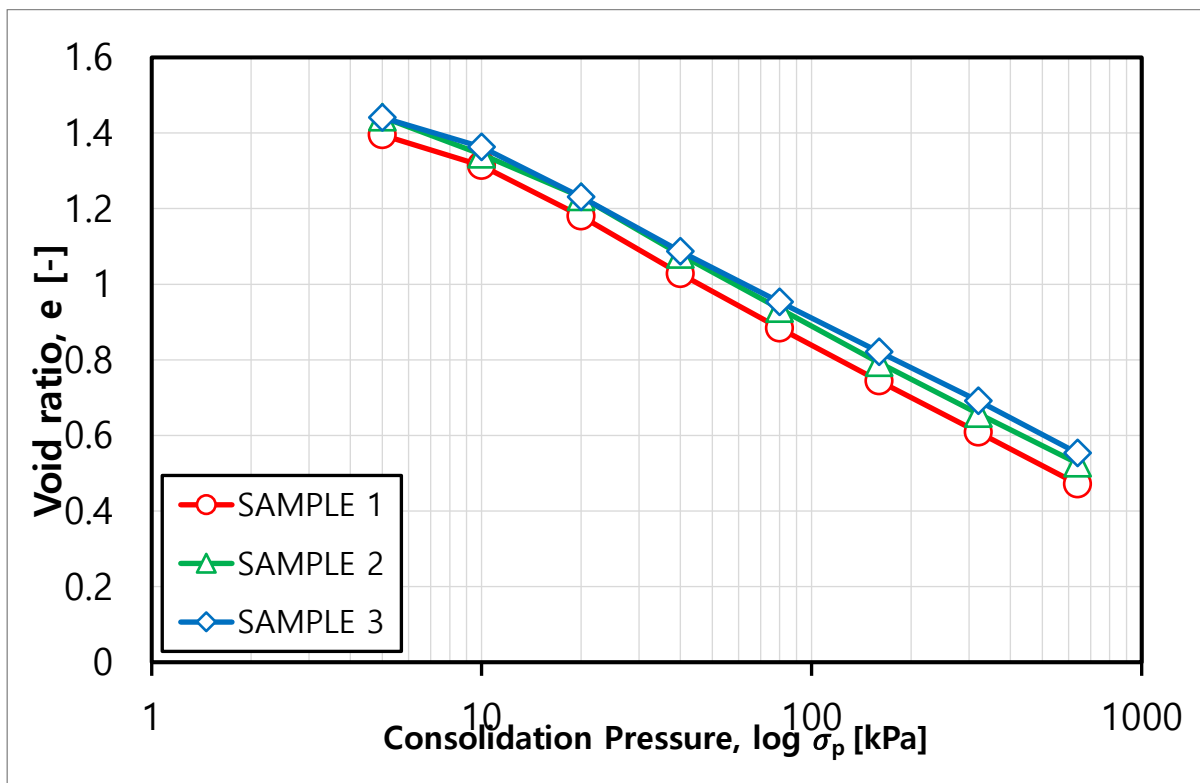


그림 3.5 압밀 하중에 대한 간극비



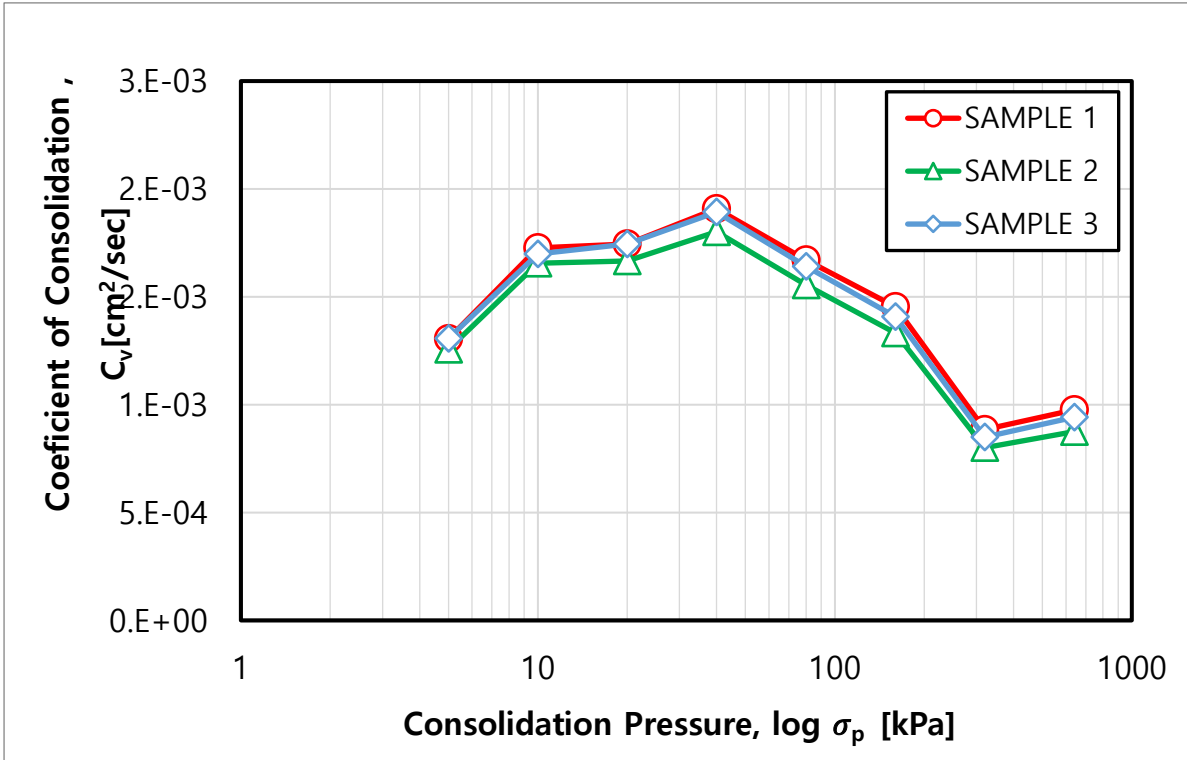


그림 3.6 압밀 하중에 대한 압밀계수

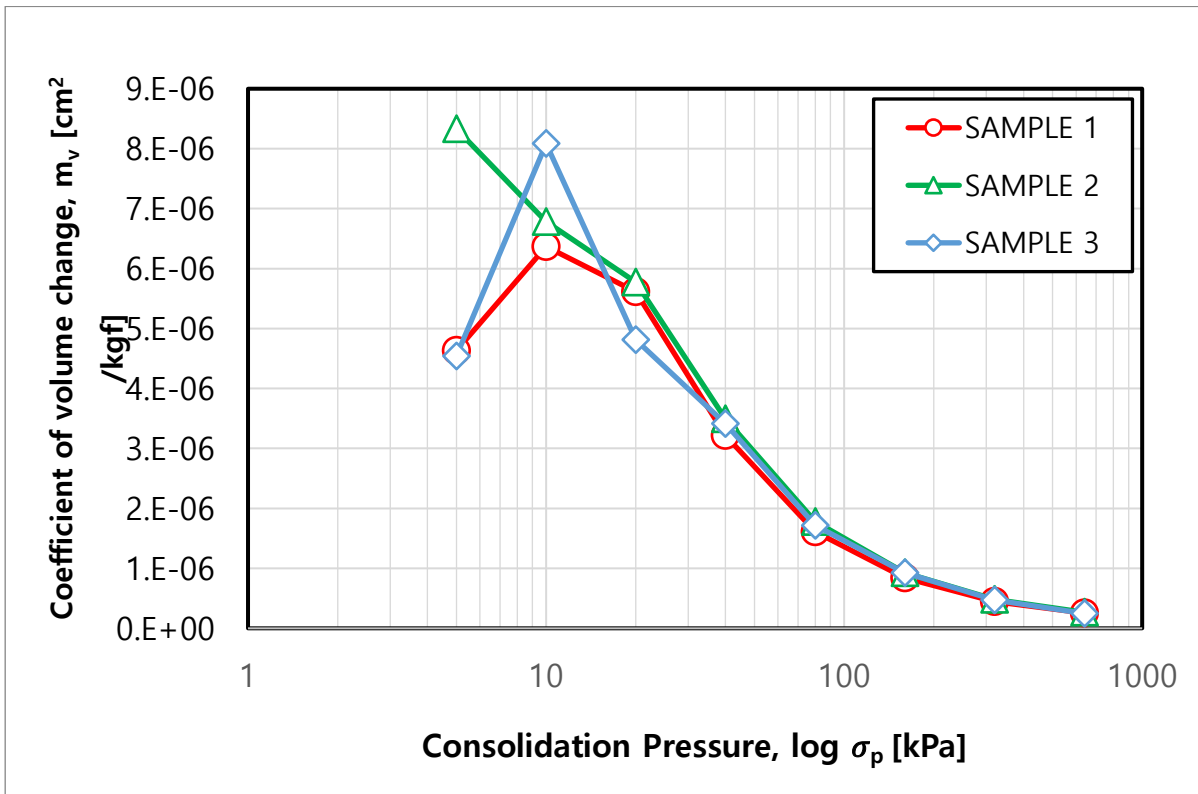


그림 3.7 압밀 하중에 대한 체적 변화계수

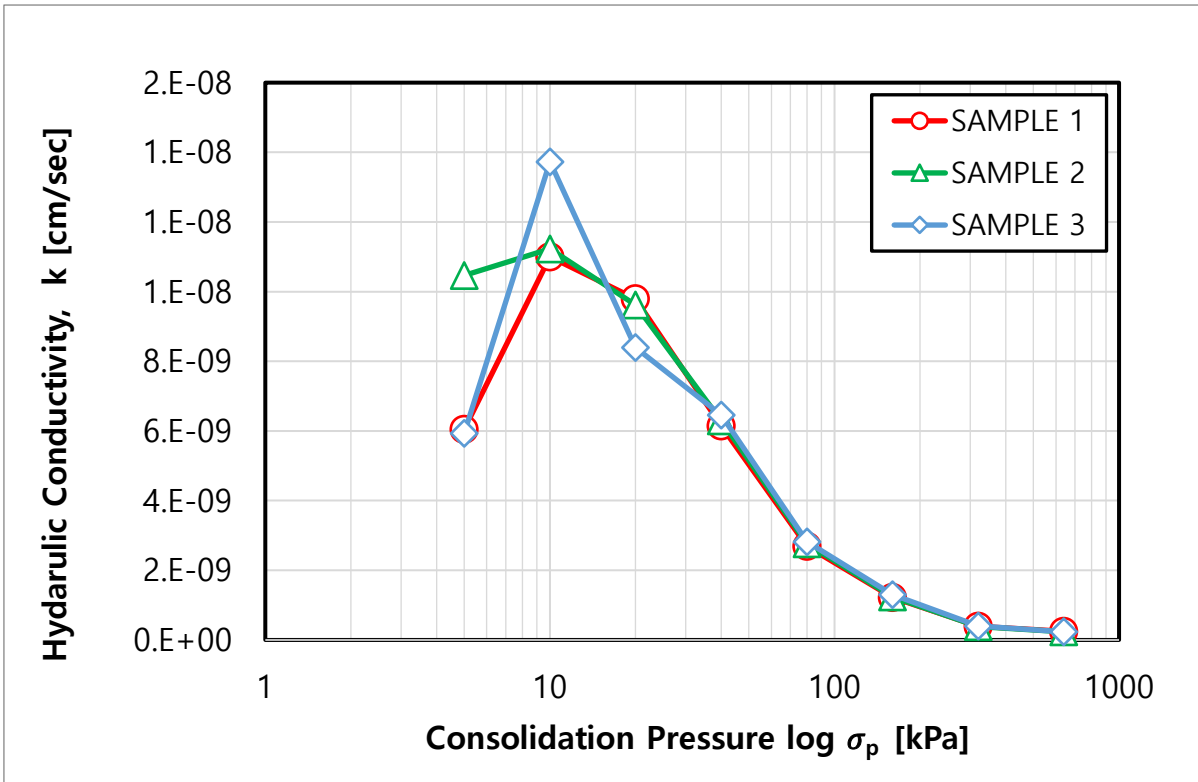


그림 3.8 압밀 하중에 대한 투수계수

### 3.2 하중 별 크리프 시험 결과

두번째 조건인 상재하중 별 Creep 시험으로 그림 4.6은 상재하중 별 시간에 따른 변형률 그래프를 나타내었다. 이후 결과값을 이용하여 2차 압축률을 그림 4.7과 같이 그래프로 나타내었다. 이는 크리프가 상수가 아닌 응력 조건에 따라 크리프 값이 달라지는 것을 확인할 수 있습니다. 상재하중에 따른 크리프 계수가 달라지는 것을 효과적으로 보여주기 위해 크리프 변형률 그래프를 나타냈었고 경향성이 보이는 것을 확인할 수 있었다.

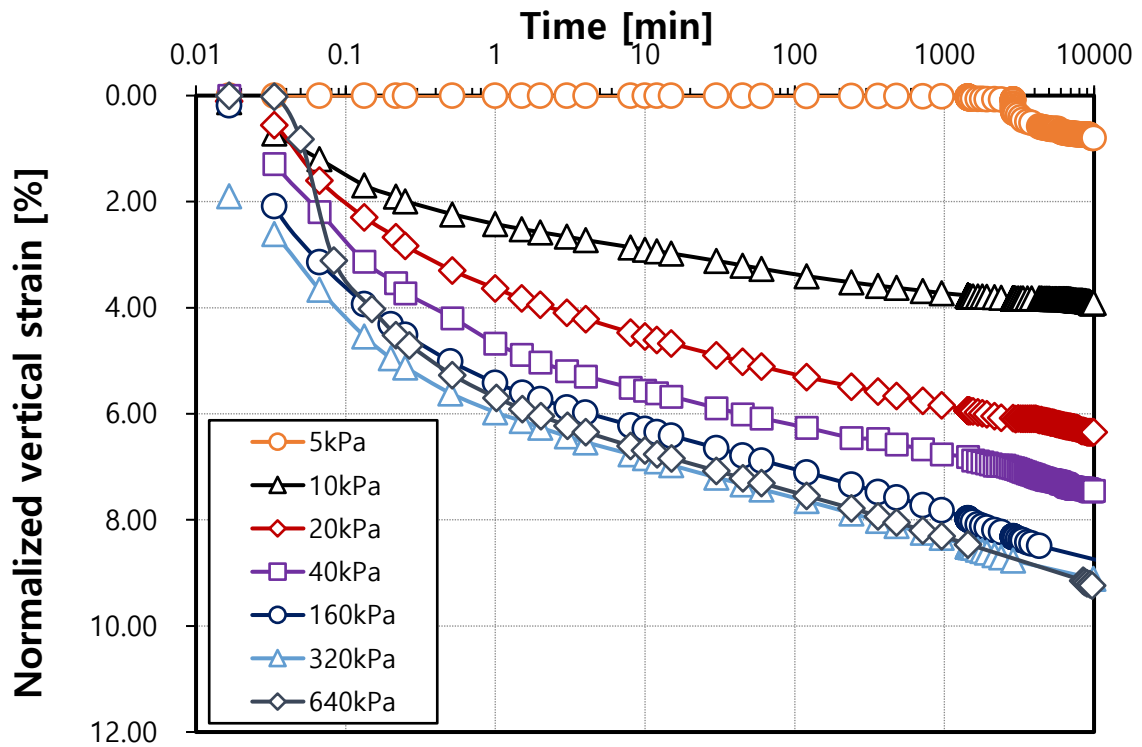


그림 3.9 상재하중 별 시간에 따른 변형률

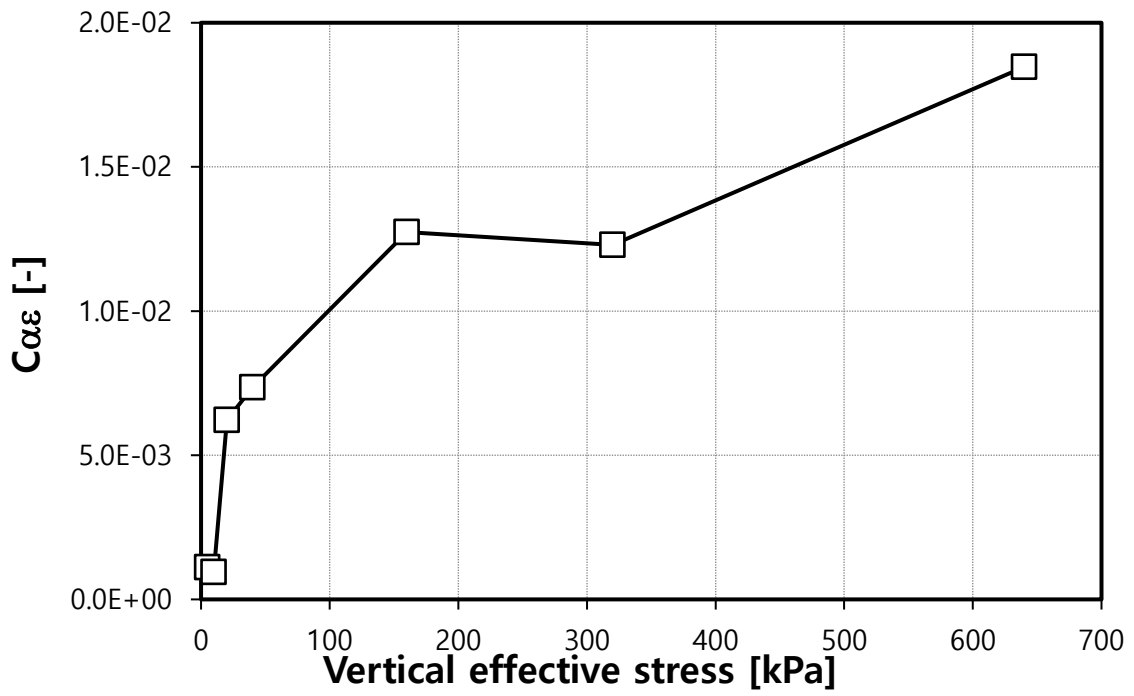


그림 3.10 상재하중 별 2차 압축률

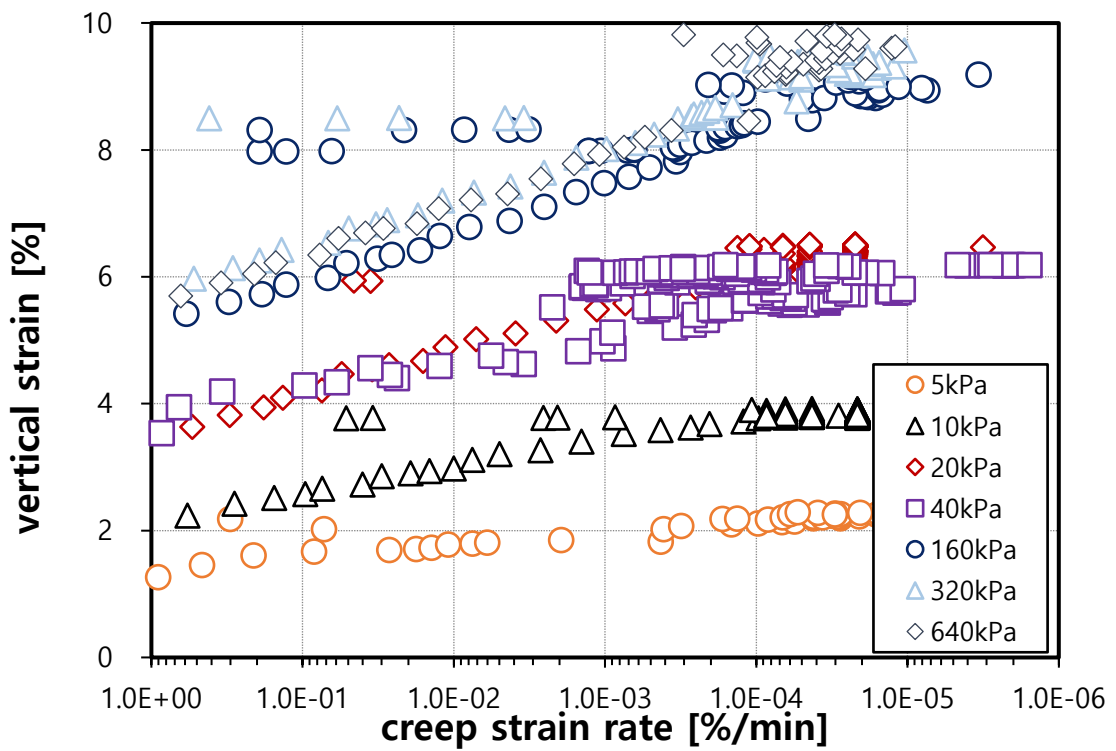


그림 3.11 상재하중 별 크리프 변형률

### 3.3 하중 증감 시험 결과

세번째 조건인 하중 증감 시험으로 기존 두 번째 조건에서 실험한 40kPa과 160kPa 결과를 넣어 그림 4.9와 비교해보았다. 낮은 상재하중 40kPa에 비해 높은 상재하중 160kPa일 때 더 빠르게 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 최종 상재응력이 같은 상황에서 OCR이 2인 경우 간극비 변화량이 작게 나타난다. 즉, 크리프가 작게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 40kPa보다 160kPa에서 OCR의 영향이 크게 나오는 것을 확인할 수 있었다.

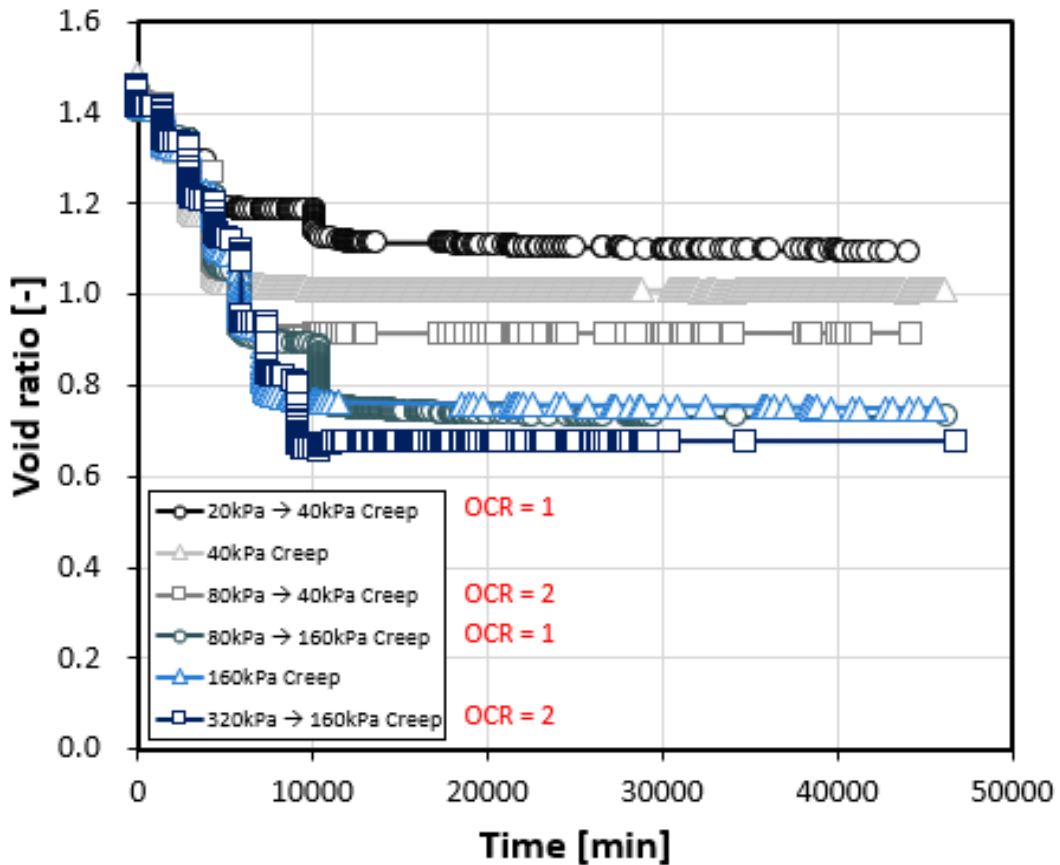


그림 3.12 시간에 따른 간극비 곡선

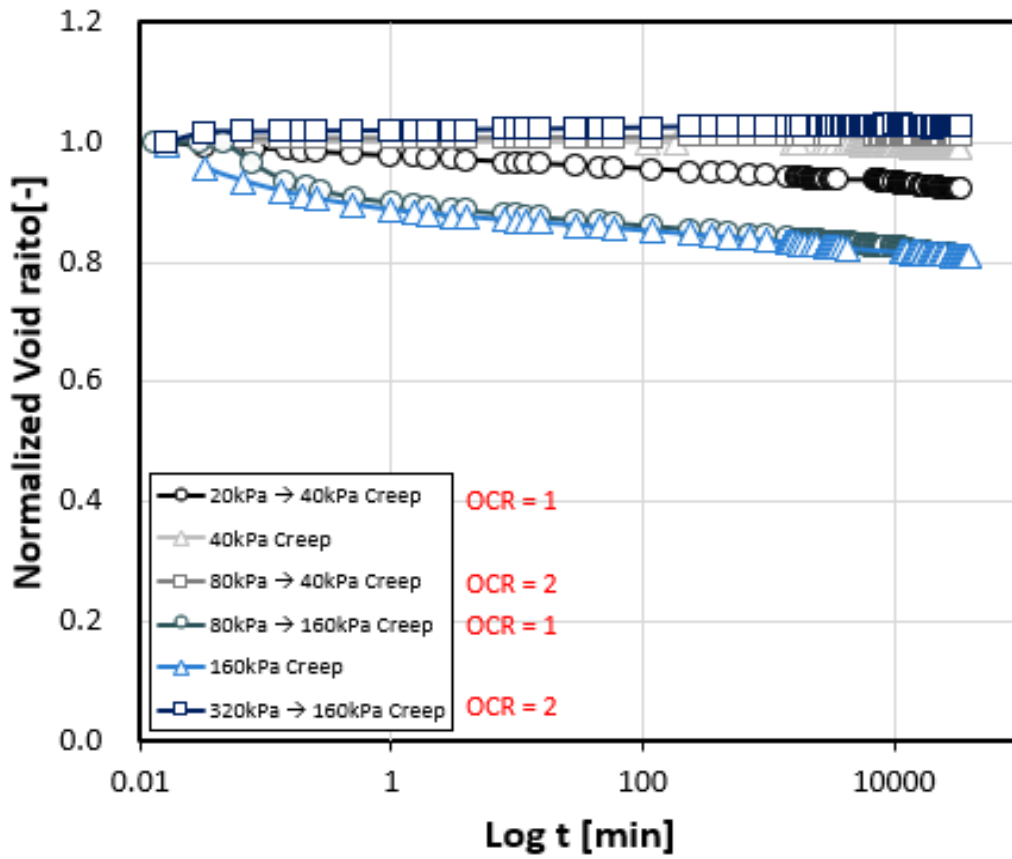


그림 3.13 시간에 따른 정규화된 간극비 곡선

## 제 4 장 결론

본 연구에서는 균질한 재성형 점토를 이용한 실내시험을 통해 점토의 압축특성 및 장기압밀 특성이 미치는 영향을 이해하고 재하하중 단계별 재하방법과 하중 재하 기간의 증가에 따른 압축곡선의 특성을 크리프 거동을 파악하기 위하여 기존에 연구된 실내시험 결과와 직접 수행한 실내 실험 결과를 비교 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 동일한 시료에서의 표준 압밀 실험결과 NC 상태이며, 침하량이 유사한 경향을 나타내고 재하하중이 증가할수록 체적변화와 투수계수가 감소하는 것으로 나타났다.
2. 재하하중이 증가할수록 크리프 변형률은 증가하며, 크리프가 상수가 아닌 응력 조건에 따라 2차 압축지수가 달라지는 것을 알 수 있었다. 또한 상재하중에 대한 유효응력이 작을수록 2차 압축지수가 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.
3. 크리프 실험 수행한 결과, 시간이 경과함에 따라 변형률 속도는 감소하였지만 변형률은 계속해서 증가하는 경향을 나타낸다.
4. 선행 압밀 하중이 현재 받고 있는 상재하중보다 큰 경우, 즉  $OCR > 1$  경우 크리프 영향이 미비하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 상재하중이 증가할수록 OCR의 영향이 크게 나타났다.
5. 하중 가감시험에서 동일한 하중을 유지한 상태에서 하중재하기간이 증가할수록 침하량이 수렴하는 경향이 나타났다. 또한 재하 하중이 증가할수록 경향성이 잘 나타났다.

## 참 고 문 헌

- [1] 지반침하 안전점검 및 지하안전평가서 검토 현황(www.kalis.or.kr)
- [2] 봉태호, 손영환, 김성필, 허준, & 장병욱. (2009). 풍화토의 크리프 특성 및 Singh-Mitchell 크리프 방정식 적용성 검토. *JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS*, 69-76.
- [3] 봉태호, 손영환, 노수각, & 박재성. (2012). 실트질 모래의 비배수 크리프특성 및 크리프 모델 비교연구. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 54(1), 19-26.
- [4] Mac, T. N. (2020). *A Bounding Surface Viscoplasticity Model for Time dependent Behaviour of Saturated and Unsaturated Soils including Tertiary Creep* (Doctoral dissertation, UNSW Sydney).
- [5] Xu, B. H., Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., & Nguyen, T. T. (2022). A large-strain radial consolidation model incorporating soil destructuration and isotache concept. *Computers and Geotechnics*, 147, 104761.
- [6] Degago, S. A. (2011). On creep during primary consolidation of clays.
- [7] Boháč, J., Mašín, D., Malát, R., Novák, V., & Rott, J. (2013). Methods of determination of  $K_0$  in overconsolidated clay. *Charles University in Prague, Faculty of Science, Albertov, 6*, 12843.
- [8] Taha, M. R., Ahmed, J., & Asmirza, S. (2000). One-dimensional consolidation of Kelang clay. *Pertanika Journal of Science & Technology*, 8(1), 19-29.
- [9] Prashant, A., Sachan, A., & Desai, C. S. (Eds.). (2020). *Advances in computer methods and geomechanics: IACMAG Symposium 2019 Volume 1* (Vol. 55). Springer Nature.
- [10] Augustesen, A., Liingaard, M., & Lade, P. V. (2004). Evaluation of time-dependent behavior of soils. *International Journal of Geomechanics*, 4(3), 137-156.



- [11] Feng, T. W. (1991). *Compressibility and permeability of natural soft clays and surcharging to reduce settlements*. University of Illinois at Urbana–Champaign.
- [12] Raymond, G. P., & Wahls, H. E. (1976). Estimating 1–dimensional consolidation, including secondary compression, of clay loaded from overconsolidated to normally consolidated state. *Transportation Research Board Special Report*, (163).
- [13] Gu, C., Wang, J., Cai, Y., Sun, L., Wang, P., & Dong, Q. (2016). Deformation characteristics of overconsolidated clay sheared under constant and variable confining pressure. *Soils and Foundations*, 56(3), 427–439.
- [14] Jiang, M. J., Liu, J. D., & Yin, Z. Y. (2014). Consolidation and creep behaviors of two typical marine clays in China. *China Ocean Engineering*, 28(5), 629–644.
- [15] Yin, J. H., Chen, Z. J., & Feng, W. Q. (2022). A general simple method for calculating consolidation settlements of layered clayey soils with vertical drains under staged loadings. *Acta Geotechnica*, 17(8), 3647–3674.
- [16] Kaddouri, Z., Cuisinier, O., & Masroui, F. (2019). Influence of effective stress and temperature on the creep behavior of a saturated compacted clayey soil. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 17, 106–114.
- [17] Kaddouri, Z., Cuisinier, O., & Masroui, F. (2019). Influence of effective stress and temperature on the creep behavior of a saturated compacted clayey soil. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 17, 106–114.
- [18] Liingaard, M., Augustesen, A., & Lade, P. V. (2004). Characterization of models for time–dependent behavior of soils. *International Journal of Geomechanics*, 4(3), 157–177.
- [19] Mac, T. N. (2020). *A Bounding Surface Viscoplasticity Model for Time dependent Behaviour of Saturated and Unsaturated Soils including Tertiary Creep* (Doctoral dissertation, UNSW Sydney).
- [20] Mesri, G., & Vardhanabhuti, B. (2005). Secondary compression. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 131(3), 398–401.

- [21] Mesri, G. (1973). Coefficient of secondary compression. *Journal of the soil mechanics and foundations division*, 99(1), 123–137.
- [22] Mesri, G. (2003). Primary compression and secondary compression. In *Soil behavior and soft ground construction* (pp. 122–166).
- [23] Oliveira, F. S., Martins, I. S., & Guimarães, L. J. (2023). A model for one-dimensional consolidation of clayey soils with non-linear viscosity. *Computers and Geotechnics*, 159, 105426.
- [24] Puzrin, A. M., Alonso, E. E., Pinyol, N., Puzrin, A. M., Alonso, E. E., & Pinyol, N. M. (2010). Unexpected excessive settlements: Kansai international airport, Japan. *Geomechanics of failures*, 23–43.
- [25] Luo, Q., & Chen, X. (2014). Experimental research on creep characteristics of Nansha soft soil. *The Scientific World Journal*, 2014.
- [26] Wang, W., Luo, Q., Yuan, B., & Chen, X. (2020). An investigation of time-dependent deformation characteristics of soft dredger fill. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 1–11.
- [27] Feng, W. Q., Yin, J. H., Tao, X. M., Tong, F., & Chen, W. B. (2017). Time and strain-rate effects on viscous stress-strain behavior of plasticine material. *International Journal of Geomechanics*, 17(5), 04016115.
- [28] Yao, Y. P., & Fang, Y. F. (2020). Negative creep of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 57(1), 1–16.

# Creep Behavior of Clay in 1D Condition

Kyeong bo, Noh

Department of Civil and  
Environmental Engineering

Graduate School

University of Ulsan

Recently, with the construction of infrastructure on the seabed, such as underwater cities and new airports, going further inland, the problem of subsidence of soft ground of clay that has not been subjected to much stress in the past is becoming important. In addition, research on the creep behavior of clay inside the cushioning material used to increase the stability of high-level radioactive waste disposal in Korea is becoming necessary. However, current research at home and abroad is insufficient in terms of experimental and numerical analysis. Therefore, in this study, we analyze creep behavior according to changes in effective stress and OCR through consolidation test results, develop a better creep model, and propose a creep prediction method. Various data such as model, consolidation, creep, etc. were collected in relation to seaweed clay and buffer clay. In addition, a mixed sample of bentonite and weathered soil was used to show similar behavior to seaweed clay, and a consolidation tester was used to test basic physical properties and predict creep due to long-term consolidation. 1. Regular consolidation test 2. According to effective stress changes To check creep characteristics, creep was measured for

each overburden load. 3. To check creep characteristics according to OCR, the load was increased or decreased and creep was measured with the final load being the same. Accordingly, we analyzed whether creep diverges or converges, consolidation characteristics, and strength characteristics. As a result of the creep experiment, it was confirmed that the creep coefficient increases as the effective stress increases. In addition, it was confirmed that the influence of OCR increases as the effective stress increases. Accordingly, it was confirmed that the creep coefficient is not constant but varies depending on stress conditions, and it is believed that a better creep model can be developed.