

개별진공압이 적용된 연약지반의 응력과 변형 특성

Characteristic of stress and strain of soft ground applied individual vacuum pressure

안동욱¹⁾, Dong-Wook Ahn, 한상재²⁾, Sang-Jae Han, 김병일³⁾, Byung-Il Kim,
정승용⁴⁾, Seung-Yong Jung, 김수삼⁵⁾, Soo-Sam Kim

- 1) 한양대학교 건설환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.
- 2) (주)지구환경전문가그룹 기술연구소장, Research Director, Research laboratory, Expert Group for Earth and Environment Co. Ltd.
- 3) (주)지구환경전문가그룹 기술연구소 부장, General Manager, Research laboratory, Expert Group for Earth and Environment Co. Ltd.
- 4) (주)지구환경전문가그룹 대표이사, CEO, Expert Group for Earth and Environment Co. Ltd.
- 5) 한국토지주택공사 토지주택연구원장, Director General, Land&Housing Institute, Korea Land&Housing Corporation

SYNOPSIS : Individual vacuum pressure method is soft ground improvement technique, in which a vacuum pressure can be directly applied to the vertical drain board to promote consolidation and strengthening the soft ground. This method does not require a surcharge load, different to embankment or pre-loading method.

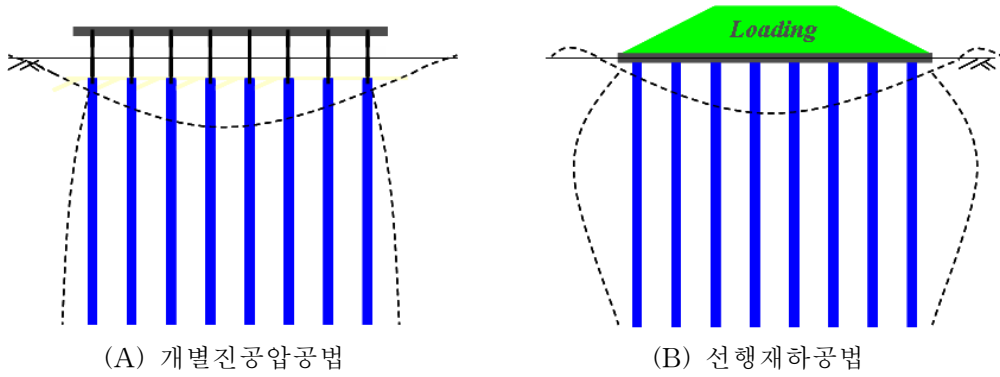
In this study, given the inner displacement of the ground where the individual vacuum pressure is applied, this dissertation aimed to reproduce the state of stress in the ground that is subject to the constraints created by the depth of improvement area. Modified Cam Clay theory which made it possible to take into account the isotropic displacement of the ground was applied to the NAP-IVP used simulation; the conception of equivalent permeability proposed by Hird was also applied so that the 3-dimensional real construction effect of drain materials could be reflected in the analysis.

Keywords : individual vacuum pressure, inner displacement, stress path, NAP-IVP

1. 서 론

개별진공압공법은 선행재하공법과 달리 그림 1과 같이 개량영역 내부로 큰 내향변형이 생기고, 개량영역 외부에도 광범위한 범위까지 침하와 측방변형이 발생한다(김기년, 2008). 이러한 변형의 차이로 인해 주변 지반에 미치는 변형의 영향 범위 및 그 정도를 정량적으로 사전에 예측하여 현장에 개별진공압공법을 적용하는 것이 중요하다. 하지만 설계 단계에서 실시되는 압밀계산에서는 간극 수압의 감소분($-\Delta u$)과 압밀하중의 증가분($+\Delta p_v$)을 동일하게 가정하여, 일반적인 연직배수공법에서 적용하고 있는 Barron의 이론에 근거한 일차원 압밀계산을 하고 있다. 이러한 관용적인 계산 방법으로는 개별진공압공법 특유의 내향변형을 고려할 수 없고, 개량영역의 깊이에 따라 발생하는 구속 조건의 차이에 의한 지반내의 응력 상태를 적절하게 구현할 수 없다(Mizuno, 2008). 또한 개별진공압공법은 경계 조건에 대한 지반내의 응력 상태를 적절하게 모사할 수 있는 구성 모델을 적용하는 것이 중요하다.

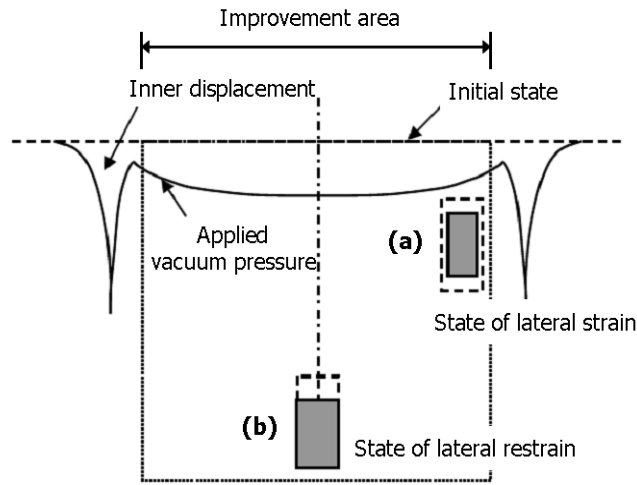
본 연구에서는 이러한 사실에 근거하여 개별진공압공법의 지반거동을 정확히 예측하기 위해 지반의 변형 상태에 따른 연약지반의 거동을 파악하고자 하였다.



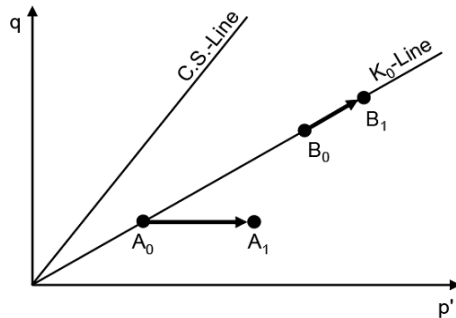
(A) 개별진공압공법 (B) 선행재하공법
 그림 1. 개별진공압공법과 선행재하공법의 비교 (김기년, 2008)

2. 개별진공압이 적용된 연약지반의 변형상태 및 응력경로

Umezakhi et al.(2003)는 그림 2와 같이 개별진공압을 적용한 연약지반의 변형상태와 이에 따른 이론적 응력경로를 제시하였다. 지반의 변형 조건을 (A)측방변형상태와 (B)측방구속상태로 분류하였다(그림 2(A)). 즉, 개량영역 경계부분의 상부는 측방변형상태로 압밀이 진행되고, 개량영역의 중앙부와 내향변형이 발생하지 않는 심층부에서는 측방구속상태로 압밀이 진행된다고 제안하였다. 이에 따른 응력경로는 그림 2(B)에 나타난 것과 같이 측방변형상태일 경우 $A_0 \rightarrow A_1$, 측방구속조건일 경우 $B_0 \rightarrow B_1$ 의 경로를 따라 이동할 것이다.



(A) 개별진공압이 적용된 지반의 변형



(B) 개별진공압이 적용된 지반의 응력경로

그림 2. 개별진공압이 적용된 지반의 변형 및 응력경로 (Umezakhi et al., 2003)

3. 해석 방법 및 조건

개별진공압에 의해 개량된 현장의 측방변형조건을 고려한 지반 거동을 예측하기 위해 현장지반을 모사하였고, 해석 결과를 실시하였다. 해석에는 개량영역의 외부의 변형을 고려한 개별진공압공법에 최적화된 수치해석 프로그램(Numerical Analysis Program-Individual Vacuum Pressure; NAP-IVP)을 사용하였다.

NAP-IVP는 지반의 등방변형을 고려할 수 있는 Modified Cam Clay 이론을 사용하였고, 실제의 3차원적인 배수재 타설효과를 고려한 해석이 가능하도록 Hird(1992)가 제안한 등가투수 개념을 적용하였다. 또한 개량영역의 깊이에 따른 진공압의 효율감소와 단계진공압의 영향을 고려할 수 있다는 특징이 있다.

해석단면은 개별진공압만을 적용하였을때의 개량영역의 깊이와 폭의 상관관계에 따라 개량영역 내부와 외부의 침하량이 발생하는 것을 정량적으로 파악하고자 개량영역의 깊이 30m, 개량영역의 폭 50m로 정하였다. 진공압 조건(-20, -40, -60, -80kPa)을 구현하기 위해 각 배수재 선요소에 부(-)의 간극수압을 가하였으며, 현장시험시공 결과로 도출된 깊이에 따른 진공압 효율 감소 경향을 고려하여 표 1과 2의 매개변수를 사용하여 해석을 실시하였다.

표 1. MCC 모델의 매개변수

κ	λ	e_{cs}	M	ν'	γ_{bulk} (kPa)	γ_w (kPa)	k (cm/sec)	K_0
0.0234	0.117	2.09	1.042	0.3	171.68	98.1	5.73×10^{-8}	0.6

표 2. 배수재의 매개변수

Type	E_0	ν	γ_{bulk} (kPa)	γ_w (kPa)
PBD (Bar)	0.001	0.30	0.0001	9.81

지반조건은 개량영역의 두께를 29m, 기밀층을 1m로 설정하였고, 지하수위는 지표면에 위치하는 것으로 가정하였으며, 대상영역의 저면은 불투수층으로 가정하여 일면배수만을 허용하였다. 더불어 배수재는 1.5m 간격의 사각형 배치로 간주하였다. 경계조건은 측방변형조건과 측방구속조건으로 나누어 적용하여, 지반의 변형상태에 따른 영향을 파악하고자 하였다. 그림 3에 해석 단면 및 유한 요소망을 도시하였다.

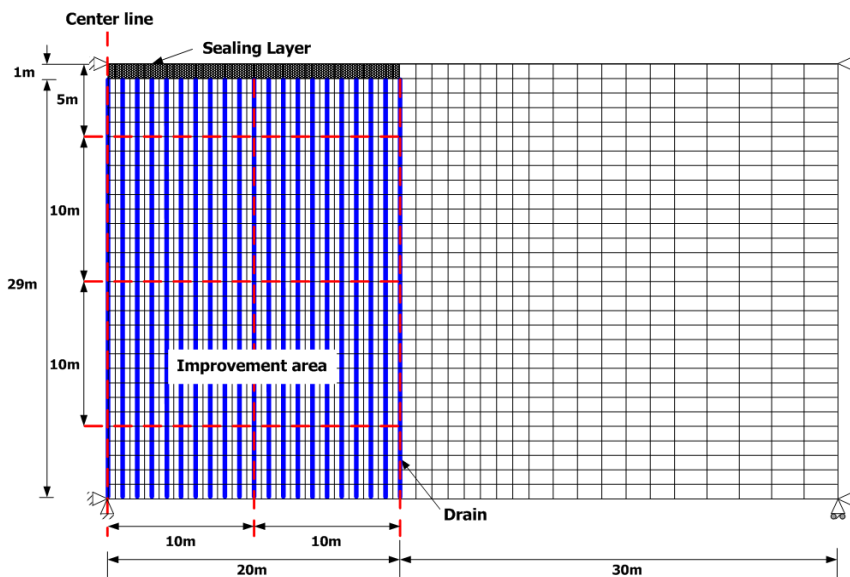


그림 3. 해석단면의 경계조건 및 유한 요소망

4. 해석결과

그림 4에 측방변형조건과 측방구속조건에서의 개량영역으로 부터의 거리에 따른 침하량을 나타냈다. 시간의 경과에 따라 침하량은 두 조건에서 모두 증가하는 것을 알 수 있었다. 개량영역에서의 침하는 측방구속조건에서 크게 나타났고, 개량영역외부에서의 침하는 측방변형조건에서 더 크게 나타났다. 이러한 결과는 측방구속조건의 경우 개량영역 내부로의 내향변형에 의한 침하를 고려할 수 없기 때문으로 판단된다. 측방변형조건일 때의 침하량은 측방구속조건일 때 개량영역 중앙부 침하량의 69.89%(60일), 72.53%(150일), 74.58%(300일)로 나타났다. 이를 통해 구속조건에 의한 차이는 개량조기가 더 크고 개량기간이 경과할수록 감소한다는 것을 알 수 있었다.

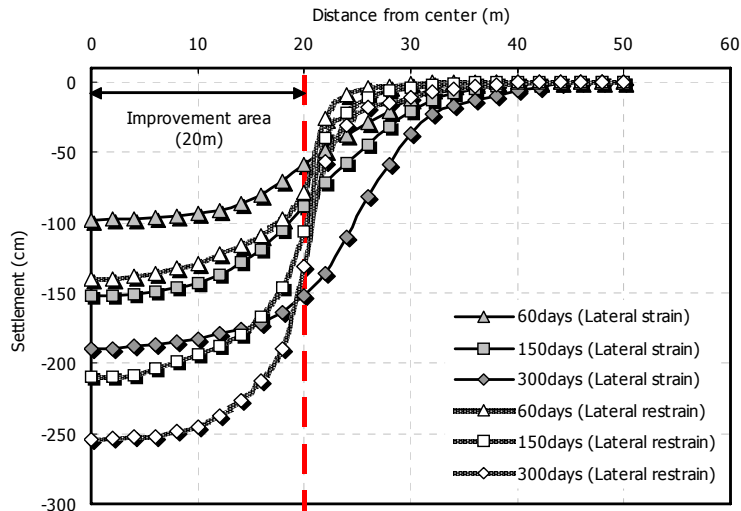


그림 4. 개량영역의 중앙부로부터의 거리에 따른 침하량 변화

그림 5는 측방변형조건과 측방구속조건에서의 개량영역 경계부의 측방변형을 나타냈다. 측방구속조건의 경우, 측방변형을 제한하였기 때문에 개량영역 경계부에서의 측방변형은 나타나지 않았다. 측방변형 조건에서는 개량기간이 증가할수록 측방변형이 증가하였고, 개량영역의 깊이가 증가함에 따라 발생하는 측방변형은 감소하였다.

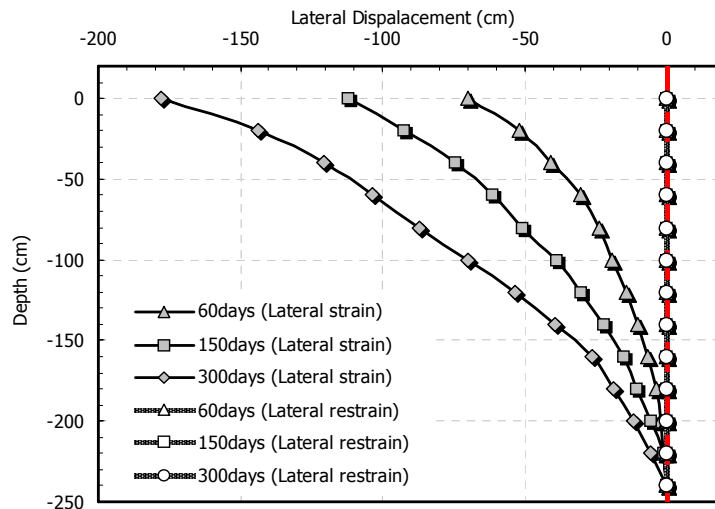


그림 5. 개량영역의 깊이에 따른 측방변형의 변화

그림 6~8에 개량영역 중앙부, 개량영역 중앙부로부터 10m 지점, 개량영역 경계부에 대한 개량영역의 깊이에 따른 응력경로를 나타냈다. 개량영역의 중앙부에서의 응력경로는 측방변형조건과 측방구속조건에서의 차이가 미미하였고, 모두 K_0 선과 유사하게 거동하는 것으로 나타났다. 개량영역 10m 지점에서의 응력경로는 개량영역의 깊이가 25m일 경우를 제외하고, 측방변형조건과 측방구속조건에서의 차이를 확인할 수 있었다. 개량영역의 깊이 5m와 15m에서 측방변형조건은 K_0 선의 아래쪽으로 거동하였고, 측방구속조건은 K_0 선을 약간 상회하여 거동하였다. 개량영역 경계부의 응력경로는 개량영역 10m 지점에서의 응력경로와 유사하게 나타났으나, 개량영역의 깊이 5m와 15m에서의 측방변형조건의 거동은 등방압 밀시의 응력경로에 더 근접한 값을 보였다. 이를 통해 개별진공압에 의해 지반을 개량할 경우, 개량영역의 중앙부는 개량영역의 깊이에 상관없이 측방구속조건으로 압밀이 진행되고, 개량영역의 경계부와 가까울수록 측방변형에 의해 지반의 변형이 발생한다고 판단할 수 있었다. 또한 개량영역의 경계부에서도 개량영역의 깊이가 깊어짐에 따라 측방변형조건에서 측방구속조건으로 지반의 변형상태가 변화함을 알 수 있었다.

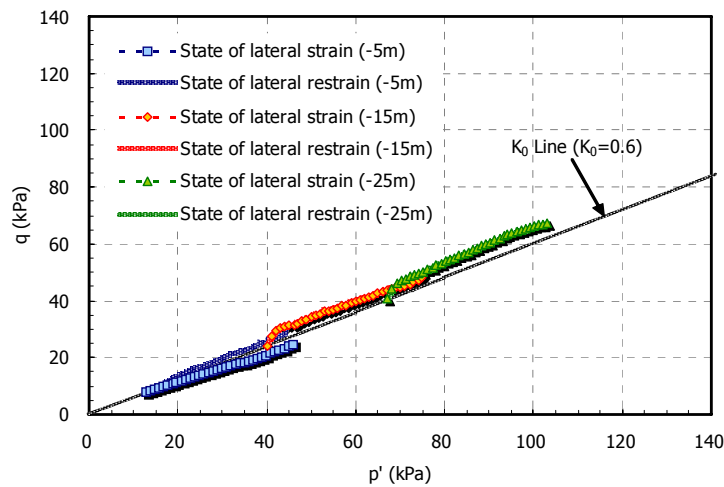


그림 6. 지반변형조건에 따른 응력경로의 비교 (개량영역의 중심부)

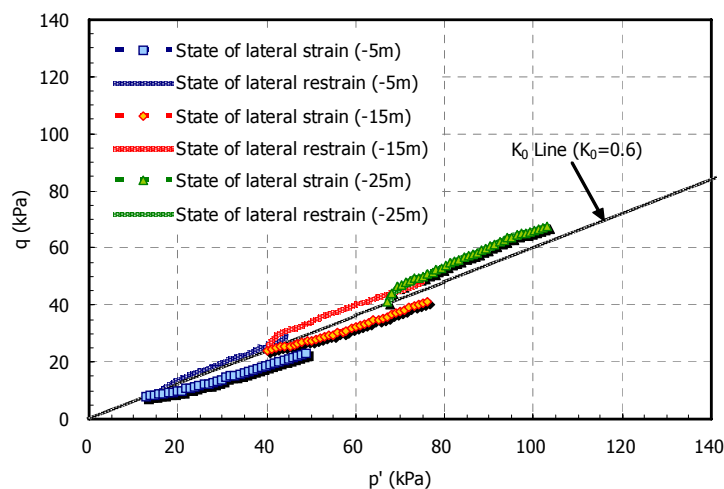


그림 7. 지반변형조건에 따른 응력경로의 비교 (개량영역으로부터 10m 지점)

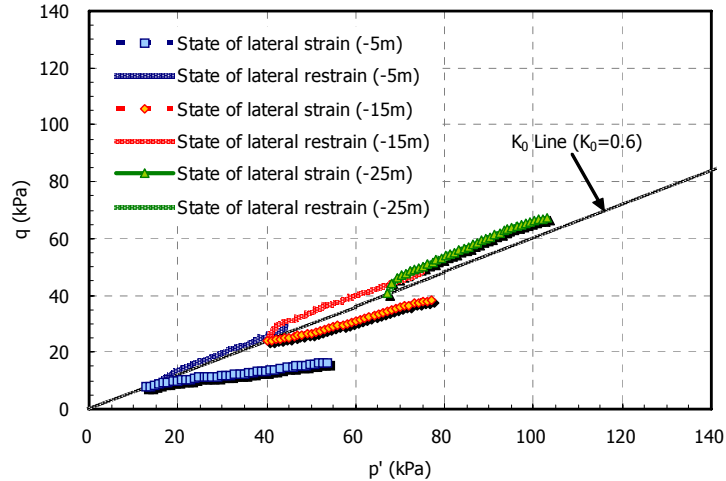


그림 8 지반변형조건에 따른 응력경로의 비교 (개량영역의 경계부)

5. 결론

본 연구에서는 개별진공압이 적용된 지반의 경계 조건에 따른 지반내의 응력 상태를 파악하고자 해석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 개량영역에서의 침하는 측방구속조건에서 크게 나타났고, 개량영역외부에서의 침하는 측방변형조건에서 더 크게 나타났다.
2. 개별진공압에 의해 지반을 개량할 경우, 개량영역의 중앙부는 개량영역의 깊이에 상관없이 측방구속조건으로 압밀이 진행되고, 개량영역의 경계부와 가까울수록 측방변형에 의해 지반의 변형이 발생한다고 판단할 수 있었다.
3. 개량영역의 깊이에 따른 응력거동을 파악한 결과, 개량영역의 상부에서는 측방변형조건에 의해 압밀이 진행되었고 깊이가 증가할수록 측방구속조건에 가까운 응력거동을 나타냈다.

참고문헌

1. Hird C. C., Pyrah I. C., Russell D.(1992), "Finite Element Modelling of Vertical Drain Beneath Embankments on Soft Ground", Geotechnique, Vol. 42, No. 3, pp. 499-511.
2. Mizuno K., Tsuchida T., Shinsha H.(2008), "Ground Deformation of Dredging Clay Reclaimed Land by Vacuum Consolidation Method and Its Finite Element Analysis", Japanese Geotechnical Journal, Vol. 3, No. 1, pp. 95-108.
3. Umezaki T., Kawamura T.(2003), "Stress Condition and Strength Properties of Clay in the Ground Applied Vacuum Consolidation Method", 第38回 地盤工學研究發表會 D-06, pp. 205-206.
4. 김기년, 한상재, 김수삼(2008). "단계석션압 조건에 따른 석션보드드레인 공법의 효율 분석", 대한토목학회 논문집, 제28권, 제6C호, pp. 321-329.