

개별진공압밀공법을 적용한 연약점토 지반의 압밀거동 분석을 위한 수치해석적 사례연구

Numerical Analysis of the Consolidation Behavior of Soft Clay Subjected to Individual Vacuum Pressure

정 두 회¹ Jung, Du Hwoe
이 정 빈² Lee, Jeong Bhin
이 준 석³ Lee, Jun Seuk

Abstract

An individual vacuum consolidation system has gained a popularity for a ground improvement of soft clayey soil. Finite element analyses have been performed to simulate the individual vacuum consolidation system using a Plaxis 2D. The modelling procedures of the vacuum consolidation system are presented with the 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.

요 지

개별진공압밀공법을 적용한 연약점토 지반의 압밀거동을 분석하기 위하여 Plaxis 2D를 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 진공압을 묘사하기 위한 세부적인 방법을 unit-cell 해석 결과와 함께 제시하고, 실제 시공사례를 모델링하여 수치해석결과와 현장계측결과를 비교해봄으로써 개별진공압밀공법이 적용된 연약지반의 압밀거동을 예측하기 위한 Plaxis 2D의 사용 가능성 검토와 해석기법을 제시한다.

Keywords : Consolidation, Individual vacuum consolidation method, Soft clay, Vacuum pressure

1. 서 론

최근 연약점토지반을 개량하기 위하여 개별진공압밀 공법의 적용이 증가하고 있는 추세이다. 압밀현상을 이용하는 지반개량공법을 적용하기 위해서는 우선 설계가 선행되어야 한다. 그러나 압밀이론의 한계성, 비선형

응력-변형률 거동 및 토질 정수의 불확실성 등의 여러 가지 요인으로 인하여 압밀현상을 이용하는 지반개량 공법에 대한 이론적인 설계로는 연약지반의 압밀거동을 정확히 묘사하기 어려운 실정이다. 이론적인 설계의 대안으로 다양한 유한요소해석 프로그램이 연약지반의 압밀거동을 예측하기 위하여 사용되고 있고, 수치해석

1 정회원, 부경대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Pukyong National Univ.)

2 정회원, 한국도로공사 대리 (Member, Deputy, Korea Expressway Corporation, Tel: +82-51-629-6074, tmxj357@gmail.com, Corresponding author, 교신저자)

3 정회원, (주)동아지질 부장 (Member, Dept. Head, Dong-Ah Geological Engrg. Co., Ltd.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2021년 10월 31일까지 그 내용을 확화로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

결과의 신뢰성 향상을 위한 노력의 일환으로 여러 연구들이 진행되고 있다.

현재까지 진공압밀공법의 수치해석을 위한 다양한 수치해석기법이 연구되어 왔고, 실제 진공압밀공법이 적용된 지반개량공사 현장의 계측결과와 수치해석 결과의 비교·분석을 통해 해석기법의 타당성을 검토하여 왔다(Indraratna et al., 2000, 2005; Rujikiatkamjorn et al., 2008; Perera, 2015). 그러나 근래에 적용 사례가 점차 증가되고 있는 개별진공압밀공법의 설계 및 압밀거동 예측을 위한 수치해석적 연구는 미흡한 실정이며 개별진공압밀공법이 적용된 현장의 계측결과를 기반으로 실시한 수치해석기법의 타당성 검토 사례 역시 쉽게 찾아볼 수 없는 실정이다.

본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 Plaxis 2D를 이용하여 진공압을 묘사하기 위한 세부적인 방법을 Unit-cell 해석 결과와 함께 제시하고 또한, 평면변형률 조건에서 개별진공압밀공법을 적용한 실제 시공사례를 모델링하여 연약지반의 압밀거동을 예측하기 위한 Plaxis 2D의 적용 가능성을 검토하고자 한다.

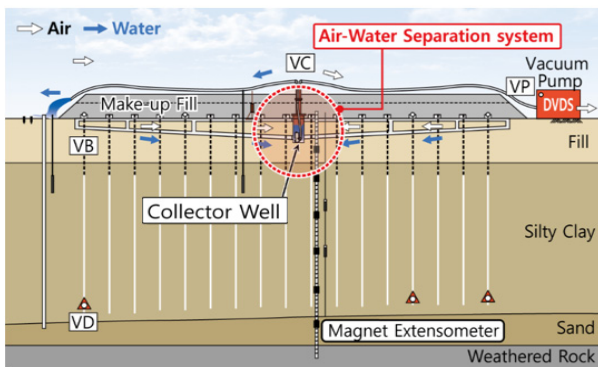
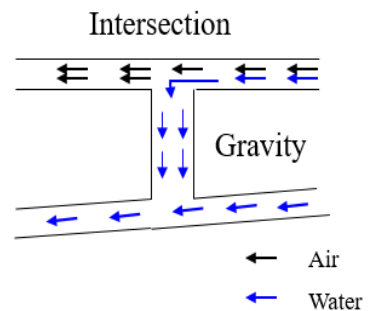
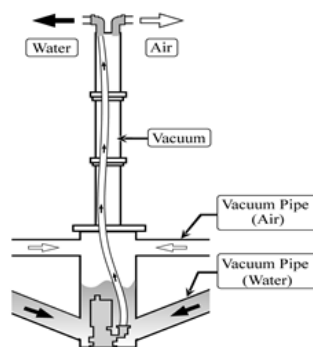


Fig. 1. A cross sectional view of individual vacuum consolidation system (Dong-Ah Geological Co., 2016)



(a) Collector well



(b) Flow of air and water

Fig. 2. Air-water separation system (Dong-Ah Geological Co., 2016)

2. 개별진공압밀공법

종래의 진공압밀공법에서는 일반적으로 진공압의 유지를 위해 불투수성의 멤브레인과 공기차단벽의 설치가 요구된다. 하지만 이러한 요소들은 시공 중에 쉽게 손상을 입을 수 있어 개량기간 동안 일정 수준 이상의 진공압을 유지하기가 어려울 수 있으며 이로 인해 지반 개량의 효율성이 떨어져서 공기가 길어지는 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 종래의 진공압밀시스템을 개선한 개별진공압밀공법이 개발되어 여러 현장에 적용되고 있다(Dong-Ah Geological Co., 2013, 2016).

개별진공압밀 시스템에서는 Fig. 1과 같이 연직배수재가 기밀커넥터(air tight connector)를 이용해서 연결한 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 진공압밀시스템의 문제점을 해결할 수 있다.

최근에는 개별진공압밀 시스템에 Fig. 2와 같이 공기와 물을 분리하는 시스템(air-water separation system)을 도입하여 개량기간 동안 진공압이 효과적으로 유지되도록 하고 있다. 공기와 물을 분리하는 시스템은 이중의 수평배수관으로 형성되어 있으며 진공압을 이용해서 점토지반에서 배출된 간극수는 하향경사를 갖는 하층 배수관을 통하여 집수정으로 유입되도록 하고, 공기는 상층의 진공배관을 통하여 외부로 배출되도록 하였다. 집수정으로 유입된 간극수는 수중펌프를 이용해서 지상으로 배출되고 공기는 진공펌프를 통해 외부로 배출

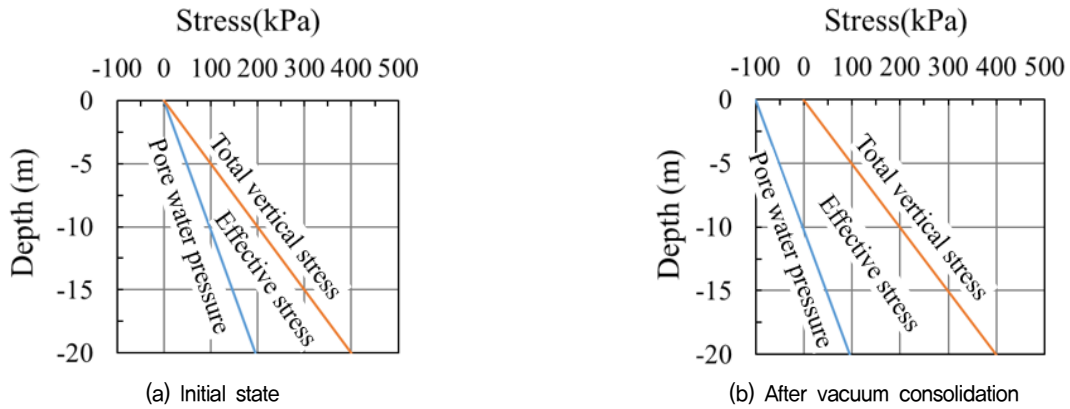


Fig. 3. Stress profiles

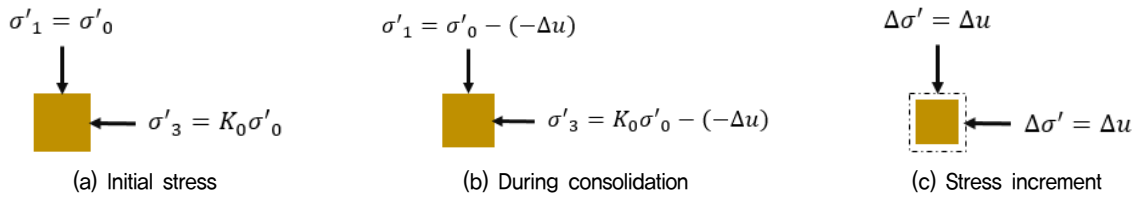


Fig. 4. Effective stress of soil element induced by a vacuum consolidation

된다. 이중 수평배수관이 아닌 단관을 사용하는 경우에는 배수관 내부에 존재하는 기포로 인해 진공압이 감소될 우려가 있다. Air-water separation system의 도입으로 배수관 내 기포로 인한 진공압이 감소되는 현상을 방지할 수 있다.

개별진공압밀공법에 의한 응력변화 및 지반개량 원리는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 지반에 진공압이 작용하면 전응력의 변화는 발생하지 않으나 진공압에 의한 압밀작용으로 수압의 감소가 발생하며 수압 감소분에 해당하는 만큼 유효응력이 증가하게 된다. 진공압에 의한 압밀은 등방압밀하중의 작용으로 기초지반의 전단파괴를 방지하고 내측방향의 수평변위를 발생시켜 주변 구조물의 변형을 방지할 수 있다. 이는 진공압이 작용하는 지반 내 임의 흙 요소의 응력상태(Fig. 4)와 응력경로(Fig. 5)를 통해 살펴볼 수 있다. Fig. 4와 같이 수압의 감소는 흙 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 Fig. 5와 같이 $p'-q'$ 곡선상에 진공압밀에 따른 응력경로를 그려보면 A점에서 E점으로 연결되는 직선으로 나타난다. 또한, 흙의 변형은 반드시 유효응력의 변화가 동반되어야 하는데 Fig. 4(c)와 같이 유효응력의 증가는 모든 방향으로 동일하게 발생하기 때문에 내측방향의 변위가 유발된다.

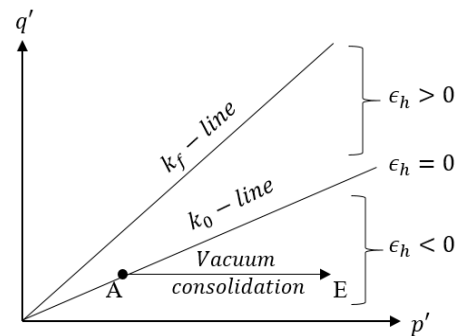


Fig. 5. Stress path due to vacuum consolidation

3. 수치해석

3.1 2차원 평면변형을 해석

진공압밀공법은 방사방향의 압밀현상을 이용하는 개량공법이다. 방사방향의 압밀현상은 축대칭 조건에서 정의되는 문제이므로 정확한 수치해석의 결과를 얻기 위해서는 연직배수재 배치형상을 고려한 3차원 모델링이 요구된다. 그러나 3차원 수치해석에 수반되는 여러 가지 제한점들로 인해 일반적으로 2차원 평면변형률 조건으로 해석이 수행되고 있다. 3차원적인 문제를 2차원 평면변형률 조건으로 묘사하기 위해서는 변형기법이 필요하다. Indraratna(1997, 2000)는 교란영역과 배수저항 효과를 모두 고려한 2차원 평면변형률 해석기법을

제안하였다. 해당 변형기법의 기반은 Fig. 6과 같이 2차원 평면변형률 조건의 unit-cell 형상으로 부터 압밀방정식을 유도하여 Hansbo(1981)가 제시한 방사방향의 압밀도와 동일한 결과를 얻을 수 있도록 식 (1)과 같은 등가의 투수계수를 산정하는 것이다.

$$k_{hp} = \frac{k_h \left\{ \alpha + \beta \frac{k_{hp}}{k_{sp}} + \theta(2lz - z^2) \right\}}{\left[\ln\left(\frac{n}{s}\right) + \left(\frac{k_h}{k_s}\right) \ln(s) - 0.75 + \pi(2lz - z^2) \frac{k_h}{q_w} \right]} \quad (1)$$

식 (1)에서 $n = \frac{d_e}{d_w}$, $s = \frac{d_s}{d_w}$, q_w 는 연직배수재의 통수능이며, 그리고 α , β , θ 는 각각 기하조건, 교란영역 그리고 배수저항 효과를 반영하는 변수들이다.

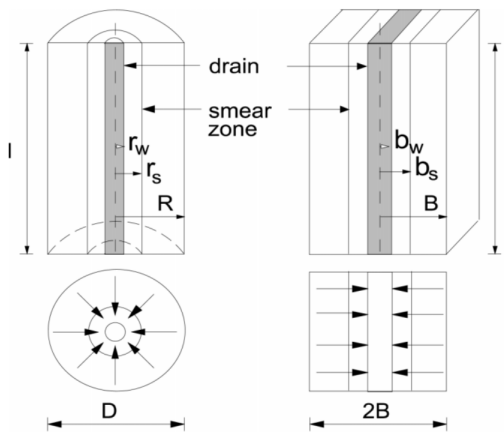
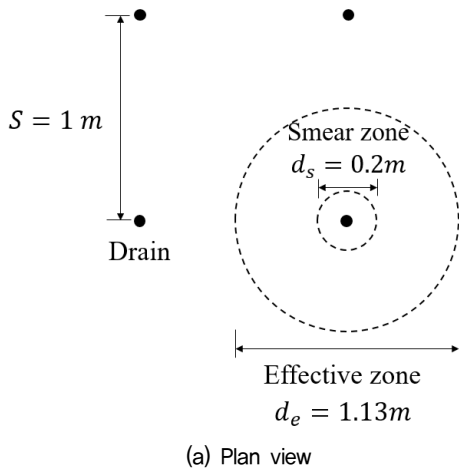
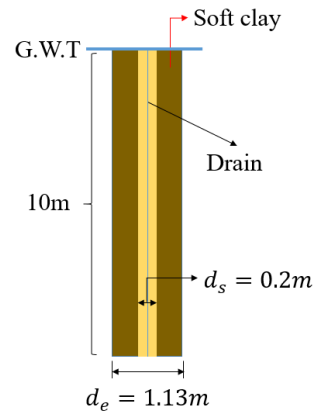


Fig. 6. Conversion of an axisymmetric unit to a plane strain unit (Indraratna, 1997)



(a) Plan view



(b) Cross section

Fig. 7. Geometry for a unit-cell analysis

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

$$\beta = \frac{2(s-1)}{n^2(n-1)} \left[n(n-s-1) + \frac{1}{3}(s^2+s+1) \right] \quad (3)$$

$$\theta = \frac{4k_{hp}}{3Bq_w} \left(1 - \frac{1}{n} \right) l^2 \quad (4)$$

식 (1)에서 배수저항 효과를 무시하면 식 (5)와 같이 교란영역만 고려한 등가투수계수를 산정할 수 있으며, 또한 교란영역도 무시한다면 식 (6)과 같이 배수재의 영향반경만 고려한 등가투수계수를 산정할 수 있다.

$$\frac{k_{sp}}{k_{hp}} = \frac{\beta}{\frac{k_{hp}}{k_h} \left[\ln\left(\frac{n}{s}\right) + \left(\frac{k_h}{k_s}\right) \ln(s) - 0.75 \right] - \alpha} \quad (5)$$

$$\frac{k_{hp}}{k_h} = \frac{0.67}{\ln(n) - 0.75} \quad (6)$$

3.2 Unit-cell 해석

Plaxis 2D를 이용하여 개별진공압밀공법의 적용에 따른 포화점토지반의 압밀거동을 해석하기 위한 전 단계로 먼저 unit-cell 해석을 통해 진공압의 재현 가능성을 평가하였다. Unit-cell 해석은 2차원 평면변형률 조건에서 수행하였으며 해석을 위한 기하조건은 Fig. 7과 같다. 수치해석 시 고려된 연직배수재의 특성과 모든 토질정수를 각각 Table 1과 Table 2에 제시하였다. Unit-cell 해석에서 수평투수계수는 연직투수계수의 2배를 적용

Table 1. Drain parameters for a unit-cell analysis

Parameters	Value
Spacing (pattern)	1.0m (square)
Diameter of effective zone	1.13m
Dimension of drain	100×3mm ²
Diameter of smear zone	200mm
Dimension of mandrel	120×60mm ²

Table 2. Engineering properties of clayey soil for a unit-cell analysis

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

하였고, 교란영역의 투수계수는 연직투수계수와 동일한 크기를 적용하였다. 2차원 평면변형률 해석을 위해 식 (5)와 식 (6)을 이용해서 교란영역과 불교란영역의 등가 투수계수를 산정하여 해석에 적용하였으며, 90kPa의 진공압이 배수재의 전체 길이에 균등하게 작용하도록 모델링하였다.

3.3 Unit-cell 입력 사항

Plaxis 2D를 이용하여 진공압의 적용에 따른 포화점토지반의 압밀거동을 해석할 때, 반드시 이행되어야 하는 사항은 아래와 같다.

- 1) Plaxis 2D에서는 대기압이 고려되지 않기 때문에 drain 요소 내 전수두를 초기 설정된 지하수위 높이에서 진공압에 해당하는 수두의 크기만큼 감소시킨 후 지하수 흐름계산(flow analysis)을 통해 진공압을 재현한다.
- 2) Drain 요소의 전수두 감소 후 지하수위 흐름계산으로 인해 Fig. 8과 같이 지하수위가 감소하게 되고 이에 따라 포화점토지반이 불포화 상태로 변하게 되어 이후 수치해석 계산 단계에서는 불포화 단위중량이 해당 지반의 단위중량으로 사용된다. 이는 수치해석 상의 문제로 현실 조건과는 다르기

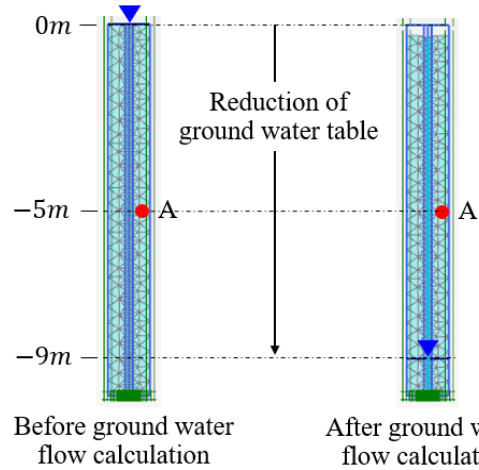


Fig. 8. Reduction of ground water table after a flow analysis

때문에 포화점토지반의 단위중량은 모두 포화단위중량으로 적용되어야 하며, 수리모델(hydraulic model)은 반드시 “saturated”로 지정되어야 한다.

- 3) 압밀 해석 시 Pore pressure calculation type은 반드시 “Steady state groundwater flow”로 설정되어야 하며, Deformation control parameters 부분의 “Ignore suction” 기능이 해제되어야만 진공압의 묘사가 가능하다.
- 4) 진공압 재현을 위해서는 초기 지하수위 보다 작은 전수두가 드레인 요소에 적용되어야 한다. 이를 위해, 배수재의 거동은 “Vacuum”으로 설정되어야 한다.

3.4 Unit-cell 해석 결과

Plaxis 2D를 이용해서 진공압 묘사의 타당성을 평가하기 위해 시간 경과에 따른 간극수압의 변화와 함께 압밀침하량을 검토하였으며, 초기 상태 및 압밀 완료 후의 깊이에 따른 간극수압과 유효응력의 분포를 분석하였다. Fig. 9는 지표면에서 시간 경과에 따른 압밀침하량을 나타내고, Fig. 10은 G.L. -2.0m 깊이에서 측정된 시간 경과에 따른 간극수압의 변화를 나타내었다. 재하성토를 하지 않고도 압밀이 진행됨을 확인할 수 있고, 실제 압밀현상에 따른 간극수압 변화와 같이 시간 경과에 따라 간극수압이 감소하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 11과 Fig. 12는 압밀이 완료된 후의 간극수압과 유효응력의 깊이별 분포를 초기응력상태와 비교한 결과이다. Fig. 3에서 언급한 바와 같이 실제 진공압밀현상에 따른 응력 변화의 관계와 같은 결과를 확인할 수 있으며 진공압에 따른 압밀거동을 정확히 재현할 수 있음을 나타낸다.

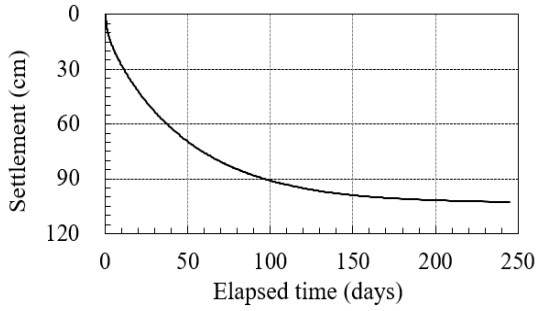


Fig. 9. Consolidation settlement with time

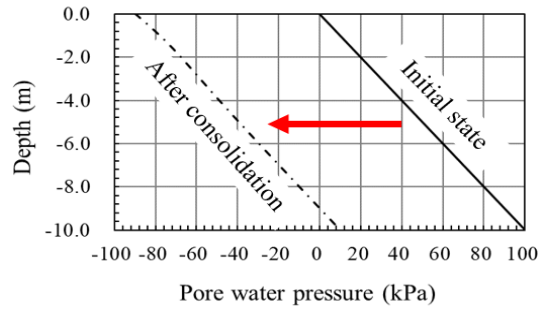


Fig. 11. Decrease in pore water pressure

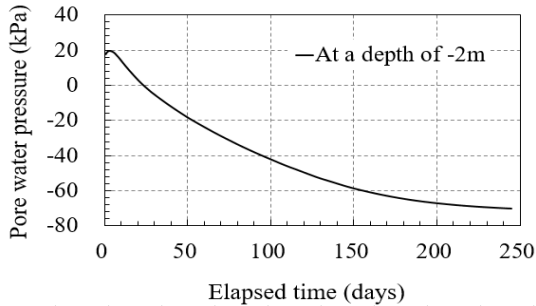


Fig. 10. Variation of pore water pressure with time

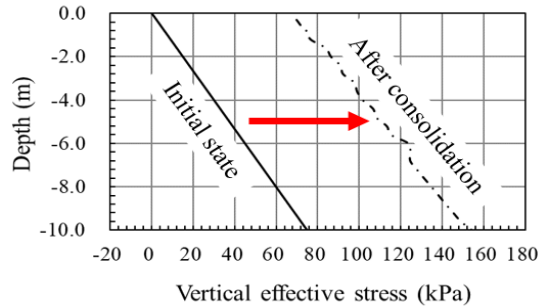


Fig. 12. Increase in vertical effective stress

4. 시공 사례 연구

4.1 시공 사례

본 절에서는 개별진공압밀공법을 적용한 지반개량공사 현장의 계측결과와 수치해석결과의 비교·분석을 통

하여 수치해석의 타당성을 검토하고, 개별진공압밀공법이 적용된 연약지반의 압밀거동 예측을 위한 Plaxis 2D의 사용 가능성을 제시하고자 한다.

전라남도 여수시 중흥동에 위치한 국가산업단지에 건설될 석유화학 플랜트 부지 조성을 위한 지반개량공사에 개별진공압밀공법을 적용하였다. 지반개량 부지면적

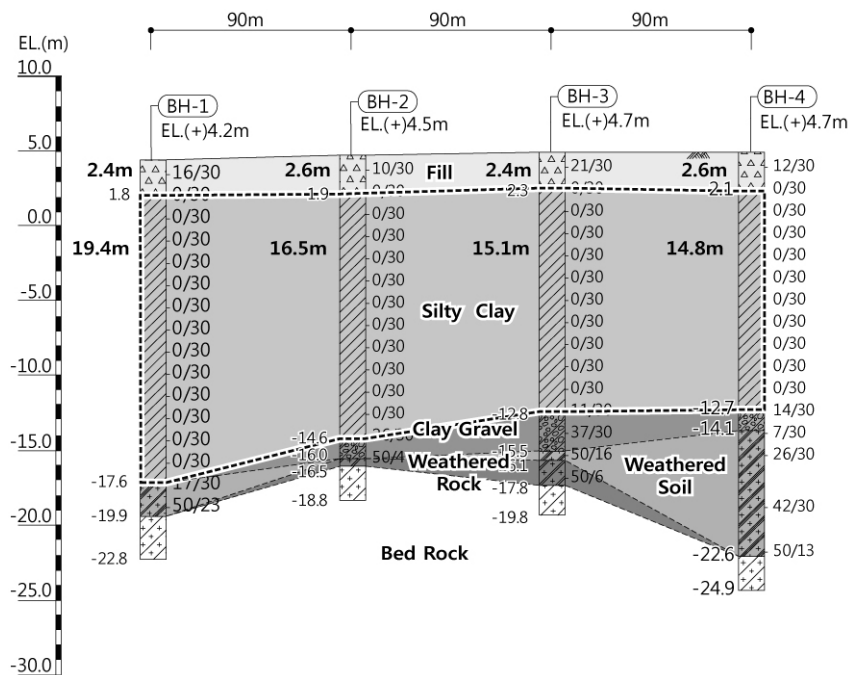


Fig. 13. Soil profile at the site (Dong-Ah Geological Eng. Co., 2016)

은 6820m²(341m × 20m)이고 대상 부지의 기초지반은 연약한 해안 매립층으로 구성되어 있다. 지반개량 공사 기간은 7개월로 연약지반 개량공사부터 계측조사 및 지반개량평가를 위한 확인조사까지 수행되었다.

Fig. 13은 본 지반개량공사 현장의 지층단면도를 나타낸 것으로 최상부 층에는 평균 2.5m 두께의 매립층이 분포하고 있으며 주로 모래질 자갈로 구성되어 있다. 그 아래로 14.8m~19.4m 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.

4.2 Multi-drain 해석

Unit-cell 해석은 제방 중심 하부에 위치하는 점토지반의 압밀거동을 묘사할 뿐, 제방 및 기초지반의 횡방향 변위와 같은 전체적인 지반거동은 unit-cell 해석으로는 묘사가 불가능하다. 따라서 연직배수재의 설치 간격과 성토제방의 사면을 고려한 실제 단면 형상과 전체적인 지반거동을 묘사하기 위해 2차원 평면변형률 해석을 수행하였다. 수치해석을 위한 단면형상은 지반조사와 실내시험 결과를 토대로 Fig. 14와 같이 설정하였다.

Fig. 14에서 실트질 점토층은 과압밀비(OCR)를 기준으로 2개의 층으로 분할하였고, 최하부 층은 풍화암 층으로 견고한 지반으로 판단되어 모델링에서 제외하였다. 수치해석을 위한 지반 물성치는 실내시험 결과를 근거로 설정하였으며 Table 3에 제시하였으며, 연직배수

재의 특성은 Table 4에 나타내었다.

본 연약지반 개량공사 현장의 사례에서는 현장에 진공압밀시스템을 구축한 후 약 2주 동안 시험가동을 하면서 진공압 누기점검 후 본격적으로 진공압 시스템을

Table 3. Engineering properties of soils for a multi-drain analysis

Layer	Properties	Value
Make-up fill (MC model)	$\gamma(kN/m^3)$	18
	$\phi'(^{\circ})$	27
	$E(kPa)$	30000
	ν	0.3
	$k(m/day)$	0.86
Silty clay 1 (SS model)	$\gamma(kN/m^3)$	15.5
	$c'(kN/m^2)$	2
	$\phi'(^{\circ})$	25
	$k_v(m/day)$	2.19×10^{-5}
	$k_{hp}(m/day)$	1.20×10^{-5}
	$k_{sp}(m/day)$	5.20×10^{-6}
	e_0	1.97
	C_c	0.92
	C_s	0.18
	OCR	1.5
Silty clay 2 (SS model)	$\gamma(kN/m^3)$	16
	$c'(kN/m^2)$	0
	$\phi'(^{\circ})$	25
	$k_v(m/day)$	2.19×10^{-5}
	$k_{hp}(m/day)$	1.20×10^{-5}
	$k_{sp}(m/day)$	5.20×10^{-6}
	e_0	1.77
C_c	0.84	
OCR	1.0	

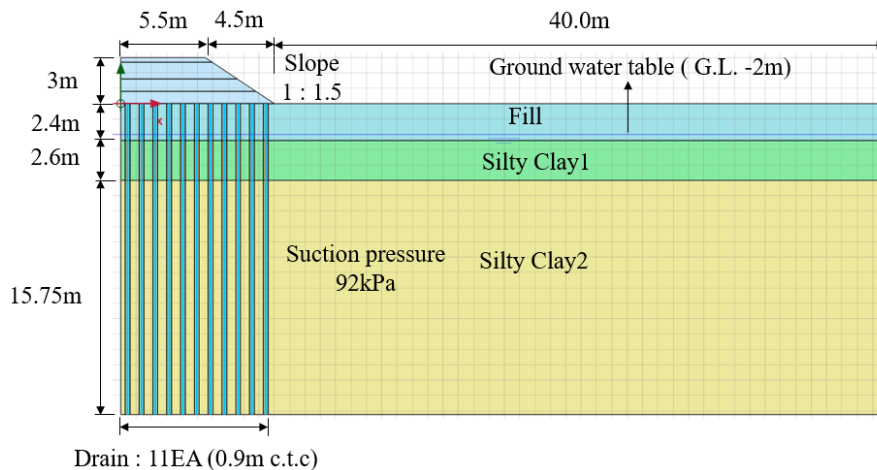


Fig. 14. Cross section for a multi-drain analysis

Table 4. Drain parameters for a multi-drain analysis

Drain parameters	Value
Spacing, S	0.9m
Pattern	Triangle
Diameter of effective drainage zone, d_e	0.945m
Diameter of mandrel, d_m	0.15m
Equivalent diameter of PVD, d_w	0.05m
d_g/d_m	2
k_n/k_s	2

가동하였다. 진공압밀시스템의 본격적 가동에 이어서 지반개량 후 지반계획고를 맞추기 위해서 압밀로 인한 침하량을 보충하기 위하여 3m 높이의 침하보충토 성토작업을 약 3주에 걸쳐서 실시하였다(Dong-Ah Geological Co., 2016). 유한요소해석에서는 시험가동 기간의 진공압 재현은 불가능하기 때문에 진공압밀시스템을 본격적으로 가동한 시점부터 진공압을 작용시키고 침하보충토 재하과정도 함께 재현하였다.

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 아래의 두 가지 사항을 고려하였다.

- 1) 시료교란을 고려하기 위한 실험실 압축지수의 수정(Schmertmann, 1953)
- 2) Log-t법과 Root-t 법으로 산정된 투수계수의 적용(Olson, 1986)

Schmertmann(1953)이 제안한 유효응력-간극비 곡선의 수정법에 따라 실험실 압축지수 대신 현장 압축지수

를 산정하여 해석에 적용하였다. 그리고 투수계수의 적정성을 평가하기 위하여 Log-t법과 Root-t법으로 산정된 투수계수를 수치해석에 적용하였다. 수평방향 투수계수는 연직방향 투수계수의 2배를 적용하였고(Rixner et al., 1986), 교란영역의 투수계수는 연직방향 투수계수와 동일한 크기를 적용하였다(Hansbo, 1987). 2차원 평면변형률 해석을 수행하기 위하여 식 (5)와 식 (6)을 이용하여 불교란영역과 교란영역에 대한 등가투수계수를 산정하였고, 진공압의 계측결과(Dong-Ah Geological Co., 2016)에 근거하여 연직배수재 전체 길이에 92kPa의 진공압이 작용하도록 모델링하였다.

연직배수공법 및 진공압밀공법의 설계에 있어 교란영역의 고려는 중요한 사항이다. 따라서, 교란영역은 수치해석을 위한 모델링 작업 시 반드시 포함되어야 하는 요소이다. 본 해석에서는 Table 4에 제시한 바와 같이 교란영역을 멘드렐 직경의 2배로 평가하였다. 대상현장에서 사용한 맨드렐의 직경이 0.15m이기 때문에 교란영역을 0.3m로 모델링하여 수치해석을 수행하였다.

4.3 Multi-drain 해석 결과

수치해석을 통한 현장 압밀거동 묘사의 적합성을 평가하기 위해서 Fig. 15에 나타난 위치에서 측정된 시간경과에 따른 압밀침하량, 간극수압, 횡방향 변위에 대한 현장계측 결과를 수치해석 결과와 비교·분석하였다. 4.5.2에서 언급한 바와 같이 본 현장에서는 진공압밀시스템을 본격적으로 가동하기 전에 약 3주 정도 시험가동을 실시하였기 때문에 계측결과에서 해당기간 동안 발생한 압밀침하량, 간극수압 및 횡방향 변위를 모두 제외한 계측결과를 이용하여 수치해석 결과와 비교·분석하였다.

Fig. 16은 압밀침하량에 대한 현장계측과 수치해석 결

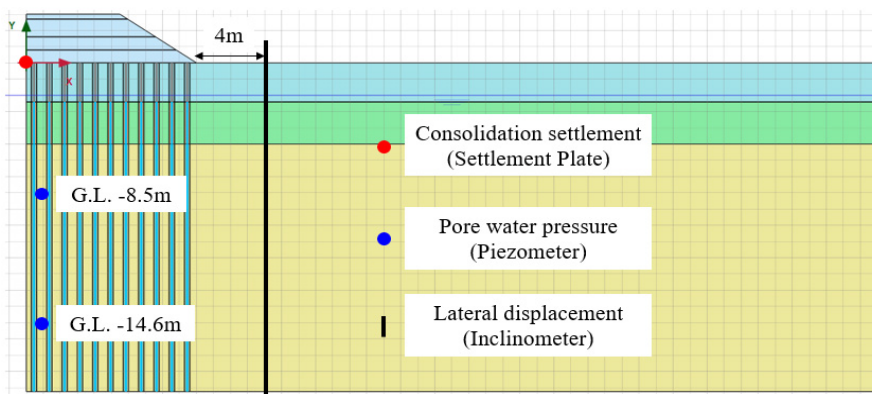


Fig. 15. Locations of field measurements

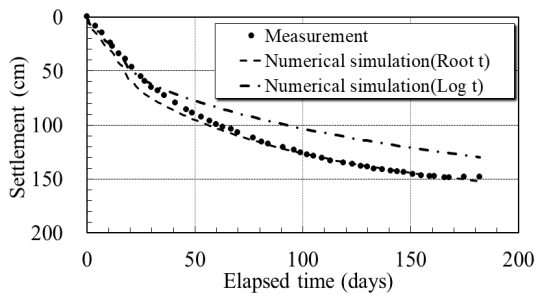


Fig. 16. Comparison of consolidation settlements with time

과를 비교한 것으로 Log-t법에 비해서 Root-t법에 의한 투수계수를 적용한 수치해석 결과가 현장계측치와 더 잘 일치하는 것으로 나타났다. Fig. 17은 G.L.-8.5m와 G.L.-14.6m 지점에서 측정한 간극수압 변화를 수치해석 결과와 비교한 것으로 간극수압의 경우도 Root-t법으로 산정된 투수계수를 적용한 수치해석 결과가 현장계측치에 더 근접하는 것으로 나타났다. 초기에는 침하보충토의 성토로 간극수압이 증가하다가 성토완료 시점부터는 진공압밀에 의해 간극수압이 점차 감소하여 최종적으로 정수압보다 작은 간극수압이 측정되었다.

Fig. 17에 나타낸 바와 같이 시간이 경과 할수록 계측치와 수치해석 결과의 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.

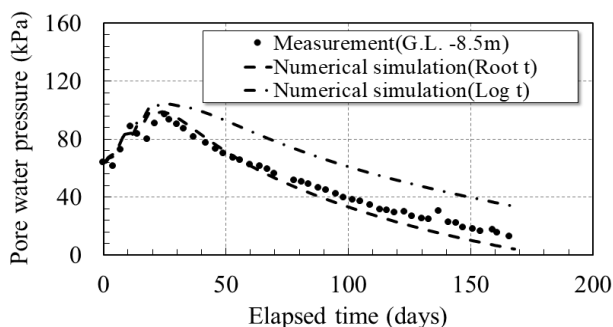
Fig. 18은 시간 경과에 따라 측정한 깊이별 지반의 횡방향 변위를 수치해석 결과와 비교한 그래프이다. 계측 결과에 의하면 진공시스템 가동 초기에는 전 깊이에 걸

쳐 횡방향 변위가 내측 방향으로 발생하였으나, 침하보충토의 급속성토로 인하여 횡방향 변위의 방향이 외측으로 향하는 것으로 나타났다. 수치해석 결과에서도 계측결과와 유사하게 횡방향 변위가 발생하는 양상을 시공 단계별로 합리적으로 묘사할 수 있음을 확인할 수가 있다.

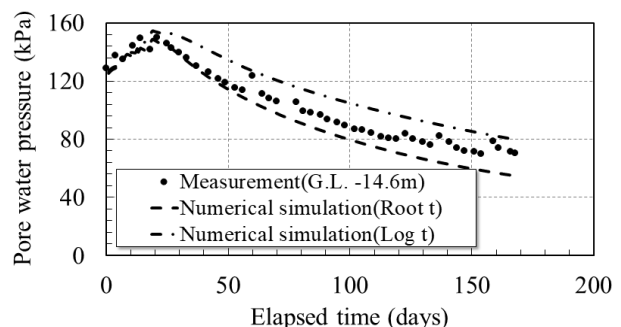
5. 결론

본 연구는 개별진공압밀공법이 적용된 연약지반의 압밀거동 예측을 위한 Plaxis 2D의 적용 가능성과 해석기법을 제시하고자 하였다. 본 연구의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) Plaxis 2D 프로그램에서는 Drain 요소에 직접 진공압을 작용시킬 수 없기 때문에 진공압의 묘사를 위해 Drain 요소의 전수두를 진공압의 크기만큼 감소시켜 주고 난 후 지하수 흐름 계산이 필수적으로 수행되어야 하고, 4.3에서 제시한 방법으로 모델링하면 진공압 적용에 의한 압밀과정을 효율적으로 해석할 수 있다.
- (2) 연약점토지반의 압밀거동 예측을 위한 수치해석에 실내시험 결과로부터 구한 압축곡선을 이용해서 압축지수를 수정한 현장압축지수와 Root-t법을 이용해서 산정한 투수계수를 적용한 결과 압밀침하와 간극수압 소산과정을 비교적 정확하게 묘사할 수 있다.
- (3) 실제 시공사례를 모델링한 Multi-drain 해석의 결과 현장계측 결과와 수치해석 결과의 일치성이 매우 높은 것으로 평가되었다. 따라서 Plaxis 2D를 이용해서 2차원 평면변형률 조건으로 수치해석을 수행하



(a) At a Depth of G.L.-8.5 m



(b) At a Depth of G.L.-14.6 m

Fig. 17. Comparison of pore water pressures with time

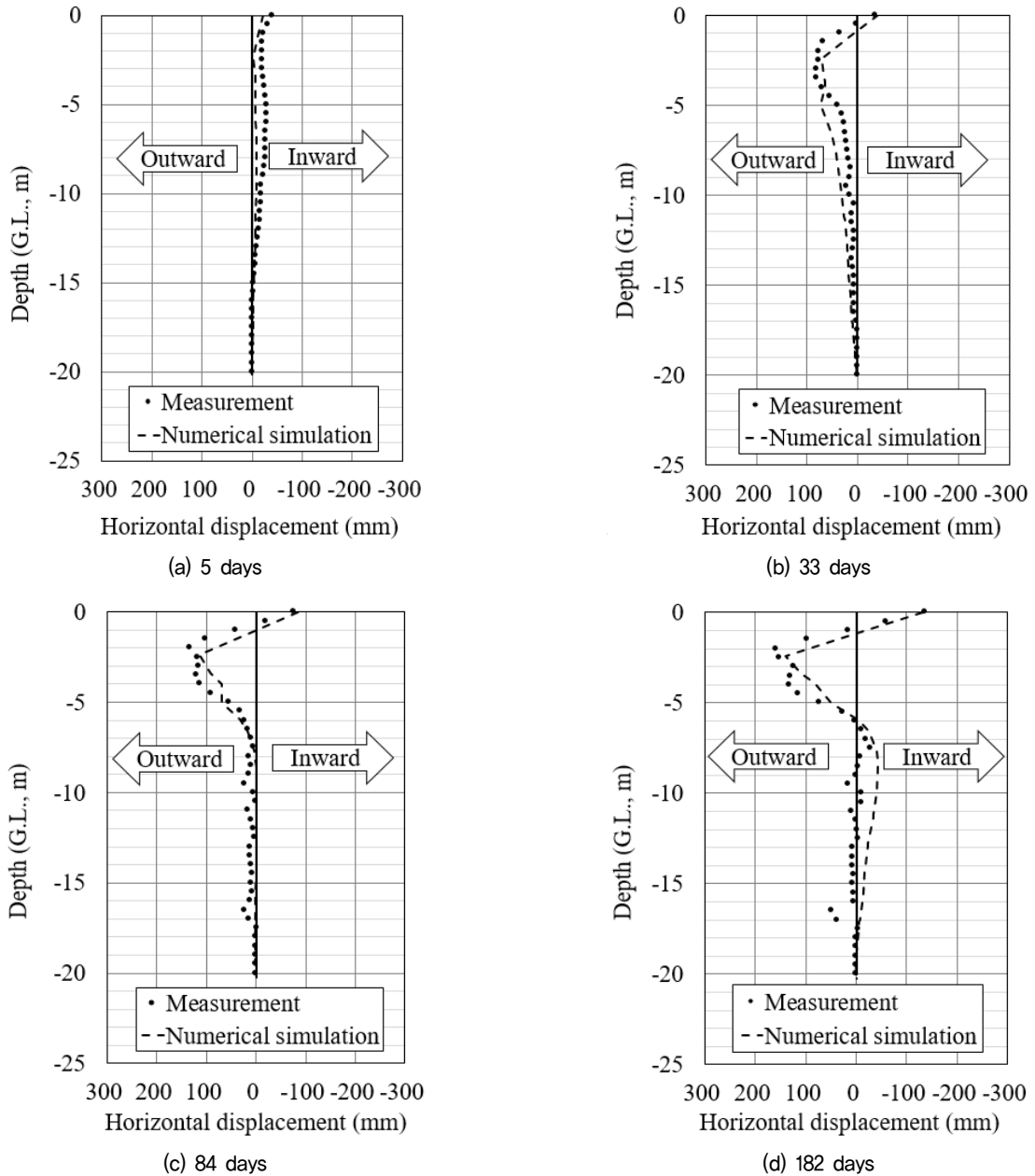


Fig. 18. Distribution of lateral displacements with depth

면 개별진공압밀공법을 적용한 포화점토지반의 압밀거동을 합리적으로 묘사할 수 있다.

(4) 본 연구에 적용한 해석방법을 이용해서 다양한 현장 사례에 대한 연구를 추가하면 개별진공압밀공법의 설계에 Plaxis 2D를 효율적으로 사용할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 부경대학교 2018년 자율창의 학술연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Indraratna, B. and Redana, I.W. (1997), "Plane Strain Modeling of Smear Effects Associated with Vertical Drains", *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, ASCE., Vol.123, No.5, pp.474-478.
2. Indraratna, B. and 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.
3. Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., and 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.
4. Rujikiatkamjorn, C., Indraratna, B., and Chu, J. (2008), "2D and

- 3D Numerical Modeling of Combined Surcharge and Vacuum Preloading with Vertical Drains”, *International Journal of Geomechanics*, ASCE., Vol.8, No.2, pp.144-156.
5. Perera, M.D.A. (2015) “Modelling Vertical Drains with Vacuum Preloading Considering the Soil Structure Characteristics”, *Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy*, School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong, Australia.
 6. Hansbo, S. (1981), “Consolidation of Fine-grained Soils by Prefabricated Drains”, *Proc. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.3, pp.12-22.
 7. Hansbo, S. (1987), “Design Aspects of Vertical Drains and Lime Column Installations”, *Proceedings of 9th Southeast Asian Geotechnical Conference*, Bangkok, Thailand, Vol.2, pp.8-12.
 8. Dong-Ah Geological Engineering Company (2013), “A Report on Field Measurement Control of the Site Improvement for the Construction of LNG Cryogenic Machine Technology Center”.
 9. Dong-Ah Geological Engineering Company (2016), “A Report on Field Measurement Control of the Site Improvement for the Construction of Lotte Versalis Complex”.
 10. Schmertmann, J.H. (1953), “The Undisturbed Consolidation Behavior of Clay”, *ASCE Transactions*, Vol.120, pp.1201-1233.
 11. Olson, R.E. (1986), “State of the Art: Consolidation Testing”, *Consolidation of soils: Testing and Evaluation*, ASTM STP 892, pp.7-68.
 12. Bergado, D., Asakami, H., Alfaro M., and Balasubramaniam, A. (1991), “Smear Effects of Vertical Drains on Soft Bangkok Clay”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.117, No.10.
 13. Rixner, J.J., Kraemer, S.R., and Smith, A.A. (1986), “Prefabricated Vertical Drains”, Vol.1 (Engineering Guidelines), Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-86/168, Washington D.C., pp.33-37.

Received : April 8th, 2021

Revised : April 16th, 2021

Accepted : April 16th, 2021