한국지반공학회논문집 제38권 8호 2022년 8월 pp. 29 ~ 37 / 특별논문집 제9호 /
JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY
Vol.38, No.8, August 2022 pp. 29 ~ 37 / NO. 9, Special Publication /

ISSN 1229-2427 (Print)
ISSN 2288-646X (Online)
https://doi.org/10.7843/kgs.2022.38.8.29

진공압밀공법 설계를 위한 Macro-element법 기반 유한요소해석

Finite Element Analysis based on the Macroelement Method for the Design of Vacuum Consolidation

김 하 영[1] Kim, Hayoung
김 규 선[2] Kim, Kyu-Sun

Abstract

A three-dimensional analysis is required to interpret the drainage behavior of an improved ground with vertical drains, and the macroelement method enables efficient interpretation considering the three-dimensional drainage effect of vertical drains under two-dimensional plane strain condition. In this study, a novel finite element analysis program was developed by applying the macroelement method to the vacuum consolidation method used in ground improvement practice. The conventional macroelement method was used to calculate the amount of drainage from the vertical drain by setting the excess porewater pressure in the drainage material to zero; however, the program developed in this study was improved to consider negative excess porewater pressure as an actual vacuum consolidation condition. To verify the performance of the program, because of a comparison with the measurement values at the site where the vacuum consolidation method was applied, results predicted by the program and field measurement data showed similar settlement behavior.

요 지

연직배수재로 개량된 지반의 배수거동을 해석하기 위해서는 3차원 해석이 필요한데, Macro-element법을 이용하면 2차원 평면변형 조건으로 연직배수재의 3차원 배수효과를 고려한 효과적인 해석이 가능하다. 본 연구에서는 지반개량에서 적용되는 진공압밀공법에 Macro-element법을 적용하여 새로운 유한요소해석 프로그램을 개발하였다. 기존의 Macro-element법은 배수재의 과잉간극수압을 0으로 하여 연직배수량을 산정하였으나, 본 연구에서 개발된 프로그램은 부(-)의 과잉간극수압을 실제 진공압밀 조건과 동일하게 고려할 수 있도록 개선하였다. 프로그램의 성능 검증을 위해 진공압밀공법 적용 현장의 계측치와 비교한 결과, 프로그램으로 예측한 결과와 현장 계측데이터는 동일한 침하거동을 나타내었다.

Keywords : Macro-element, Plane strain condition, Vacuum consolidation

1 정회원, 삼성물산㈜ 건설부문 ENG실 마스터 (Member, Master, Engrg. Division, Samsung C&T Corporation, Tel: +82-2-2145-6583, hy05.kim@samsung.com, Corresponding author, 교신저자)
2 정회원, 삼성물산㈜ 건설부문 ENG실 프로 (Member, Pro. Engrg. Division, Samsung C&T Corporation)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2023년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2022 by the Korean Geotechnical Society
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

연약지반에 부지조성 및 구조물을 축조하는 경우, 장기 압밀침하를 방지하기 위해 사전에 지반개량이 필요하다. 장기 압밀침하 방지를 위한 지반개량공법으로는 연직배수공법을 포함한 프리로딩(preloading) 공법이 일반적으로 적용된다. 프리로딩 공법은 공사비는 경제적이지만 압밀침하를 위한 시간이 길게 소요되고, 성토로 인해 지반융기 및 수평변위를 유발하여 시공 중 안전사고의 위험성이 있으므로, 프리로딩 공법 적용 시에는 급속성토가 어렵고 단계성토로 시공하는 것이 필수적이다. 또한 최근에는 성토재료의 물량 부족과 재료의 반출입에 따른 민원증가가 우려되고 있는 추세이므로, 프리로딩 공법을 적용할 경우에는 시공 중 제약 조건이 많아지고 있다. 반면에 진공압밀(vacuum consolidation) 공법은 Fig. 1과 같이 진공압을 이용하여 지반에 포함된 물과 공기를 강제 배출하여 침하 및 강도증가를 촉진시키므로, 급속시공을 가능하게 하고, 일반적으로 여성토가 불필요하기 때문에 공기단축을 가능하게 하므로, 성토물량을 최소화하여 시공할 수 있는 장점이 있는 공법이다.

2차원 평면변형율 해석에서는 3차원적으로 평면 배치된 연직배수재의 효과를 재현하기 위하여 투수계수를 등가의 값으로 보정하는 Mass permeability법을 일반적으로 사용한다(Cai and Miura, 1999). 진공압밀공법은 지반에 연직배수재를 타설하고, 진공펌프를 사용하여 강제적으로 물과 공기를 배수하여 압밀을 촉진시키는 방법이므로, 이 공법을 유한요소법으로 시뮬레이션 할 경우에는 연직배수재가 타설된 곳에 부(-)의 과잉간극수압을 가해야 한다. 그러나, 2차원 평면변형율 조건에서는 연직배수재가 종방향으로 연속된 것으로 표현되므로 투수계수를 인위적으로 작게 설정해야 하는 문제가 발생하기 때문에 정확한 배수거동 예측이 불가능하다.

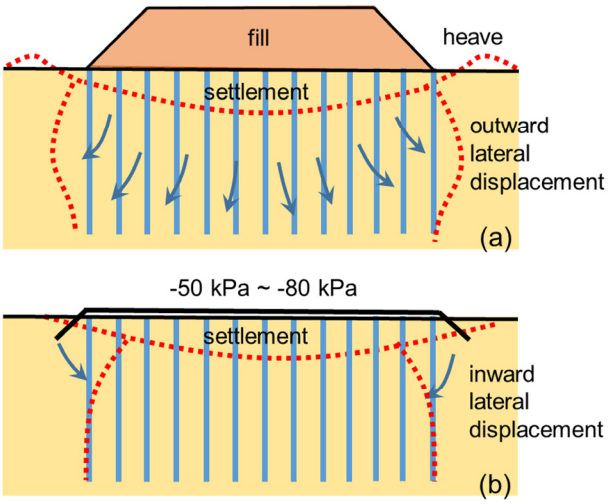


Fig. 1. Comparison of (a) Preloading method and (b) Vacuum consolidation method (modified from VCTA, 2014)

Sekiguchi et al.(1986)은 연직배수재가 타설된 지반의 수치해석적 문제점을 해결할 수 있고, 연직배수공법의 3차원적인 배수효과를 2차원 평면변형율 조건으로 표현할 수 있는 Macro-element법을 개발하였다. Hirata et al.(2009, 2010)은 Macro-element법을 범용성 있게 확장하여, 복잡한 경사지반, 정삼각형 배치 및 웰저항(well resistance) 효과 등도 고려할 수 있도록 개선하였다. 본 연구에서는 이와 같은 Macro-element법을 정변형율 사변형 요소(quadrilateral element)에 도입하여 진공압밀공법에 대한 해석을 효율적으로 수행할 수 있는 유한요소해석 프로그램을 개발하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서 Macro-element법 도입을 위한 정식화 과정을 설명하고, Macro-element법에서 진공압밀공법을 모사할 수 있는 방법을 기술하였다. 3절에서는 단위요소에 대한 이론해 및 유한요소해석 결과를 비교하여 개발된 유한요소해석 프로그램을 검증하였다. 4절에서는 현장 계측결과와 유한요소해석 결과를 나타내었다. 5절에서는 성토공법과 진공압밀공법을 유한요소해석으로 비교하여 진공압밀공법의 특징이 반영된 해석이 가능한 것을 확인하였다.

2. Macro-element법 도입

2.1 Macro-element의 정식화

Sekiguchi et al.(1986, 1988)은 이산화 기법으로 요소중심에 수두 값을 대표시키는 방법(Akai and Tamura, 1978)을 이용하여 Macro-element법을 개발하였다. Fig. 2와 같이 절점 1~절점 4를 갖는 유한요소에 대한 간극수의 연속조건식은 다음의 식 (1)과 같다.

$$\int \Delta v \cdot dxdydz = Q \cdot \Delta t \qquad (1)$$

여기서, Δv: 체적변형율 증분, Δt: 시간 증분, Q: 4개의 경계면에서의 단위시간당 유출수량이다.

간극수의 유동법칙으로 Darcy 법칙을 이용하면, 총

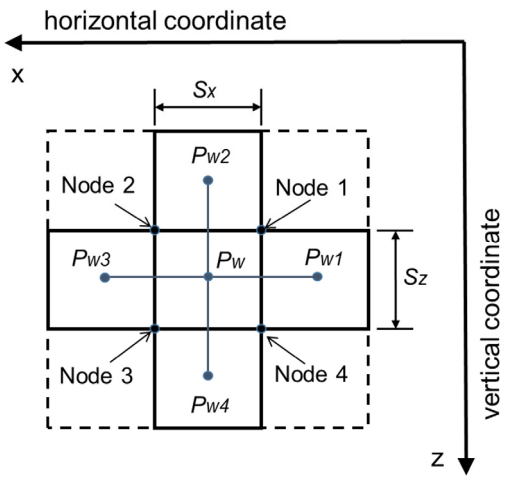


Fig. 2. Porewater pressure of each element (modified from Sekiguchi et al., 1986)

유출수량 $Q \cdot \Delta t$는 절점 1~절점 4을 갖는 중심요소의 대표 간극수압인 P_w와 그 주변요소의 대표 간극수압인 P_{wi}를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q \cdot \Delta t = \left[\left(\Sigma_{i=1}^{4} \beta_i \right) \cdot P_w - \Sigma_{i=1}^{4} \left(\beta_i \cdot P_{wi} \right) \right] \cdot S_y \qquad (2)$$

여기서, β_i (i = 1~4)는 i 방향의 유출계수, S_y는 각 요소의 깊이방향의 길이이다.

경계선 $\overline{14}$ (절점 1과 절점 4의 연결선)을 가로지르는 방향의 유출계수 β_1는 다음과 같이 표현된다.

$$\beta_1 = \frac{k_h \cdot \Delta t \cdot S_z / \gamma_w}{d_1 + (l_1 - d_1) \cdot (k_h / k_{h1})} \qquad (3)$$

여기서, k_h와 k_{h1}은 각각 중심요소와 인접요소 *1*의 수평방향 투수계수이고, S_z는 흐름에 수직한 방향의 요소폭, γ_w는 물의 단위체적중량, d_1는 중심요소의 도심으로부터 경계선 $\overline{14}$까지의 수직거리, l_1는 중심요소의 도심과 인접요소 *1*의 도심과의 거리이다.

직경 *2a*의 연직배수재가 격자형으로 간격 $S_x = S_y$로 타설되었을 경우, 기본 Macro-element는 그 중심에 1개의 연직배수재(직경 *2a*, 길이 S_z)를 포함하는 평면 $S_x \times S_y$, 높이 S_z의 각주가 된다($S_y = S_x$). 인접하는 3개의 Macro-element 내의 과잉간극수압 분포를 모식화하면 Fig. 3과 같다. 각 요소 내에서는 연직배수재 방향으로 방사상의 간극수 흐름이 발생한다. 시간 증분 Δt에 1개의 연직배수재(직경 *2a*, 길이 S_x, 무한대 투수성)를 통하여 배출되는 수량을 $Q_{VD} \cdot \Delta t$로 하면, 연직배수재 외주($r = a$)의 동수경사는 다음과 같다.

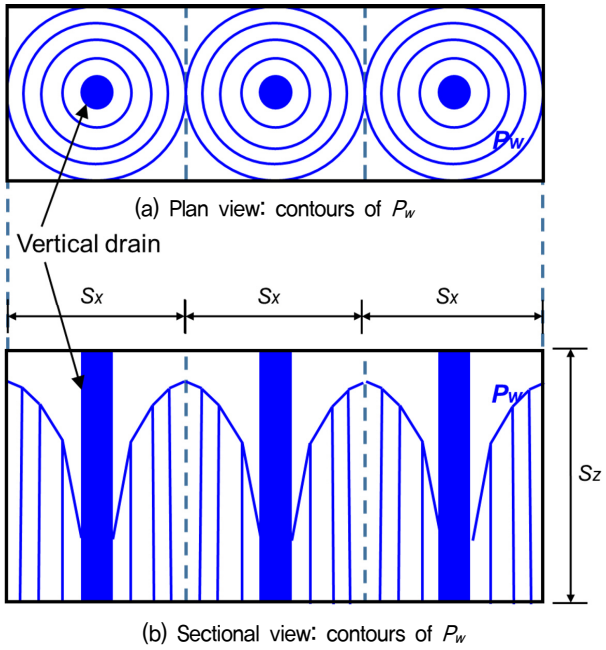


Fig. 3. Excess porewater pressure distribution (modified from Sekiguchi et al., 1986)

$$Q_{VD} \cdot \Delta t = 2\pi a \cdot S_z \cdot k_h \cdot \Delta t \cdot \frac{\partial (P_w / \gamma_w)}{\partial r} \Big|_{r=a} \qquad (4)$$

식 (2)로부터 유추하면 1개의 Macro-element 내 1개의 연직배수재가 존재하는 경우에 대해서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_{VD} \cdot \Delta t = \beta_{VD} \cdot \overline{P_w} \cdot S_y \qquad (5)$$

여기서, β_{VD}는 연직배수재의 유출계수, S_y는 Macro-element의 깊이방향 길이, $\overline{P_w}$는 평균 과잉간극수압으로 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{P_w} = \frac{2\pi \int_0^b P_w \cdot r \cdot dr}{\pi b^2} \qquad (6)$$

여기서, $b \left(= \frac{S_x}{\sqrt{\pi}} = \frac{S_y}{\sqrt{\pi}} \right)$는 유효집수반경이다.

연직배수재 주변의 과잉간극수압 P_w의 분포특성을 다음 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_w = P_w(r,z,t) = f(r) \cdot g(z,t) \tag{7}$$

식 (7)에서 분포함수 *f(r)*은 Barron(1948)에 의한 등변형율 조건의 연직배수재 문제에 대한 고유함수를 적용한다.

$$f(r) = \ln\left(\frac{r}{a}\right) - \frac{r^2 - a^2}{2b^2} \tag{8}$$

식 (8)에서 *f(a)* = 0의 경우는, 연직배수재 내에서 수두손실이 없고, 과잉간극수압이 발생하지 않는 것으로 가정하고 있다. 격자배열(S_x = S_y)의 연직배수에 대한 임의의 1개의 유출계수 β_{VD}를 구하면 다음의 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta_{VD} = \frac{2\sqrt{\pi} \cdot k_h \cdot \Delta t}{\gamma_w} \cdot \frac{S_z}{b} \cdot \left[\frac{1 - 1/n^2}{\ln(n) - (1 - 1/n^2)(3 - 1/n^2)/4}\right] \tag{9}$$

여기서, *n=b/a*이다.

정리하면, 체적변화량은 요소의 경계면으로부터의 간극수의 유출량과 연직배수재에 의한 간극수의 유출량의 합이므로, 다음의 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$\int \Delta v \cdot dxdydz = Q \cdot \Delta t + Q_{VD} \cdot \Delta t$$
$$= \left[\left(\beta_{VD} + \Sigma_{i=1}^{4}\beta_i\right) \cdot \overline{P_w} - \Sigma_{i=1}^{4}\left(\beta_i \cdot \overline{P_{wi}}\right)\right] \cdot S_y \tag{10}$$

기본 Macro-element의 요소경계에서는 식 (8)의 요소 내의 과잉간극수압 분포함수가 유효집수반경 위치(*r* = *b*)에서 *f'(b)* = 0 이다. 이 조건으로부터 2개의 Macro-element 사이를 가로지르는 수평방향의 흐름은 생기지 않도록 해석하므로, 식 (10)의 요소경계에서의 유출계수는 다음의 조건을 넣을 수 있다.

$$\beta_1 = \beta_3 = 0 \tag{11}$$

2.2 Macro-element법을 활용한 진공압밀 모사

Macro-element법에서는 연직배수재 내에서 과잉간극수압이 발생하지 않는 조건(과잉간극수압 = 0)으로 정식화 되었다. 그러나, 진공압밀공법에서는 연직배수재 내에서 부(-)의 과잉간극수압이 발생하기 때문에 연직배수재 내에 일정 크기의 부(-)의 과잉간극수압을 적용해야 한다. 연직배수재 내의 과잉간극수압을 P_{wd} 라고 하면 식 (5)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_{VD} \cdot \Delta t = \beta_{VD} \cdot \left(\overline{P_w} - P_{wd}\right) \cdot S_y \tag{12}$$

식 (12)를 적용할 경우, 식 (10)은 다음의 식 (13)과 같이 표현할 수 있다.

$$\int \Delta v \cdot dxdydz = Q \cdot \Delta t + Q_{VD} \cdot \Delta t$$
$$= \left[\left(\beta_{VD} + \Sigma_{i=1}^{4}\beta_i\right) \cdot \overline{P_w} - \beta_{VD} \cdot P_{wd} - \Sigma_{i=1}^{4}\left(\beta_i \cdot \overline{P_{wi}}\right)\right] \cdot S_y \tag{13}$$

식 (13)의 제 3항은 연직배수재 내의 부(-)의 과잉간극수압에 의한 배수량을 표현하고 있고, 부(-)의 과잉간극수압은 작용하는 진공압과 같은 값으로 간주할 수 있기 때문에, 유한요소해석 프로그램에서는 하중 항으로 이항하여 계산한다.

3. 유한요소해석 프로그램 검증

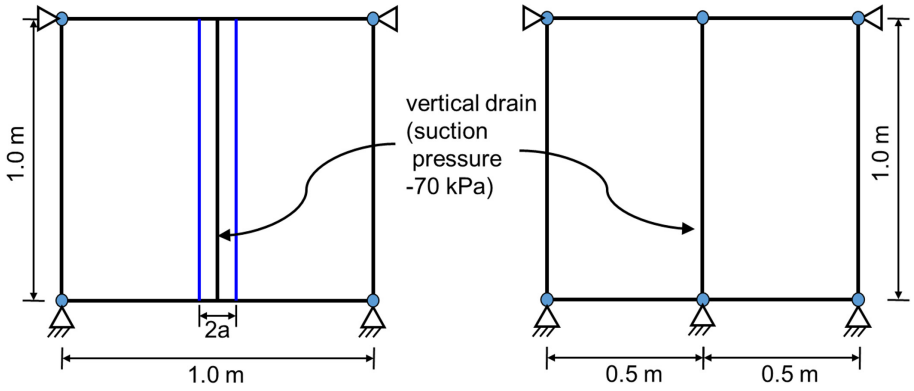
본 연구에서는 유한요소해석 프로그램에 식 (13)을 도입하여 진공압밀에 의한 간극수압의 변화를 표현할 수 있는 유체-지반 연성변형 해석 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램을 검증하기 위해 단위요소에 대해 이론해와 유한요소해석 결과를 비교하였고, 진공압밀 및 성토재하 시의 간극수압 및 침하 거동에 대한 적합성을 검증하였다.

3.1 해석 조건

개발된 프로그램의 검증을 위해 단순한 단위요소의 탄성모델에 대해 검토하였다. 검증에 이용한 입력치는 Table 1에 요약하였다. 여기서 사용된 입력치는, 일반적인 토질 물성치와는 달리, 이론해와의 비교 및 진공압밀 해석을 위해 이상적인 값을 사용하였다.

Table 1. Input parameters for element verification model (modified from Hirata et al., 2010)

Elastic modulus, *E* (kN/m^2)	Poisson ratio, *ν'*	Hydraulic conductivity, *k* (m/day)	Radius of drain, *a* (m)
1000.0	0.333	8.64×10^{-4}	0.0141



(a) Element for Macro-element method (b) Conventional element (drainage condition of boundary element)

Fig. 4. Element verification model (modified from Hirata et al., 2010)

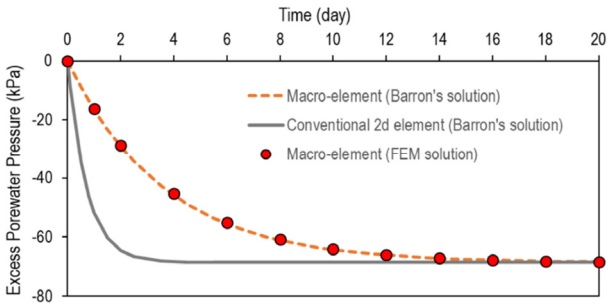


Fig. 5. Element simulation result

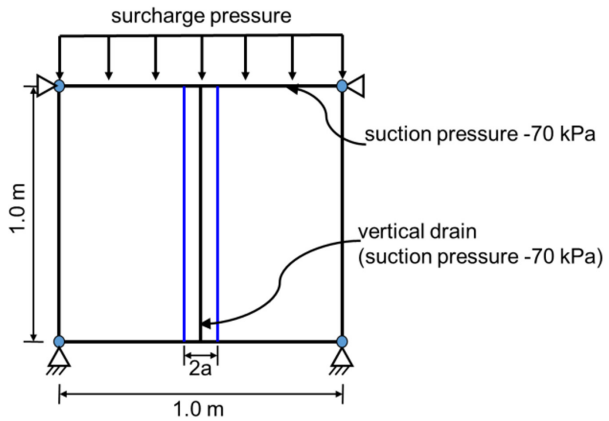


Fig. 6. Element simulation of vacuum consolidation process (modified from Hirata et al., 2010)

3.2 이론해와의 비교

프로그램 검증을 위해 Fig. 4와 같이 Macro-element 법을 이용한 경우와 요소경계에 배수면을 설정한 경우에 대하여 비교하였다. 시뮬레이션 비교 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Macro-element법을 적용한 경우 Barron의 이론해(Barron, 1948)와 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 참고로 Barron의 이론해를 통해서 보면 요소경계에 배수면을 설정할 경우에는 압밀속도가 실제보다 훨씬 빠르다는 것을 알 수 있다. 이는 Hirata et al.(2010)의 해석 결과와도 일치한다. 이와 같은 결과는 일반적인 유한요소해석 프로그램으로는 진공압밀에 대한 거동 예측이 어렵다는 것을 말해주는 것으로, 본 연구에서 도입한 Macro-element법의 진공압밀 거동해석에서의 유효성을 확인할 수 있다.

3.3 진공압밀 시공공정 검증

진공압밀공법의 시공공정을 재현한 해석결과에 대한 검증을 위해, Fig. 6과 같이 단위요소에 대한 시뮬레이션(Hirata et al., 2010)을 실시하였다. Macro-element에는 진공압을 -70kPa 재하하는 동시에, 요소 상부에도 진공압 -70kPa을 재하하였다. 또한 요소 상부에는 성토하중을 재하하여 지반변위를 예측하였다. 단위요소에 대한 시뮬레이션 결과는 Fig. 7에 나타내었다. 진공압을 재하하면 시간 경과에 따라 단위요소의 평균 간극수압이 재하한 진공압에 수렴하는 것을 알 수 있다. 또한 진공압을 1일 동안 정지 후 재가동하면 단위요소의 평균 간극수압이 일시적으로 상승한 후 곧바로 진공압에 수렴하는 경향을 나타내었다. 진공압을 작용하고 있는 상태에서 성토하중을 단계적으로 재하하면 성토하중을 재하하는 순간에는 단위요소의 평균 간극수압이 일시적으로 상승하지만 진공압의 영향으로 간극수압이 진공압에 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 침하는 진공압 및 성토하중 작용에 따라서 연동하여 발생하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과로부터, 개발된 프로그램이 진공압 재하, 정지 및 성토재하 등의 진공압밀공법 공정에 따른 각각의 시공단계에 따라 지반거동을 적합하게 재현하고 있는 것을 확인할 수 있다.

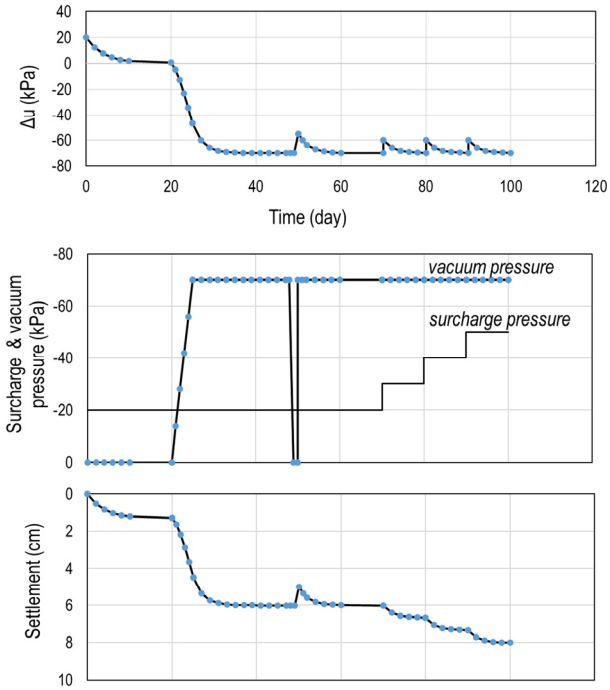


Fig. 7. Result of element simulation of vacuum consolidation process

4. 현장 시공결과 비교

Han et al.(2013)은 부산지역 해상에 호안을 설치하고 준설매립 후 지반개량을 실시한 지반에서 해석 및 계측 결과에 대한 비교 연구를 수행하였다. 대상 지반은 30.4m 두께의 원지반 연약점성토와 상부 12.3m 두께의 준설매립토로 이루어진 총 42.7m 두께의 토층이다. 해당 현장은 준설매립 후, 지반개량으로 진공압밀과 성토 재하가 병행되어 시행되었다. 본 연구에서 개발된 프로그램을 검증하기 위해 Han et al.(2013)에서 제시된 지반조건 및 지반정수를 참조하여 Table 2의 지반 물성치를 본 연구에서 개발한 프로그램의 입력치로 해석을 수행하였다. 여기서 표준압밀시험의 압밀계수는 실제의 거동과 비교할 때 1/5 ~ 1/10 정도로, 실제 사용하는 투수계수는 5 ~ 10 배로 설정할 필요가 있다는 결과에 따라, 유한요소해석에서의 수평 투수계수는 압밀시험 결과의 5

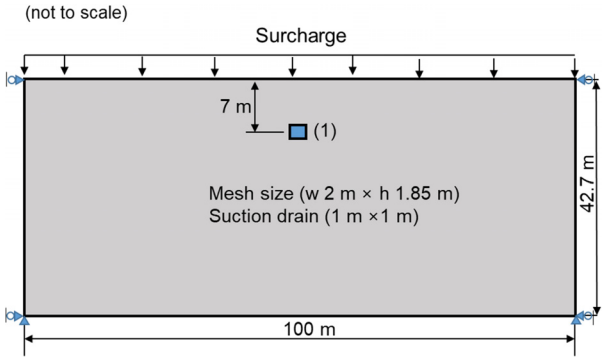


Fig. 8. Geometry of FEM analysis

배의 값을 적용하였다(VCTA, 2014). Fig. 8에 나타낸 바와 같이, 등간격의 Mesh를 사용하고, 지표면에 성토하중을 작용시켜서 해석을 수행하였다.

유한요소해석은 시간에 따른 진공압 재하 및 성토 재하를 현장 시공순서에 따라 반영하였다. 최종 진공압은 -80kPa이고 성토하중은 17.1kPa 이다. 현장에서는 연직배수재 타설 후 97 일이 경과한 후에 진공압을 가하였으며, 진공압을 가하기 전 97 일 동안에 침하가 2.24m 발생하였다. 이는 준설매립에 의한 자중압밀 침하로 인한 것으로 판단되며, 정확한 압밀상태를 알 수 없기 때문에, 본 해석에서는 진공압을 작용한 시점부터 해석을 실시하였다. 시공이력을 반영한 유한요소해석 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 유한요소해석 결과는 현장 계측데이터와 유사한 경향을 나타내었다. 재하하중은 진공압이 대부분이므로, 해석 프로그램이 잘 작동되고 있음을 알 수 있다. 지반 내부 지점 (1)에서의 응력경로 및 간극수압을 Fig. 10에 나타내었다. 응력경로는 진공압 재하로 인하여 편차응력이 증가하지 않고 평균 유효응력만이 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 시공 중 전단파괴의 위험이 없다는 것을 의미한다. 또한 간극수압은 진공압 재하에 따라 부(-)의 간극수압을 나타내며, 시간 경과에 따라 재하 진공압에 수렴하고 있는 것을 알 수 있다. 성토 재하로 인하여 일시적으로 간극수압이 상승하나 그 영향은 미미하다.

Table 2. Input soil parameter

Classification		Thickness (m)	Model	M	Unit weight (kN/m^3)	Compression index Cc	Initial void ratio e_0	Horizontal permeability k_h (cm/s)
Dredged reclaimed layer		12.3	MCC	0.772	15.29	0.82	2.55	1.66×10^{-7}
In situ clay layer	Upper	7.4	MCC	0.772	15.84	0.71	1.93	1.66×10^{-7}
	Middle	11.0	MCC	0.772	15.47	0.93	1.87	
	Lower	12.0	MCC	0.772	16.62	0.71	1.37	

*MCC: Modified Cam-Clay

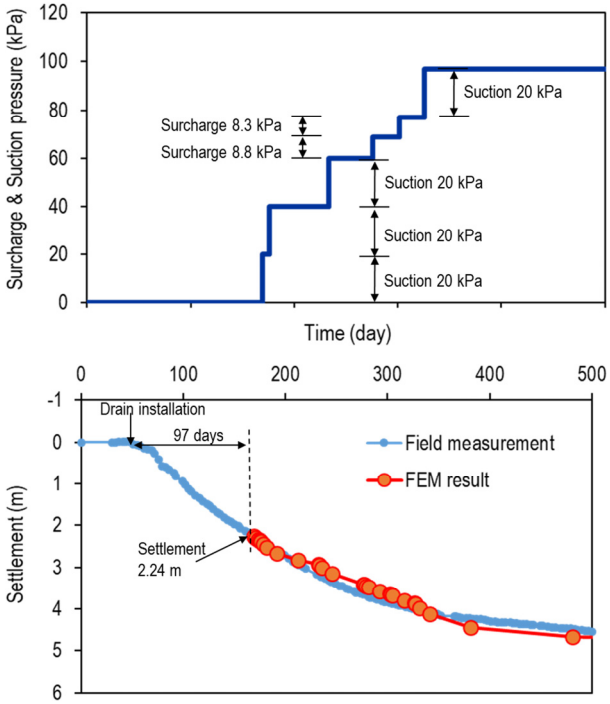


Fig. 9. Comparison of field measurement and settlement prediction of FEM analysis

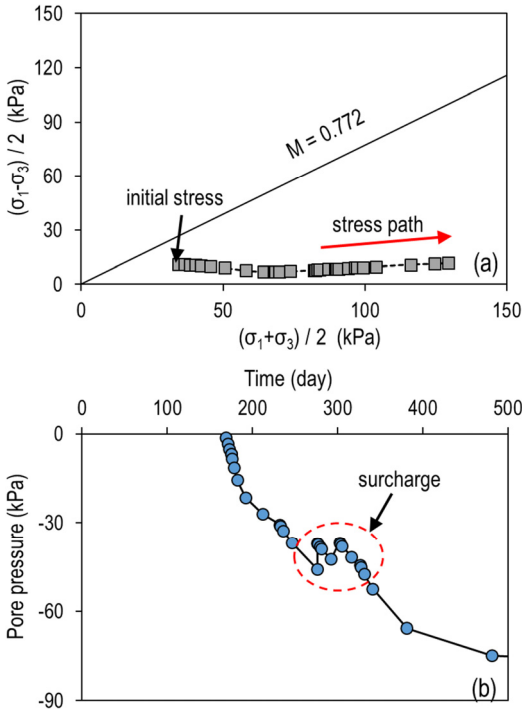


Fig. 10. Results of FEM analysis: (a) Stress path, (b) Pore pressure

5. 성토공법과 진공압밀공법의 유한요소해석 결과 비교

진공압밀을 해석할 때 진공압을 지반에 작용시킬 수 없어 진공압에 상당하는 하중을 성토하중으로 대체하여

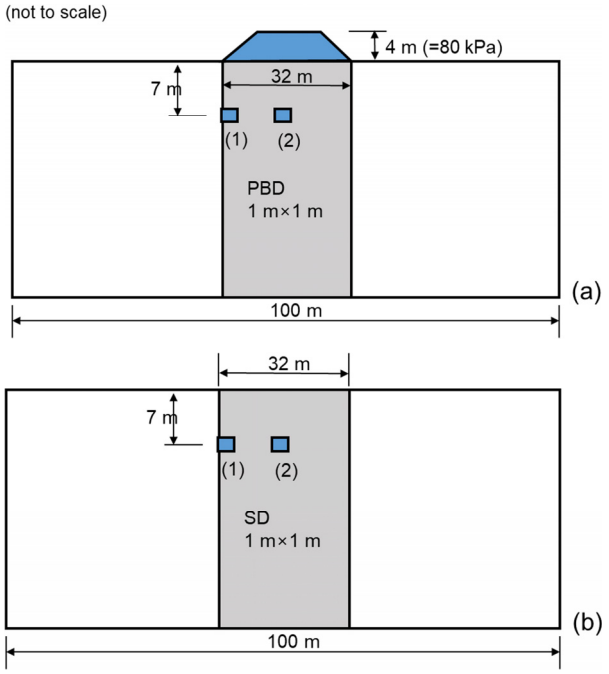


Fig. 11. Geometry of FEM analysis: (a) surcharge, (b) suction drain

해석하는 경우가 대부분이다. 이럴 경우 진공압밀공법의 중요한 특징의 하나인 변위 특성을 반영할 수 없다. 여기서는 같은 하중 조건을 진공압을 작용하였을 때와 성토하중으로 작용하였을 때를 비교하였다. 성토하중 조건은 급속시공을 가정하여 1m 씩 5 일 간격으로 4m를 성토하는 것으로 하였으며, 진공압 조건은 성토하중과 똑같은 진공압을 동일한 간격으로 가하였다. 입력 물성치는 Table 2에 제시한 값을 이용하였다.

성토공법과 진공압밀공법의 모식도를 Fig. 11에 나타냈다. 기존 해석방법으로는 진공압밀의 해석이 곤란하므로 Fig. 11(a)와 같이 진공압밀하중과 같은 성토하중으로 대체하여 해석을 하게 된다. 그러나 개발된 유한요소해석 프로그램을 이용하면 진공압밀에 대한 정확한 해석이 가능하다. Fig. 11(a)와 Fig. 11(b)에 나타낸 케이스에 대하여 개발된 프로그램으로 해석하였으며, Fig. 11의 지점 (1)의 수평변위 결과를 Fig. 12에 나타냈다. Fig. 12(a)는 성토로 인하여 성토 경계부에서 외곽 방향(-)으로 수평변위가 발생하고 있음을 알 수 있다. 그러나 진공압밀공법 해석 결과는 실측 데이터(Matsumoto et al., 2003)로 확인된 바와 같이 내측 방향(+) 변위가 유발된다는 것을 알 수 있다.

성토공법과 진공압밀공법을 적용하였을 때의 지점 (1)과 지점 (2)의 응력경로를 Fig. 13에 나타내었다. 성토공법은 성토 진행과정에 따라 한계상태선에 근접하는 경

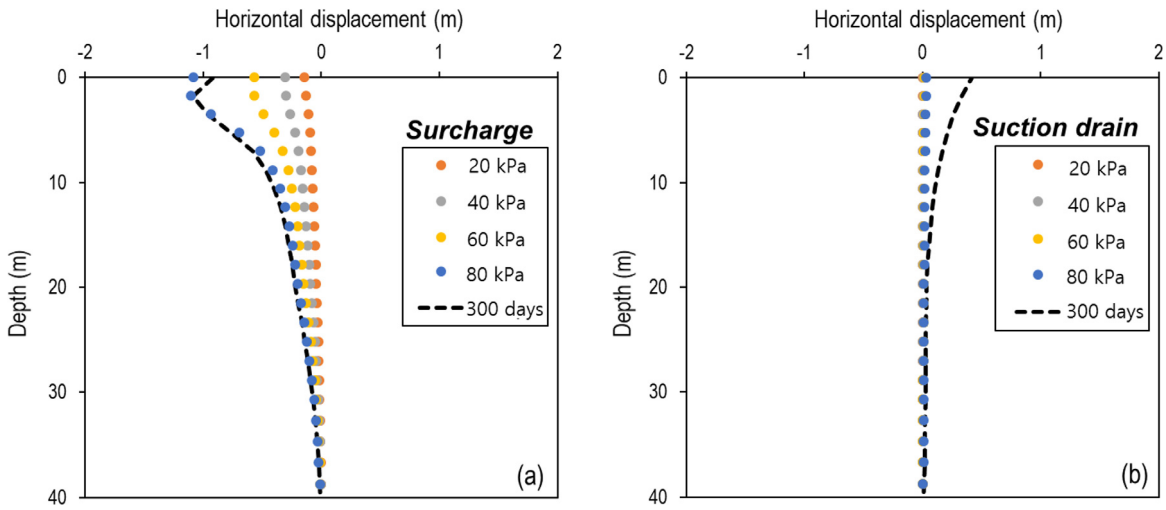


Fig. 12. Horizontal displacement: (a) surcharge, (b) suction drain

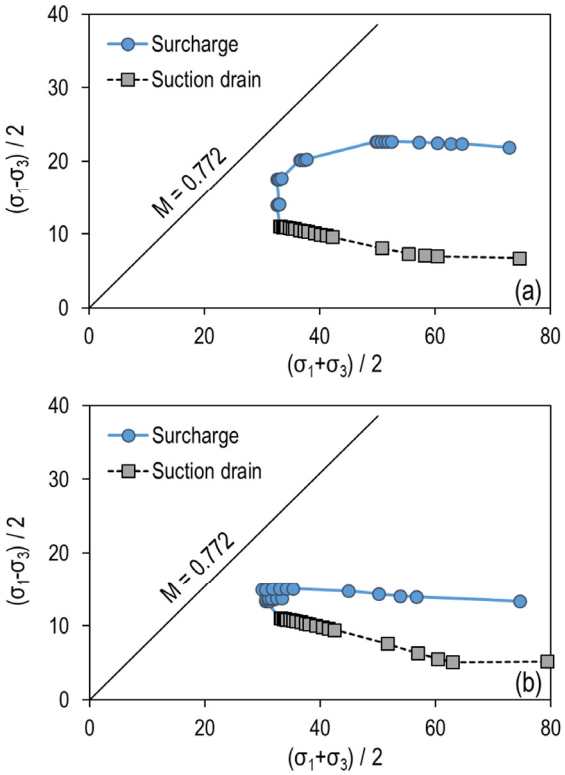


Fig. 13. Stress path: (a) at point 1, (b) at point 2

우가 발생하며, 경우에 따라 성토 중 전단파괴 가능성이 존재한다. 반면에, 진공압밀공법의 경우 초기 K_o 응력상태에서 편차응력의 변화가 거의 없는 상태에서 등방압밀 거동을 나타내기 때문에 시공 중 안정성을 확보할 수 있음을 응력경로를 통해 확인할 수 있다.

이상의 결과로부터, 진공압밀을 성토공법으로 치환하여 해석할 경우에는 수평변위 및 지반 내의 응력상태를 정확히 예측할 수 없기 때문에, 진공압밀공법 적용에 따른 효과를 적절히 반영할 수 없음을 알 수 있다. 본 연구에서 개발한 유한요소해석 프로그램은 진공압밀공법의 특징이 효과적으로 반영된 해석이 가능하고, 실무에서 충분히 활용 가능한 것을 확인하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 Sekiguchi et al.(1986)이 제안한 Macro-element법을 2차원 평면변형율 해석에 도입하여 3차원 배수효과를 고려한 진공압밀공법의 해석이 가능하도록 유한요소해석 프로그램을 개발하였다. 본 논문에서 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) Macro-element법을 도입한 개발된 프로그램은 3차원 배수효과를 2차원 평면변형율 해석으로 용이하게 구현이 가능하며, 진공압 재하, 정지 및 성토재하에 따른 지반거동을 재현할 수 있다.

(2) 현장 계측결과와의 비교를 통하여 계측결과와 개발된 유한요소해석 결과가 좋은 상관관계를 나타내고 있음을 확인하였다. 그러나 진공압밀공법의 설계 및 예측을 실무에 적용하기 위해서는 정확한 지반 물성시험 및 평가가 수반되어야 한다.

(3) 개발된 프로그램을 이용하여 진공압밀공법의 특징인 편차응력의 변화가 거의 없는 등방압밀 거동을 구현할 수 있으며, 진공압 재하 중 시공 안정성을 확보할 수 있음을 응력경로를 통해 확인 하였다.

참고문헌 (References)

1. Akai, K. and Tamura, T. (1978), Study of Two-dimensional Consolidation Accompanied by an Elastic Plastic Constitutive Equation, *Proceedings of JSCE*, No.269, pp.98-104 (in Japanese).
2. Barron (1948), Consolidation of Fine-grained Soil by Drain Wells, *Trans. ASCE*, Vol.113, pp.718-742.
3. Cai, J.C. and Miura, N. (1999), A Simple Method for Analyzing Consolidation of PVD Improved Subsoil, *Proc. 8th Australia-New Zealand Conference on Geomechanics*, Hobart, Vol.1, pp.243-249.
4. Han, S.J., Yoo, H.K., Kim, B.I., and Kim, S.S. (2013), Settlement Characteristics of Soft Ground Applying the Suction Drain Method, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.3, pp.15-27 (in Korean).
5. Hirata, M., Shimizu, H., Fukuda, J., Yamada, K., and Kawada, M. (2009), FE Simulation for Vertical Drain Placing Ground Using Expanded Macro-element Method, *Journal of Applied Mechanics JSCE*, Vol.12.
6. Hirata, M., Shimizu, H., Fukuda, J., Yamada, K., and Kawaida, M. (2010), F.E. Simulation for Vertical Drain Placing Ground Using Expanded Macro-element Method, *J. Appl*. Mech.13, pp.431-442 (in Japanese).
7. Matsumoto, K., Ochiai, H., and Yasufuku, N. (2003), Control of Stability of Filling on Soft Ground under Vacuum Consolidation based on Estimation by FEM Analysis, *JSCE*, No.750, III-65, 77-88.
8. Sekiguchi, H., Shibata, T., Fujimoto, A., and Yamaguchi, H. (1986), A Macro-element Approach to Analyzing the Plane Strain behavior of Soft Foundation with Vertical Drains, *Proceedings of the 31st Symposium of the JGS*, pp.111-116 (in Japanese).
9. Sekiguchi, H., Shibata, T., Mimura, M., and Sumikura, K. (1988), Behaviour of the seawall and Bridge Abutment at the edge of an offshore airport fill, the Annuals of the Disaster Prevention Research Institute Kyoto University, No.31 B-2.
10. Vacuum Consolidation Technology Association (VCTA) (2014), Technical report of high vacuum pressure N&H method, pp.163-172 (in Japanese).

Received : June 20th, 2022
Revised : July 19th, 2022
Accepted : July 29th, 2022