creative commons
COMMONS DEED

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

dCollection

[UCI]I804:21031-200000294709

공 학 석 사 학 위 논 문

# 개별진공압밀공법에 의한 연약점성토 지반의 압밀거동 분석을 위한 수치해석기법의 적용에 관한 연구

2020년 2월

부경대학교 대학원

토 목 공 학 과

이 정 빈

공 학 석 사 학 위 논 문

# 개별진공압밀공법에 의한 연약점성토 지반의 압밀거동 분석을 위한 수치해석기법의 적용에 관한 연구

지도교수 정두회

이 논문을 공학석사학위논문으로 제출함

2020년 2월

부경대학교 대학원

토 목 공 학 과

이 정 빈

# 이정빈의 공학석사 학위논문을 인준함.

2020년 2월 21일




주　　심　공학박사　정 진 호　(인)

위　　원　공학박사　김 수 한　(인)

위　　원　공학박사　정 두 회　(인)

# 목 차

표 목차 ····· iii
그림 목차 ····· iv
Abstract ····· vii

**제1장 서론 ····· 1**
1.1 연구배경 ····· 1
1.2 연구동향 및 목적 ····· 2

**제2장 이론적 고찰 ····· 5**
2.1 1차원 압밀이론 ····· 5
2.1.1 압밀침하속도 ····· 5
2.1.2 압밀침하량 ····· 7
2.2 압밀촉진공법 ····· 10
2.2.1 Preloading 공법 ····· 10
2.2.2 연직배수공법 ····· 12
2.2.3 진공압밀공법 ····· 16
2.2.4 개별진공압밀공법 ····· 19
2.3 2차원 평면변형률 해석 ····· 21
2.3.1 Hird's method ····· 21
2.3.2 Indraratna's method ····· 23

제3장 수치해석 ····· 26
3.1 Plaxis 2D ····· 26
3.1.1 재료모델(Model) 및 요소(Element) ····· 26
3.2 Unit-cell 해석 ····· 28
3.2.1 모델링 ····· 28
3.2.2 Unit-cell 해석결과 ····· 31
3.3 사례연구 ····· 37
3.3.1 과업개요 ····· 37
3.3.2 과업현황 ····· 38
3.3.3 계측결과 ····· 42
3.4 Multi-drain 해석 ····· 49
3.4.1 해석조건 ····· 49
3.4.2 Multi-drain 해석결과 ····· 52

제4장 결론 ····· 60

참고문헌 ····· 62

# 표 목차

표 2.1 교란영역의 크기 및 투수계수 ····· 15
표 3.1 Unit-cell 해석에 적용된 Drain 특성 ····· 29
표 3.2 Unit-cell 해석에 적용된 토질정수 ····· 29
표 3.3 과잉간극수압 분포(x = 0.01 m) ····· 33
표 3.4 실트질 점토의 토질특성 ····· 39
표 3.5 연직배수재의 특성 및 교란영역 고려를 위한 특성치 ····· 41
표 3.6 Multi-drain 해석에 적용된 토질정수 ····· 51
표 3.7 각 수치해석 결과의 RMSE 비교 ····· 59

# 그림 목차

그림 2.1 응력증분에 따른 간극수의 흐름(Das, 2014)····· 6
그림 2.2 연직변형률과 유효응력의 관계 ····· 7
그림 2.3 1차원 압밀침하 ····· 8
그림 2.4 간극비-유효응력 곡선(Das, 2014) ····· 9
그림 2.5 Preloading의 원리(Das, 2014) ····· 11
그림 2.6 sand drain 공법(Das, 2016) ····· 13
그림 2.7 연직배수재의 형상(Das, 2016) ····· 14
그림 2.8 진공압밀 시스템(Masse et al., 2001)····· 17
그림 2.9 진공압밀에 따른 응력변화····· 17
그림 2.10 진공압밀에 의해 흙 요소에 작용하는 응력 ····· 18
그림 2.11 진공압밀에 따른 응력경로····· 19
그림 2.12 개별진공압밀시스템(동아지질, 2019) ····· 20
그림 2.13 Air-water separation system(동아지질, 2019)····· 20
그림 2.14 2차원 평면변형률 조건의 Unit cell(Hird, 1992) ····· 23
그림 2.15 2차원 평면변형률 조건의 Unit cell(Indraratna, 1997)····· 25
그림 3.1 해석에 사용되는 재료모델(Plaxis 2D Material Manual, 2019) ·27
그림 3.2 15절점 삼각형 요소(Plaxis 2D Reference Manual, 2019) ····· 28
그림 3.3 Unit-cell 해석에 사용된 기하조건····· 29
그림 3.4 포화점토지반의 단위중량 ····· 30
그림 3.5 Hydraulic model ····· 30

그림 3.6 Pore pressure calculation type ····· 31
그림 3.7 Deformation control parameters ····· 31
그림 3.8 흐름계산에 따른 지하수위 감소 ····· 32
그림 3.9 배수재와 원지반간의 수두차이 ····· 33
그림 3.10 과잉간극수압 분포 ····· 33
그림 3.11 시간경과에 따른 압밀침하량 ····· 34
그림 3.12 시간경과에 따른 과잉간극수압의 소산 ····· 34
그림 3.13 $P_{steady}$의 계산 ····· 35
그림 3.14 $P_{water}$의 분포 ····· 35
그림 3.15 시간경과에 따른 간극수압의 변화 ····· 36
그림 3.16 진공압밀에 따른 간극수압의 감소 ····· 36
그림 3.17 진공압밀에 따른 유효응력의 증가 ····· 36
그림 3.18 과업위치(Google) ····· 37
그림 3.19 지반조사 평면도(동아지질, 2019) ····· 38
그림 3.20 지층단면도(동아지질, 2019) ····· 39
그림 3.21 개별진공압밀공법의 시공개요(동아지질, 2019) ····· 40
그림 3.22 침하보충토 성토 및 진공시스템 가동 기간 ····· 41
그림 3.23 현장계측 및 현장시험조사 위치(동아지질, 2019) ····· 42
그림 3.24 AD1 구역의 진공압 분포 ····· 43
그림 3.25 AD2 구역의 진공압 분포 ····· 43
그림 3.26 AD3 구역의 진공압 분포 ····· 44
그림 3.27 연직배수재 하부의 진공압 분포 ····· 44

그림 3.28 AD1 구역의 시간에 따른 압밀침하량 ····· 45
그림 3.29 AD2 구역의 시간에 따른 압밀침하량 ····· 45
그림 3.30 시간에 따른 간극수압의 변화 ····· 46
그림 3.31 횡방향 변위의 분포특성 ····· 47
그림 3.32 지반개량 전후의 토질특성 ····· 48
그림 3.33 콘 관입시험 결과 ····· 49
그림 3.34 Multi-drain 해석을 위한 단면형상 ····· 50
그림 3.35 교란영역의 모델링 ····· 52
그림 3.36 계측위치 ····· 53
그림 3.37 시간경과에 따른 압밀침하량 비교 ····· 53
그림 3.38 시간경과에 따른 간극수압의 변화 비교 ····· 54
그림 3.39 횡방향 변위의 분포특성 비교 ····· 56
그림 3.40 압밀침하량의 변화 비교 (Case 1) ····· 58
그림 3.41 간극수압의 변화 비교 (Case 2) ····· 59

# Numerical Analysis of the Consolidation Behavior of Soft Clayey Soil Subjected to Individual Vacuum Pressure

Jeongbhin Lee

*Department of Civil Engineering, The Graduate School,*
*Pukyong National University*

## Abstract

In recent civil engineering project, many projects have currently been carried out on soft grounds that were considered as inappropriate sites for construction purposes. However, constructions on soft soils are challenging works because of their poor properties such as low shear strength, high compressibility and unfavorable permeability.

In order to overcome these problems, a variety of ground improvement techniques have been employed. Recently, the use of prefabricated vertical drains (PVDs) with vacuum application has gained a popularity for ground improvement where the construction of high embankment for preloading is not available. The conventional vacuum consolidation system is composed of an impervious membrane and a cut-off wall to maintain a vacuum pressure during the whole treatment process. It has been reported that there exist several problems in using the impervious membrane and the cut-off wall. They can be easily damaged during construction and thereby resulting in a poor control of vacuum pressure. To overcome these shortcomings, a new vacuum consolidation system, which is called as an individual vacuum

consolidation method, has been developed.
However, it is not an easy work to design the individual vacuum consolidation method due to several limitations of the consolidation theory. The numerical analysis can often be used as an alternative method to predict the consolidation behavior of soft ground to be treated with the vacuum consolidation method.
In this study, numerical simulations were performed to simulate the individual vacuum consolidation system using the finite element program, Plaxis 2D. The modelling procedures of the vacuum consolidation system are presented in detail with results of an unit-cell analysis. In addition, a case study was carried out to assess the applicability of the Plaxis 2D for simulating the consolidation behavior of soft ground subjected to the individual vacuum pressure.

Keywords : Ground improvement techniques, Individual vacuum consolidation method, Numerical analysis, Plaxis 2D

# 제1장 서론

## 1.1 연구배경

현대 산업사회에서 오늘날과 같이 양호한 가용부지가 부족한 시대에선 연약지반의 활용은 필수적이다. 그러나, 연약지반의 불량한 토질특성으로 기초지반의 전단파괴 및 과도한 침하와 같은 여러 문제점의 발생이 우려되므로 연약지반을 활용하기 위해서는 반드시 지반개량공사가 선행되어야 한다.

기존의 연약지반개량공법 중 연직배수재 설치와 함께 재하성토를 하지않고 진공압을 가하여 연약점토지반의 압밀을 촉진시키는 진공압밀공법의 적용이 증가하고 있는 추세이다. 본 공법의 적용 시 등방압밀하중의 작용으로 기초지반의 전단파괴를 방지할 수 있으며, 동시에 지반의 횡방향 변위가 내측으로 발생하기 때문에 대상 부지에 인접한 구조물에 미칠 수 있는 유해한 변형을 방지할 수 있다. 또한, 성토가 필요하지 않기 때문에 공사기간의 단축 및 공사비의 절감 효과도 기대할 수 있다. 초기에 제안된 진공압밀시스템은(Kjellman, 1952) 진공압 적용과 함께 개량기간 동안 일정 수준 이상의 진공압 유지를 위해 불투수성의 멤브레인 및 공기 차단벽의 설치가 요구된다. 이러한 요소들은 시공 중 손상을 입을 수 있기 때문에, 지반개량 중 진공압이 저하되어 지반개량효과가 감소하거나 공사기간이 증가하는 등의 문제점이 발생 가능하다.

최근에는, 기존 진공압밀시스템의 문제점이 보완된 시스템이 개발되어 연약점토지반 개량공사에 적용되고 있다. 새로 보완된 진공압밀공법에서는 각각의 연직배수재가 수평 진공배수관을 통해 진공펌프에 직접 연결되면서 모든 연직배수재에 개별적으로 진공압을 적용할 수 있다. 또한, 불투수성의 멤브레인 및 공기 차단벽과 같은 요소가 필요하지 않기 때문에 기존 진공압밀시스템에서 발생 가능했던 문제점을 해결할 수 있다.

압밀현상을 이용하는 지반개량공법을 적용하기 위해서는 우선 설계가 선행되

어야 한다. 그러나, 압밀이론의 한계성, 비선형 응력-변형률 거동 및 토질 정수의 불확실성 등의 여러 가지 요인으로 인해, 압밀현상을 이용하는 지반개량공법에 대한 이론적인 설계로는 연약지반의 압밀거동을 정확히 묘사하기 어려운 실정이다. 이론적인 설계의 대안으로 다양한 유한요소해석 프로그램이 연약지반의 압밀거동을 예측하기 위하여 사용되고 있고, 수치해석 결과의 신뢰성 향상을 위한 노력의 일환으로 여러 연구들이 진행되고 있다. 현재까지 연직배수공법 및 진공압밀공법의 수치해석을 위한 다양한 수치해석기법이 연구되어 왔고, 실제 진공압밀공법이 적용된 지반개량공사 현장의 계측치와 수치해석결과의 비교·분석을 통해 해석기법의 타당성을 검토하여 왔다. 그러나, 개별진공압밀공법이 적용된 지반개량공사 현장의 계측결과를 이용한 수치해석 기법의 타당성 검토에 대한 연구는 아직까지 진행된 사례가 없는 실정이다.

## 1.2 연구동향 및 목적

수치해석 프로그램을 이용한 연직배수공법 및 진공압밀공법의 수치해석에 관한 연구는 다양하게 이루어지고 있다. 기존의 연구에서는 실제 3차원 조건(Multi-drain)에서 수평방향의 압밀거동(Radial consolidation)을 2차원 평면변형률 조건으로 해석하기 위한 기반이론 및 수치해석기법을 개발하는 것을 목표로 2차원 평면변형률 조건에서 수행한 수치해석 결과를 축대칭 또는 3차원 수치해석결과 또는 현장계측결과와 비교·분석을 통하여 2차원 평면변형률 해석결과에 대한 타당성을 검증하고 있다.(Hird, Pyrah and Russel, 1992; Indraratna and Redana, 1997, 2000; Lin and Kim, 2000; Indraratna and Rujikiatkamjorn 2005, 2008, 2010; Matharage 2015; Nguyen and Yun 2018). 1990년대 초부터 2000년대 초반까지 수행된 연구는 주로 연직배수공법의 설계를 위한 수치해석기법 개발연구에 중점을 두고 있으며, 이후 진공압밀공법의 적용 증가와 더불어 진공압밀공법에 대한 수치해석적 연구가 진행되고 있다. 전술한 바와 같이 현재까지 수행된 여러 연구들의 목적은 유사하나 수치해석

기법의 원리 및 적용에 관하여 다소 차이를 보이고 있다.

Hird 등(1992)은 축대칭 조건에서 정의된 압밀이론(Hansbo, 1981)으로 평가한 압밀도와 동일한 압밀도를 얻을 수 있는 수평방향의 압밀이론을 평면변형률 조건에서 유도하여 수치해석에 적용하였다. 이들의 연구에서는 연직배수재 시공에 의해 발생되는 스미어 영역(smear zone)과 배수재의 배수저항(well resistance)효과는 고려하지 않았다.

Indraratna 등(1997)은 Hird(1992)의 연구를 보완하여 스미어 효과 및 배수저항효과 까지 고려한 수평방향의 압밀이론을 평면변형률 조건에서 유도하고, Hansbo(1981)의 수평방향 압밀이론과 동일한 압밀도를 얻을 수 있도록 평면변형률 조건에 적합한 등가투수계수를 산정하는 기법을 제시하였다.

Indraratna 등(2000)은 기존 연구에서 제시한 기법을 바탕으로, CRISP 92를 이용한 수치해석의 결과와 현장계측결과의 비교를 통해 해석기법의 타당성을 검증하였다. 스미어 효과 및 배수저항효과를 고려하여 수치해석을 실시한 결과 스미어 효과 및 배수저항 효과를 고려하면 수치해석의 정밀도를 상당히 개선시킬 수 있는 것으로 보고하였다.

Indraratna 등(2005)은 진공압이 적용된 압밀현상에 대한 이론을 평면변형률 조건에서 제시하였다. 또한, 사례연구를 통해 진공압이 연직배수재의 전 깊이에 균등하게 분포하는 것이 아니라 깊이에 따라 선형적으로 감소하여 분포한다고 보고하였다. 유한요소 프로그램인 ABAQUS를 이용한 진공압밀공법의 수치해석 결과에 의하면 깊이에 따라 진공압이 감소되도록 모델링을 하는 경우, 현장의 압밀거동을 합리적으로 재현할 수 있는 것으로 보고하였다.

Indraratna 등(2008)은 ABAQUS를 이용하여 진공압밀공법이 적용된 현장을 3차원 및 2차원 조건으로 모델링 한 수치해석결과를 현장계측결과와 비교하였다. 2차원 해석에서는 Indraratna(2005)가 제시한 이론을 토대로 산정한 등가투수계수를 해석에 적용하였으며 3차원 및 2차원 조건에서 수행된 모든 수치해석의 결과가 현장의 압밀거동을 잘 묘사하는 것으로 나타났다.

Matharage(2015)는 연직배수재 설치에 따른 지반의 투수계수 및 압축성의 변화를 고려한 압밀현상의 이론적인 해를 제시하였다. 이전 모든 연구에서는 배수재 설치에 따른 스미어 효과를 고려하긴 하였으나, 지반교란에 따른 압축성의 변화를 고려하지 않고 스미어 영역 내에 일정한 값의 투수계수를 적용하여 해석하였다. 본 연구에서는, 스미어 영역에서 부터 불교란 지반까지 변화하는 투수계수 및 압축성을 고려한 등가의 값을 산정하여 평면변형률 조건으로 수치해석을 실시하였고 현장계측결과와 비교한 결과 수치해석의 정확성이 증가된 것으로 보고되었다.

Nguyen 등(2018)은 축대칭 조건에서의 정의된 압밀이론(Hansbo, 1981)에서 계산되는 유출량이 2차원 평면 변형률 조건에서 동일한 유출량이 발생될 수 있도록 등가 투수계수를 산정하여 수치해석에 적용하였다. 유한요소 프로그램인 Plaxis 2D를 이용하여 연직배수공법의 수치해석을 실시한 결과 현장의 압밀거동을 잘 묘사하는 것으로 보고되었다.

현재까지, 수치해석 프로그램을 이용하여 연직배수공법 및 진공압밀공법이 적용된 연약지반의 압밀거동을 묘사하기 위한 연구는 활발히 진행되어 왔다. 하지만, 근래에 적용성이 점차 증가되고 있는 개별진공압밀공법의 설계 및 압밀거동 예측을 위한 수치해석 연구는 미흡한 실정이며 해당 공법이 적용된 현장의 계측결과를 기반으로 실시한 수치해석기법의 타당성 검토 사례 역시 쉽게 찾아볼 수 없는 상황이다. 또한, 진공압밀공법이 적용된 현장의 수치해석 모델링을 위해 지반 전용 유한요소 해석프로그램인 Plaxis 2D가 이용된 사례는 많지 않다.

따라서, 본 논문에서는 Plaxis 2D를 이용하여 진공압을 묘사하기 위한 세부적인 방법을 Unit cell 해석결과와 함께 제시한다. 또한, 평면변형률 조건에서 개별진공압밀공법이 적용된 실제 시공사례를 모델링하여, 개별진공압밀시스템이 적용된 연약지반의 압밀거동을 예측하기 위한 Plaxis 2D의 사용 가능성을 검토하고자 한다.

# 제2장 이론적 고찰

## 2.1 1차원 압밀이론

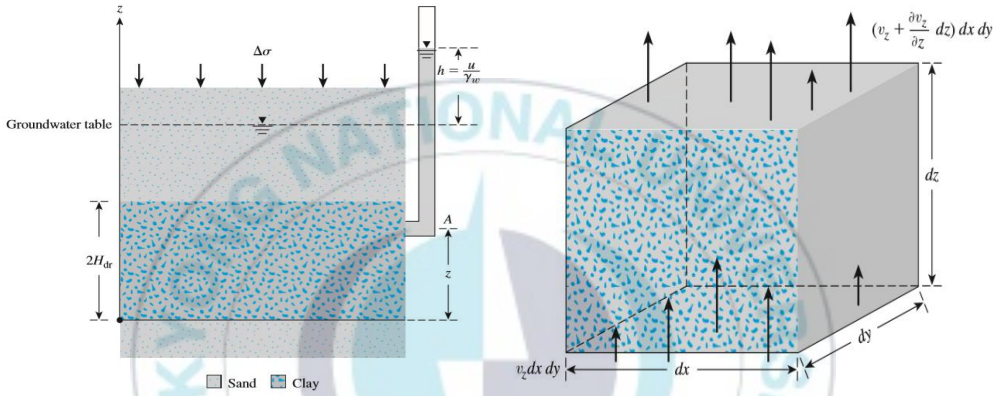
제방 및 기초에 의한 하중과 같은 외부하중의 작용으로 포화된 점토지반 내 응력증분이 발생하게 되면 투수성이 매우 낮은 점토의 특성으로 인하여 지중에는 과잉간극수압이 유발된다. 이렇게 발생한 과잉간극수압은 간극수의 배출과 함께 아주 오랜 기간에 걸쳐 소산되고 이와 동시에 점토지반에는 체적의 변형이 발생하게 된다. 광범위한 지역에 걸쳐서 매립하는 경우와 같이 외부하중이 넓게 분포하는 경우에 점토지반 내 흙입자에는 횡방향 변형이 발생할 수 없기 때문에 과잉간극수압의 소산으로 인한 점토지반의 체적변형은 오로지 연직방향의 침하로만 나타난다. 이와 같은 침하형태를 1차원 압밀침하라고 한다.

### 2.1.1 압밀침하속도

점토지반에서 압밀과 관련된 중요한 사항 중 하나는 압밀침하가 진행되는 속도를 평가하는 것이다. 압밀침하가 진행되는 속도는 생성된 과잉간극수압의 소산정도를 평가하여 예측하게 된다. 압밀침하속도를 계산하기 위해 필요한 이론이 Terzaghi(1925)에 의하여 처음으로 제시되었다. 해당이론에 따른 압밀방정식을 풀게 되면 시간경과에 따른 과잉간극수압의 소산정도를 평가할 수 있다. Terzaghi(1925)는 압밀방정식의 유도를 위해 아래와 같은 가정을 설정하였다.

1) 점토층은 균질(homogeneous)하다.
2) 점토층은 완전히 포화되어있다.(S=100%)
3) 흙입자와 물 자체의 압축성은 무시한다.
4) 물의 흐름은 연직방향이라고 가정하며 흙이 압축되는 방향과 일치한다.
5) 물의 흐름은 Darcy의 법칙에 따른다.

압밀방정식은 연속성의 법칙(Law of continuity)과 Darcy 법칙의 조합을 통해 유도할 수 있다. 그림 2.1(a)는 두께가 $2H_{dr}$인 점토층에 하중 $\Delta\sigma$가 작용하여 점토층 임의의 깊이에서 과잉간극수압이 발생한 상태를 보여주고 있다. 그림 2.1(b)는 과잉간극수압으로 인하여 모래와 점토 경계면과 점토층 임의의 깊이에 위치하는 흙 요소 사이에 전수두차가 발생하여 흙 요소에 간극수의 흐름이 발생된 상황을 보여준다.




(a) 응력증분에 따른 과잉간극수압　　(b) 흙 요소내 간극수의 흐름

**그림 2.1 응력증분에 따른 간극수의 흐름(Das, 2014)**

연속성의 법칙과 Darcy의 법칙을 이용하여 압밀현상을 나타내는 방정식을 유도하게 되면 식(2.1)과 같이 시간과 깊이에 따른 간극수압의 변화를 정의하는 압밀방정식이 유도된다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \tag{2.1}$$

식(2.1)에서 $c_v = \dfrac{k}{m_v \gamma_w}$ 이다.

경계조건을 적용하여 식(2.1)을 풀면 시간과 깊이에 따른 간극수압의 크기와 압밀도를 산정할 수 있다.

### 2.1.2 압밀침하량

압밀 진행속도에 이어 또 하나 중요한 사항은 압밀침하의 크기에 관한 문제이다. 즉, 고려대상의 점토지반에 얼마나 큰 압밀침하량이 발생할 것인가에 대한 문제는 설계에 있어 매우 중요한 요소가 된다. 압밀침하는 유효응력의 증가와 함께 연직방향의 변형이 발생하는 현상으로 압밀침하량 계산을 위해 압밀현상에 대한 응력-변형률의 관계 정의가 필요하다. 압밀침하량의 계산을 위한 식의 유도는 원론적으로 다음과 같이 시작된다.

$$s = \int_H \epsilon_z dz \tag{2.2}$$

여기서, 압밀침하량 산정을 위해 수직변형률 $\epsilon_z$는 보통 2가지 방법으로 정의될 수 있다. 횡방향 변형($\epsilon_h$)은 발생하지 않는 1차원 압밀이론을 다루기 때문에, $\epsilon_z = \epsilon_v$라는 사실을 먼저 정리하고 시작한다. $\epsilon_z$를 정의하는 첫 번째 방법은 체적변화계수 $m_v$를 사용하는 것이다. 그림 2.2와 같이 체적변화계수는 응력의 크기에 따라 비선형적으로 변하는 값이다. 하지만, Terzaghi의 1차원 압밀이론은 미소변형이론으로 선형의 응력-변형률 관계를 가정하므로, 체적변화계수는 상수로 가정하며 침하량 계산을 위한 식은 아래와 같이 정의된다.

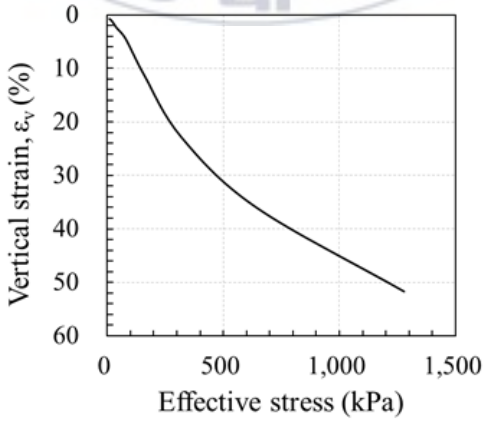



그림 2.2 연직변형률과 유효응력의 관계

$$m_v = \frac{\epsilon_v}{\Delta\sigma'} \tag{2.3}$$

$$s = \int_H m_v \Delta\sigma' dz = m_v \Delta\sigma' H \tag{2.4}$$

두 번째 방법으로 토질의 삼상관계를 이용하여 $\epsilon_z$를 정의하는 것이다. 그림 2.3은 포화된 점토의 1차원 압밀침하 형상을 나타내고 있다. 이를 통해, 1차원 압밀 침하량 계산을 위한 식을 유도하면 다음과 같다.

$$\epsilon_z = \epsilon_v = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta e}{1+e_0} \tag{2.5}$$

$$s = \int_H \frac{\Delta e}{1+e_0} dz = \frac{\Delta e}{1+e_0} H \tag{2.6}$$

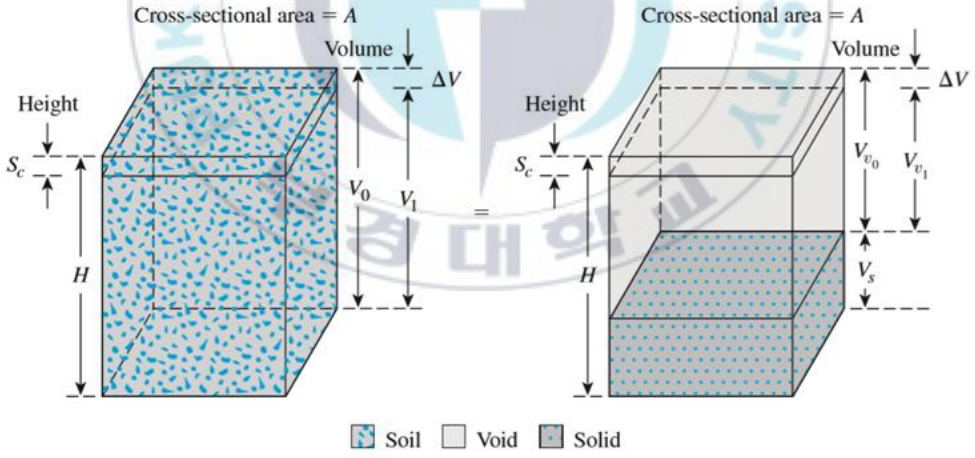
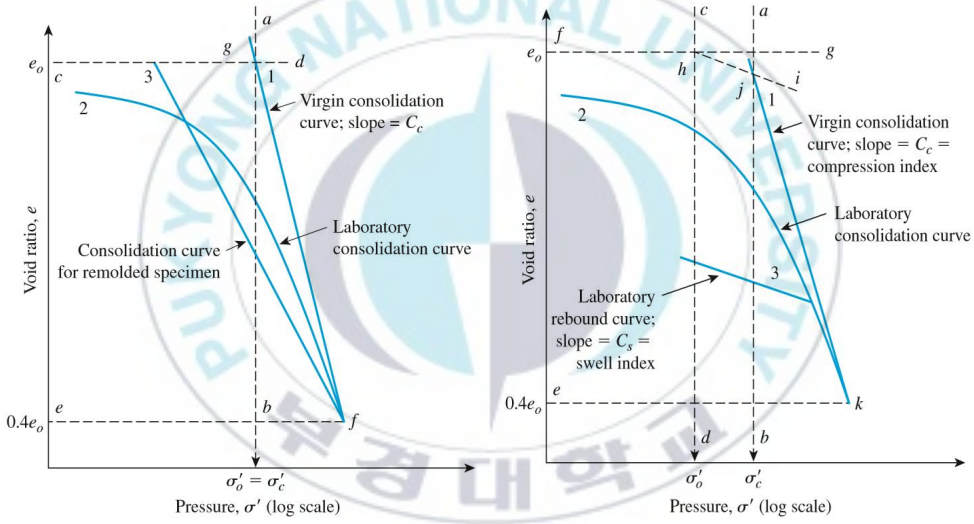



**그림 2.3 1차원 압밀침하**

여기서, 간극비의 변화는 일반적으로 압축지수($C_c$) 및 재압축지수($C_s$)를 이용하여 나타낼 수 있다. 그림 2.4는 압밀현상에 따른 간극비 및 유효응력 변화의 관계를 나타내며 그래프의 기울기로 압축지수와 재압축지수를 정의한다. 점토

는 응력이력에 따라 정규압밀점토와 과압밀점토로 구분되는데, 이를 구분하는 기준은 과압밀비(OCR, overconsolidation ratio)로 과거에 받았던 최대압력에 대한 현재 유효상재압력의 비로 정의된다. 정규압밀점토는 OCR값이 1인 점토를 말하며, 과압밀점토는 OCR값이 1보다 큰, 즉 현재 유효상재압력보다 과거에 더 큰 압력을 받은 경험이 있는 점토를 의미한다. 압밀침하량의 계산식은 OCR값에 따라 구분되므로 OCR값의 크기는 침하량 계산에 있어 매우 중요한 요소가 된다. 각 조건에 따라 간극비의 변화($\Delta e$)를 그림 2.4로부터 산정하여 식(2.6)에 대입하면 아래와 같이 1차원 압밀침하량의 계산식이 유도된다.




(a) 정규압밀점토 (b) 과압밀점토

**그림 2.4 간극비-유효응력 곡선(Das, 2014)**

- 정규압밀점토

$$\Delta e = C_c[\log(\sigma'_0 + \Delta\sigma') - \log\sigma'_0] \tag{2.7}$$

$$s = \frac{C_c H}{1+e_0} log\left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0}\right) \tag{2.8}$$

-과압밀점토

1) $\sigma'_0 + \Delta\sigma' \leq \sigma'_c$

$$\Delta e = C_s[\log(\sigma'_0 + \Delta\sigma') - \log\sigma'_0] \tag{2.9}$$

$$s = \frac{C_s H}{1+e_0} log\left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0}\right) \tag{2.10}$$

2) $\sigma'_0 + \Delta\sigma' > \sigma'_c$

$$s = \frac{C_s H}{1+e_0} log\left(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_0}\right) + \frac{C_c H}{1+e_0} log\left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_c}\right) \tag{2.11}$$

## 2.2 압밀촉진공법

연약지반은 불량한 토질특성으로 기초지반의 전단파괴 및 과도한 침하와 같은 여러 문제점의 발생이 우려되므로 연약지반을 활용하기 위해서는 반드시 지반개량공사가 선행되어야 한다. 기존의 지반개량공법 중 압밀현상을 이용한 공법은 가장 보편적이며 많은 시공사례를 바탕으로 여러 지반개량 공사현장에 적용되고 있다. 본 절에서는, 지반개량의 원리로 압밀현상을 이용하는 여러 공법에 대하여 설명하고자 한다.

### 2.2.1 Preloading 공법

연약점토지반의 개량을 위해 적용 가능한 가장 단순한 공법은 Preloading공법이다. Preloading공법은 연약점토지반 상부에 한시적으로 재하성토를 하여 구조물 공사 이전에 연약지반을 압밀시킴으로써, 추후 시공되는 구조물의 하중에 의해 발생 가능한 침하를 미리 발생시키는 것이다. 또한, 연약지반의 압밀에 따른 유효응력의 증가로 인하여 지반의 전단강도가 증가하여 구조물의 하중에 의해 발생 가능한 기초지반의 전단파괴를 방지할 수 있다. 그림 2.5는

Preloading공법에 대한 원리를 나타낸다. 그림 2.5에서 $\Delta\sigma_p$는 구조물의 단위면적당 하중을 의미하고 $\Delta\sigma_p$에 의한 압밀침하량은 다음과 같이 계산된다.

$$S_{(p)} = \frac{C_c H_c}{1+e_0} log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma_{(p)}}{\sigma'_0} \tag{2.12}$$

만약, 구조물의 단위면적당 하중보다 더 큰 $\Delta\sigma_p + \Delta\sigma_f$의 하중이 연약지반에 가해진다면, 이로 인한 침하량은 다음과 같을 것이다.

$$S_{c(p+f)} = \frac{C_c H_c}{1+e_0} log \frac{\sigma'_0 + [\Delta\sigma'_{(p)} + \Delta\sigma'_{(f)}]}{\sigma'_0} \tag{2.13}$$

$\Delta\sigma_p + \Delta\sigma_f$에 의해 $S_{(p)}$의 침하량은 $t_1$시점 보다 빠른 $t_2$시점에서 발생한다. 시간 $t_2$에서 하중 $\Delta\sigma_f$를 제거하고 구조물이 시공된다면, 그 이후로 추가적인 침하는 발생하지 않으며 구조물 하중에 의한 지반의 전단파괴 또한 발생하지 않을 것이다. 하지만, Preloading공법에 따른 연약지반의 압밀은 1차원 압밀현상이 지배적이므로 목표침하량에 도달하기 까지 아주 오랜 시간이 소요된다. 이와 같은 문제점을 보완하기 위해 연약지반 내부에 연직배수재를 설치하여 방사방향의 압밀현상을 유도함으로써 개량기간을 상당히 단축시킬 수 있다.

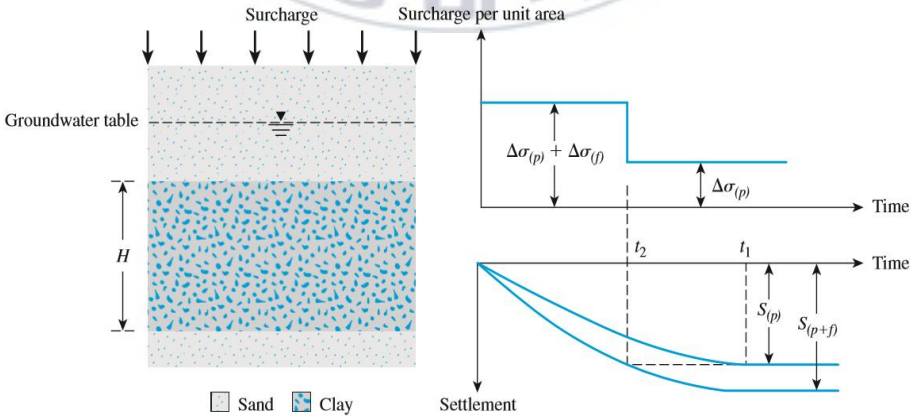



그림 2.5 Preloading의 원리(Das, 2014)

### 2.2.2 연직배수공법

연직배수공법은 연약지반 내부에 연직배수재를 설치함과 동시에 재하성토를 하여 압밀과정을 가속화시키고, 지반의 강도를 증진시키며, 시공 후 발생 가능한 침하를 미리 발생시켜 지반의 안정화를 도모하는 공법이다. 연직배수공법의 가장 큰 특징은 연직배수재 설치에 따른 방사방향의 압밀현상, 즉 횡방향으로 간극수의 흐름을 유발시켜 압밀의 진행속도를 촉진시키는 것이다. 따라서, 본 공법의 설계를 위해서는 방사방향 압밀이론이 필요하다. 연직방향의 흐름에 의한 평균압밀도를 $U_v$, 횡방향의 흐름에 인한 평균압밀도를 $U_h$이라 할 때, 두 압밀도를 조합한 평균압밀도는 식(2.14)와 같다.

$$U_{v,h} = 1-(1-U_v)(1-U_h) \tag{2.14}$$

방사방향의 기본 압밀방정식은 Terzaghi(1925)의 1차원 압밀방정식의 변형된 형태로 식(2.15)와 같이 정의된다. 방사방향의 압밀방정식 유도를 위한 모든 기본 가정사항은 Terzaghi(1925)의 1차원 압밀방정식의 가정사항과 동일하나 물의 흐름방향은 연직방향이 아닌 수평방향으로만 발생한다고 가정한다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_h\left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r}\right) \tag{2.15}$$

방사방향 압밀방정식의 해는 다음 두 가지 조건으로부터 구할 수 있다.

1) Free-strain case : 지반에 작용되는 하중이 연성적인 성질을 가질 때, 지반에는 균등한 응력분포가 발생하지만 불균등한 지표침하가 유발된다.

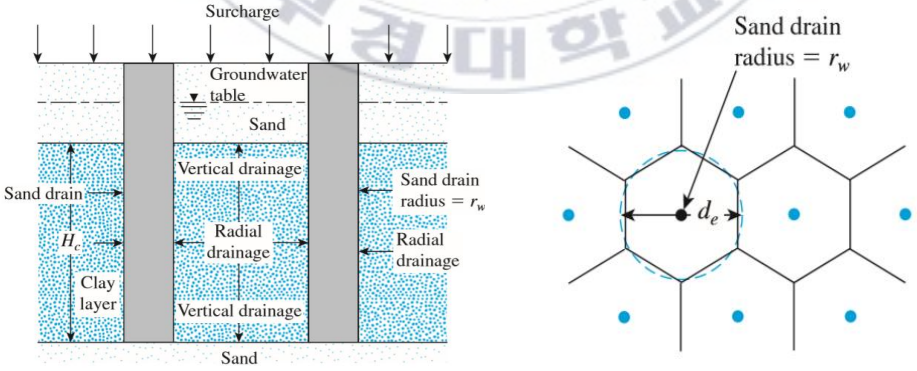
2) Equal-strain case : 지반에 작용되는 하중이 강성적인 성질을 가질 때, 균등한 지표침하가 발생되지만 지반에는 불균등한 응력분포가 발생한다.

Free-strain case 조건에 관한 해의 유도는 Equal-strain case 조건보다 복잡하며, 그 해 역시 설계에 적용하기가 쉽지 않다. Barron(1948)은 Equal-strain

case 조건에 대하여 압밀방정식의 해를 구하였고 Hansbo(1981)에 의해 수정되었다. 해를 제시하기 전 몇 가지 용어정리를 위하여 다음을 설명한다. 방사방향의 압밀을 이용하여 지반개량을 도모한 최초의 공법은 Sand drain공법으로 현재 연직배수재로 사용되는 토목섬유 대신 그림 2.6과 같이 모래가 연직배수재의 재료로 사용된 공법이다. 방사방향 압밀방정식의 해(Barron, 1948; Hansbo, 1981)는 모래가 배수재로 사용된 조건에서 축대칭으로 발생하는 방사방향의 압밀현상을 정의하기 위하여 유도되었다. 그림 2.7과 같이 연직배수재로 토목섬유가 사용되는 경우에는 축대칭 조건에서 정의된 방사방향의 압밀방정식의 해를 이용하기 위해 연직배수재를 등가의 원형배수재로 가정하여야 한다. 연직배수재의 등가 직경($d_w$)은 배수재의 폭($a$)와 두께($b$)를 이용하여 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$\text{Kjellman(1948)} : d_w = \frac{2(a+b)}{\pi} \tag{2.16}$$

$$\text{Hansbo(1987)} : d_w = \frac{(a+b)}{2} \tag{2.17}$$




(a) 단면도 (b) 평면도

그림 2.6 sand drain 공법(Das, 2016)

연직배수재는 정사각형 또는 정삼각형의 배열로 설치되며 설치간격($S$)과 배치형상에 따라 연직배수재의 영향직경($d_e$)은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$d_e = 1.05S \quad \text{(정삼각형 배치)} \tag{2.16}$$

$$d_e = 1.128S \quad \text{(정사각형 배치)} \tag{2.17}$$

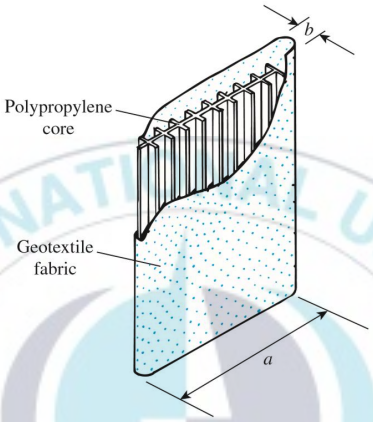



그림 2.7 연직배수재의 형상(Das, 2016)

Barron(1948)이 유도한 Equal-strain case 조건에 대한 압밀방정식 해는 다음과 같다.

$$\Delta u = \frac{4\Delta u_{av}}{d_e^2 F(n)}\left[r_e^2 \ln\left(\frac{r}{r_w}\right) - \frac{r^2 - r_w^2}{2}\right] \tag{2.18}$$

$$U_{avg,h} = 1 - \frac{\Delta u_{avg}}{\Delta u_i} = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{F(n)}\right) \tag{2.19}$$

$$F(n) = \left(\frac{n^2}{n^2-1}\right)\ln(n) - \frac{3n^2-1}{4n^2} \tag{2.20}$$

식(2.19)에서 $T_h = \frac{C_r t}{d_e^2}$이고, 식(2.20)에서 $n = \frac{d_e}{d_w}$이다.

Barron(1948)의 해는 실제 현장에서 발생하는 문제들을 고려하지 않은 이상적인 조건을 가정으로 구해진 해이다. 즉, 맨드렐(mandrel)을 이용하여 배수재를 설치하는 과정에서 필연적으로 발생하는 지반교란에 따른 토질특성의 변화 또는 배수재의 통수능력 저하와 같은 문제점들이 고려되지 않았다. 연직배수공법 적용시 현장에서 발생가능한 대표적인 문제점은 교란영역의 발생 및 배수저항의 효과이다. 교란영역은 연직배수재 타설 시 맨드렐의 관입 및 인발로 인해 원지반의 교란된 영역을 의미한다. 교란영역에서는 토질의 압축성 및 수평방향의 투수계수가 감소되어 압밀진행 속도의 저하를 유발한다. 지반교란의 정도는 맨드렐의 형상 및 크기와 관입방법 등에 따라 달라지며 연직배수공법 설계에 있어 가장 중요한 설계요소인 교란영역의 범위($d_s$) 및 교란영역에서의 수평투수계수($k_s$)는 실내실험 또는 현장 계측 데이터를 이용한 역해석으로부터 다양하게 연구되어 이들의 연구결과를 요약하여 정리하면 표 2.1과 같다.

**표 2.1 교란영역의 크기 및 투수계수**

| Researchers | Proposed |
|---|---|
| Jamiolkowski(1981) | $d_s/d_m = 2.5 \sim 3.0$ |
| Hansbo(1987) | $d_s/d_m = 2$<br>$k_s/k_v = 1$ |
| Bergado(1991) | $d_s/d_m = 2$<br>$k_h/k_v = 1.5 \sim 2$ |
| Indraratna(1998) | $d_s/d_m = 4 \sim 5$<br>$k_s/k_v = 0.9 \sim 1.3$<br>$k_h/k_v = 1.4 \sim 1.9$ |
| 박영목(2003) | $d_s/d_m = 3.08 \sim 3.92$ (CL)<br>$d_s/d_m = 3.10 \sim 3.36$ (OH)<br>$k_s/k_h = 0.76 \sim 0.86$ |

Hansbo(1981)는 Barron(1948)의 해를 수정하여 교란영역 및 배수저항 효과를 모두 고려할 수 있는 해를 아래와 같이 제시하였다.

$$U_h = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{F}\right) \tag{2.21}$$

$$F = \ln\left(\frac{n}{s}\right) + \left(\frac{k_h}{k_s}\right)\ln(s) - 0.75 + \pi z(2l - z)\frac{k_h}{q_w} \tag{2.22}$$

식(2.22)에서 $q_w$ : 연직배수재의 통수능, $n = \frac{d_e}{d_w}$, $s = \frac{d_s}{d_w}$이다.

Hansbo(1981)의 해는 Barron(1948)의 해와 달리 평균압밀도를 의미하는 해가 아니며 식(2.22)에서 배수저항효과를 고려하는 마지막 항에 변수 z가 포함되어 있어 깊이(z)에 따라 압밀도가 달라진다. 평균압밀도는 임의의 깊이마다 식(2.22)로부터 압밀도를 계산하여 가중평균법을 이용하면 산정할 수 있다. 하지만, 일반적으로 연직배수재의 통수능은 상당히 크기 때문에 식(2.22) 우변의 마지막 항이 압밀도 $U_r$에 미치는 영향은 크지 않다.

### 2.2.3 진공압밀공법

진공압밀공법은 연직배수공법의 변형된 시스템으로 연직배수재 설치와 함께 재하성토 대신 진공압을 이용하여 지반의 압밀과정을 촉진시키는 공법이다. 일반적으로 개량 대상의 지반이 매우 연약하여 제방의 성토가 어려운 경우 또는 성토에 필요한 재료의 운반이 쉽지 않은 경우 진공압밀공법이 적용될 수 있다.

진공압밀공법은 Kjellman(1952)에 의하여 처음으로 제안되었으며 그림 2.8은 본 공법의 모식도를 나타낸다. 본 시스템에서는 진공압의 적용과 더불어 개량기간동안 일정 수준이상의 진공압 유지를 위하여 불투수성의 멤브레인(membrane)과 공기차단벽의 설치가 필요하다. 또한, 기밀성의 유지를 위하여 멤브레인의 끝 부분은 벤토나이트로 채워진 트렌치 내부에 고정되어진다. 그 후, 그림 2.8과 같이 진공펌프를 작동시켜 멤브레인 하부지반에 존재하는 공기를 외부로 배출시킴으로써 진공상태로 만들어 주어 대기압 하중으로 연약지반의 압밀을 유도한다. 본 공법의 장점으로는 제방의 성토가 불필요하며, 등방압

밀하중의 작용으로 기초지반의 전단파괴를 방지할 수 있고, 이와 동시에 내측으로 발생하는 횡방향 변형으로 주변 구조물에 발생 가능한 유해한 변형을 방지할 수 있다. 진공압밀공법에 따른 응력변화 관계는 다음과 같이 설명된다. 진공압밀공법이 적용되면 초기 전응력의 변화는 발생하지 않으나 진공압에 의한 압밀작용으로 수압의 감소가 발생하며 수압의 감소 분 만큼 유효응력이 증가하게 된다. 이러한 응력변화 관계를 그림 2.9에 나타내었다.

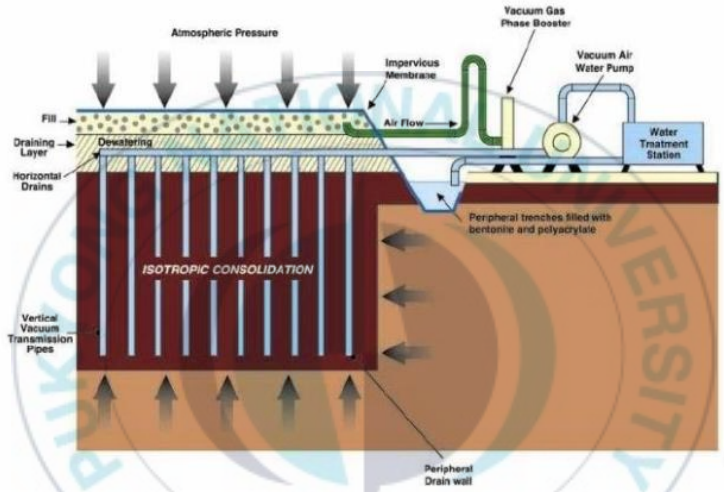
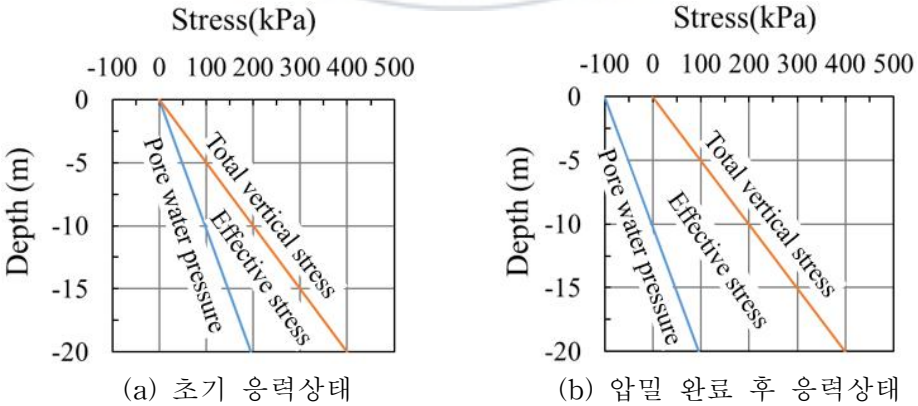



그림 2.8 진공압밀 시스템(Masse et al., 2001)




(a) 초기 응력상태 (b) 압밀 완료 후 응력상태

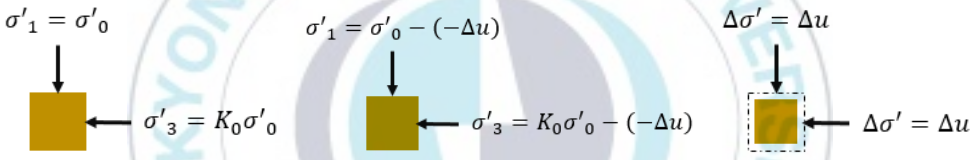
그림 2.9 진공압밀에 따른 응력변화

언급된 바와 같이, 진공압밀공법의 적용 시 등방압밀하중의 작용으로 기초지반의 전단파괴를 방지하고 내측방향의 수평변위를 발생시켜 주변 구조물의 변형을 막을 수 있다. 이러한 사실은 진공압을 받고있는 지반 내 임의의 요소에 작용하는 응력상태(그림 2.10) 및 응력경로(그림 2.11)를 통해 살펴볼 수 있다.

$$\text{초기응력상태 : } p' = \frac{\sigma'_0 + K_0\sigma'_0}{2} \text{ and } q' = \frac{\sigma'_0 - K_0\sigma'_0}{2}$$

$$\text{압밀진행상태 : } p' = \frac{\sigma'_0 - (-\Delta u) + K_0\sigma'_0 - (-\Delta u)}{2} \text{ and } q' = \frac{\sigma'_0 - K_0\sigma'_0}{2}$$

여기서, $\Delta u$ : 수압의 감소분.




(a) 초기응력 (b) 압밀 시 응력 (c) 내측방향 변위

**그림 2.10 진공압밀에 의해 흙 요소에 작용하는 응력**

그림 2.9를 통해 설명한 바와 같이 진공압밀시스템에서는 외부하중에 의한 과잉간극수압의 생성과 소산에 따라 압밀이 발생하는 것이 아니라 진공압에 의하여 초기 정수압이 감소되면서 압밀이 진행된다고 하였다. 그림 2.10과 같이 정수압의 감소는 응력 요소 내 모든 방향으로 동일한 크기로 발생하고 이로 인한 유효응력의 증가 또한 등방적으로 발생하기 때문에 압밀이 진행됨에 따라 $p'$값은 증가하지만 $q'$값은 일정하게 유지된다. 따라서, 그림 2.11과 같이 $p'$-$q'$ 곡선상에 진공압밀에 따른 응력경로를 그려보면 A점에서 B점으로 연결되는 직선으로 나타난다. 또한, 흙의 변형은 반드시 유효응력의 변화가 동반되어야 하는데 그림 2.10(c)와 같이 유효응력의 증가는 모든 방향으로 동일하게 발생하기 때문에 내측방향의 변위가 유발된다.

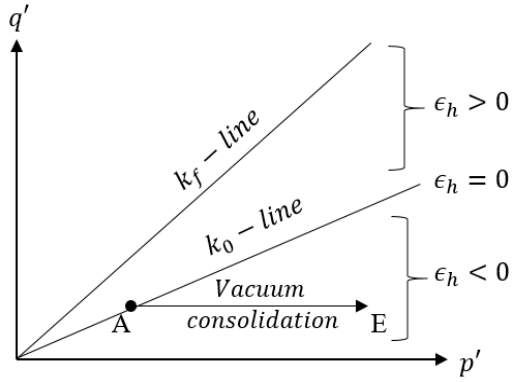



그림 2.11 진공압밀에 따른 응력경로

### 2.2.4 개별진공압밀공법

기존 진공압밀공법에서는 일반적으로 진공압의 유지를 위해 불투수성의 멤브레인과 공기차단벽의 설치가 요구된다. 하지만, 이러한 요소들은 시공 중에 쉽게 손상을 입을 수 있어 일정수준 이상의 진공압 유지가 어려울 수 있으며 이로 인해 효율적인 지반개량을 기대하기 어려운 문제 및 공사기간이 증가하는 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 기존 진공압밀시스템을 개선시킨 개별진공압밀공법이 개발되어 여러 현장에 적용되고 있다.

그림 2.12와 같이 개선된 진공압밀 시스템에서는 연직배수재가 수평배수관을 통해 진공펌프에 직접 연결되어 연직배수재에 개별적으로 진공압이 적용되므로 효율적인 지반개량을 기대할 수 있다. 또한, 진공압의 유지를 위해 필요했던 불투수성의 멤브레인과 공기차단벽은 개별진공압밀 시스템에서는 요구되지 않기 때문에 기존 시스템의 문제점을 해결할 수 있다.

최근에는, 개별진공압밀 시스템에 더불어, air-water separation 시스템을 도입하여 효과적인 진공압의 유지가 가능하도록 하고 있다. 그림 2.12와 같이, air-water separation 시스템은 이중의 수평 배수관과 연결되어 단면 중앙에 설치된 Collector Well을 통해 가동된다. 본 시스템은 그림 2.13과 같이 지반 내 간극수와 공기가 서로 다른 별개의 관을 통해 Collector Well로 유입되도록

유도한다. 그 후, Collector Well로 유입된 간극수는 수중펌프를 통하여 지상으로 배출되고 공기는 진공펌프를 통해 외부로 배출된다. 이중 수평배수관이 아닌 단관을 사용하는 경우에는 배수관 내부에 존재하는 기포로 인해 진공압이 감소 될 우려가 있다. 따라서, 본 시스템의 도입으로 배수관 내 기포로 인한 진공압의 감소현상을 방지할 수 있다. 개별진공압밀공법에 의한 응력변화 관계 및 지반개량원리는 2.2.3항에 설명된 바와 동일하다.

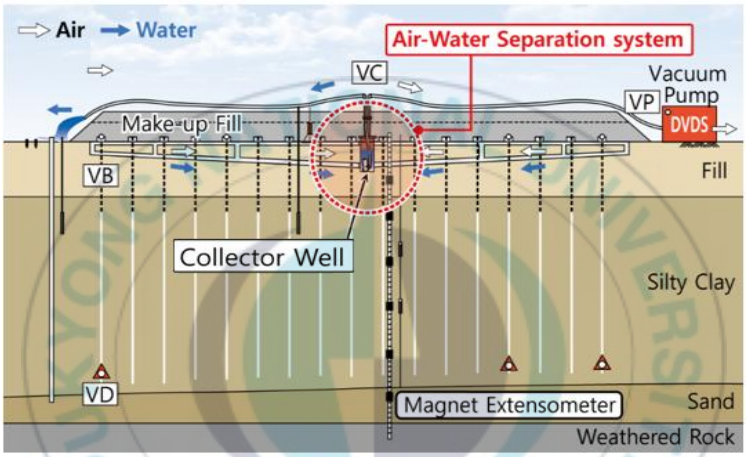
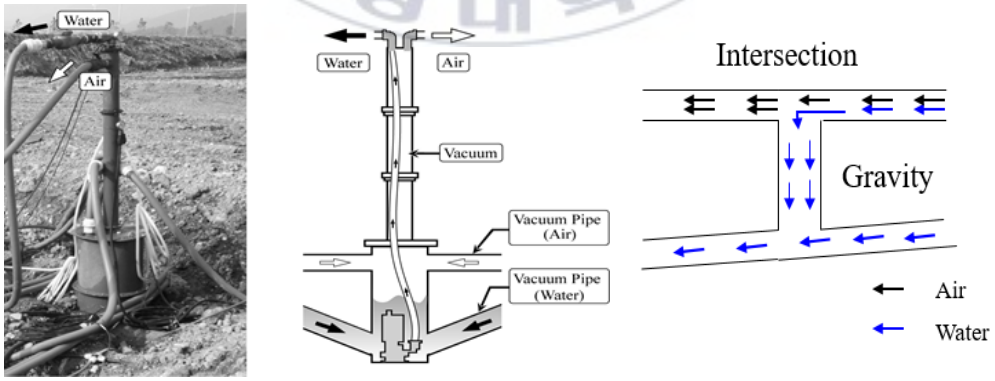



그림 2.12 개별진공압밀시스템(동아지질, 2019)




(a) Collector well (b) 공기 및 간극수의 흐름

그림 2.13 Air-water separation system(동아지질, 2019)

## 2.3 2차원 평면변형률 해석

연직배수공법 및 진공압밀공법은 방사방향의 압밀현상을 이용하는 개량공법이다. 방사방향의 압밀현상은 축대칭 조건에서 정의되는 문제이므로 정확한 수치해석의 결과를 얻기 위해서는 연직배수재 배치 형상을 고려한 3차원 모델링이 요구된다. 하지만, 3차원 수치해석에 수반되는 여러 제한점들로 인해 일반적으로 2차원 평면변형률 해석이 수행되고 있다. 따라서, 3차원의 문제를 2차원 평면변형률 조건에서 묘사하기 위해서는 변형기법이 필요하다.

### 2.3.1 Hird's method

Hird(1992)는 축대칭 조건에서 정의된 방사방향의 압밀현상을 2차원 평면 변형률 조건에서 묘사하기 위한 변형기법을 제시하였다. 해당 변형기법의 기반은 Hansbo(1981)가 유도한 압밀도와 동일한 결과를 2차원 평면변형률 조건에서 얻을 수 있도록, 축대칭 조건의 투수계수 또는 기하조건을 2차원 평면변형률 조건에 부합하게 조정하는 것이다. 이를 위해, 그림 2.14와 같이 2차원 평면 변형률 조건에 놓인 Unit Cell형상으로부터 압밀방정식을 유도하여 아래와 같이 압밀도 계산을 위한 해를 제시하였다.

$$U_{hp} = 1 - \exp\left(\frac{-8T_{hp}}{F_p}\right) \tag{2.23}$$

$$F_p = \frac{2}{3} + 2z(2l - z)\frac{k_{hp}}{BQ_w} \tag{2.24}$$

식(2.23)에서 $T_{hp} = \frac{C_{hp}t}{4B^2}$이고, 아래첨자 p는 평면변형률 조건임을 의미한다.

Hansbo의 해인 식(2.21)과 식(2.23)을 동일하게 두면 다음과 같다.

$$U_{hp} = U_h \tag{2.25}$$

$$\frac{T_{hp}}{F_p}=\frac{T_h}{F} \quad \text{or} \quad \frac{C_{hp}t}{B^2F_p}=\frac{C_ht}{r_e^2F} \tag{2.26}$$

여기서, $C_{hp}$와$C_h$ 및 토질정수가 두 조건에서 모두 같다고 가정하면, 식(2.26)을 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$B^2F_p = r_e^2F \tag{2.27}$$

$$\frac{2}{3}B^2-r_e^2\left[\ln\frac{n}{s}+\frac{k}{k_s}ln(s)-\frac{3}{4}\right]=\left(\frac{\pi r_e^2k}{q_w}-\frac{2Bk}{Q_w}\right)(2lz-z^2) \tag{2.28}$$

배수재의 통수능은 충분히 커서 무시할 수 있다고 가정하면($Q_w \rightarrow \infty$), 식(2.28)을 통해 2차원 평면변형률 해석을 위한 폭(B)값을 식(2.29)와 같이 설정할 수 있다. 즉, 모든 토질정수는 축대칭 조건과 동일하게 사용하되 식(2.29)와 같이 폭(B)을 조정하여 축대칭 조건의 문제를 2차원 평면변형률 해석을 통해 묘사를 할 수 있다.

$$B/r_e=\left[\frac{3}{2}\left\{\ln(\frac{n}{s})+(\frac{k_h}{k_s})\ln(s)-3/4\right\}\right]^{1/2} \tag{2.29}$$

반면, 식(2.28)에서 폭(B)와 배수재의 영향원의 반경($r_e$)을 동일하게 보면 2차원 해석을 위한 투수계수($k_{hp}$)를 산정할 수 있다. 즉, 기하조건은 모두 동일하게 적용하되 식(2.30)과 같이 수평투수계수를 2차원 평면변형률 조건에 부합하게 조정하여 수치해석에 적용하는 것이다.

$$k_{hp}=\frac{2}{3}k_h\left\{\ln(\frac{n}{s})+(\frac{k_h}{k_s})\ln(s)-\frac{3}{4}\right\} \tag{2.30}$$

교란영역의 고려는 연직배수공법 설계에 있어 매우 중요한 요소로 압밀도에 큰 영향을 미치는 인자이다. 하지만, Hird는 그림 2.14에 나타난 바와 같이 평면변형률 조건에서 압밀도를 산정할 때, 교란영역은 고려하지 않았다.

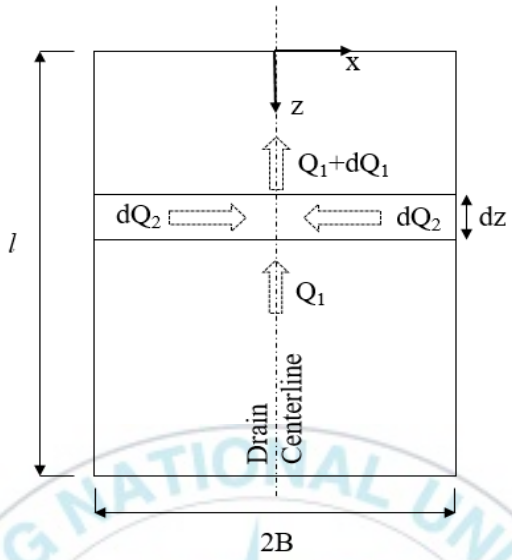



그림 2.14 2차원 평면변형률 조건의 Unit cell(Hird, 1992)

### 2.3.2 Indraratna's method

Indraratna(1997 and 2000)는 교란영역과 배수저항효과를 모두 고려한 2차원 평면변형률 해석기법을 제안하였다. 해당기법의 기반은 Hird(1992)의 기법과 마찬가지로, 식(2.21)에 제시된 Hansbo의 압밀도와 동일한 결과를 2차원 조건에서 얻을 수 있도록 등가의 투수계수를 산정하여 수치해석에 적용시키는 것이다. 이를 위해, Indraratna는 2차원 평면변형률 조건에서 압밀도 계산을 위한 해를 아래와 같이 유도하였다.

$$U_{hp} = 1 - \exp\left(\frac{-8T_{hp}}{F_p}\right) \tag{2.31}$$

$$F_p = \alpha + \beta\frac{k_{hp}}{k_{sp}} + \theta(2lz - z^2) \tag{2.32}$$

$$\alpha = \frac{2}{3}\frac{(n-s)^3}{n^2(n-1)} \tag{2.33}$$

$$\beta = \frac{2(s-1)}{n^2(n-1)}[n(n-s-1)+\frac{1}{3}(s^2+s+1)] \tag{2.34}$$

$$\theta = \frac{4k_{hp}}{3Bq_{\varphi}}\left(1-\frac{1}{n}\right)l^2 \tag{2.35}$$

식(2.33), 식(2.34) 및 식(2.35)에서 $\alpha,\beta$ 그리고 $\theta$는 각각 기하조건, 교란영역 그리고 배수저항효과를 반영하는 변수들이다.

식(2.21)과 식(2.31)을 동일하게 두면 다음과 같다.

$$U_{hp} = U_h \tag{2.36}$$

$$\frac{T_{hp}}{F_p} = \frac{T_h}{F} \quad \text{or} \quad \frac{C_{hp}t}{B^2F_p} = \frac{C_ht}{r_e^2F} \tag{2.37}$$

식(2.37)에서 폭(B)과 배수재의 등가반경($r_e$)을 같다고 가정하게 되면, 교란영역 및 배수저항효과를 모두 고려한 등가투수계수를 산정할 수 있다.

$$k_{hp} = \frac{k_h\left\{\alpha+\beta\frac{k_{hp}}{k_{sp}}+\theta(2lz-z^2)\right\}}{\left[\ln(\frac{n}{s})+(\frac{k_h}{k_s})\ln(s)-0.75+\pi(2lz-z^2)\frac{k_h}{q_w}\right]} \tag{2.38}$$

만약, 식(2.38)에서 배수저항효과를 무시하면 식(2.39)와 같이 교란영역만 고려된 등가투수계수를 산정할 수 있으며 교란영역도 무시한다면 식(2.40)와 같이 배수재의 영향반경만 고려된 식이 산정된다.

$$\frac{k_{sp}}{k_{hp}} = \frac{\beta}{\frac{k_{hp}}{k_h}\left[\ln(\frac{n}{s})+(\frac{k_h}{k_s})\ln(s)-0.75\right]-\alpha} \tag{2.39}$$

$$\frac{k_{hp}}{k_h} = \frac{0.67}{\ln(n) - 0.75} \tag{2.40}$$

하지만, 식(2.38)과 식(2.39)에는 미지수 2개($k_{hp}$, $k_{sp}$)가 포함되기 때문에 바로 이용할 수는 없다. 보통, 식(2.40)을 통해 불교란 영역의 등가수평투수계수($k_{hp}$)를 계산한 후, 식(2.38) 또는 식(2.39)에 대입하여 교란영역의 등가 수평투수계수($k_{sp}$)를 산정하여 수치해석에 이용한다. 실제, 위에 제시된 투수계수에 대한 식들이 수학적으로 완벽하지는 않지만 위 식들로부터 도출된 투수계수를 이용한 2차원 수치해석의 결과와 현장계측결과 및 3차원 수치해석결과와 비교해 볼 때 충분히 합리적인 결과를 도출하는 것으로 평가되었다.

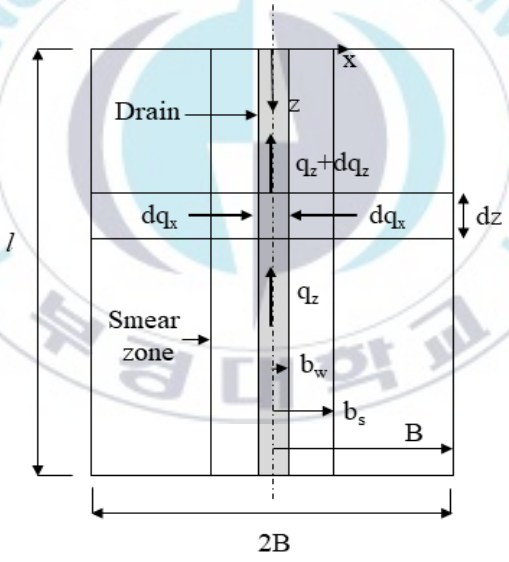



그림 2.15 2차원 평면변형률 조건의 Unit cell(Indraratna, 1997)

# 제3장 수치해석

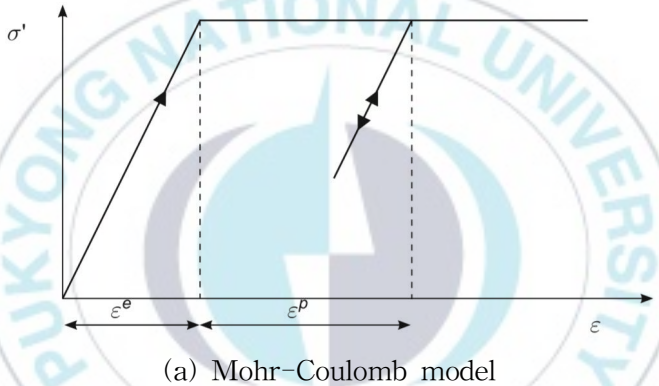
## 3.1 Plaxis 2D

유한요소 해석기법은 각종의 지반공학적 문제를 해결하기 위해 널리 이용되고 있다. 일반적으로, 압밀현상과 관련된 문제는 압밀이론의 한계성, 비선형 응력-변형률 거동, 토질정수의 불확실성 및 불균질성 등으로 인하여 이론적인 설계로 압밀거동을 정확히 묘사하기 힘든 실정이다. 특히, 대부분의 압밀관련 공법의 설계에 사용되는 Terzaghi의 1차원 압밀이론은 미소변위이론(Small displacement theory)에 기반을 두고 있으므로 선형의 응력-변형률 관계가 적용되기 때문에 압밀침하량 산정 및 침하속도 평가에 있어 다소 현실과는 다른 결과가 도출된다. 따라서 이론적인 설계의 대안으로 수치해석법이 사용될 수 있다. 적절한 해석모델 및 적합한 토질정수의 사용과 함께 이론적인 설계에서 고려하기 힘든 사항도 다룸으로써 유한요소해석은 합리적인 결과를 제공할 수 있다. 본 연구에서는 개별진공압밀공법의 수치해석을 위하여 2차원 유한요소해석 프로그램인 Plaxis 2D를 사용하였다.

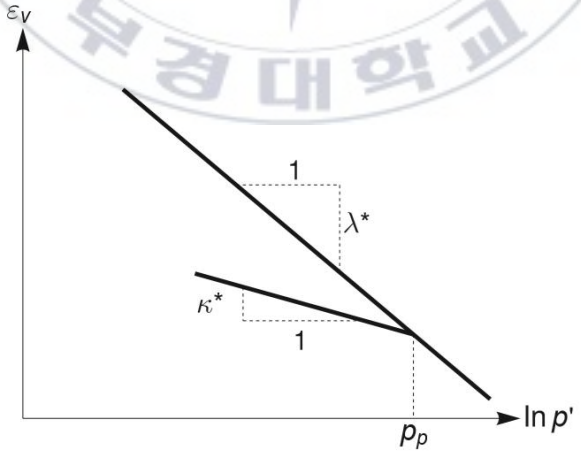
### 3.1.1 재료모델(Model) 및 요소(Element)

수치해석에 있어 가장 중요한 요소 중 하나는 적절한 재료모델을 선택하는 것이다. 즉, 지반거동을 정확하게 묘사하기 위해 적합한 구성모델(Constitutive model)을 설정하는 것이 수치해석의 신뢰성 향상을 위해 중요하다. Plaxis 2D는 여러 구성모델을 제공하고 있기 때문에 해석대상의 문제에 대하여 가장 적합한 모델을 선택해야 합리적인 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 압밀거동의 묘사를 위하여 연약지반에는 Soft-Soil 모델을 적용하였고 제방 및 연약지반 상부에 위치하는 매립층에 대해서는 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다. 각 모델의 특성은 그림 3.1과 같다. 유한요소 해석결과의 정확성에 큰 영향을 미

치는 또 하나의 인자는 요소이다. 수치해석의 결과인 변위 및 응력은 요소의 절점과 Gauss 적분점에서 계산되기 때문에 일반적으로 정확한 결과를 위하여 고차원 요소의 사용이 요구된다. Plaxis 2D는 축대칭 및 평면변형률 조건에 대하여 6절점과 15절점의 삼각형 요소를 제공한다. 그림 3.2와 같이 15절점 삼각형 요소는 4차항의 변위함수를 기반으로 하며, 12개의 Gauss 적분점을 제공하는 고차요소로, 보다 정밀한 해석결과를 기대할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 15절점의 삼각형 요소가 수치해석에 사용되었다.




(a) Mohr-Coulomb model




(b) Soft-Soil model

**그림 3.1 해석에 사용되는 재료모델(Plaxis 2D Material Manual, 2019)**

(a) 15절점 요소 (b) 12 가우스 적분점

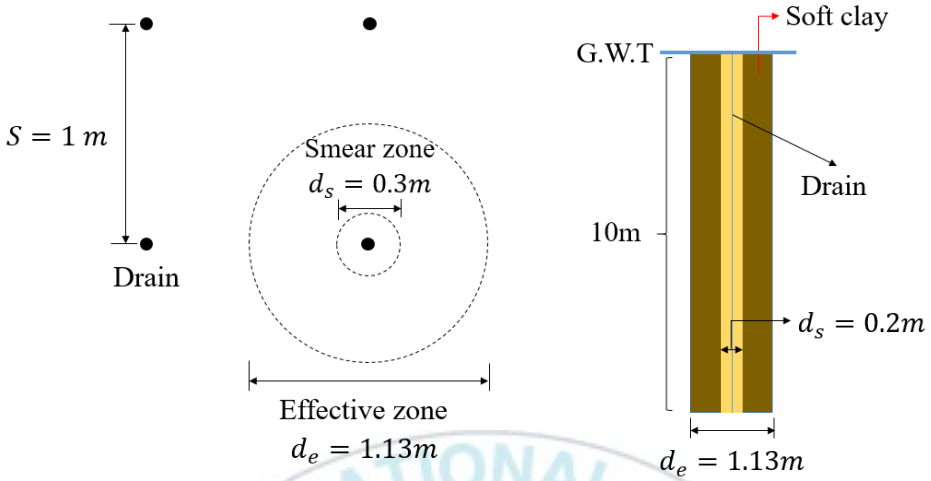
**그림 3.2 15절점 삼각형 요소(Plaxis 2D Reference Manual, 2019)**

## 3.2 Unit-cell 해석

과거 Plaxis 버전에는 진공압을 묘사할 수 있는 기능이 포함되어 있지 않아 진공압밀현상을 묘사할 수 없었으나 최신(2015 이후)버전에는 진공압 재현을 위해 필요한 기능들이 추가되어 진공압의 묘사가 가능해졌다. 본 연구에서는 Plaxis 2D(2019)를 이용하여 Unit-cell 문제를 모델링하고 수치해석결과의 분석과 함께 진공압밀현상의 묘사방법을 세부적으로 제시하고자 한다.

### 3.2.1 모델링

Plaxis 2D를 이용하여 개별진공압밀공법을 해석하기 위한 전 단계로 먼저 Unit-cell 해석을 통해 진공압의 재현 가능성을 평가하였다. Unit - cell 해석은 2차원 평면변형률 조건에서 수행하였으며 해석을 위한 기하조건은 그림 3.3과 같다. 수치해석 시 고려된 연직배수재의 특성과 모든 토질정수를 각각 표 3.1, 표 3.2에 제시하였다. 여기서, 수평투수계수는 연직투수계수의 3배를 적용하였고, 교란영역의 투수계수는 연직투수계수와 동일한 크기를 적용하였다(Hansbo, 1987). 또한, 2차원 평면변형률 해석을 위해 식(2.39) 및 식(2.40)으로부터 교란영역과 불교란 영역의 등가 투수계수를 산정하여 해석에 적용하였으며, 90 kPa의 진공압이 배수재의 전체 길이에 균등하게 적용될 수 있도록 모델링을 수행하였다.




(a) 평면도 (b) 단면도

그림 3.3 Unit-cell 해석에 사용된 기하조건

표 3.1 Unit-cell 해석에 적용된 Drain 특성

| Division | Value |
|---|---|
| Spacing(pattern) | $1.0\,m$ (square) |
| Diameter of effective zone of drainage | $1.13\,m$ |
| Dimension of drain | $100 \times 3\,mm^2$ |
| Diameter of smear zone | $200\,mm$ |
| Dimension of mandrel | $120 \times 60\,mm^2$ |

표 3.2 Unit-cell 해석에 적용된 토질정수

| Layer | Properties | Value |
|---|---|---|
| Clay (Soft Soil model) | $\gamma(kN/m^3)$ | 17.5 |
| | $\phi'(^\circ)$ | 25 |
| | $k_v(m/day)$ | $5.76 \times 10^{-5}$ |
| | $k_{hp}(m/day)$ | $5.10 \times 10^{-5}$ |
| | $k_{sp}(m/day)$ | $1.26 \times 10^{-5}$ |
| | $\lambda^*$ | 0.085 |
| | $\kappa^*$ | 0.017 |
| | OCR | 1.2 |
| | $e_0$ | 1.35 |

Plaxis를 이용하여 진공압밀의 해석을 수행할 때, 반드시 수행되어야 하는 사항은 아래와 같다.

1) Plaxis에서는 대기압이 고려되지 않기 때문에 Drain요소 내 전수두를 초기 설정된 지하수위 높이에서 진공압의 크기만큼 감소시킨 후 지하수 흐름계산을 통해 진공압을 재현한다.

2) Drain 요소의 전수두 감소 후 지하수위 흐름계산으로 인해 지하수위가 감소하게 되고 이에 따라 포화점토지반이 불포화상태로 변하게 되어 이후 수치해석 계산 단계에서는 불포화 단위중량이 해당지반의 단위중량으로 사용된다. 이는 수치해석상의 문제로 현실조건과는 다르기 때문에 그림 3.4와 같이 포화점토지반의 단위중량은 모두 포화단위중량으로 적용되어야 하며 그림 3.5와 같이 hydraulic 모델은 반드시 “saturated”로 지정되어야 한다.

그림 3.4 포화점토지반의 단위중량

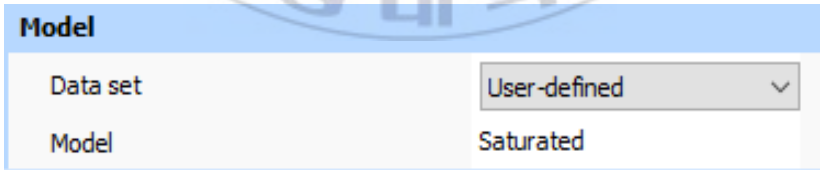



그림 3.5 Hydraulic model

3) 압밀 해석 시, 그림 3.6과 같이 Pore pressure calculation type은 반드시 “Steady state groundwater flow”로 설정되어야 하며, 그림 3.7과 같이 Deformation control parameters 부분의 “Ingnore suction” 기능이 해제되어야만 진공압의 묘사가 가능하다.

4) 진공압 재현을 위해 초기 지하수위 보다 작은 전수두가 Drain 요소에 적용되어야 한다. 이를 위해, 배수재의 거동은 “Vacuum”으로 설정되어야 한다.

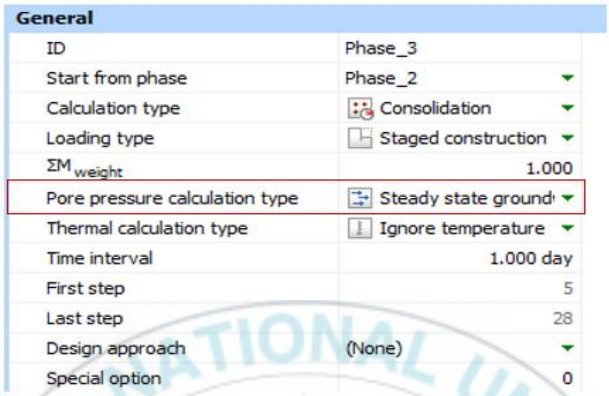



그림 3.6 Pore pressure calculation type

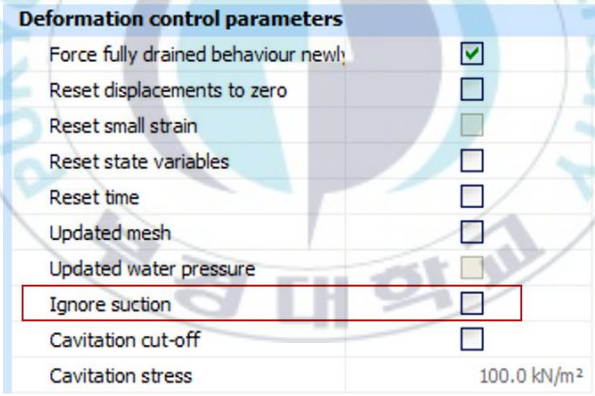



그림 3.7 Deformation control parameters

### 3.2.2 Unit-cell 해석결과

Plaxis를 통한 진공압 묘사의 타당성을 평가하기 위해 과잉간극수압의 생성 및 소산과정과 함께 시간에 따른 압밀침하량을 검토하였으며 초기상태 및 압밀완료 후의 간극수압과 유효응력의 분포를 분석하였다. 여기서 과잉간극수압은 점토지반 상부에 하중을 작용시킴으로써 발생하는 수압의 의미가 아님을

밝힌다. 앞서 전술한 바와 같이, 진공압밀공법은 과잉간극수압을 유발시켜 압밀을 유도하는 공법이 아니므로 해당용어에 대하여 혼동이 있을 수 있으므로 해당 내용에 대한 설명을 하고자 한다.

Plaxis에서 압밀이라는 현상을 묘사하기 위해서는 연직배수공법이든 진공압밀공법이든 반드시 과잉간극수압의 생성과 소산이 동반되어야 한다. 앞서 논의한 바와 같이, Plaxis에서 진공압을 재현하기 위해 진공압의 크기(90 kPa)만큼 Drain요소의 수두(-9 m)를 감소시킨 후 흐름계산을 수행하면 진공압밀현상의 묘사를 위해 과잉간극수압이 생성된다.

그림 3.8과 같이 Drain요소 내부의 전수두를 감소시킨 후 흐름계산을 수행하게 되면 지하수위가 0 m에 -9 m로 감소하게 되는데 이로 인해 지반 내 임의의 위치(A)의 압력수두에 변화가 발생한다. 즉, A점의 초기 압력수두는 -5 m이지만, 흐름계산 수행 후 A점의 압력수두는 4 m로 총 9 m에 해당하는 압력수두의 변화가 발생한다. 그 결과, 9 m의 압력수두 변화량이 과잉간극수압의 항으로 나타나는 것이다. 이렇게 발생한 과잉간극수압이 시간에 따라 소산되면서 진공압밀현상이 재현되는 것이다. 또한, 흐름계산 결과 그림 3.9와 같이 원지반($h_B = 0m$)과 배수재($h_A = -9m$)간의 수두차이가 나타남을 확인할 수 있다.

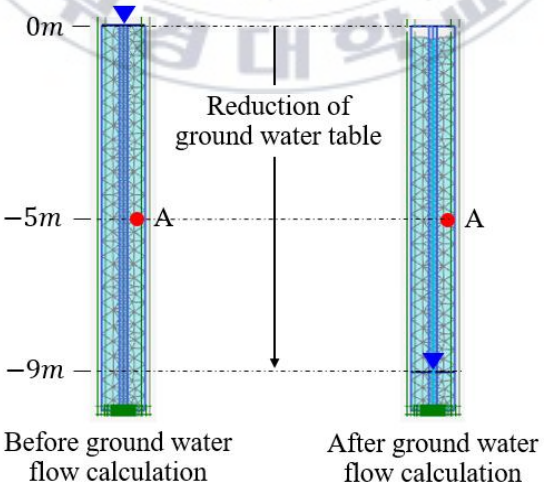



그림 3.8 흐름계산에 따른 지하수위 감소

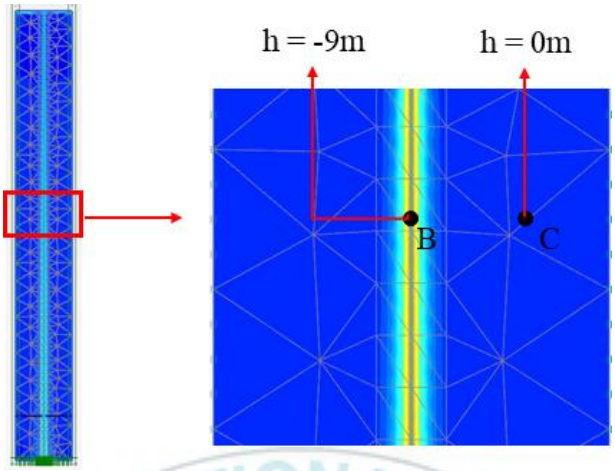



그림 3.9 배수재와 원지반간의 수두차이

흐름계산에 따라 발생한 과잉간극수압의 분포는 그림 3.10과 같고 표 3.3은 $x = 0.01m$ 위치에서 깊이별 과잉간극수압의 크기를 나타낸다. 모든 깊이에서 90 kPa에 상응하는 과잉간극수압이 유발되었고 최상부 경계에는 배수조건에 대하여 Open Boundary가 설정되었기 때문에 $y = 0m$에서 과잉간극수압은 0 kPa이다. 그림 3.11 및 그림 3.12는 시간에 따른 압밀침하량과 과잉간극수압의 소산을 나타내며 재하성토를 하지 않고도 압밀이 진행됨을 확인할 수 있다.

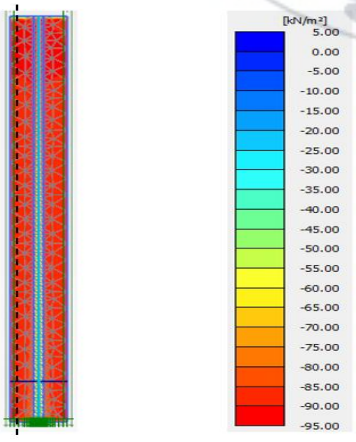



그림 3.10 과잉간극수압 분포

표 3.3 과잉간극수압 분포(x = 0.01 m)

| $y(m)$ | $\Delta u(kPa)$ |
|---|---|
| 0.0 | 0.0 |
| -1.2 | -90.30 |
| -2.0 | -89.75 |
| -4.0 | -89.64 |
| -6.0 | -89.55 |
| -8.0 | -89.36 |
| -10.0 | -90.67 |

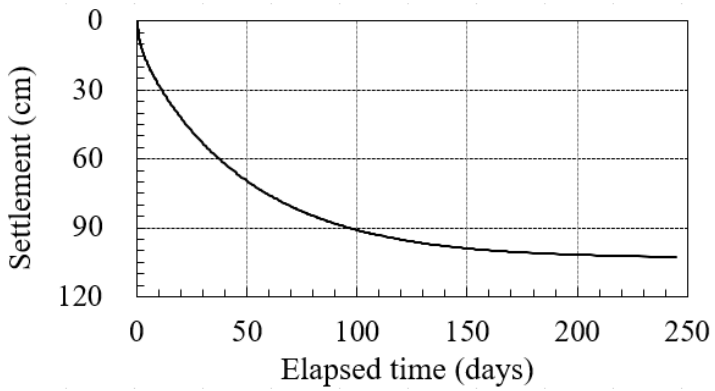



그림 3.11 시간경과에 따른 압밀침하량

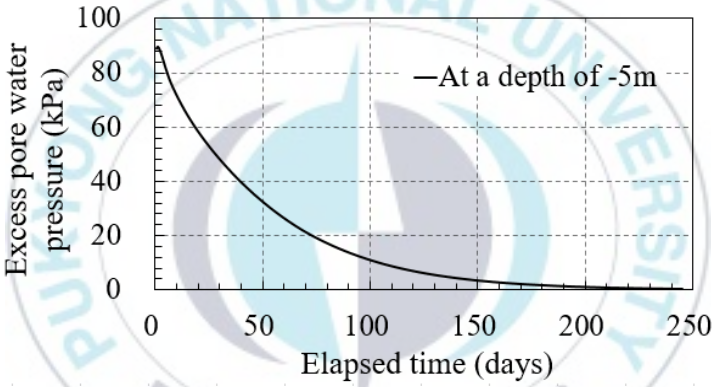



그림 3.12 시간경과에 따른 과잉간극수압의 소산

2장(그림 2.9)에서 논의된 바와 같이 진공압밀공법에서는 압밀이 진행됨에 따라 간극수압이 감소하게 된다. 하지만, Plaxis에서는 압밀이라는 현상을 묘사하기 위해 의도적으로 과잉간극수압을 발생시키기 때문에 진공압밀의 진행과 함께 간극수압의 변화를 정확히 예측할 수 있는지에 대한 의문이 들 수 있다. 결론적으로, 진공압밀에 따른 간극수압의 감소현상은 정확히 묘사된다. Plaxis에서 간극수압은 아래와 같이 계산되며, 모든 압력은 ( - )부호로 나타난다.

$$P_{water} = P_{steady} + P_{excess} \quad (3.1)$$

식(3.1)에서 $P_{steady}$는 정상흐름 상태 또는 정수압 상태에서의 수압을 의미한

다. 그림 3.13은 $P_{steady}$의 계산 원리를 나타내며, 그림 3.14는 Drain 요소의 전수두 감소 후 흐름계산에 의해 발생된 $P_{water}$의 분포를 나타낸다. 그림 3.13에서 지하수위가 0 m에 존재할 때 A점의 초기 $P_{steady}$의 크기는 -50 kPa이고, $P_{excess}$의 크기는 0 kPa로 간극수압 $P_{water}$의 크기는 -50 kPa이다. 반면, 지하수위가 흐름계산에 의해 -9 m로 감소된 후 $P_{steady}$의 크기는 40 kPa이 되며 $P_{excess}$의 크기는 -90 kPa로 간극수압 $P_{water}$의 크기는 -50 kPa이 된다. 즉, 흐름계산 후 발생하는 과잉간극수압에 의해 간극수압이 증가하지 않으며 그림 3.14와 같이 간극수압의 분포는 과잉간극수압 발생 전후로 동일하다.

그림 3.15는 -2 m 지점에서 측정된 시간에 따른 간극수압의 변화를 나타낸다. 실제, 진공압밀현상에 따른 간극수압 변화와 같이 시간에 따라 간극수압이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

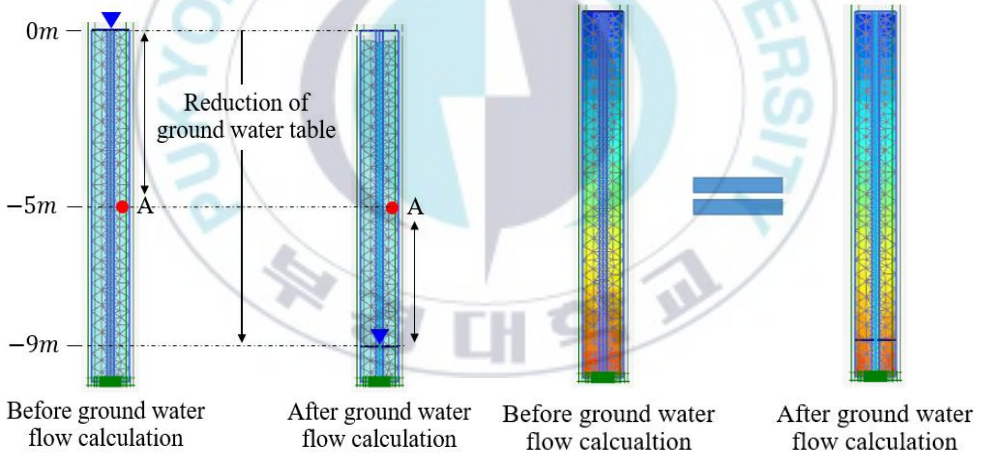



그림 3.13 $P_{steady}$의 계산

그림 3.14 $P_{water}$의 분포

그림 3.16 및 그림 3.17은 압밀이 완료된 후의 간극수압과 유효응력의 깊이별 분포를 초기상태와 비교한 결과를 나타낸다. 실제, 진공압밀현상에 따른 응력변화 관계와 같은 결과를 확인할 수 있으며 진공압밀거동을 정확히 재현할 수 있음을 나타낸다. 단, Plaxis에서는 모든 압력은 (-)부호를 기준으로 나타내기 때문에, 간극수압 및 유효응력 분포의 방향성에 주의하여야 한다.

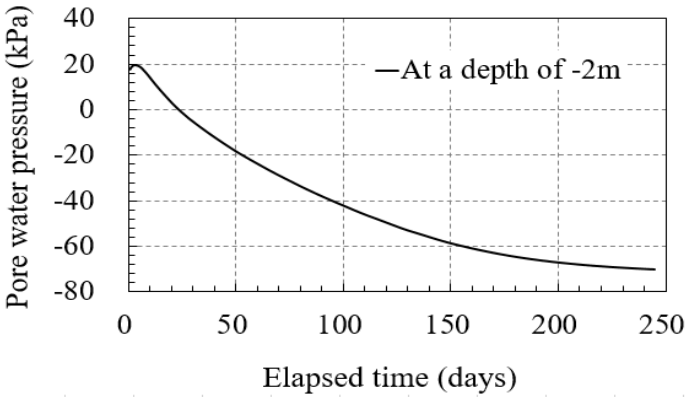



그림 3.15 시간경과에 따른 간극수압의 변화

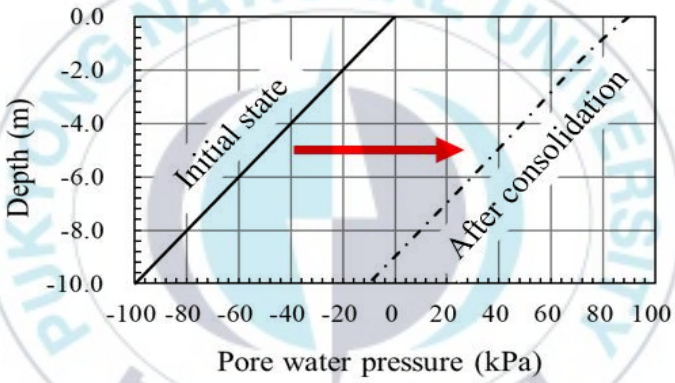



그림 3.16 진공압밀에 따른 간극수압의 감소

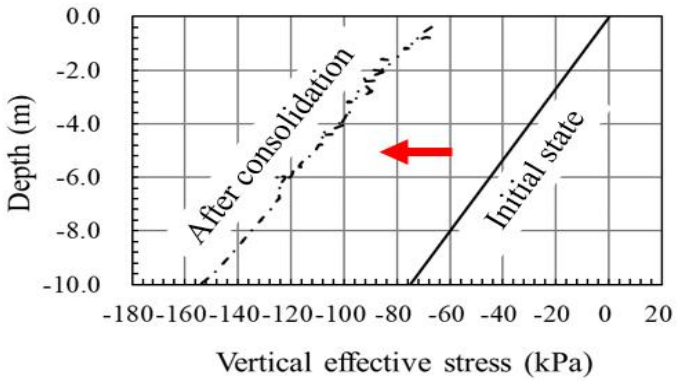



그림 3.17 진공압밀에 따른 유효응력의 증가

## 3.3 사례연구

현재까지 연직배수공법 및 진공압밀공법의 수치해석 타당성 검토를 위해 현장계측결과와 수치해석결과의 비교·분석을 통한 사례연구는 다양하게 이루어졌다. 하지만, 개별진공압밀공법이 적용된 현장의 계측결과를 바탕으로 수행된 수치해석의 타당성 검토 사례는 쉽게 찾아볼 수 없고, 또한 진공압밀공법의 수치해석을 위해 Plaxis 2D가 이용된 사례는 매우 드문 수준이다.

본 절에서는 실제 개별진공압밀공법이 적용된 현장의 계측결과와 수치해석결과의 비교·분석을 통하여 수치해석의 타당성을 검토하고 개별진공압밀공법이 적용된 연약지반의 압밀거동 예측을 위한 Plaxis 2D의 사용가능성을 제시하고자 한다.

### 3.3.1 과업개요

전라남도 여수시에 위치한 국가산업단지에 건설될 석유화학 플랜트의 부지조성을 위한 지반개량공사로 개별진공압밀공법이 적용되었다. 그림 3.18은 본 공사현장의 위치를 나타내며, 해당 기초지반은 연약한 해안 매립지반으로 구성되어 있다. 총 부지면적은 6820 $m^2$이며, 공사기간은 총 7개월로 연약지반 개량공사부터 계측조사 및 지반개량평가를 위한 확인조사 까지 수행되었다.

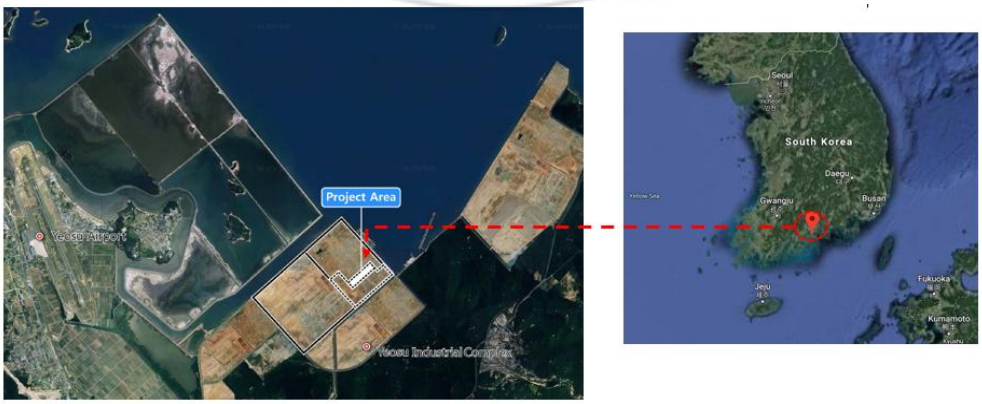



그림 3.18 과업위치(Google)

### 3.3.2 과업현황

기초지반의 토질특성 평가를 위하여 그림 3.19와 같이 여러 지반조사가 수행되었다. 파란 점섬으로 표시된 영역은 개별진공압밀공법이 적용된 본 공사현장으로, 총 3구역으로 구분되었고, SPT 및 CPT 시험이 수행되었다.

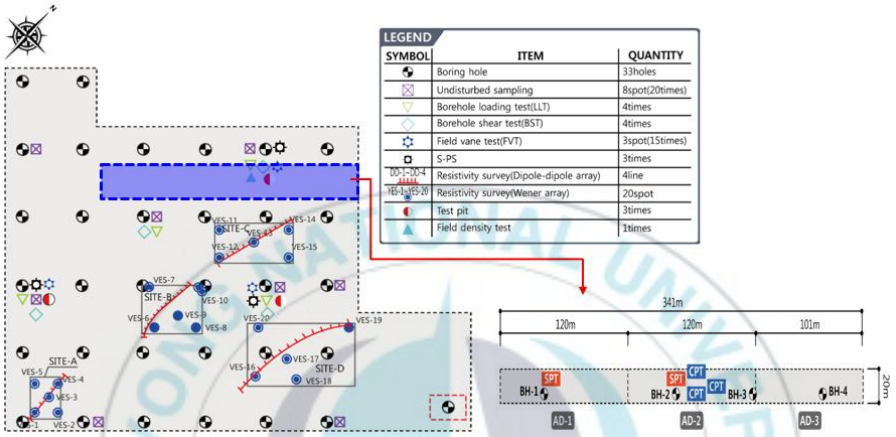



그림 3.19 지반조사 평면도(동아지질, 2019)

그림 3.20은 본 공사현장의 지층단면도를 나타낸다. 최상부 층에는 평균 2.5 m 두께의 매립층이 분포하고 있으며 주로 모래질 자갈로 구성되어 있다. 그 아래로 14.8 m ~ 19.4 m 두께의 두꺼운 실트질 점토층이 존재하고 있고, 실트질 점토층의 N치는 0으로 기록되어 개량이 필요한 연약지반임을 알 수 있다. 또한, 실트질 점토층 하부에는 점토질 자갈층이 얇게 분포하여 배수경계를 이루고 있으며, 최하층에는 풍화암층이 분포하는 것으로 나타났다. 시추조사 후 채취된 실트질 점토의 불교란 시료를 이용하여 실내토질시험을 수행하였고, 표 3.4에 시험결과를 제시하였다. 통일분류법에 따르면 실트질 점토는 고소성의 점토(CH)로 분류되었으며 비배수 전단강도는 30 kPa 이하로 매우 연약하고 압축성이 큰 연약점토로 판정되었다. 따라서, 석유화학 플랜트를 건설하기 위해 지반개량공사가 필수적으로 요구되었으며 개별진공압밀공법이 채택되어 성공적으로 지반개량이 이루어졌다.

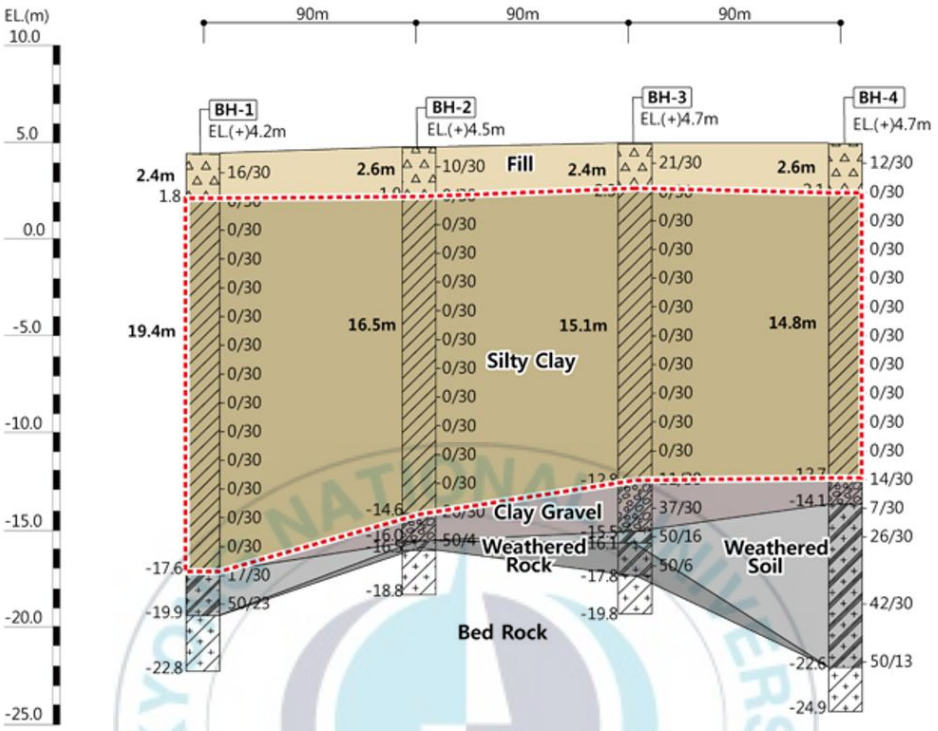
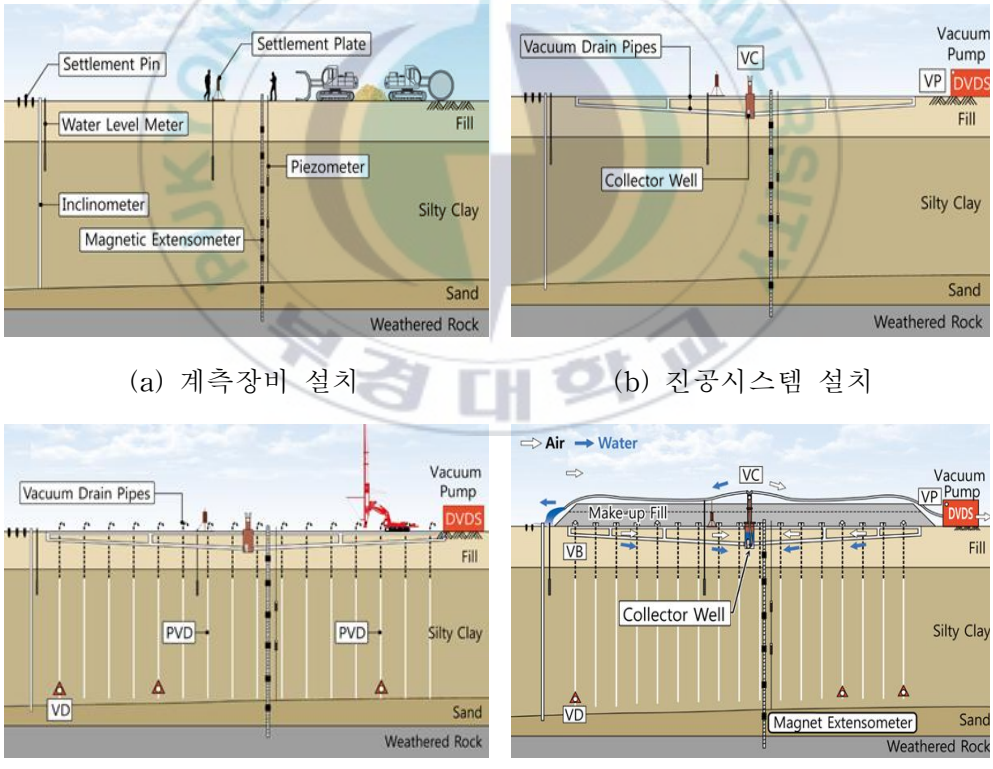



그림 3.20 지층단면도(동아지질, 2019)

표 3.4 실트질 점토의 토질특성

| Properties | Values |
|---|---|
| USCS | CH |
| Natural water content, $w_n$ | 52.6% ~ 75.7% |
| Initial void ratio, $e_0$ | 1.49 ~ 2.09 |
| Liquid limit, LL | 66.4% ~ 93.2% |
| Plasticity index, PI | 40.1% ~ 63.2% |
| Compression index, $C_c$ | 0.50 ~ 0.88 |
| Undrained shear strength, $S_u$ | $< 30\,kPa$ |
| OCR | 0.87 ~ 1.62 |

개별진공압밀시스템은 기존의 진공압밀시스템과 차이가 있기 때문에, 전체적인 시공개요에 큰 차이점이 있다. 그림 3.21은 개별진공압밀시스템의 구축을 위한 전체적인 시공순서를 나타낸다. 먼저, 부지정지 후 계측조사를 위해 필요한 각종 계측장비가 해당 위치에 설치된다. 이후, 진공시스템 적용에 가장 중요한 요소인 진공펌프, Collector well, 진공배수관이 설치된다. 그 다음, 정해진 패턴과 간격으로 연직배수재를 연약지반 하부까지 설치하고 상부의 진공배수관과 연결시킨다. 마지막으로, 최종 계획고를 맞추기 위하여 침하보충토를 성토함으로써 전반적인 작업은 마무리된다. 이후, 현장계측과 함께 진공시스템을 가동함으로써 연약지반의 압밀을 유도하여 지반개량이 이루어진다.




(a) 계측장비 설치 (b) 진공시스템 설치

(c) 연직배수재 설치 (d) 침하보충토 성토

**그림 3.21 개별진공압밀공법의 시공개요(동아지질, 2019)**

연직배수재 설치를 완료한 후 진공시스템의 가동성을 평가하기 위하여 침하보충토 성토 이전에 약 3주 정도 시험 가동을 실시하였다. 이후, 그림 3.22와 같이 총 3 m의 침하보충토가 성토되었고, 약 6개월 동안 진공시스템이 가동되었다. 표 3.5는 본 공사에 적용된 연직배수재의 특성 및 교란영역 고려를 위한 특성치를 나타낸다. 교란영역의 크기 및 투수계수를 설정하기 위해, Hansbo (1987)가 제시한 결과를 이용하여, $d_s/d_m = 2$ 와 $k_s/k_v = 1$을 적용하였다.

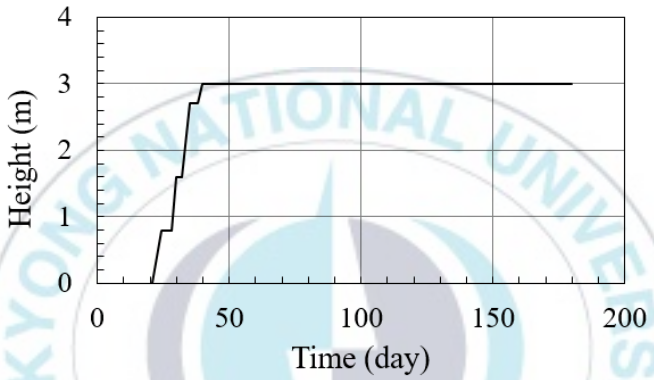



그림 3.22 침하보충토 성토 및 진공시스템 가동 기간

표 3.5 연직배수재의 특성 및 교란영역 고려를 위한 특성치

| Division | Value |
|---|---|
| Spacing, $S$ | $0.9\,m$ |
| Pattern | Triangle |
| Diameter of effective zone of drainage, $d_e$ | $0.945\,m$ |
| Diameter of mandrel, $d_m$ | $0.15\,m$ |
| Equivalent diameter of PVD, $d_w$ | $0.05\,m$ |
| $d_s/d_m$ | 2 |
| $k_h/k_s$ | 2 |
| $n$ | 18.9 |
| $s$ | 6 |

### 3.3.3 계측결과

본 과업의 공사기간은 총 7개월로 약 180일간 진공배수 시스템을 가동하여 지반개량을 완료하였다. 개별진공압밀공법의 개량효과를 평가하기 위하여 아래의 총 5가지 항목에 대하여 검토하였다.

1) 개량기간 중 $90kPa$ 이상의 진공압 유지 여부
2) 공사기간 내 목표침하량의 달성 여부
3) 간극수압의 변화 양상
4) 횡방향변위의 분포 특성
5) 지반개량 여부

그림 3.23은 압밀완료 후 개량효과 평가를 위해 실시한 현장시험 및 현장계측 위치를 나타내며, BH-1과 BH-2 시추공에서 불교란시료를 채취하여 개량 전후의 토질특성의 개선여부를 평가하기 위하여 실내토질시험을 실시하였다.

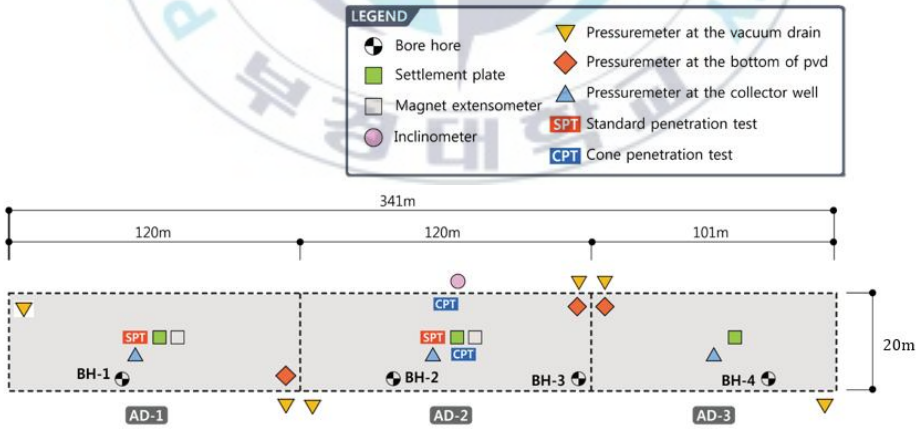



**그림 3.23 현장계측 및 현장시험조사 위치(동아지질, 2019)**

진공압은 한 구역당 총 4곳(진공펌프, Collector well, 진공배수관, 연직배수재 하부)에서 측정되었다. 그림 3.24부터 그림 3.27까지는 개량기간 동안 측정된

진공압의 변화를 나타낸다. 진공압 계측결과에 의하면 개량기간 동안 진공압의 큰 손실이 발생되지 않았고 90 kPa 이상의 압력이 지속적으로 유지되고 있음을 확인하였다. 과거 진공압밀시스템의 큰 문제 중 하나였던 진공압의 지속적인 유지의 어려움이 본 시스템의 도입을 통해 충분히 개선될 수 있음이 확인되었다.

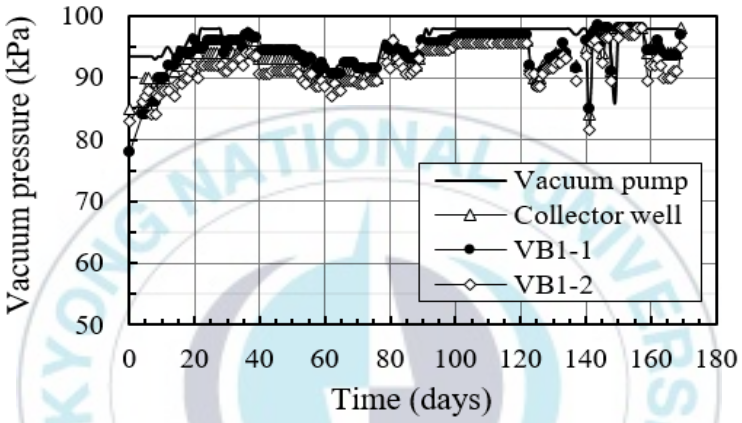



그림 3.24 AD1 구역의 진공압 분포

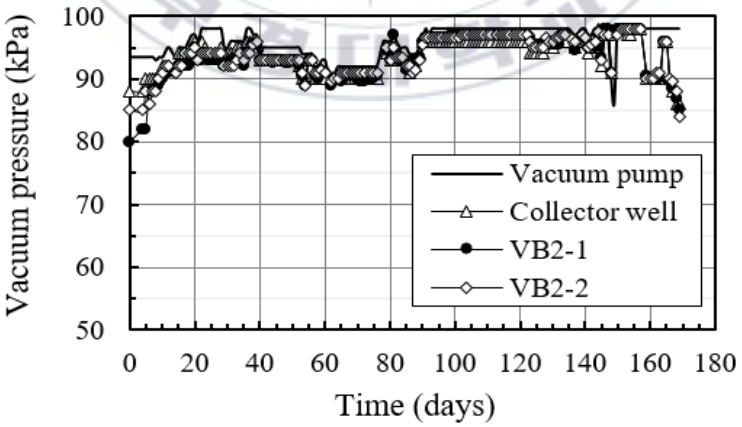



그림 3.25 AD2 구역의 진공압 분포

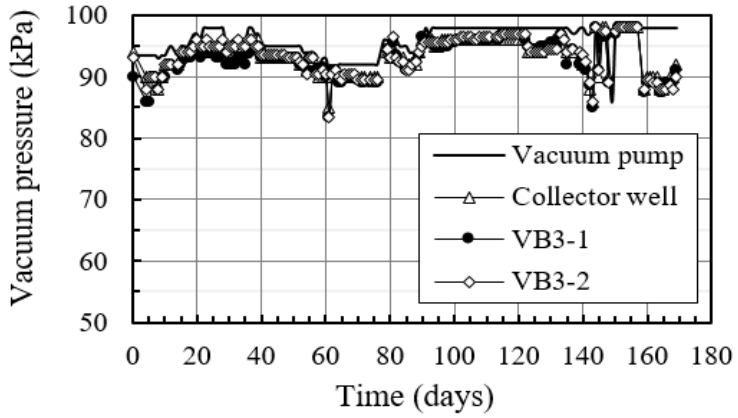



그림 3.26 AD3 구역의 진공압 분포

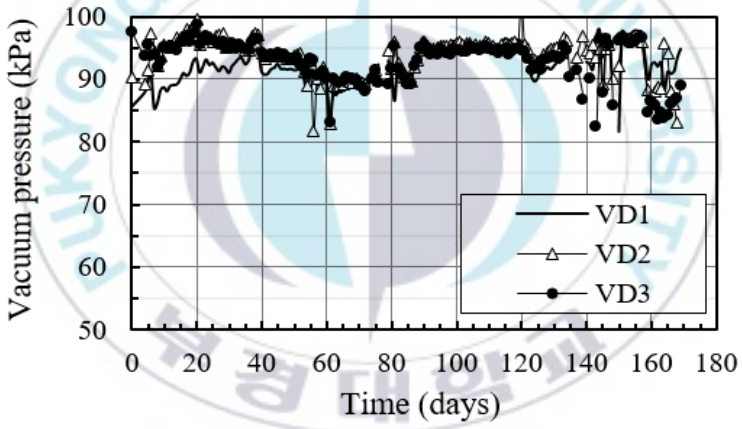



그림 3.27 연직배수재 하부의 진공압 분포

그림 3.28 및 그림 3.29는 시간에 따른 압밀침하량의 변화를 보여준다. 초기 설계단계 시 개량기간(7개월) 내 150 cm의 침하량을 목표침하량으로 설정하였다. 하지만, 계측결과 약 5개월 만에 목표침하량에 도달하였다. 개량기간 동안 진공압의 큰 손실이 발생되지 않고 90 kPa 이상의 압력이 지속적으로 적용된 결과로 판단된다. 따라서, 본 진공시스템의 적용이 공사기간 단축에도 효과가 있음이 확인되었다.

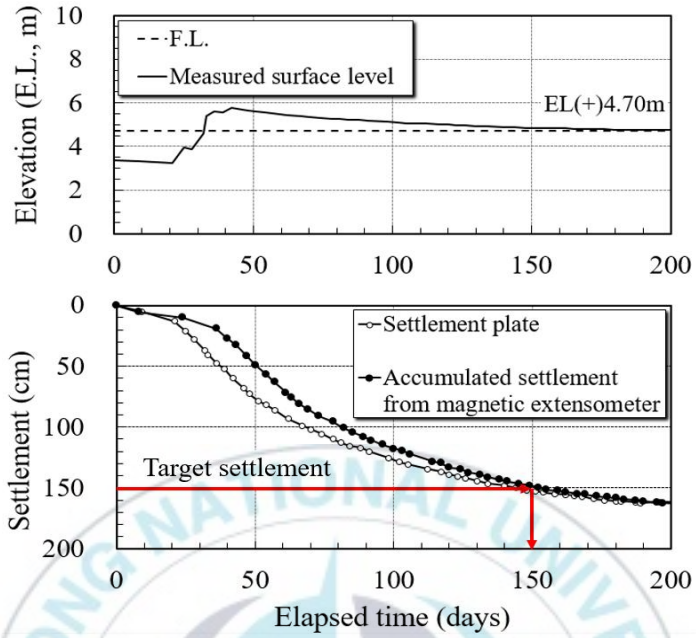



그림 3.28 AD1 구역의 시간에 따른 압밀침하량

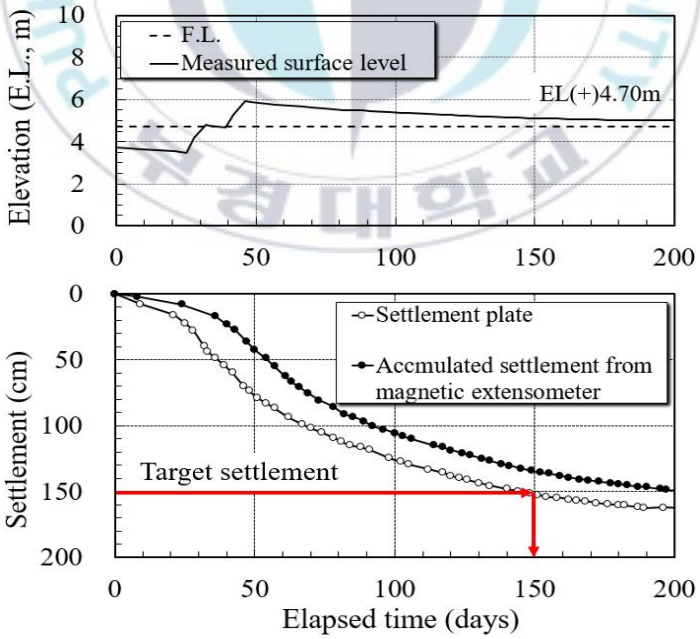



그림 3.29 AD2 구역의 시간에 따른 압밀침하량

재하성토를 함으로써 발생하는 과잉간극수압의 소산으로 압밀이 진행되는 기존의 연직배수공법과 진공압을 적용시켜 압밀을 유도하는 진공압밀공법의 가장 큰 차이점은 압밀에 따른 응력변화관계와 횡방향 변위의 방향성이다. 2장에서 논의된 바와 같이, 진공압에 의한 압밀현상에서는 초기 간극수압이 시간에 따라 감소하게 되고, 수압의 감소 분 만큼 유효응력이 증가되어 지반개량이 이루어진다고 하였다. 그림 3.30은 시간에 따른 간극수압의 변화를 나타낸다. 지반개량 초기단계에 침하보충토의 성토로 인하여 간극수압이 상승했지만, 그 이후 압밀이 진행됨에 따라 간극수압은 점차 감소하여, 최종적으로 초기 정수압보다 작은 간극수압이 측정되었다. 그림 3.31은 지중경사계로부터 측정된 시간경과에 따른 지반의 횡방향 변위의 변화를 나타낸다. 초기 진공압의 적용단계에서는 연약지반 전 깊이에 내측방향의 횡변위가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이후, 3 m 높이의 침하보충토를 단기간에 성토함으로써, 하부 실트질 점토층에서는 외측방향의 횡변위가 발생되었지만, 상부 매립층에서는 계속하여 내측방향의 횡변위가 발생하였다. 급속성토에 의해 발생하는 외측방향의 횡방향 변위는 개량구역 주위에 위치하는 지하구조물에 유해한 영향을 미칠 수 있기 때문에, 지속적인 계측조사가 필요하며, 주의를 기울여야 한다.

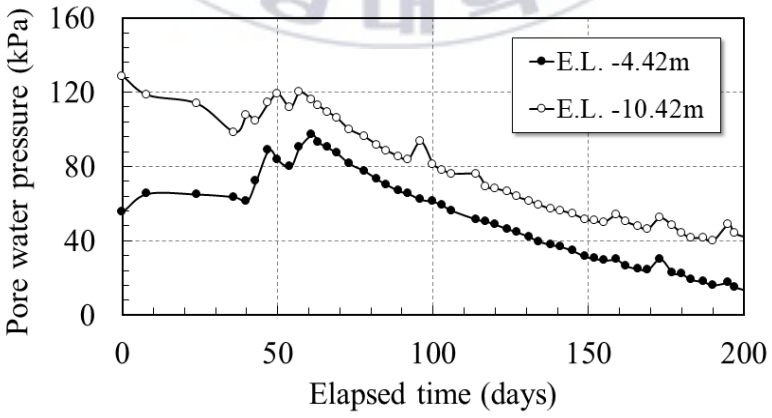



그림 3.30 시간에 따른 간극수압의 변화

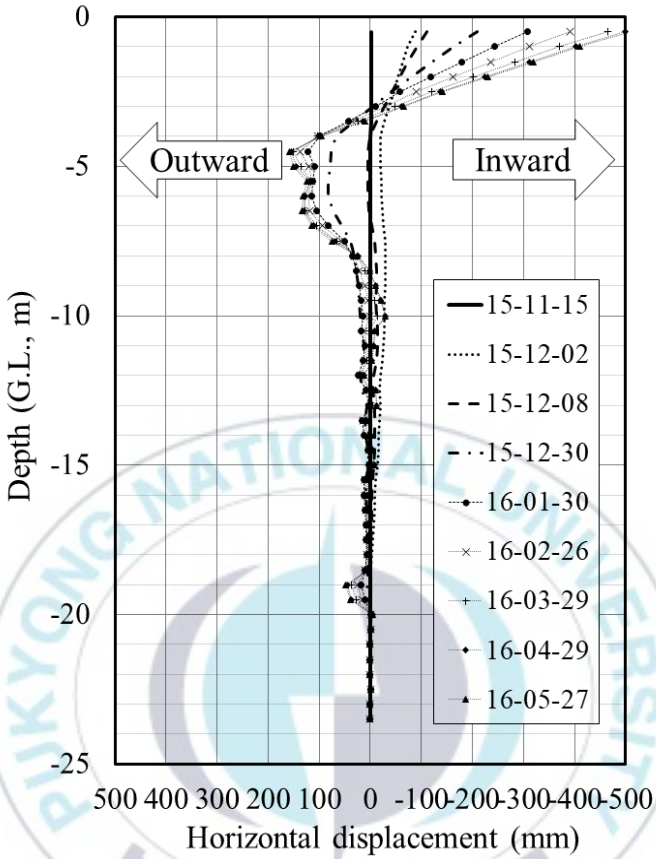


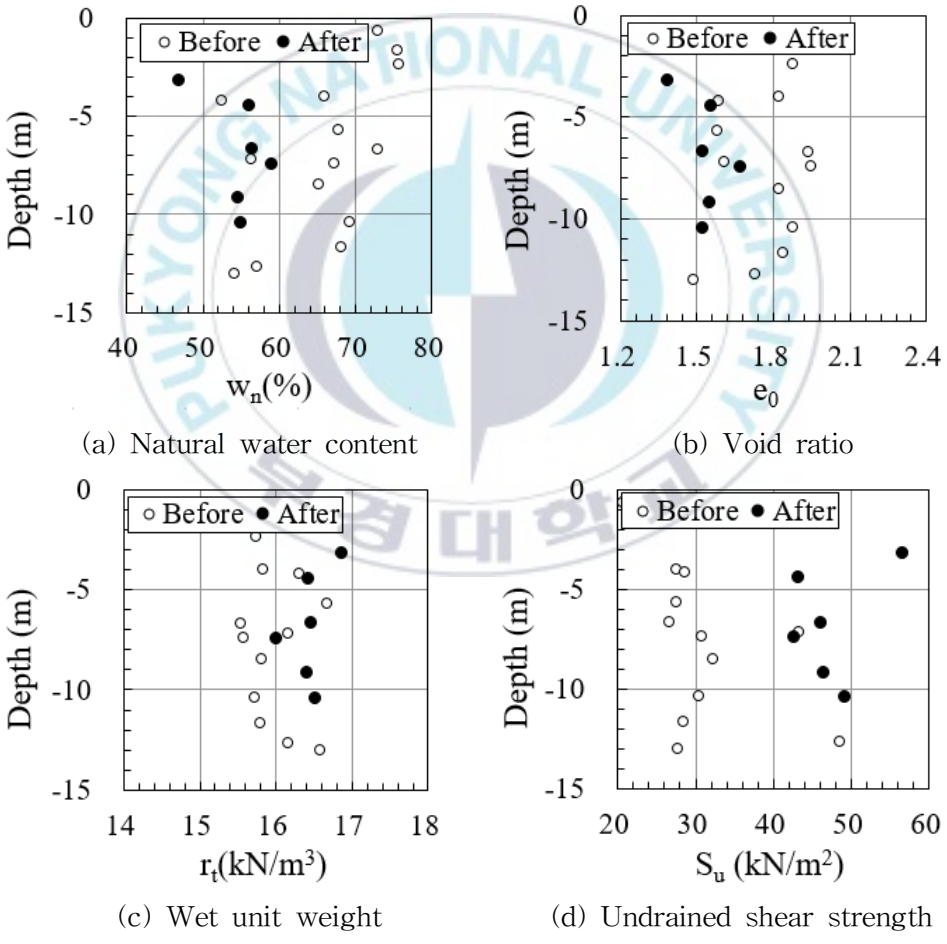

그림 3.31 횡방향 변위의 분포특성

압밀 종료 후 연약지반의 개량여부에 대한 평가를 위해 실내토질시험 및 콘 관입 시험을 수행하였다. 그림 3.32는 실내시험으로부터 얻은 총 4개 항목의 결과를 보여준다. 함수비 및 간극비는 지반개량 이후 감소하였고 단위중량 및 비배수전단강도는 증가한 것으로 나타나 모든 토질특성이 개선된 것으로 확인되었다. 그림 3.33은 콘관입시험을 통해 측정된 콘 저항치로부터 계산한 비배수전단강도를 나타낸다. 개량 이후 연약지반의 비배수 전단강도가 크게 증가하였음을 확인할 수 있다. 현장계측결과와 실내토질시험의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 개별진공압밀시스템의 도입으로 90 kPa 이상의 진공압이 유지될 수 있고 Air-water separation 시스템은 진공압의 감소를 방지할 수 있다.

2) 침하보충토의 급속성토는 외측방향의 횡변위를 유발하여 개량지반 주위의 지하구조물에 유해한 영향을 미칠 수 있다.

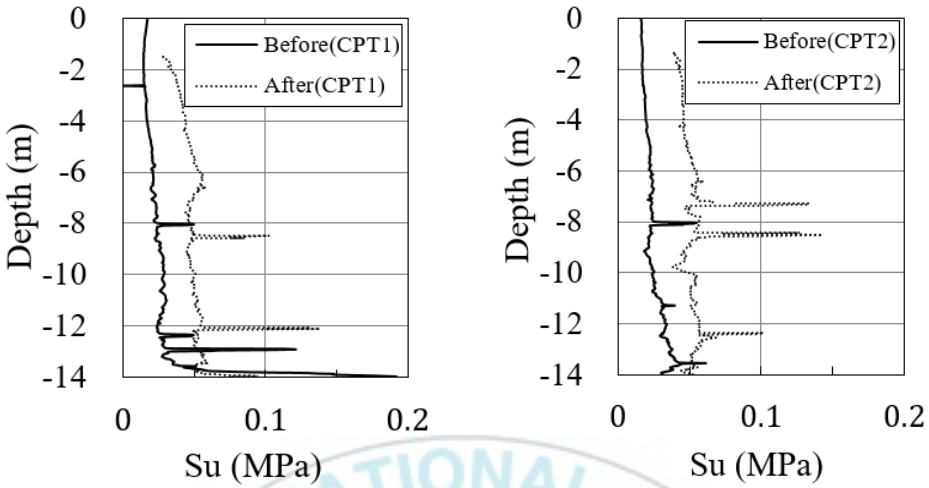
3) 개별진공압밀시스템의 적용으로 연약지반의 불량한 토질특성을 상당히 개선 시킬 수 있다.




(a) Natural water content (b) Void ratio

(c) Wet unit weight (d) Undrained shear strength

그림 3.32 지반개량 전후의 토질특성




(a) AD1 (b) AD2

**그림 3.33 콘 관입시험 결과**

## 3.4 Multi-drain 해석

Unit-cell 해석은 제방 중심 하부에 위치하는 지반의 압밀거동을 묘사할 뿐, 제방 및 기초지반의 횡방향 변위와 같은 전체적인 지반거동은 Unit-cell 해석으로는 묘사가 불가능하다. 연직배수재의 설치간격 및 제방의 사면을 고려한 실제 단면형상과 전체적인 지반거동을 묘사하기 위해서는 Multi-drain 해석이 요구된다. Multi-drain 해석을 수행하기 위해 3.3절에 제시된 실제 시공사례를 모델링하여 현장계측결과와 수치해석결과를 비교·분석하였다.

### 3.4.1 해석조건

수치해석을 위한 단면형상을 그림 3.20에 제시된 지층단면도와 실내시험결과를 이용하여 그림 3.34와 같이 설정하였다. 그림 3.34에서 실트질 점토층은 OCR값 기준으로 2개의 층으로 분할하였고, 최하부 층은 자갈 및 풍화암 층으로써 견고한 지반으로 판단되어 모델링에서 제외하였다.

수치해석을 위한 지반 물성치는 실내시험조사 결과를 바탕으로 설정하였으며

표 3.6에 제시하였다. 일반적으로 표준압밀시험으로 부터 압밀해석에 필요한 토질정수를 산정하지만 시료의 교란, 실험의 한계성 등의 문제로 표준압밀시험을 통해 산정된 토질정수는 현장조건을 정확히 반영하지 못한다. 따라서, 본 연구에서는 수치해석결과의 정확성과 합리적인 압밀거동 예측을 위하여 아래 두 가지 사항을 고려하였다.

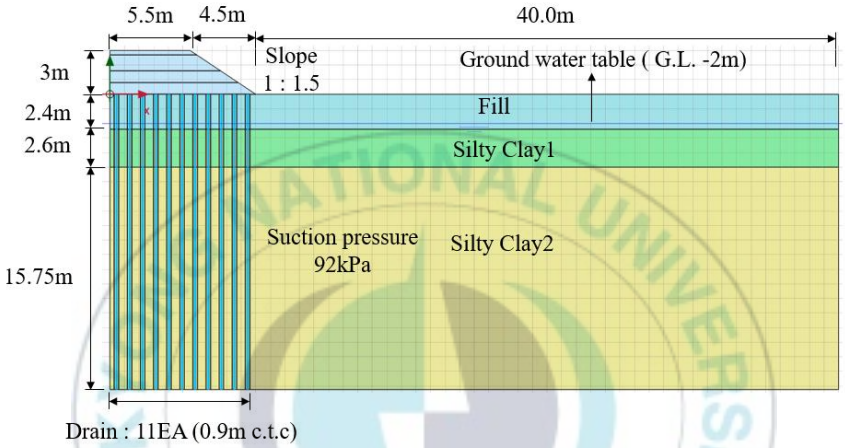



그림 3.34 Multi-drain 해석을 위한 단면형상

1) 시료교란을 고려하기 위한 실험실 압축지수의 수정(Schmertmann, 1953)

2) Root-t 법으로 산정된 투수계수의 이용(Yong, 1985)

Schmertmann이 제시한 유효응력-간극비 곡선의 수정법에 따라 실험실 압축지수 대신 현장압축지수를 산정하여 해석에 적용하였다. Silty clay1 및 Silty clay2 층의 실험실 압축지수는 각각 0.82, 0.71 였으며, 현장압축지수는 각각 0.92, 0.84로 산정되었다. 또한, Log-t법으로 산정된 투수계수는 일반적으로 Root-t법으로 산정된 투수계수 및 실제 투수계수 보다 작으므로, 침하속도 평가에 대하여 보수적인 결과를 초래할 수 있어 Root-t법으로 산정된 값을 수치해석에 사용하였다. 여기서, 수평투수계수는 연직투수계수의 2배를 적용하였고 교란영역의 투수계수는 연직투수계수와 동일한 크기를 적용하였다. 또한, 2차

원 평면변형률 해석을 수행하기 위해, 식 (2.51) 및 식 (2.52)를 사용하여 불교란영역과 교란영역에 대한 등가투수계수를 산정하였고, 그림 3.24부터 그림 3.27에 제시된 진공압의 계측결과에 따라 92 kPa의 진공압이 적용되도록 모델링을 하였다. 연직배수재의 설치간격 및 특성은 표 3.5에 제시된 바와 같다.

**표 3.6 Multi-drain 해석에 적용된 토질정수**

| Layer | Properties | Value |
|---|---|---|
| Fill and Make-up fill (MC model) | $\gamma(kN/m^3)$ | 18 |
| | $\phi'(^\circ)$ | 27 |
| | $E(kPa)$ | 30000 |
| | $\nu$ | 0.3 |
| | $k(m/day)$ | 0.86 |
| Silty Clay1 (SS model) | $\gamma(kN/m^3)$ | 15.5 |
| | $c'(kN/m^2)$ | 2 |
| | $\phi'(^\circ)$ | 25 |
| | $k_v(m/day)$ | $2.19\times10^{-5}$ |
| | $k_{hp}(m/day)$ | $1.20\times10^{-5}$ |
| | $k_{sp}(m/day)$ | $5.20\times10^{-6}$ |
| | $e_0$ | 1.97 |
| | $C_c$ | 0.92 |
| | $C_s$ | 0.18 |
| | $OCR$ | 1.5 |
| Silty Clay2 (SS model) | $\gamma(kN/m^3)$ | 16 |
| | $c'(kN/m^2)$ | 0 |
| | $\phi'(^\circ)$ | 25 |
| | $k_v(m/day)$ | $2.19\times10^{-5}$ |
| | $k_{hp}(m/day)$ | $1.20\times10^{-5}$ |
| | $k_{sp}(m/day)$ | $5.20\times10^{-6}$ |
| | $e_0$ | 1.77 |
| | $C_c$ | 0.84 |
| | $OCR$ | 1.0 |

연직배수공법 및 진공압밀공법의 설계에 있어 교란영역의 고려는 중요한 사항이다. 따라서, 교란영역은 수치해석을 위한 모델링 작업 시 반드시 포함되어야 하는 요소이다. 본 해석에서는 표 3.5에 제시된 바와 같이 교란영역을 멘드렐의 직경의 2배(Hansbo, 1987)로 평가하였다. 현장에서 사용한 맨드렐의 직경이 $d_m = 0.15\,m$ 이기 때문에 그림 3.35에 Drain 요소 주변을 확대하여 나타낸 바와 같이 교란영역을 0.3 m로 모델링하여 수치해석을 수행하였다.

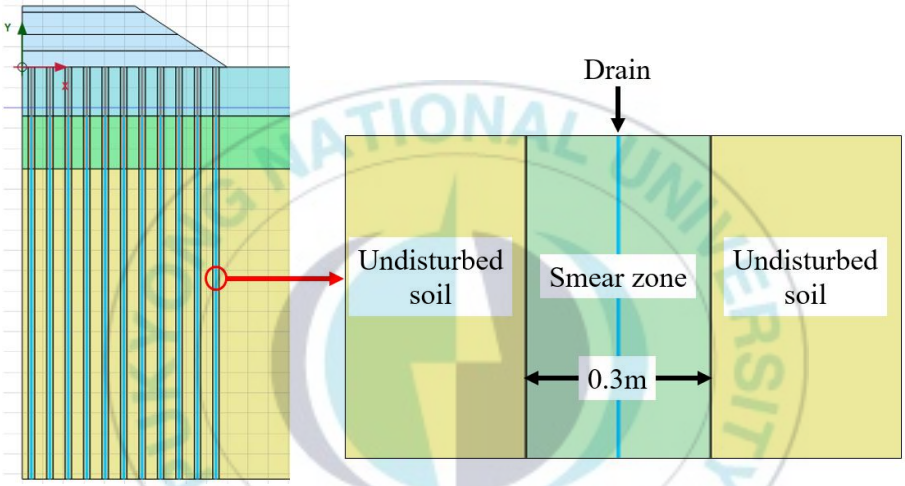



그림 3.35 교란영역의 모델링

### 3.4.2 Multi-drain 해석결과

수치해석을 통한 현장 압밀거동 묘사의 적합성을 평가하기 위해, 압밀침하량, 간극수압의 변화, 횡방향 변위에 대한 현장계측결과와 수치해석결과를 비교·분석하였다. 정확한 비교·분석을 위해서 3.3절에 제시한 현장계측결과를 수정하였다. 본 해석에 적용한 시공사례에서는 진공압밀시스템을 구축한 후 시스템의 가동성을 점검하기 위하여, 본격적으로 시스템을 가동하기 전에 약 3주가량 시험가동을 실시하였다. 시험가동에 해당하는 기간에 발생한 변화들은 수치해석에서 묘사하기 힘들기 때문에 침하 보충토의 성토시점 부터 측정된 침하량, 간극수압 및 횡방향 변위의 계측결과를 이용하여 수치해석결과와 비교·분석하였

다. 그림 3.36은 침하량, 간극수압, 그리고 횡방향 변위를 계측한 위치 및 수치해석 결과의 측정위치를 나타낸다.

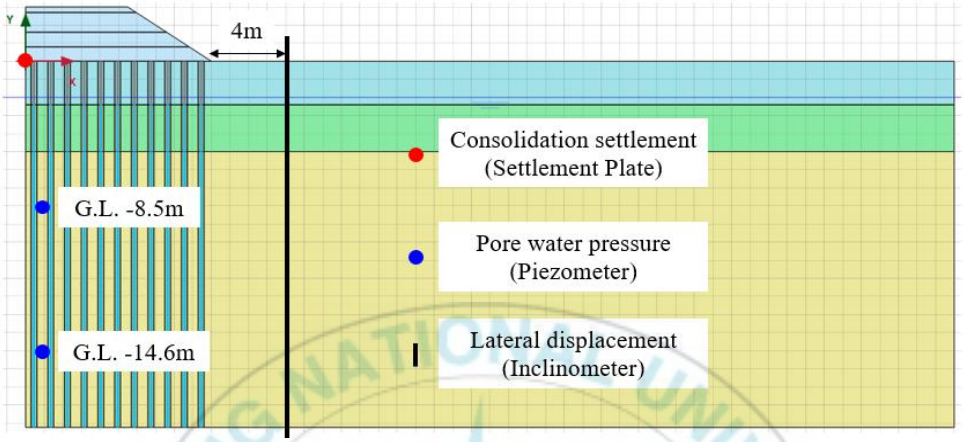



그림 3.36 계측위치

그림 3.37은 압밀침하량에 대한 현장계측결과와 수치해석결과를 비교한 것으로 수치해석결과와 현장계측결과가 잘 일치하는 것으로 나타났다.

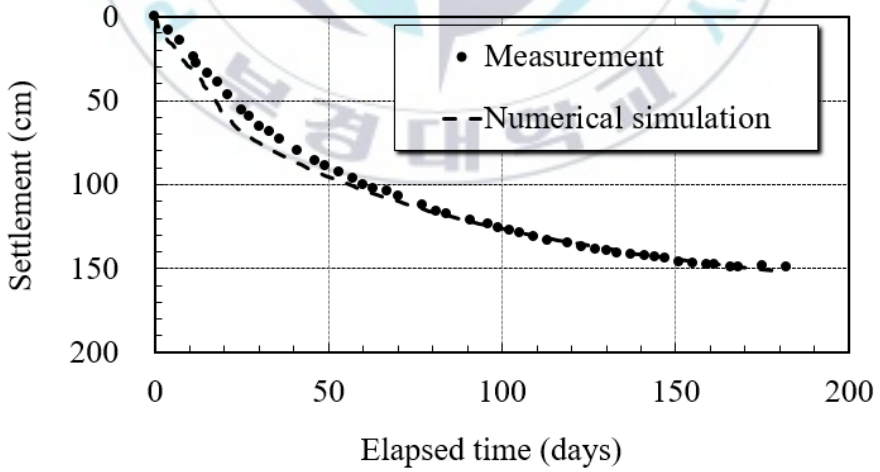
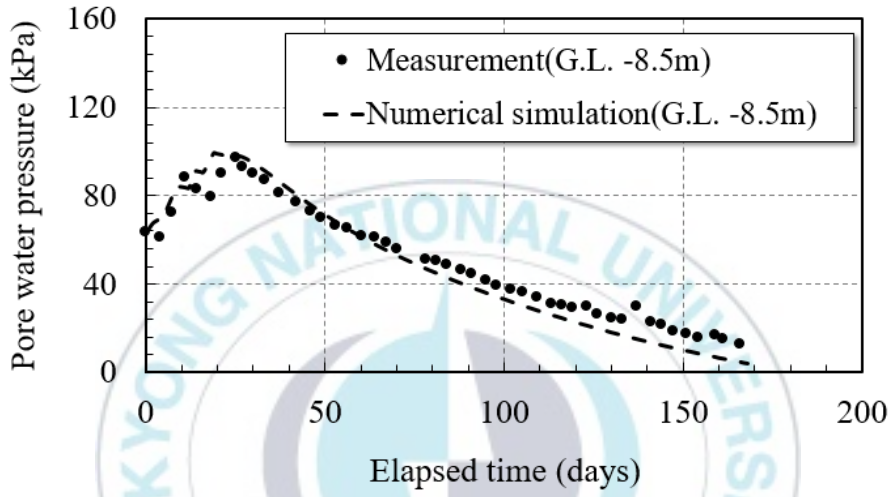


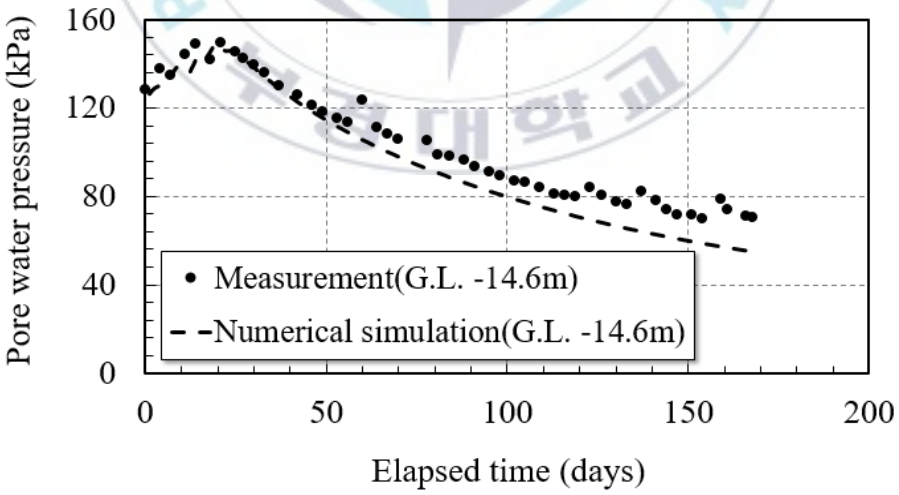

그림 3.37 시간경과에 따른 압밀침하량 비교

그림 3.38은 G.L.-8.5 m와 G.L.-14.6 m 지점에서 측정된 간극수압 변화를 수

치해석 결과와 비교한 것으로 모든 지점에서 현장계측결과와 수치해석결과가 유사한 경향으로 나타났다. 초기에는 침하보충토의 성토로 간극수압이 증가하다가 성토완료 시점부터는 진공압밀에 의해 간극수압이 점차 감소하여 최종적으로 정수압보다 작은 간극수압이 측정되었다.




(a) G.L. -8.5 m 지점의 간극수압 변화

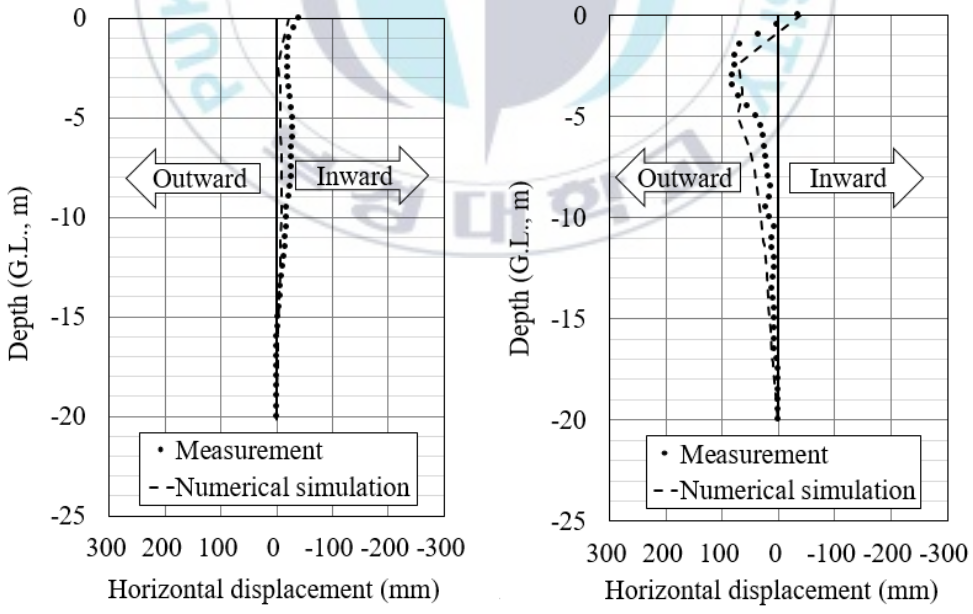



(b) G.L. -14.6 m 지점의 간극수압 변화

**그림 3.38 시간경과에 따른 간극수압의 변화 비교**

그림 3.38에 나타낸 바와 같이 시간이 경과 할수록 현장계측결과와 수치해석 결과간의 차이가 점점 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 압밀이 진행됨에 따라 간극비가 점차 감소하게 되고 이로 인해 투수계수 역시 감소하게 된다. 그러나, 간극비 감소에 따른 투수계수의 감소 정도를 정확하게 평가하여 수치해석에 반영하는 것은 매우 어렵기 때문에 수치해석에서는 압밀이 진행되는 동안 투수계수가 일정하게 유지되도록 설정하였기 때문인 것으로 판단된다.

그림 3.39에 진공시스템 가동 후 시간경과에 따라 측정된 횡방향 변위의 분포를 수치해석결과와 비교하였다. 진공시스템 가동 초기에는 전 깊이에 걸쳐 횡방향 변위가 내측방향으로 발생하였으나, 침하보충토의 급속성토로 인하여 횡방향 변위의 방향이 외측으로 향하는 것으로 나타났다. 수치해석결과에서도 시공 단계별 횡방향 변위 분포형태를 합리적으로 묘사할 수 있음을 확인 할 수 있다.




(a) 5 days (b) 33 days

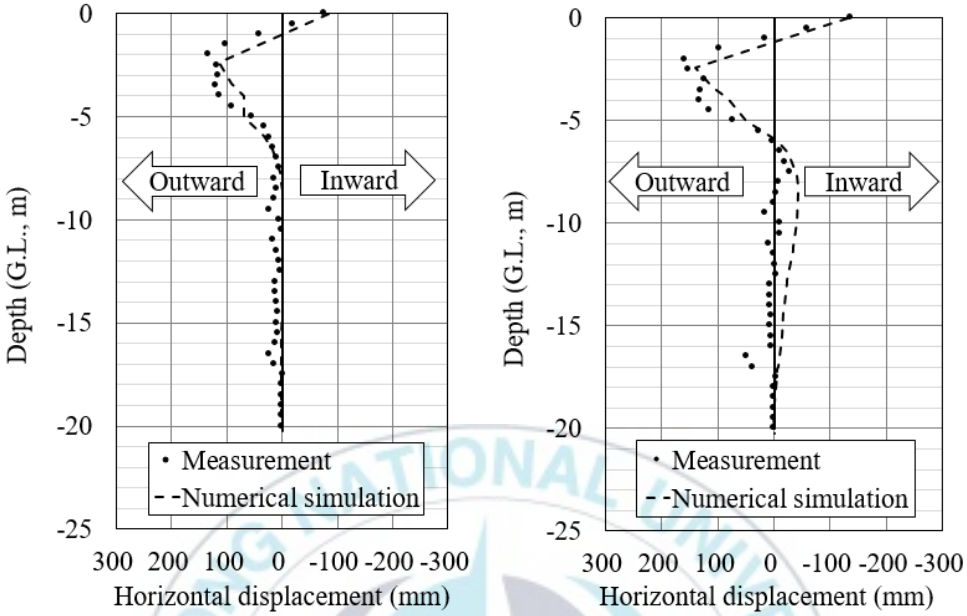



**그림 3.39 횡방향 변위의 분포특성 비교**

점토지반의 압밀거동 예측을 위한 수치해석 시 토질정수의 평가가 해석결과에 미치는 영향을 평가하기 위해 추가적인 수치해석을 수행하여 아래 두 가지 사항을 검토하였다.

Case 1 : 현장 압축지수 및 실험실 압축지수를 적용한 수치해석으로부터 얻은 시간 - 침하 곡선과 현장계측결과의 비교·분석. (그림 3.40).

Case 2 : Root t법 및 Log t법으로 산정된 투수계수를 적용한 수치해석으로부터 얻은 시간 - 간극수압 변화곡선과 현장계측결과의 비교·분석. (그림 3.41).

표준압밀시험 결과 Log-t법으로 산정된 연직투수계수는 $1.26 \times 10^{-5}$ m/day로, Root-t법에 의해 산정된 연직투수계수 보다 약 1.7배 작게 나타났다. 3.4절에 제시한 수치해석과 마찬가지로, 수평투수계수는 연직투수계수의 2배를 적용하

였고 교란영역의 투수계수는 연직투수계수와 동일한 값을 적용하였다. 실험실 압축지수는 표준압밀시험의 결과를 통해 작성된 압축곡선으로부터 산정하여 Silty clay1 layer에는 0.82, Silty clay2 layer에는 0.71을 수치해석에 적용하였다. 단, Case 1에 대한 내용을 검토시에는 Root t법으로 산정된 투수계수를 각 수치해석에 적용하였고, Case 2 검토시에는 현장 압축지수를 각 수치해석에 적용하였다.

각 해석조건에 대한 수치해석결과와 현장계측결과의 유사성을 정량적으로 평가하기 위하여 통계적 기법을 적용하였다. 일반적으로, 계측결과와 수치모델에 의한 예측값 간의 오차를 평가하기 위하여 평균 제곱근 오차(RMSE)가 가장 보편적인 방법으로 사용된다. 따라서, 본 연구에서는 RMSE(root mean square error)를 계산하여 각 조건에 대한 수치해석결과의 유사성을 평가하였고, RMSE 값은 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_{1,i} - x_{2,i})^2} \tag{3.2}$$

식(3.2)에서 $x_1, x_2, N$은 각각 현장계측결과, 수치해석결과, 비교 데이터의 개수를 의미한다. RMSE는 오차제곱합의 평균에 제곱근을 취한 값으로써 두 결과간의 오차를 평균화시킨 개념을 의미하며, RMSE가 작을수록 두 결과간의 오차는 작고 유사성이 높은 것을 의미한다. 각 조건에 대한 RMSE 값을 표 3.7에 제시하였다.

그림 3.40 및 그림 3.41에 나타난 바와 같이, 현장 압축지수를 적용한 수치해석으로부터 얻은 시간-침하곡선이 현장계측결과와 더욱 일치하였으며, Root t법으로 산정된 투수계수를 적용한 수치해석을 통해 얻은 시간-간극수압 변화곡선이 현장계측결과와 더 유사한 것으로 나타났다. 또한, 표 3.7에 제시된 바와 같이 RMSE 값 역시 실험실 압축지수 및 Log t법의 투수계수를 수치해석에 적용한 경우 보다 현장 압축지수 및 Root t법으로 산정된 투수계수를 적용

한 경우에 더욱 작은 값을 보여 현장계측결과와 수치해석결과 간 오차가 더 작은 것으로 평가되었다. 따라서, 시료교란을 고려하여 수정한 현장 압축지수와 Root-t법으로 산정된 투수계수를 적용하는 것이 점토지반의 압밀침하량 및 간극수압 변화의 정확한 예측을 위해 중요하다.

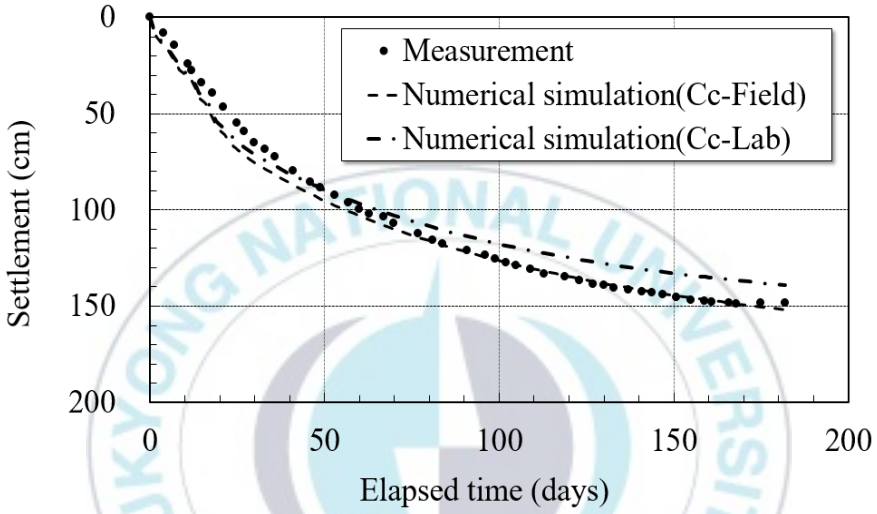
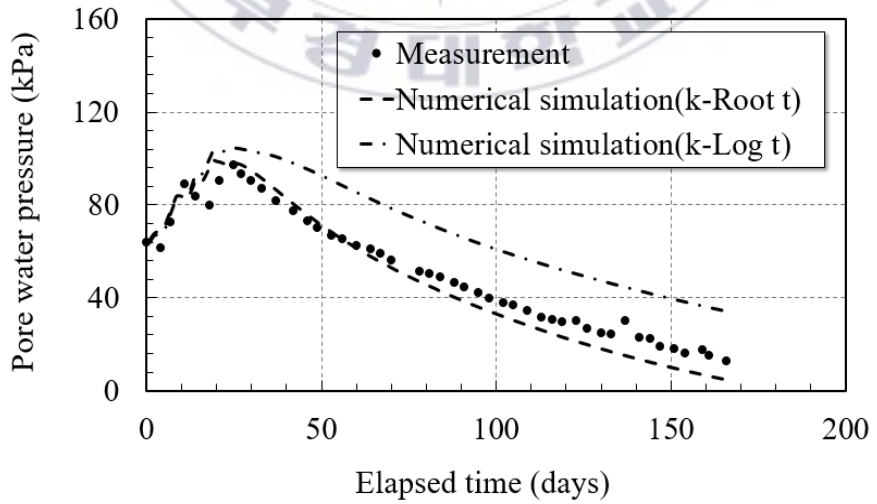
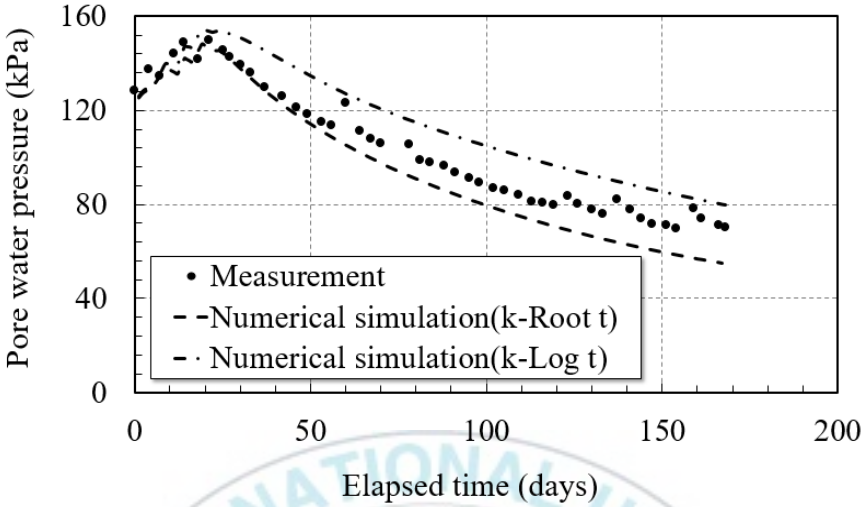



그림 3.40 압밀침하량의 변화 비교 (Case 1)




(a) G.L. -8.5 m 지점의 간극수압 변화 비교




(b) G.L. -14.6 m 지점의 간극수압 변화 비교

**그림 3.41 간극수압의 변화 비교 (Case 2)**

**표 3.7 각 수치해석 결과의 RMSE 비교**

| 항목 | RMSE | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Case 1 | | Case 2 | |
| | Cc-Field | Cc-Lab | k-Root t | k-Log t |
| 압밀침하량 | 5.48 $cm$ | 8.79 $cm$ | - | - |
| 간극수압(G.L. -8.5m) | - | - | 6.81 $kPa$ | 19.72 $kPa$ |
| 간극수압(G.L. -14.6m) | - | - | 10.25 $kPa$ | 13.04 $kPa$ |

# 제4장 결론

본 연구는 Plaxis 2D를 이용하여 진공압밀현상을 묘사하기 위한 세부적인 방법을 Unit-cell 해석결과와 함께 제시하고 2차원 평면변형률 조건에서 개별진공압밀공법이 적용된 실제 시공사례를 모델링하여, 개별진공압밀시스템이 적용된 연약점토지반의 압밀거동을 예측하기 위한 Plaxis 2D의 사용 가능성을 검토하고자 하였다. 본 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) Plaxis 2D 프로그램에서는 Drain 요소에 직접 진공압을 적용시킬 수 없기 때문에 진공압의 묘사를 위해 Drain 요소의 전수두를 진공압의 크기만큼 감소시켜 주고 난 후 지하수 흐름계산이 필수적으로 수행되어야 한다.

2) Plaxis 2D 프로그램은 압밀이라는 현상을 묘사하기 위해서 과잉간극수압을 생성하기 때문에 진공압밀시스템의 재현 시에도 과잉간극수압이 유발된다. 하지만, 이는 오로지 프로그램 상 압밀현상의 묘사를 위해 발생하는 것으로 진공압밀시스템의 묘사 시 간극수압은 과잉간극수압 발생에 따라 증가하지 않는다. 또한, 간극수압은 진공압밀현상에 의해 시간경과에 따라 감소하며 동시에 압밀침하가 진행된다. 결과적으로, 간극수압의 감소량 만큼 유효응력이 증가되어 진공압밀현상의 정확한 묘사가 가능하다.

3) 합리적인 수치해석의 결과를 얻기 위해서 가장 중요한 사항은 현장조건을 정확하게 묘사할 수 있는 지반물성치를 설정하는 것이다. 따라서, 연약점토지반의 압밀거동 예측을 위한 수치해석시에는 실험실로부터 산정된 압축지수의 수정과 합리적인 투수계수의 적용이 필수적으로 요구된다.

4) 실제 시공사례를 모델링한 Multi drain 해석의 결과, 현장계측결과와 수치해석결과간의 일치성이 매우 높은 것으로 평가되었다. 따라서, Plaxis 2D를 이용한 2차원 평면변형률 조건의 수치해석으로 개별진공압밀시스템이 적용된 연약점토지반의 압밀거동을 합리적인 수준으로 묘사할 수 있으며 개별진공압밀공법의 설계를 위해 Plaxis 2D가 충분히 사용되어 질 수 있다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

# 참 고 문 헌


1. Barron, R. A.(1948). “Consolidation of fine-grained soils by drain wells.” Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol. 113, pp.718-754.

2. Das, B. M., Sobhan, K.(2014). “Principles of Geotechnical Engineering 8th Edition, Cengage Learing®, pp. 364-420.

3. Das, B. M.(2016). “Principles of Foundation Engineering 8th Edition, Cengage Learing®, pp. 840-855.

4. Hansbo, S.(1981). “Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains.” Proceedings. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm., Vol. 3.

5. Hird, C. C., Pyrah, I. C., Russell, D.(1992). “Finite element modelling of vertical drains beneath embankments on soft ground.” Geotechnique, London., Vol. 42(3), pp. 499-511.

6. Indraratna, B., Redana, I. W.(1997). “Plane strain modeling of smear effects associated with vertical drains.” Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering, ASCE., Vol. 123(5), pp. 474-478.

7. Indraratna, B., Redana, I. W.(2000). “Numerical modeling of vertical drains with smear and well resistance installed in soft clay.” Canadian Geotechnical Journal, Vol. 37, pp. 132-145.

8. Indraratna, B., Bamunawita, C., Khabbaz, H.(2004). “Numerical modeling of vacuum preloading and field applications.” Canadian Geotechnical Journal, Vol. 41, pp. 1098-1110.

9. Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C.(2004) “Mathematical modeling and

field evaluation of embankment stabilized with vertical drains incoporating vacuum preloading." Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, New York.

10. Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., Sathananthan, I.(2005). "Analytical and numerical solutions for a single vertical drain including the effects of vacuum preloading." Canadian Geotechnical Journal, Vol. 42, pp. 994-1014.

11. Jung, D., Park, K., Lee, J., Kim, D., Lee, J.(2019). "A case study on the field performance of vacuum consolidation method using PVDs subjected to individual vacuum pressure." 16th Asian Regional Conference on Soli Mechanics and Geotechnical Engineering, ATC7, Taiwan.

12. Lin, D. G., Kim, H. K., Balasubramaniam, A. S.(2000). "Numerical modeling of prefabricated vertical drain." Geotechnical Engineering Journal, Southeast Asian Geotechnical Society, Vol. 31(2), pp. 109-125.

13. Nguyen, B. P., Yun, D. H., Kim, Y. T.(2018). "An equivalent plane strain model of PVD-improved soft deposit." Computers and Geotechnics, Vol. 103, pp. 32-42.

14. Perera, M. D. A.(2015). "Modelling vertical drains with vacuum preloading considering the soil structure characteristics." Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy of the University of Wollongong Australia.

15. Parsa-Pajouh, A., Fatahi, B., Khabbaz, H.(2016). "Experimental and numerical investigation to evaluate two-dimensional modeling of vertical drain-assisted prelading." International Journal of Geomechanics, ASCE., Vol. 16(1), pp. B4015003, 1-14.

16. Plaxis(2019). "Plaxis 2D Reference Manual and Plaxis 2D Material Manual" Available at http://www.plaxis.com

17. Rujikiatkamjorn, C., Indraratna, B., Chu, J.(2008). “2D and 3D numerical modeling of combined surcharge and vacuum preloading with vertical drains.” International Journal of Geomechanics, ASCE., Vol. 8(2), pp. 144-156.

18. Shen, S. L., Chai, J. C., Hong, Z. S., Cai, F. X.(2005). “Analysis of field performance of embankment on soft clay deposit with and without PVD-improvement.” Geotextiles and Geomembranes, Vol. 23, pp. 463-485.

19. Schmertmann, J.H.(1953). “Undisturbed consolidation behavior of clay.” Transactions, ASCE, Vol. 120(1), pp. 1201-1227.

20. Stapelfeldt, T.(2006). “Preloading and vertical drains.” Helsinki University of Technonlogy.

21. Yildiz, A.(2009). “Numerical analyses of embankments on PVD improved soft clays.” Advances in Engineering Software, Vol. 40(10), pp. 1047-1055.

22. Yong, R. N., “Towsend, F. C.(1986). Consolidation of soils : testing and evaluation.” Philadelphia, Pa, ASTM., pp. 7-15.