

수평배수재를 이용한 진공압밀공법의 해석에 관한 연구

A Study on the Analysis of Vacuum Consolidation with Horizontal Drains

김홍택¹⁾, Hong-Taek Kim, 김석열²⁾, Seog-Yeol Kim, 윤창진²⁾, Chang-Jin Yoon,
강인규³⁾, In-Kyu Kang, 김창겸⁴⁾, Chang-Kyum Kim

¹⁾홍익대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hong-Ik Univ.

²⁾농업기반공사 책임연구원, Chief Researcher, Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation

³⁾(주)브니엘컨설턴트 책임기술자, Chief Engineer, Vniel Consultant Co., Ltd.

⁴⁾홍익대학교 토목공학과 대학원, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Hong-Ik Univ.

SYNOPSIS : In the present study, the analytical approaches of vacuum consolidation with horizontal drains were proposed. For dissipating rapidly pore-water in hydraulic fills, vacuum consolidation method applied vacuum pressure in horizontal drains is developed. In the analytical approaches, the governing equation is based on two-dimensional finite strain consolidation theory and the boundary conditions of horizontal drains are considered in applying negative pore-water pressure occurred by vacuum pressure. Also, parametric studies to vacuum pressure and installation pattern of horizontal drains are carried out.

Key words : vacuum consolidation, two-dimensional finite strain consolidation, horizontal drain method

1. 서론

수평배수공법은 배수가 불량한 저습지에서 배수개선을 주목적으로 적용되고 있는 공법이다. 최근 간척지의 조성 및 준설매립사업이 확대되어 육상에서 매립재료를 구하기 어려워지면서 해저의 준설재료로 대체되고 있는 실정이며, 이에 따라 수평배수공법이 확대 적용되고 있는 추세이다. 또한 진공압밀공법은 성토재하압밀공법과는 달리 성토재료가 불필요하며, 급격한 재하에 의한 전단파괴의 위험성이 없는 장점에도 불구하고 시공상의 어려움으로 국내외적으로 활발하게 적용되지 못하였으나 최근들어 진공막 설치기술 및 강력한 진공펌프의 등장으로 시공기술이 발전되면서 미국, 유럽, 일본 등지에서 적극적으로 활용되기 시작했고, 국내에서도 광양, 김해 등지에서 연약지반 개량공법으로 적용된 바 있다.

본 연구에서는 수평배수공법에 있어서 보다 효과적인 압밀배수를 유도하기 위해 진공압밀공법을 적용할 경우, 이에 대한 해석적 접근방법과 진공압에 따른 압밀효과 및 수평배수재의 배치형태에 따른 영향을 분석하였다. 본 연구에서 수평배수 진공압밀공법에 대한 지배방정식은 Gibson 등(1967)의 1차원 유한변형압밀이론을 2차원으로 확장시킨 기존의 수평배수압밀이론(황 등, 1998)을 이용하였으며, 진공압밀 시 수평배수재에 작용하는 진공압으로 발생된 부압은 경계치로 모델링하여 해석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 수평배수압밀공법

수평배수공법은 주로 농업토목 분야에서 수리조건은 양호하나, 지하수위가 높고 수분이 낮은 용출수와 수분이 많은 평야지의 배수 불량지에 직경 5cm 정도의 원형암거(주로 PVC 유공관)를 수평으로 설치하여 수두차에 의해 중력방향으로 자연배수시켜 배수불량지를 개량하는데 사용하고 있는 공법이다.

최근 간척지의 조성 및 준설매립사업이 확대되면서 더욱 효율적이며, 경제적인 지반개량을 위해 토목분야에서 수평배수공법에 대한 적용성이 크게 대두되고 있으며, 준설매립지반에 적용된 수평배수공법의 개요도 및 압밀진행과정은 그림 1과 같다. 그림 1과 같이 준설매립지반에 적용된 수평배수압밀공법은 수평배수재 상부의 준설매립지반에 대하여 침투압밀을 유도함으로써 압밀침하를 가속화시키는 역할을 하며, 간극수의 배출방법에 따라 자연배수방법과 인위배수방법으로 구분할 수 있다. 자연배수방법은 수평배수재를 경사지게 설치하여 중력에 의해 자연배수를 유도하는 방법으로 농업토목 분야에서 일반적으로 사용하고 있는 방법이나 준설매립지반내에 적용할 경우에는 시공이 어려운 문제가 있다. 또한 인위배수방법은 수평배수재 내에 진공압을 가하여 간극수를 강제로 배출시키는 방법으로 준설매립지반내에 적용할 경우 효과적인 방법이다.

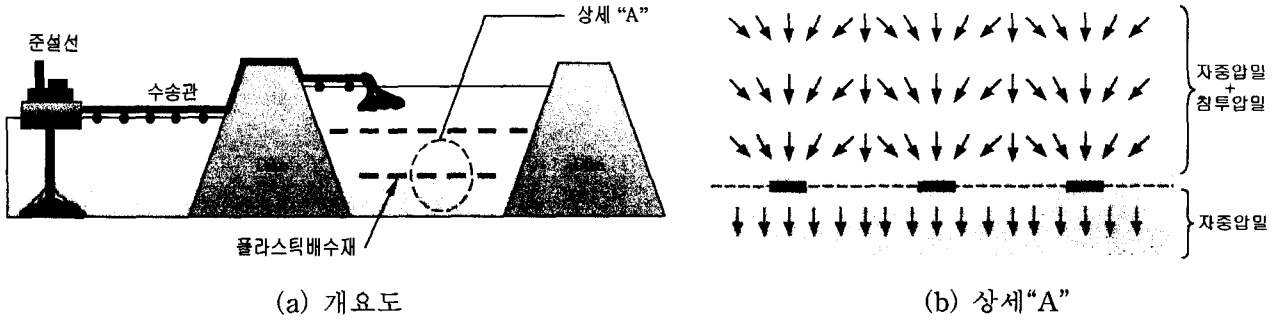


그림 1. 수평배수압밀공법의 개요

2.2 연직배수 진공압밀공법

연직배수 진공압밀공법은 1952년 스웨덴의 W. Kjellman에 의해 개발된 공법으로 그림 2와 같이 연직배수공법과 병행하여 연약점토층을 진공압에 의해 탈수시켜 압밀축진을 유도하는 공법이다. 기존의 재하공법은 상재하중을 다시 제거해야 하고 외력에 의해 발생하는 과잉간극수압이 시간의 경과와 함께 소산되어 유효응력의 증가를 유도하지만, 진공압밀공법은 일정한 전응력하에서 지반내에 부의 간극수압을 유발시켜 부의 간극수압만큼 유효응력을 증가시켜 압밀을 유도하는 방법이다. 또한 연직배수 진공압밀공법은 과도한 재하로 인한 지반의 전단파괴 및 측방유동이 발생하지 않으며, 지반을 균등하게 압밀시켜 재하중공법에 의한 방법보다 배수시간이 단축되고 2차 압밀침하 영역까지 압밀을 유도함으로써 잔류침하가 거의 발생하지 않는 점 등의 장점이 있어 대심도 지반개량에 적절한 공법이다.

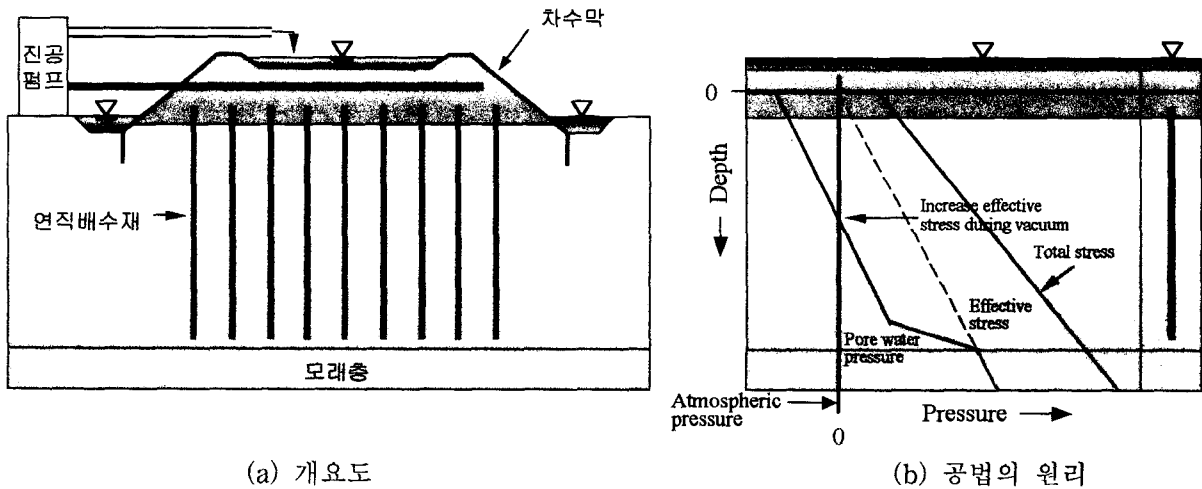


그림 2. 연직배수 진공압밀공법의 개요

2.3 수평배수 진공압밀공법

수평배수 진공압밀공법은 플라스틱 배수재를 준설패립지반 내에 수평으로 타설할 때, 적절한 동수경사를 유지하면서 타설하지 않으면 배수재에 의한 개량효과를 기대할 수 없기 때문에 이를 개선하기 위해 그림 3(a)에 도시한 바와 같이 수평배수재의 단부에 진공압을 가하여 탈수시키는 공법이다. 수평배수 진공압밀공법의 장점은 플라스틱 배수재를 타설할 때 긴 구간을 연속된 작업에 의해 설치할 수 있으므로 배수재 타설에 소요되는 작업시간이 단축되는 효과가 있으며, 비교적 얕은 심도의 준설패립지반을 개량하는 경우와 대심도의 준설패립지에 연직배수재를 타설하기 위한 중장비 투입이 불가능한 경우에도 적용이 가능한 점 등이 있다. 또한 수평배수 진공압밀공법은 준설토를 효과적으로 패립하기 위해 단계적으로 투기하는 경우에 준설택업과 배수재 타설작업이 동시에 이루어질 수 있고, 준설택이 종료된 이후 슬러리 상태의 초연약지반이 조성되어 있는 경우에도 적절한 타설장비를 이용한 배수재 설치작업이 가능하다. 그림 3(b)는 수평배수 진공압밀공법이 적용되는 지반내부의 응력변화를 도시한 것이다.

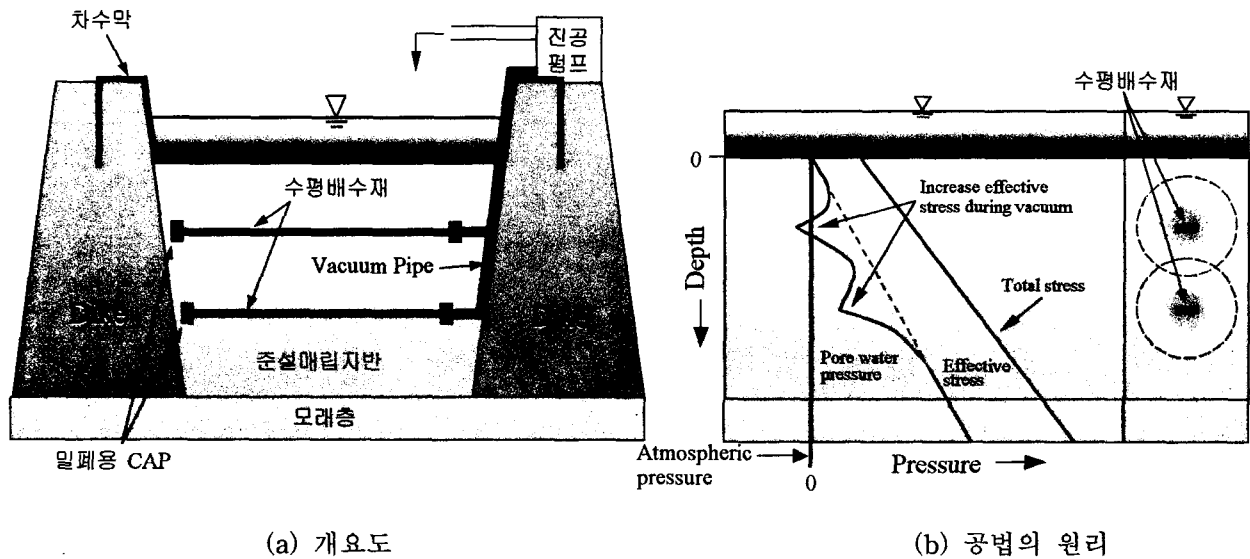


그림 3. 수평배수 진공압밀공법의 개요

3. 수평배수 진공압밀이론의 해석

3.1 지배방정식

본 연구에서는 수평배수 진공압밀공법에 대한 해석적인 접근을 위해 Gibson 등(1967)이 제안한 1차원 유한변형률 압밀이론을 근거로 하여 자중압밀과 수평배수재의 배수로 인한 침투압밀효과를 반영하여 유도된 수평배수압밀이론(황 등, 1998)을 이용하였으며, 수평배수재에 작용하는 진공압으로 발생된 부압은 경계치로 모델링하여 해석하였다. 수평배수 압밀이론에 대한 지배방정식은 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial e}{\partial t} &= \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_{\text{자중압밀}} + \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_{\text{침투압밀}} \\
 &= \mp(\gamma_s - \gamma_w)g\lambda \frac{\partial e}{\partial z} + g \frac{\partial^2 e}{\partial z^2} \\
 &+ \frac{(1+e_0)}{\gamma_w \lambda} \left(\frac{1}{(e-e_\infty)} \frac{dk_x(e)}{dx} \frac{de}{dx} - \frac{k_x(e)}{(e-e_\infty)^2} \left(\frac{de}{dx} \right)^2 + \frac{k_x(e)}{(e-e_\infty)} \frac{d^2 e}{dx^2} \right) \\
 &+ \frac{1}{\gamma_w \lambda} \left(\frac{1}{(e-e_\infty)} \frac{dk_z(e)}{dz} \frac{de}{dz} - \frac{k_z(e)}{(e-e_\infty)^2} \left(\frac{de}{dz} \right)^2 + \frac{k_z(e)}{(e-e_\infty)} \frac{d^2 e}{dz^2} \right)
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, $g(e) = -\frac{k_z(e)}{\gamma_w} \frac{1}{(1+e)} \frac{d\sigma'_z}{de}$, $e = (e_{00} - e_{\infty}) \exp(-\lambda \sigma'_z) + e_{\infty}$, λ : 상수

γ_s : 연약토층의 단위중량, γ_w : 물의 단위중량, $k_z(e)$: 지반흙의 z 방향 투수계수
 e : 간극비, t : 임의의 경과시간, e_{∞} : 최종상태($t = \infty$)에서의 간극비
 e_{00} : 초기상태(시간 $t = 0$)에서 최상부 지표면 흙의 간극비

3.2 초기조건 및 경계조건

수평배수재의 배치형태 및 해석에 적용된 대표단면은 그림 4와 같다. 여기서, h_0 는 준설매립 점토층의 초기 두께이다.

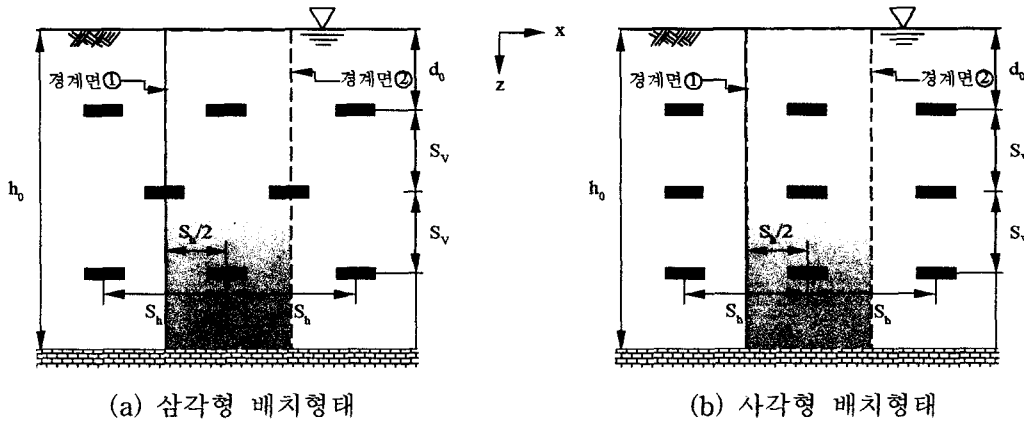


그림 4. 수평배수재의 배치형태에 따른 대표단면

3.2.1 초기조건

초기상태에서의 깊이별 유효응력 (σ'_z)은 식(2)와 같으며, q_0 는 상부표면에 작용하는 하중으로 준설매립토의 초기조건은 식(2)와 같다.

$$e(x, z) = (e_{00} - e_{\infty}) \exp[-\lambda(\gamma_s - \gamma_w)z + q_0] + e_{\infty} \quad (2)$$

3.2.2 경계조건

그림 4의 해석모델에서는 z 방향으로의 양측면을 경계면으로 정의하였으며, 수평배수재의 경계조건에 진공압 (p)을 적용하여 간극비에 대한 식으로 표현하면 식(3)과 같다. 또한 준설매립지반의 상부와 하부 및 경계면 등에 대한 경계조건을 요약·정리하면 식(4)~(7)과 같다.

$$e(s_h/2, d)_{t=t} = \{e(x, 0)_{t=t} - e_{\infty}\} \exp\{-\lambda((\gamma_s - \gamma_w)d + p)\} + e_{\infty} \quad (3)$$

$$\text{상부 경계조건} : e(x, 0)_{t=t} = e_{00} \quad (4)$$

$$\text{경계면 ①, ②} : \partial e / \partial x = 0 \quad (5)$$

$$\text{하부 경계조건} : (\text{불투수 조건}) \frac{\partial e}{\partial z} - \lambda(\gamma_s - \gamma_w)(e - e_{\infty}) = 0 \quad (6)$$

$$(\text{투수조건}) e(x, h)_{t=t} = (e_{00} - e_{\infty}) \exp\{-\lambda(\gamma_s - \gamma_w)h\} + e_{\infty} \quad (7)$$

3.3 해석절차

수평배수 진공압밀공법에 대한 해석절차는 그림 5에 도시된 바와 같이 초기조건과 경계조건으로부터 Dufort-Frankel의 유한차분화 알고리즘을 이용하여 경과시간별로 간극비, 침하량, 압밀도 및 시간계수 등을 계산한다. 해석에 적용되는 간극비는 초기 시간일 때 준설매립지반 지표면의 초기간극비(e_{00}), 지반의 초기 평균간극비(e_0), 임의의 시간 t 일 때 지표면의 간극비(e_{00}^T) 및 시간 $t=\infty$ 일 때 간극비(e_∞) 등이 있다.

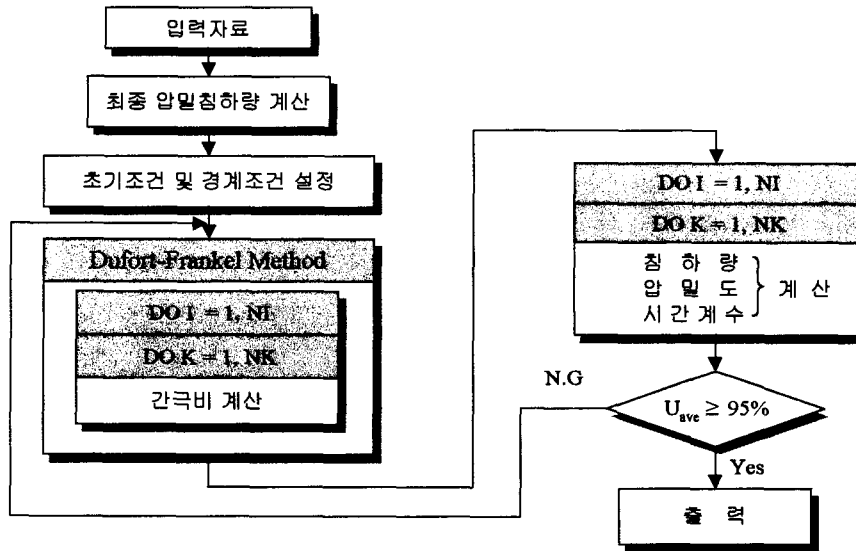


그림 5. 수평배수 진공압밀에 대한 해석절차

4. 분석 및 고찰

본 연구에서는 수평배수 진공압밀공법에 의한 압밀효과와 수평배수재의 설치형태에 따른 압밀효과를 분석하여 수평배수 진공압밀공법의 압밀메카니즘과 적용성을 분석하였다. 분석에 사용된 준설매립토의 입력변수는 표 1과 같다.

표 1. 분석에 사용된 준설매립토의 입력변수

토 층 초기높이 $h_0(m)$	단위중량 $\gamma_s (t/m^3)$	초기간극비 e_{00}	초기 평균간극비 e_0	최종간극비 e_∞	지표면 간극비 e_{00}^T	λ	진공압 $p (t/m^2)$	비고
1.0	1.308	2.000	1.998	1.333	1.667	0.02	0.0~10.0	
$k(e) = -8.05 \times 10^{-10} + (1.16 \times 10^{-9})e - (5.71 \times 10^{-10})e^2 + (1.21 \times 10^{-10})e^3$								

4.1 진공압에 의한 압밀효과

준설매립토의 자중압밀, 수평배수압밀 및 수평진공압밀에 의한 시간-침하량 관계곡선은 그림 6과 같다. 그림 6에서 평균압밀도 95%에 도달하는 압밀소요시간을 비교하면, 자중압밀의 경우 106일이 소요되며 수평배수압밀의 경우에는 48일이 소요되는 것으로 계산되었다. 또한 진공압을 $8.0t/m^2$ 으로 가하여 수평진공압밀을 한 경우에는 24일 소요되어 진공압에 의한 압밀효과가 큰 것으로 평가되었다.

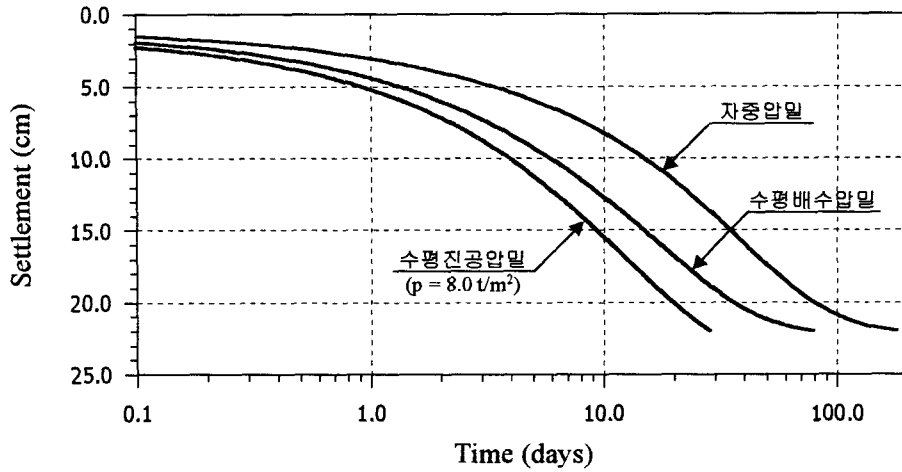


그림 6. 진공압에 의한 시간-침하량 비교

그림 7은 진공압의 정도에 따라 평균압밀도 50%에서의 준설매립토층 임의의 지점에서의 압밀도를 나타낸 것이며, 그림 8은 진공압을 $8.0t/m^2$ 으로 가하여 수평진공압밀시킨 경우에 있어서 평균압밀도 (U_{ave})에 따라 준설매립토 임의의 지점에서의 압밀도를 도시한 결과이다.

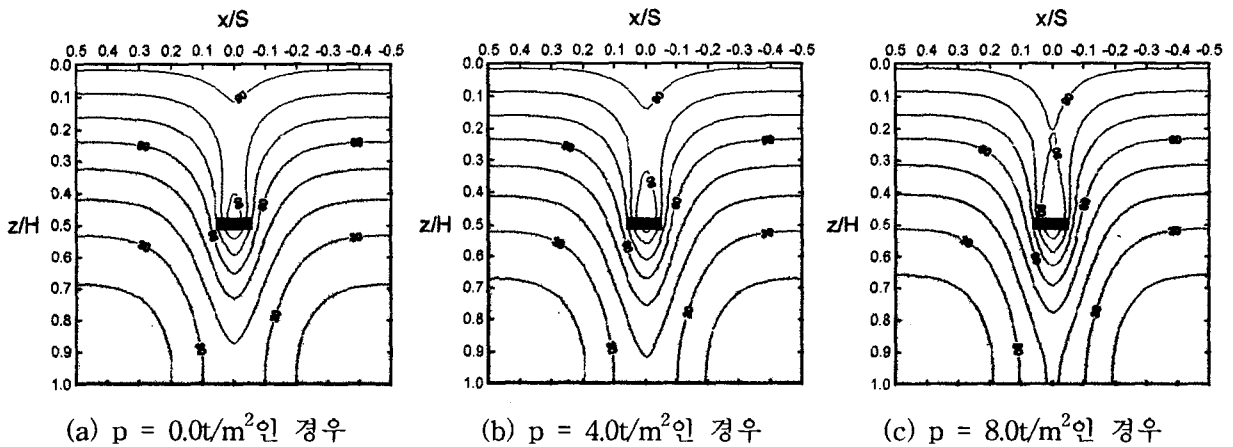


그림 7. 진공압의 크기에 따른 수평배수재의 압밀효과

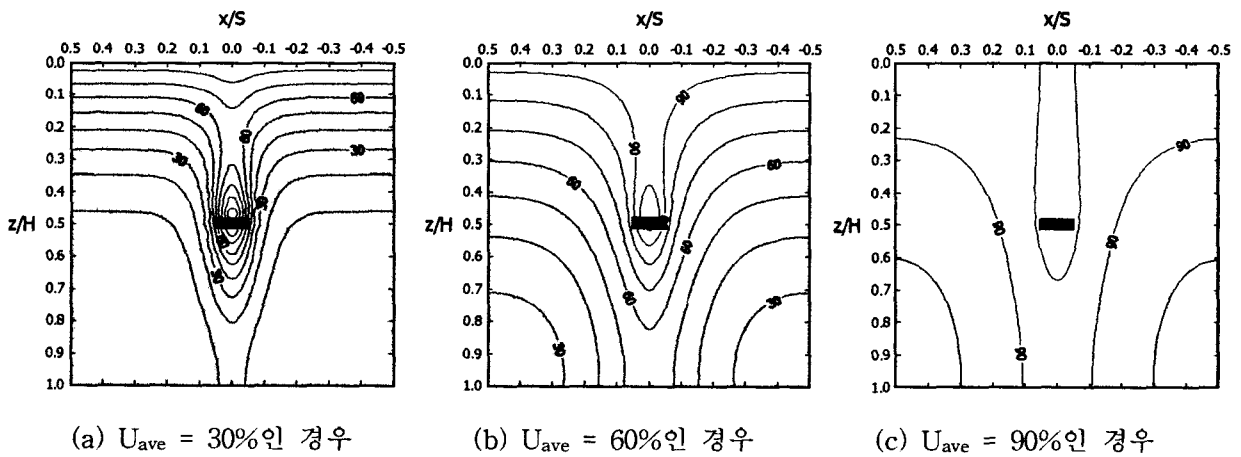


그림 8. 평균압밀도에 따른 수평배수재의 압밀효과($p = 8.0t/m^2$ 인 경우)

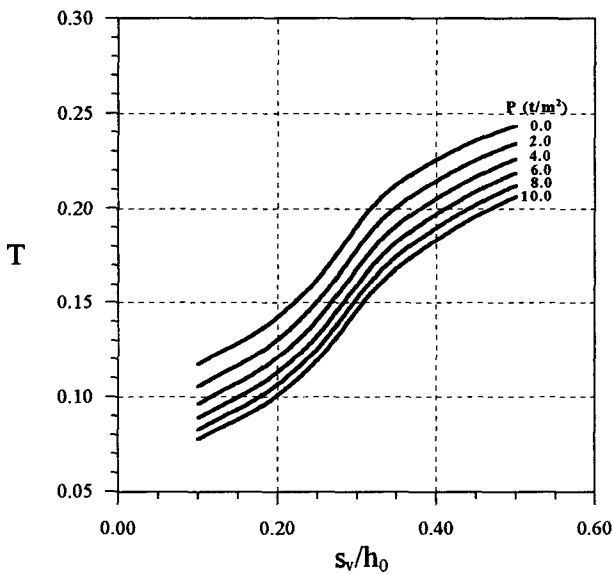
그림 7 및 8로 부터 수평배수재를 중심으로 압밀이 점차 확산되는 경향을 알 수 있으며, 진공압이 증가할수록 수평배수재 상부층은 압밀효과가 증가되는 경향을 나타내고 수평배수재 하부층은 진공압이 증가할수록 압밀효과가 감소하는 경향을 나타냈다. 이러한 경향은 수평배수재 상부층에서는 하향침투로 인해 진공압이 증가할수록 유효응력이 증가하여 압밀이 가속되는 반면, 수평배수재 하부층에서는 상향 침투로 진공압이 증가함에 따라 유효응력이 감소하여 압밀효과가 저하되는 것으로 판단된다.

4.2 수평배수재의 배치형태에 따른 영향

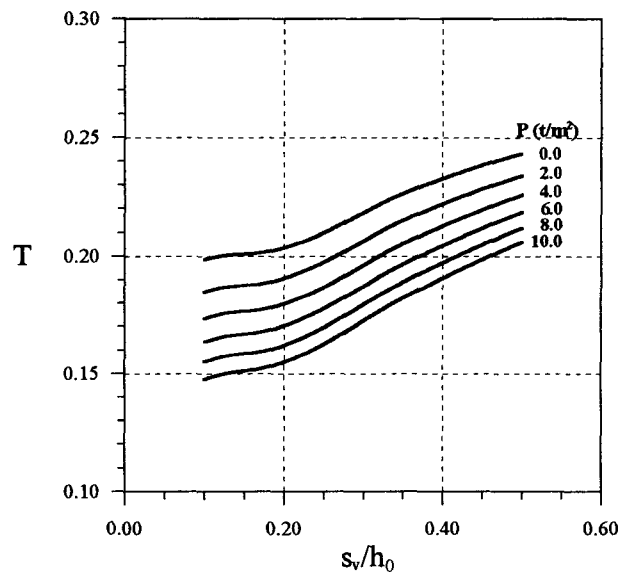
수평배수 진공압밀공법에 있어서 수평배수재를 다층으로 타설할 경우 수평배수재의 배치형태(그림 4 참조)에 따른 압밀효과를 분석한 결과는 그림 9와 같다. 그림 9에서 수평배수재는 3개의 층으로 가정하였으며, 수평방향 설치간격은 1.0m로 고정시켜 평균압밀도 90%에 해당하는 시간계수 (T)로부터 진공압에 따른 배치형태에 대한 영향을 분석하였다. 여기서 시간계수(T)는 압밀시간을 나타내는 무차원 변수로 식(8)과 같이 정의된다.

$$T = \frac{g_0 \cdot t}{l_0^2} \quad (8)$$

$$\text{여기서, } g_0 = \frac{k(e_0)}{\gamma_w(1+E_0)} \left\{ \frac{1}{\lambda(e_0 - e_\infty)} \right\}, \quad l_0 = \frac{h_0 + s_h + s_v}{4(1 + e_0)}$$



(a) 삼각형 배치형태



(b) 사각형 배치형태

그림 9. 수평배수재 배치형태에 따른 영향

그림 9의 결과를 통해서 볼 때, 수평배수재의 설치간격이 좁을수록 삼각형 배치형태가 압밀속도 측면에서 우수한 것으로 나타났다. 그러나 수평배수재의 시공조건과 진공 파이프의 추가 설치에 따른 비용을 고려해 볼 때 사각형 배치형태가 현장 적용성이 클 것으로 판단된다. 수평배수재의 배치형태에 따른 영향을 구체적으로 살펴보면, 진공압이 10.0t/m²일 경우 사각형 배치형태에서는 설치간격비 (s/H)가 0.1~0.5로 변화함에 따라 시간계수는 0.147~0.206 정도로 나타났다. 또한 삼각형 배치형태의 경우에는 설치간격비가 0.1~0.5로 변화함에 따라 시간계수가 0.077~0.206 정도로서 압밀시간이 최대 48%정도(설치간격비 0.1의 경우) 단축되는 것으로 평가되었다.

5. 결론

본 논문에서는 수평배수 압밀공법에 있어서 보다 효과적으로 간극수를 배출하기 위해 진공압밀공법을 적용할 경우에 대한 해석적인 접근방법과 진공압에 의한 압밀효과 및 수평배수재의 배치형태에 따른 영향을 분석하였다. 이상의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 수평배수 진공압밀공법에 대한 압밀효과를 비교·분석하기 위해 자중압밀과 수평배수압밀에 의한 시간-침하곡선을 도시한 결과 수평배수 진공압밀공법이 자중압밀과 수평배수압밀에 비하여 압밀효과가 큰 것으로 나타났다.
- (2) 수평배수 진공압밀공법에 있어서 진공압이 증가할수록 수평배수재 상부층은 압밀효과가 증가되는 경향을 나타냈으며, 수평배수재 하부층은 진공압이 증가할수록 압밀효과가 감소하는 경향을 나타냈다. 이러한 경향은 수평배수재 상부층에서는 하향침투로 인해 진공압이 증가할수록 유효응력이 증가하여 압밀이 가속된 반면, 수평배수재 하부층에서는 상향침투로 진공압이 증가함에 따라 유효응력이 감소하여 압밀효과가 저하되는 것으로 판단된다.
- (3) 수평배수재의 배치형태에 따른 압밀효과를 분석한 결과, 수평배수재의 설치간격이 좁을수록 삼각형 배치형태가 우수한 것으로 나타났다. 그러나 수평배수재의 시공조건과 진공 파이프의 추가 설치에 따른 비용을 고려해 볼 때 사각형 배치형태가 현장 적용성이 클 것으로 판단된다.
- (4) 향후 수평배수 진공압밀공법에 대한 실내 및 현장실험을 통해 본 연구에서 제시한 해석절차에 대한 검증이 지속적으로 수행될 예정이다.

참고문헌

1. 김형주, 원명수(1997), “수평배수공법에 의해 개량된 준설점토지반의 압밀거동에 관한 연구”, 한국지반공학회지, 제13권, 제1호, pp. 137~145.
2. 박중배, 이승우, 김유석(1996), “수직배수를 병행한 진공압밀공법 적용시의 연약지반 거동 예측 연구”, 한국지반공학회지, 제12권, 제5호, pp. 79~87
3. 황정규, 김홍택, 김석열, 강인규, 김승욱(1998), “플라스틱 배수재를 이용한 수평배수공법에 관한 연구”, 한국지반공학회지, 제14권, 제6호, pp.93~112.
4. Brand, E. W., Brenner R. P.(1981), *Soft Clay Engineering*, Elsevier Scientific Pub. Co., pp 129~133, pp 649~654.
5. Gibson, R. E., England G. L. and Hussey, M. J. L.(1967) "The Theory of One-Dimensional Consolidation of Saturated Clays. I. Finite Non-Linear Consolidation of Thin Homogeneous Layers", *Geotechnique*, Vol. 17, No. 3, pp 261~273.