

# 수평진공배수공법이 적용된 준설패립지반의 압밀 해석에 관한 연구

## A Study on the Consolidation Analysis of Hydraulic Fills Applying Lateral Vacuum Consolidation Method

이 송<sup>\*1</sup> Lee, Song  
강 명 찬<sup>\*2</sup> Kang, Myoung-Chan  
김 흥 석<sup>\*3</sup> Kim, Heung-Seok

### Abstract

A study was made to predict consolidation phenomena induced by lateral vacuum consolidation. Surface strengthening of the hydraulic fills is the target of lateral vacuum consolidation method using lateral drain and vacuum pressure on the very soft clay. Substantial changes in 3-D water flow effective stress, compressibility, and permeability are caused by the lateral vacuum consolidation method consisting of lateral drain and vacuum pressure on the very soft clay. For this reason, the previous three dimensional consolidation governing equation was improved to comprise the three dimensional water flows, variety boundary condition, effective stress increase due to negative pore pressure development, non-linearity of compressibility and permeability related with effective stress. The relationship among effective stress, void ratio and permeability was used in the form of power law. To verify the validity of this analysis, results of large scale laboratory test were compared with the proposed model. This comparison showed a good agreement. According to consolidation analyses, applying lateral vacuum consolidation method, upper ground with drain was improved equally, but lower ground without drain was consolidated by self weight. Appropriate lateral drain setting space was suggested based on the result of consolidation analyses in accordance with lateral setting space.

### 요 지

준설패립지반 표층강도증진을 위한 수평진공배수공법 적용시의 압밀현상 예측을 위한 연구를 수행하였다.

초연약지반에 수평배수재와 진공압을 이용하는 수평진공배수 공법을 적용할 경우, 배수재 부근에서 3차원적 배수 특성과 넓은 범위의 유효응력의 변화, 지반의 압축성 및 투수성이 크게 변화하게 된다. 이를 위하여 3차원 배수특성과 다양한 경계조건, 부의 간극수압 발생을 통한 유효응력의 증가, 유효응력에 따른 압축성과 투수성의 비선형성을 포함할 수 있도록 기존의 3차원 압밀 지배방정식을 확장 유도하였고, 유효응력-간극비-투수계수의 관계를 누송형태의 함수로 표현하여 사용하였다. 해석기법의 타당성을 검증하기 위하여 실내에서 수행된 대형 토조실험 결과를 모델링하여 좋은 일치율을 확인하였고, 이를 바탕으로 수평진공배수공법 적용시의 압밀효과에 대한 분석결과 드레인이 타설된 상부지반에서는 균등한 개량효과의 결과를, 하부의 미개량 지반에서는 자중압밀에 의한 압밀효과를 확인할 수 있었으며 배수재의 수평타설 간격에 따른 압밀효과 분석을 통하여 적정 배수재 설치간격의 범위를 확인하였다.

**Keywords :** Hydraulic fills, Lateral drain, Negative pore pressure, Surface strengthening, Vacuum pressure

\*1 정회원, 서울시립대학교 도시과학대학 토목공학과 교수

\*2 정회원, 서울시립대학교 도시과학대학 토목공학과 박사과정

\*3 정회원, (주) 대우건설 기술연구소 토목연구팀 연구원

## 1. 서론

현재 국내에서는 제한된 국토의 효율적 이용과 부족한 산업부지의 확충 등의 목적으로 인근 해안의 해성점토를 준설한 후 매립하는 형식의 대규모 부지조성 사업이 이루어지고 있다. 이렇게 조성된 지반은 자중압밀을 경험한 후에도 함수비가 보통 200% 이상의 슬러리 상태로서 압축성이 크고 전단강도를 기대하기 어려운 초연약 해성점토지반을 형성하기 때문에 연약지반 개량의 본 공사 진행을 위한 장비의 주행성 확보에 어려움이 발생한다. 최근 표층처리공법의 한 방안으로서 수평배수재 및 진공압밀공법을 이용한 표층안정처리공법의 적용성에 대한 연구가 진행되고 있다. 본 공법은 일본의 오양건설에서 최초로 개발되어 현장시험 시공을 통하여 개량효과를 확인하였다. 국내의 경우 김(1997)등 본 공법 적용시의 압밀거동을 파악하기 위하여 대형압밀시험과 포텐셜 증공원주압밀 이론을 이용하여 수치해석을 실시하였고, 황(1998)등은 본 공법의 해석절차에 체계화에 초점을 두고 이론적 및 실험적 접근을 진행하였다. 그의 최근 본 공법의 적용에 대한 연구가 진행되고 있다. 이를 위해서는 배수형식과 진공압을 이용한 유효응력증가속에서 진행되는 압밀현상에 관계된 비선형 압밀이론의 유도가 필수적이라 할 수 있다. 수평배수재와 진공압을 이용한 수평진공배수 시, 간극속의 물 흐름은 기존의 1차원 배수형태도 아니며 또한 표층안정처리의 대상이 되는 준설매립지반은 매우 높은 초기 함수비와 지반의 전단강도를 거의 기대할 수 없는 초연약지반의 형태를 띠고 있어 유효응력 및 간극비에 따른 투수성 및 압축성에 있어 상당한 비선형성을 보임이 이미 여러 문헌과 기존연구를 통해 입증되었다. 그러므로 투수계수 및 지반의 압축성을 단일한 상수로 표현하여 압밀거동을 설명하는 미소변형론이 기본 가정인 기존의 선형 압밀이론으로는 본 연구대상과 같은 초연약지반의 압밀 현상을 적절히 예측하기 어렵다. 따라서 수평진공배수 공법적용시 시간에 따른 침하량, 압밀도 및 유효응력 변화 등 제반 압밀현상을 정확히 예측하기 위해서는 기존의 압밀이론이 아닌 3차원적 배수특성과 다양한 경계조건, 부의 간극수압 발생을 통한 유효응력증가, 유효응력에 따른 압축성과 투수성의 비선형성 등을 총괄적으로 포함할 수 있는 비선형 압밀이론의 정립이 필요하다.

비선형 압밀이론은 Gibson(1981)등이 1차원 유한 변형률 압밀 이론을 발표한 이래, Zaho(1989)등은 이를 3

차원적으로 확장시킨 압밀 지배방정식을 발표하였다. 국내에서는 이러한 3차원 압밀 지배방정식을 바탕으로 수평배수재 및 진공압밀공법 적용시의 압밀 현상 해석에 대한 연구들이 진행되고 있다. 하지만 이러한 3차원 압밀지배 방정식은 Gibson등이 제시한 비선형 매개변수인  $g, \lambda$  등을 선형으로 가정하여 지배방정식을 구성하고 있다. 그러나 수평진공배수공법의 적용대상지반은 고함수비의 초기 유효응력의 매우 낮은 초연약지반이므로 지반의 경험하는 유효응력의 변화 폭은 커지게 되며 지반의 압축성 및 투수성 또한 매우 크게 변화하게 된다. 이러한 경우 비선형 매개변수인  $g, \lambda$ 값은 고정된 상수값이 아니라 유효응력 단계에 따라 변화하는 값으로 고려하는 것이 타당하고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 비선형 계수의 도입없이 압밀 진행 과정중의 압축성과 투수성의 변화를 고려할 수 있도록 유효응력-공극비, 공극비-투수계수의 관계로써 표현되어지는 비선형 압밀 지배방정식을 확장 유도하였고 본 지배방정식을 바탕으로 수평진공배수공법 적용시의 초기 및 경계조건을 설정하여 유한차분 수치해석 기법을 이용하여 시간경과에 따른 침하량, 압밀도, 지반의 물성변화 등을 예측하였다.

## 2. 3차원 유한 변형률 압밀이론

3차원 유한 변형률 압밀이론은 Gibson등 (1981)의 1차원 유한 변형률 압밀이론을 바탕으로 3차원 적으로 확장되었으며 해석식을 간단히 하기 위하여 물질좌표계의 항으로 유도되었다. 이 이론은 압밀 진행 중 측방 변형이 없다는 가정하에 흙과 물의 혼합물과 간극수의 평형방정식, 흙 입자와 간극수의 연속방정식, 구성관계로서 유효응력-공극비, 공극비-투수계수의 관계와 흐름 법칙, 유효응력의 원리 등의 조건하에서 유도되었다.

### 2.1 압밀 지배방정식

압밀 지배방정식은 평형방정식, 연속방정식, 물흐름 방정식으로부터 유도되었고 좌표변환이 이용되었다. 이를 바탕으로 최종적으로 유도된 3차원 압밀 지배방정식은 식(1)과 같다.

$$\pm \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \frac{d}{de} \left[ \frac{k_z(e)}{1+e} \right] \frac{\partial e}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{k_z(e)}{\gamma_w(1+e)} \frac{d\sigma_z'}{de} \frac{\partial e}{\partial z} \right]$$

$$\begin{aligned}
& + (1+e_0) \frac{\partial}{\partial x} \left[ -\frac{k_x(e)}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial x} \right] + (1+e_0) \frac{\partial}{\partial y} \left[ -\frac{k_y(e)}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial y} \right] \\
& + \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \tag{1}
\end{aligned}$$

Zaho(1989)는 식(1)과 같은 3차원 유한변형률 압밀 지배방정식을 유도하였고, 등방의 투수계수를 가진다고 가정하였다. 상기식은 또한 상당한 비선형성을 보이기 때문에 식을 간단히 하기 위하여 Gibson등이 도입한 식(2), (3)과 같은 비선형 계수와 식(4)로 표현되는  $\zeta$ 를 도입하여 상수로 가정하여 식(5)와 같은 최종적인 3차원 압밀지배방정식을 유도하였다.

$$g(e) = -\frac{k(e)}{\gamma_w} \frac{1}{(1+e)} \frac{d\sigma_z'}{de} \tag{2}$$

$$\lambda(e) = -\frac{d}{de} \left( \frac{de}{d\sigma_z'} \right) \tag{3}$$

$$\zeta = \frac{(1+e_0)k(e)}{\gamma_w(e-e_\infty)} \tag{4}$$

$$\frac{\partial^2 e}{\partial z^2} \mp \lambda(\gamma_s - \gamma_w) \frac{\partial e}{\partial z} + \frac{\zeta}{g\lambda} \left[ \frac{\partial^2 e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 e}{\partial y^2} \right] = \frac{1}{g} \frac{\partial e}{\partial t} \tag{5}$$

이후 정은(1993) Zaho의 3차원 유한변형률 압밀이론에서 간극비-투수계수의 선형성을 극복하기 위하여 식(6)과 같은 압밀 지배방정식을 유도하여 연직드레인이 타설된 연약지반의 진공압밀을 해석하였다.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial e}{\partial t} & = \mp (\gamma_s - \gamma_w) g \lambda \frac{\partial e}{\partial z} + g \frac{\partial^2 e}{\partial z^2} \\
& + \frac{(1+e_0)}{\gamma_w \lambda} \left( \frac{1}{e-e_\infty} \frac{dk}{dx} \frac{de}{dx} - \frac{k}{(e-e_\infty)^2} \left( \frac{de}{dx} \right)^2 \right. \\
& \left. + \frac{k}{e-e_\infty} \frac{d^2 e}{dx^2} \right) \\
& + \frac{(1+e_0)}{\gamma_w \lambda} \left( \frac{1}{e-e_\infty} \frac{dk}{dy} \frac{de}{dy} - \frac{k}{(e-e_\infty)^2} \left( \frac{de}{dy} \right)^2 \right. \\
& \left. + \frac{k}{e-e_\infty} \frac{d^2 e}{dy^2} \right) \tag{6}
\end{aligned}$$

상기의 식(6)은 비선형 계수  $g$ ,  $\lambda$ 를 일정한 상수로 가정하였지만 압밀 진행중의 유효응력-간극비, 간극비-투수계수의 변화성을 나타낼수 있는 비선형 계수가 일정한 상수로 간주될수 있는 유효응력의 범위는 매우 제한적이다. 특히 지반의 초기상태가 매우 연약한 고함수비의 초연약지반은 지반이 경첩하게 되는 유효응력의 범위가 매우 크므로 비선형 계수를 적용함에 있어 고정된 상수값이 아니라 유효응력에 따라 변화하는 값으로 고

려해야 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 수평진공압밀 공법이 적용되는 지반은 준설매립이 완료되고 자중압밀이 진행중이거나 혹은 완료된 상태임을 감안할 때 비선형 계수를 상수로 가정하여 해석하는데는 무리가 따르리라는 판단하에 비선형계수의 도입없이 유효응력-간극비, 간극비-투수계수의 함수로 표현되어지도록 지배방정식을 확장 유도하였다.

식(1)의 기본방정식을 바탕으로 등방의 투수계수를 갖는다고 가정하였고, 간극비-투수계수의 비선형성을 고려하여  $k(e)$ 를 변수로 고려하였으며, 간극수압의 항을 간극비의 항으로 변환 확장하여 최종적으로 식(7)과 같이 유효응력-간극비-투수계수의 함수로 표현되는 비선형 압밀 지배방정식을 유도하였다.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial e}{\partial t} & = \mp \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \left[ \frac{1}{(1+e)} \frac{\partial k(e)}{\partial z} - \frac{k(e)}{(1+e)^2} \frac{\partial e}{\partial z} \right] \\
& - \left( \frac{1}{\gamma_w(1+e)} \frac{\partial k(e)}{\partial z} \frac{\partial e}{\partial z} \right) \frac{d\sigma_z'}{de} \\
& + \frac{k(e)}{\gamma_w(1+e)^2} \left( \frac{\partial e}{\partial z} \right)^2 \frac{d\sigma_z'}{de} - \frac{k(e)}{\gamma_w(1+e)} \frac{\partial^2 e}{\partial z^2} \frac{d\sigma'}{de} \\
& - \frac{(1+e_0)}{\gamma_w} \left[ \frac{\partial k(e)}{\partial x} \frac{d\sigma_z'}{de} \frac{\partial e}{\partial x} + k(e) \frac{d\sigma_z'}{de} \frac{\partial^2 e}{\partial x^2} \right] \\
& - \frac{(1+e_0)}{\gamma_w} \left[ \frac{\partial k(e)}{\partial y} \frac{d\sigma_z'}{de} \frac{\partial e}{\partial y} + k(e) \frac{d\sigma_z'}{de} \frac{\partial^2 e}{\partial y^2} \right] \tag{7}
\end{aligned}$$

## 2.2 비선형 응력-변형-투수계수 관계

연약지반의 비선형압밀 거동을 지배하는 주된 매개변수는 유효응력-간극비-투수계수의 관계이다. 앞의 지배방정식 또한 이들의 관계식으로 구성되어있으므로 이를 정확히 정의하는 것은 중요한 사항이다.

### 2.2.1 유효응력-간극비 관계

Gibson등(1967)에 의해 처음으로 소개된 비선형 유한변형률 압밀이론은 각 유효응력 단계별 압축성과 투수성의 변화를 고려한 것이었다. Gibson등(1981)은 간극비 유효응력의 관계를 일정한 함수형태로 나타내는 대신 비선형 계수  $g$ ,  $\lambda$ 를 통해 간극비와 유효응력의 관계를 압밀해석에 도입했으나, 이 비선형 계수 또한 고정된 상수가 아니라 유효응력에 단계에 따라 변화하는 변수이므로 이러한 비선형성을 압밀예측에 충분히 반영하기 위해서는 간극비-유효응력의 관계를 일정한 함수

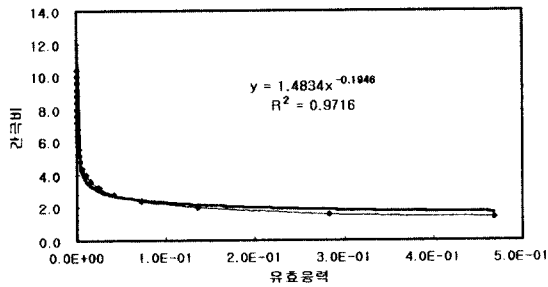


그림 1. 유효응력-간극비의 관계

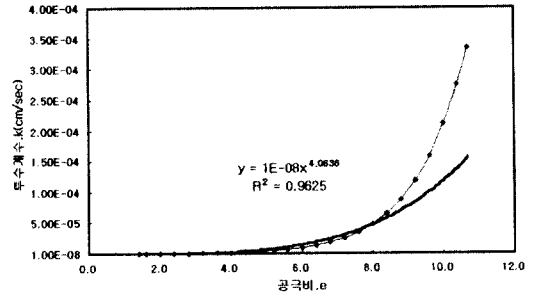


그림 2. 간극비-투수계수의 관계

의 형태로 표현하는 것이 필요하다.

Koppula(1970), Koppula and Morgenstern(1982)은 식(8)과 같은 관계를, Somogyi(1980)는 식(9)와 같은 관계를 제안하였다. 또한 Gibson등(1981)은 다양한 실내 실험을 통해 얻은 유효응력과 간극비의 관계를 식(10)과 같이 압밀진행전의 간극비와 압밀 종료후의 간극비와 관계를 바탕으로 지수형태와 유사하게 표현된 경험식을 제안하였다.

$$\frac{de}{d\sigma'} = \left( \frac{de}{d\sigma'} \right)_0 \left( \frac{\sigma'}{\sigma_0} \right)^p \quad (8)$$

여기서,  $\left( \frac{de}{d\sigma'} \right)_0$  : 임의의 초기 값

$p$  : 경험적 상수 (0~-1)

$$e = A \sigma'^B \quad (9)$$

여기서, A, B : Curve fitted constants

$$e = (e_{00} - e_{\infty}) \exp(-\lambda \cdot \sigma') + e_{\infty} \quad (10)$$

여기서,  $e_{00}$  : 압밀 시작전의 간극비

$e_{\infty}$  : 압밀 종료 시의 간극비

이밖에 Carrier, Beckman(1984), Sunara(1984)등도 유효응력-간극비의 관계식을 제안하였다. 본 연구에서는 외국의 준설패립지반의 유효응력-간극비의 데이터를 Curve fitting하여 Somogyi(1980)의 제안식과 같이 누승함수의 형태로 식(11)과 같은 관계식을 이용하였다.

$$e = \text{comf}_1 \sigma'^{-\text{comf}_2} \quad (11)$$

여기서,  $\text{comf}_1, \text{comf}_2$  : Curve fitting constants

## 2.2.1 간극비-투수계수 관계

초기 지반상태가 매우 연약한 고함수비의 상당히 큰 간극비를 나타내는 경우에 있어서 간극비 단계에 따른 투수계수는 상당한 비선형성을 보임이 기존의 연구결과에 의해 입증이 되었고, 이들의 비선형 관계를 표현하기 위한 기존의 연구결과를 살펴보면 다음과 같다.

Koppula(1970), Koppula and Morgenstern(1982)은 식(12)와 같은 관계를, Somogyi(1980)는 식(13)과 같은 관계를 제안하였고, 그의 실험을 통해 얻은 관계를 다항식의 형태로 이들의 관계를 표현하고 있다.

$$\frac{k}{1+e} = \left( \frac{k}{1+e} \right)_0 \left( \frac{\sigma'}{\sigma_0} \right)^p \quad (12)$$

$$e = C \sigma'^D \quad (13)$$

여기서, C, D : Curve fitting constants

본 연구에서는 외국의 준설패립지반의 간극비-투수계수 데이터를 curve fitting하여 Somogyi(1980)의 제안식과 같이 누승함수의 형태로 식(14)와 같은 관계식을 이용하였다.

$$k(e) = \text{comf}_3 e^{\text{comf}_4} \quad (14)$$

여기서,  $\text{comf}_3, \text{comf}_4$  : Curve fitting constants

## 3. 수치해석

### 3.1 수평진공배수 공법 모델링

수평진공 배수공법은 그림 3과 같이 준설패립된 초연약지반 표층부에 매설선을 이용하여 일정한 간격으로 드레인재를 수평으로 매설하여 드레인재의 단부에 부압(負壓)을 작용시켜 단기간에 걸쳐 압밀을 촉진시켜

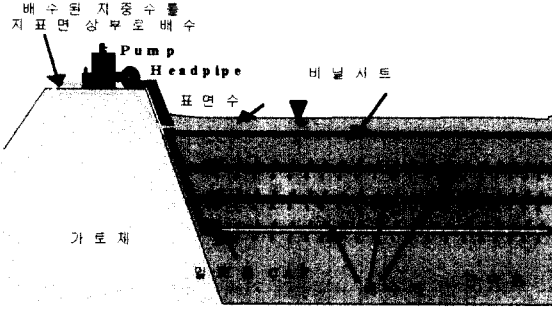


그림 3. 수평진공배수 공법 개요

지지력을 증대시키는 공법이다. 본 공법 적용시의 압밀 해석을 위한 해석단면은 그림 4와 같으며 흙은 완전히 포화되어 있고, 수위는 흙 상부 표면에 있다고 가정하였다. 배수재는 상부표면으로부터  $d_1$ 인 거리에서부터 연직으로  $d_v$ , 수평으로  $d_h$ 의 간격으로 타설되어 있다고 모델링 하였다.

### 3.2 유한 차분방정식

본 연구에서 유도된 식(7)의 지배방정식을 시간에 대한 전방차분, 공간에 대해 중앙차분을 이용하는 양해법 중 해의 안정성이 우수한 Dufort-Frankel 차분화 알고리즘을 이용하여 정리하면 식(15)와 같다.

$$\begin{aligned}
 E^{T+\Delta T}(x_i, y_j, z_k) = & \frac{1}{(C_1)} \{ C_2 E^{T-\Delta T}(x_i, y_j, z_k) \\
 & - P_1 [ E^T(x_{i+\Delta x}, y_j, z_k) - E^T(x_{i-\Delta x}, y_j, z_k) ] \\
 & - P_2 [ E^T(x_i, y_{j+\Delta y}, z_k) - E^T(x_i, y_{j-\Delta y}, z_k) ] \\
 & - \frac{1}{2} P_4 [ E^T(x_i, y_j, z_{k+\Delta z}) - E^T(x_i, y_j, z_{k-\Delta z}) ] \\
 & - P_3 [ E^T(x_i, y_j, z_{k+\Delta z}) - E^T(x_i, y_j, z_{k-\Delta z}) ] \\
 & - \frac{1}{4} P_5 [ ( k^T(x_{i+\Delta x}, y_j, z_k) - k^T(x_{i-\Delta x}, y_j, z_k) ) \\
 & \times ( E^T(x_{i+\Delta x}, y_j, z_k) - E^T(x_{i-\Delta x}, y_j, z_k) ) ) \\
 & - \frac{1}{4} P_6 [ ( k^T(x_i, y_{j+\Delta y}, z_k) - k^T(x_i, y_{j-\Delta y}, z_k) ) \\
 & \times ( E^T(x_i, y_{j+\Delta y}, z_k) - E^T(x_i, y_{j-\Delta y}, z_k) ) ] \\
 & - \frac{1}{4} P_7 [ ( k^T(x_i, y_j, z_{k+\Delta z}) - k^T(x_i, y_j, z_{k-\Delta z}) ) \\
 & \times ( E^T(x_i, y_j, z_{k+\Delta z}) - E^T(x_i, y_j, z_{k-\Delta z}) ) ] \\
 & + \frac{1}{2} P_8 [ ( k^T(x_i, y_j, z_{k+\Delta z}) - k^T(x_i, y_j, z_{k-\Delta z}) ) \\
 & + \frac{1}{4} P_9 [ ( E^T(x_i, y_j, z_{k+\Delta z}) - E^T(x_i, y_j, z_{k-\Delta z}) )^2 ] \} \quad (15)
 \end{aligned}$$

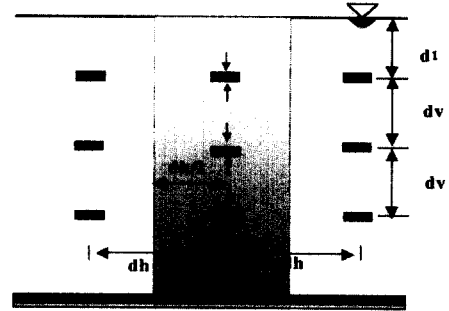


그림 4. 해석단면 모델링

여기서,

$$C_1 = \frac{1}{2\Delta t} - P_3 - P_1 - P_2, \quad C_2 = \frac{1}{2\Delta t} + P_3 + P_1 + P_2$$

$$P_1 = \frac{1+E_0}{\gamma_w \Delta x^2} k(e) \frac{d\sigma'}{de}, \quad P_2 = \frac{1+E_0}{\gamma_w \Delta y^2} k(e) \frac{d\sigma'}{de}$$

$$P_3 = \frac{k(e)}{\gamma_w [1 + E^T(x_i, y_j, z_k)] \Delta z^2} \frac{d\sigma'}{de}$$

$$P_4 = \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \frac{k(e)}{[1 + E^T(x_i, y_j, z_k)]^2 \Delta z}$$

$$P_5 = \frac{1+E_0}{\gamma_w (\Delta x)^2} \frac{d\sigma'}{de}, \quad P_6 = \frac{1+E_0}{\gamma_w (\Delta y)^2} \frac{d\sigma'}{de}$$

$$P_7 = \frac{1}{\gamma_w [1 + E^T(x_i, y_j, z_k)] \Delta z^2} \frac{d\sigma'}{de}$$

$$P_8 = \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \frac{1}{[1 + E^T(x_i, y_j, z_k)] \Delta z}$$

$$P_9 = \frac{k(e)}{\gamma_w [1 + E^T(x_i, y_j, z_k)]^2 \Delta z^2} \frac{d\sigma'}{de}$$

### 3.3 초기 및 경계조건

#### 3.3.1 초기조건

준설매립완료 후의 고함수비의 지반은 자중압밀이 진행되고 있기 때문에 과잉간극수압이 존재하게 되어 자중에 의해 평형을 이룰 때의 연직 유효응력 분포식은 적용하기가 힘들다. 따라서 해석의 초기 조건으로는 식(16)과 같이 지반의 초기 간극비 분포는 전토층에 대해 일정하다고 보았고, 만약 본 공법적용 시 자중압밀이 종료되어 자중하에서 평형을 이룰 경우 지반의 초기간극비 분포는 식(17)과 같은 연직유효응력 분포식을 통하여 간극비의 향으로 표현할 수 있다.

$$e(x, y, z)_{t=0} = e_{ini} \quad (16)$$

$$\sigma'(x, y, z)_{t=0} = (\gamma_s - \gamma_w)z \quad (17)$$

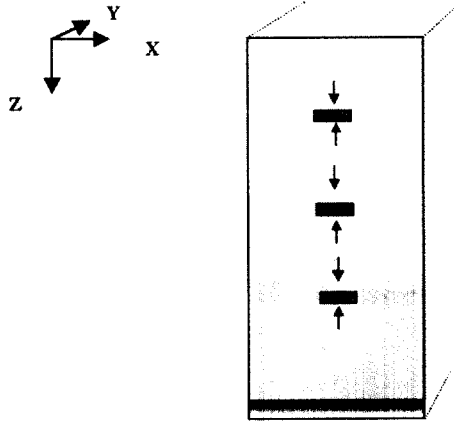


그림 5. 해석시의 단위 셀

### 3.3.2 경계조건

그림 5와 같은 해석대상 단위셀의 경계조건으로는 상부표면의 간극비, 하부면의 간극비, 해석단면 4면 경계 조건, 흠-드레인 경계부에서의 간극비 등으로 구분할 수 있다.

상부표면의 간극비는 진공압밀 진행 중 변화하므로 한 시간단계에서 산정된 평균간극비를 다음시간 단계의 상부표면의 간극비로 설정하였다. 또한 하부면은 투수층과 불투수층으로 고려될 수 있는데, 투수층의 경우 압밀진행 동시에 바로 유효응력으로 전환되므로 식(18)과 같이 표현하여 간극비의 향으로 표현할 수 있으며, 불투수층의 경우 하부면을 통한 물흐름은 없다는 조건 하에서 식(19)를 통해 간극비의 향으로 표현할 수 있다.

$$\sigma'(x, y, 0)_{t=t} = (\gamma_s - \gamma_w)z \quad (18)$$

$$\frac{\partial e}{\partial z} + (\gamma_s - \gamma_w) \frac{de}{d\sigma_z} = 0 \quad (19)$$

해석 단위셀의 4면을 통한 물 흐름은 없기 때문에 각 경계면 조건은 아래의 식으로 각각 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial e}{\partial x} = 0 \quad (x=0, y=y, z=z) \quad (20)$$

$$\frac{\partial e}{\partial x} = 0 \quad (x=nx, y=y, z=z) \quad (21)$$

$$\frac{\partial e}{\partial y} = 0 \quad (x=x, y=0, z=z) \quad (22)$$

$$\frac{\partial e}{\partial y} = 0 \quad (x=x, y=ny, z=z) \quad (23)$$

흠과 드레인 경계부의 조건으로는, 드레인의 투수성을 무한대로 가정하면 흠과 드레인 경계부의 전응력은

유효응력과 같게 되어 식(24)와 같이 드레인 상부의 자중과 드레인에 작용된 진공압의 합으로 표현할 수 있다.

$$\sigma' = (\gamma_s - \gamma_w)z_d + P \quad (24)$$

### 3.4 침하 및 시간관계

침하량과 간극비 사이의 관계를 이용해 임의의 시간(t) 및 임의 지점에서의 침하량은 식(25)와 같이 정의 된다.

$$S(x, y, z)_{t=t} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} h_0 \\ = [e(x, y, z)_{t=0} - e(x, y, z)_{t=t}] \frac{h_0}{1 + e_0} \quad (25)$$

여기서,  $e_0$  : 초기평균간극비

$h_0$  : 초기높이

또한 임의 시간에서 전토층의 평균침하량은, 식(26)과 같이 표현할 수 있다.

$$S_{ave}(t) = \frac{1}{N_i N_j N_k} \sum_{i=0}^{N_i} \sum_{j=0}^{N_j} \sum_{k=0}^{N_k} \\ \times [e(x_i, y_j, z_k)_{t=0} - e(x_i, y_j, z_k)_{t=t}] \frac{h_0}{1 + e_0} \quad (26)$$

여기서,

$N_i$  : x방향으로의 절점수

$N_j$  : y방향으로의 절점수

$N_k$  : z 방향으로의 절점수

$S_{ave}(t)$  : 임의의 시간에서의 평균 침하량

또한 압밀종료 시의 최종 침하량은 (27)과 같다.

$$S_{ave}(\infty) = \frac{1}{N_i N_j N_k} \sum_{i=0}^{N_i} \sum_{j=0}^{N_j} \sum_{k=0}^{N_k} \\ \times [e(x_i, y_j, z_k)_{t=0} - e(x_i, y_j, z_k)_{t=\infty}] \frac{h_0}{1 + e_0} \quad (27)$$

여기서,  $S_{ave}(\infty)$  : 압밀종료시 평균침하량

따라서 임의시간에서의 압밀도는 식(28)과 같이 표현 된다.

$$U(t) = \frac{S_{ave}(t)}{S_{ave}(\infty)} \quad (28)$$

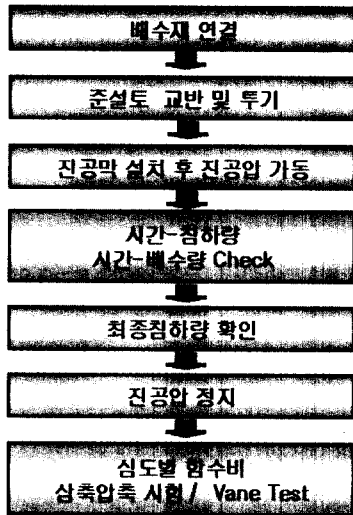


그림 6. 대형 토조시험 흐름도

#### 4. 해석결과의 검증 및 압밀효과 분석

수평진공배수 공법 적용시의 압밀해석을 위하여 본 연구에서 진행된 지배방정식 및 경계조건 설정 등의 타당성을 검증하기 위하여 실내실험 결과와의 비교 분석을 실시하였다.

##### 4.1 대형토조실험

모형실험은 대형 토조 내에 미리 드레인재를 정방향으로 설치하고 고함수비 상태( $w_r=200\%$ )의 준설토를 투기하여 실험을 실시하게 된다. 수평진공배수공법의 실내 모형실험에 대한 흐름도를 간단하게 나타내면 그림 6과 같다.

##### 4.2 실험장비 및 실험조건

드레인재를 이용한 수평진공배수공법의 토조 실험에 사용된 실험 장비는 크게 진공압 시스템과 대형 토조로 구분할 수 있다.

진공압시스템으로용량 600 l/min의 진공펌프 2대를 사용하였고 효율을 극대화시키기 위하여 1시간 간격으로 펌프가 자동으로 교체되어 가동될 수 있도록 장치를 설치하였다. 집수탱크는 진공압 작용 시 배수재를 통해서 유입된 흡입량을 측정할 수 있도록 제작하였다.

모형토조의 경우 배수재의 간격의 차이에 의한 진공압밀효과를 확인하기 위하여 모형토조를 폭 50cm×길

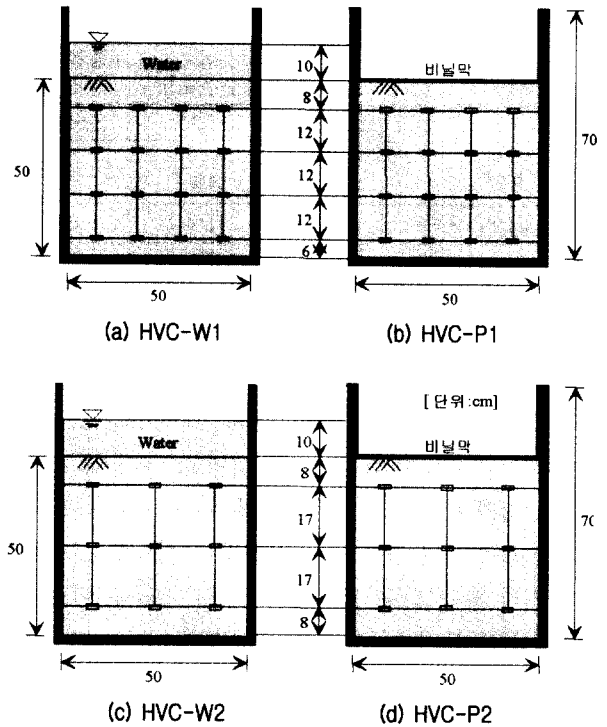


그림 7. Case별 실험조건

이 300cm×높이 70cm로 제작하였다. 또한 실험 중 지반의 압밀 상태와 침하량을 육안으로 확인하기 위하여 토조 정면과 Head Pipe 측면은 투명한 아크릴로 제작하였고, 수평배수재는 실내 모형실험을 고려하여 폭 100mm×두께 3mm 크기의 드레인재를 절단하여 폭 5mm×두께 3mm인 크기로, 정방향으로 간격을 달리하여(4단, 3단) 설치하였고, 하모니카형 드레인을 사용하였다. 적용진공압은 연결 부위의 압력손실 등을 고려하여 모든 연결부위에 실링처리를 하였고 진공압은 드레인의 축소된 점을 감안하여 실제 현장적용시의 크기를 바탕으로  $-0.1 \text{ kg/cm}^2$ 의 진공압이 일정하게 유지되도록 하였다.

모형토조 실험은 그림 7에서와 같이 동일한 조건에서, 표층부 진공막 설치시의 4×4단 배열(HVC-P<sub>1</sub>)과 3×3단(HVC-P<sub>2</sub>)의 경우를 실시하였고, 표층부 물막의 경우 또한 4×4(HVC-W<sub>1</sub>), 3×3(HVC-W<sub>2</sub>)단 배열의 경우에 대해 배재의 간격과 지반 표층부의 진공압 처리 방법을 달리하여 4가지 경우에 대하여 실험을 실시하였다.

##### 4.3 해석결과의 검증

본 연구에 유도된 3차원 압밀지배방정식 및 수평진공배수 공법 해석을 위해 고려된 초기 및 경계조건 설정의 타당성을 검토하기 위하여 실내에서 수행된 토조시험 결

표 1. 해석시의 주요 입력변수

초기 간극비	$\gamma_s$ ( kg/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_w$ ( kg/cm <sup>3</sup> )	토층의 두께 (cm)
6.0	0.00268	0.001	50
$e - \sigma$	진공압 kg/cm <sup>2</sup>	드레인 배열	D1(cm)
$e = 1.4834\sigma^{-0.1946}$	0.1	4×4	6
k-e	DV(cm)	DH(cm)	-
$k = 1E-08e^{4.0638}$	12.5	12.5	-

과와의 비교를 실시하였다. 유도된 지배방정식을 초기에는 FTCS에 의해 그리고 그 이후에는 Dufort-Frankel 방법에 의해 지배방정식을 차분화 하였고, 초기 및 경계조건을 고려하여 해석을 실시하였다. 해석절차는 그림8과 같다. 연구결과와 검증의 위한 해석대상은 진공압 효과를 충분히 확인할 수 있었던 HVC-P1 결과를 이용하였다. HVC-P1 모델해석에 이용된 입력변수는 표1과 같다.

그림 9는 진공압 헤드파이프로 부터의 각 거리별로

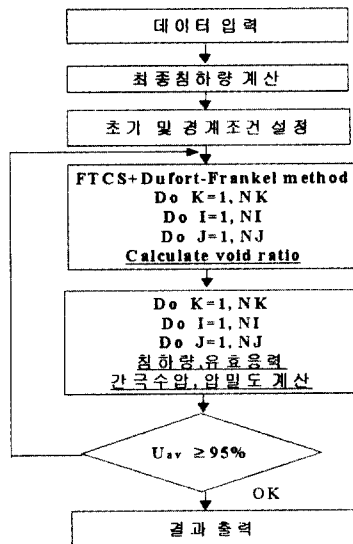


그림 8. 프로그램 해석절차

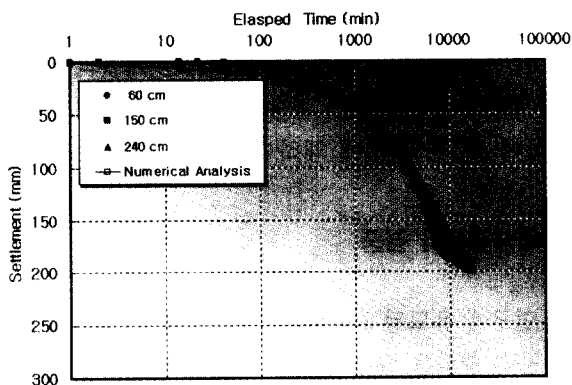


그림 9. 대형토조 모델링 결과

측정된 침하량과 실내 토조시험결과를 모델링하여 검증한 결과를 보여주고 있으며 실내에서 수행된 토조 시험결과와의 좋은 일치를 확인할 수 있었다.

#### 4.4 수평진공배수 공법의 효과 분석

실내에서 실시된 대형 토조시험 모델링을 통하여 본 연구에서 진행된 지배방정식 및 각 경계조건 등이 수평진공배수 공법 적용시의 압밀현상을 해석가능 하리라는 판단하에 수평진공배수공법 적용시의 압밀 효과 분석을 실시하였다. 압밀효과 분석은 토층이 50cm인 토조 시험 모델링 결과와 하부 미개량 지반의 효과를 알아보기 위하여 동일한 조건에 전 토층의 깊이를 100cm인 두 가지의 경우에 대하여 분석을 실시하였다.

##### 4.4.1 평균압밀도에 따른 심도별 간극비 분포

토층깊이가 50cm 인 경우와 100cm의 경우에 대하여 동일한 조건하에서 해석을 실시하였다. 그림 10, 그림 11은 각각에 대하여 평균압밀도에 따른 심도별 간극비

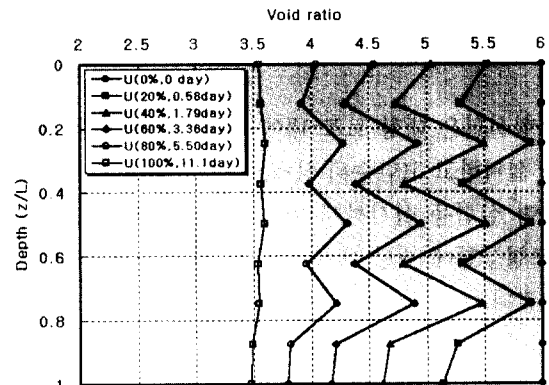


그림 10. 심도별 간극비 분포(50cm)

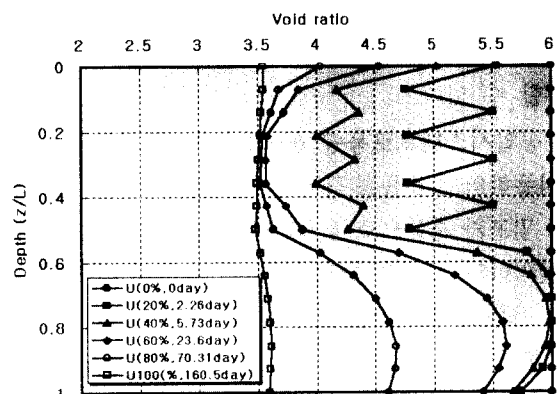


그림 11. 심도별 간극비 분포(100cm)



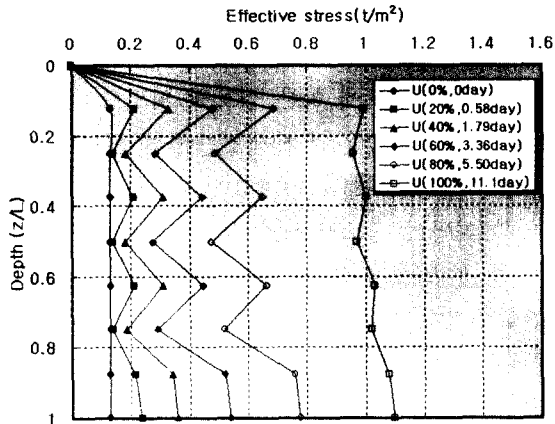


그림 12. 심도별 유효응력 분포(50cm)

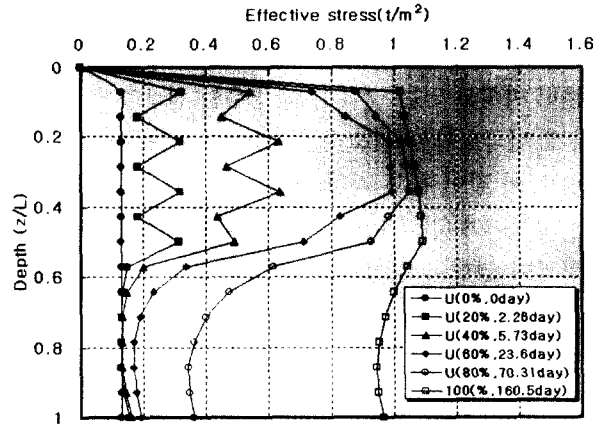


그림 13. 심도별 유효응력 분포(100cm)

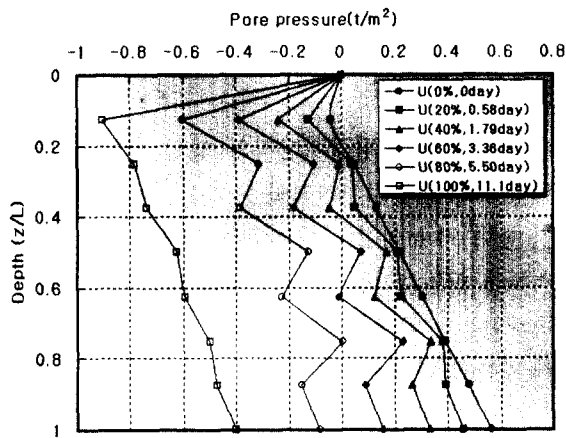


그림 14. 심도별 간극수압 분포(50cm)

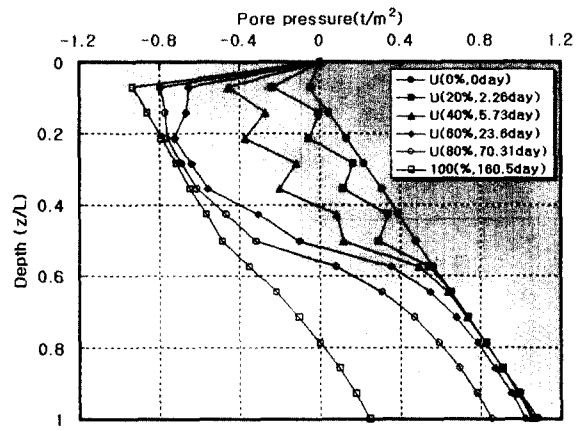


그림 15. 심도별 간극수압 분포(100cm)

분포의 결과로서, 드레인 부근에서 우선적으로 간극비가 크게 감소하고 압밀이 진행됨에 따라 점진적으로 전 토층이 동일한 값으로 수렴해 가고 있다. 그림 8의 경우 최하단 드레인과 하부바닥면까지의 거리가 매우 짧아 미개량부분이 존재하지 않는 경우로서 각 평균압밀도에 따라 전 토층이 균등하게 개량되나 그림 9에서와 같이 하부 미개량 지반이 심도가 깊은 경우, 드레인이 타설된 상부 지반은 균등하게 개량효과를 나타내나 드레인이 타설된 하부지반은 상부지반에 비해 개량효과가 크게 나타나지 않는 결과를 보여 주었다. 진공압이 드레인이 설치되어 있는 곳에서만 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

#### 4.4.2 평균압밀도에 따른 심도별 유효응력 분포

그림 12, 그림 13은 두 가지 해석 조건에 대해 평균압밀도에 따른 심도별 유효응력 분포를 보여주고 있다. 드레인 부근에서 우선적으로 유효응력이 크게 증가하고

압밀이 진행됨에 따라 점진적으로 전 토층이 동일한 값으로 수렴해 가고 있다. 토층깊이가 50cm로 얇은 경우 그림 12와 같이 압밀이 진행됨에 따라 유효응력이 전 토층에 대해 균등하게 증가되는 반면 토층깊이가 100cm로 깊은 경우, 상부에서는 압밀이 진행됨에 따라 균등한 유효응력 분포를 나타내나 하부지반에서는 상부지반보다 낮고 점진적인 유효응력증가 양상으로 압밀이 진행됨에 따라 진공압이 점진적으로 유효응력으로 전이되어 최종적으로 완전히 유효응력으로 전이되는 결과를 보여주고 있다. 이는 하부 지반은 진공압에 의한 압밀보다는 자중에 의한 압밀효과가 발생하는 것을 나타내고 있다.

#### 4.4.3 평균압밀도에 따른 심도별 간극수압분포

진공압 적용 시 간극수압은 음의 간극수압을 띠게 되고 음의 간극수압 만큼 유효응력으로 전이된다. 그림 14, 그림 15는 두 가지 해석조건에 대해 압밀이 진행됨

에 따라 심도별 간극수압 분포의 결과를 보여주고 있다. 앞의 결과와 마찬가지로 진공압의 영향이 전토층에 대해 충분히 미치고 있는 그림 14의 경우는 전토층에 대해 균등하게 간극수압이 감소하는 결과를 보여주고 있으나 그림 15와 같이 하부 지반이 심도가 깊은 경우, 상부에서는 균등하게 간극수압이 감소하나 하부 지반에서는 진공압이 영향이 적어 점진적이고 상부지반보다 훨씬

작은 탈수 효과가 나타나고 있다.

#### 4.4.4 평균압밀도에 따른 심도별 압밀도 분포

그림 16, 그림 17은 각 해석조건에 대해 압밀 진행에 따른 심도별 압밀도를 나타내고 있다. 그림 16에서와 같이 하부 지반이 심도가 드레인의 연직간격 보다 작은 경우, 즉 전 토층이 진공압의 영향이 미치게 되는 경우는 균등한 압밀효과를 나타내고 있으나 그림 17과 같이 하부지반이 심도가 깊어지는 경우 하부 지반에서는 진공압에 의한 탈수효과가 감소하게 되어 상부에서는 균등한 압밀효과가 나타나지만 하부지반에서는 상부지반보다 훨씬 느린 압밀효과가 나타나게 된다. 이 두 가지 경우에 대한 상부층만의 압밀도를 비교하여 보면 유사한 시간에 동일한 압밀도에 도달함을 보여주었다.

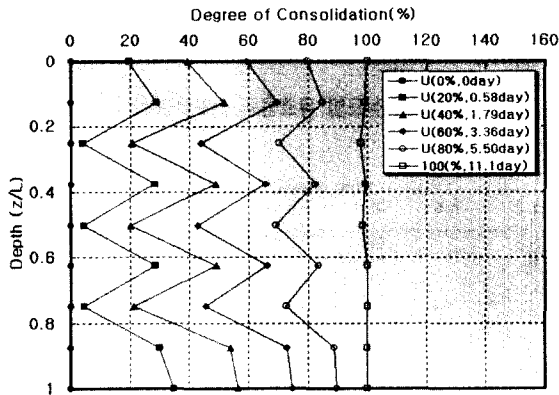


그림 16. 심도별 압밀도 분포(50cm)

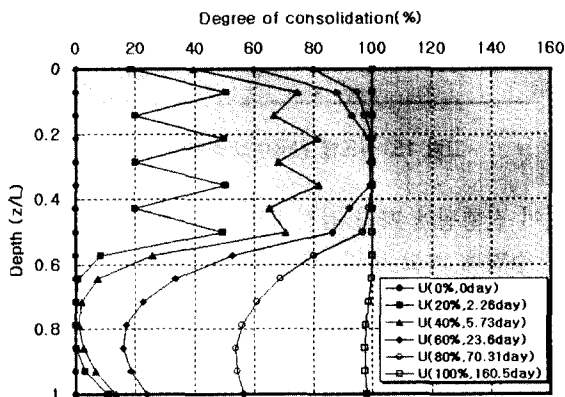


그림 17. 심도별 압밀도 분포(100cm)

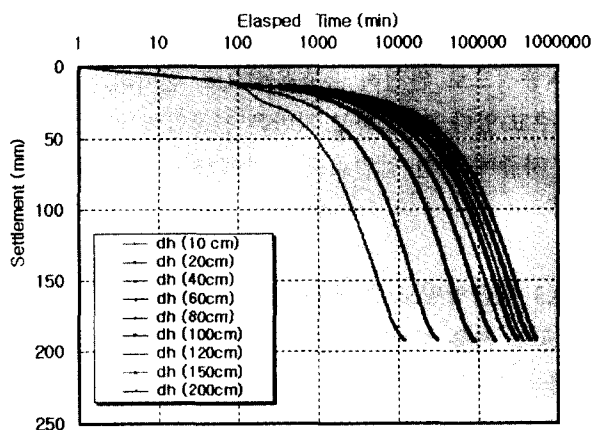


그림 18. 배수재 수평타설간격에 따른 침하량

#### 4.4.5 배수재 수평설치간격의 영향

배수재의 수평설치간격의 영향을 알아보기 위하여 초기 높이 50cm의 경우에 대하여 드레인의 수평간격을 달리하여 압밀효과를 확인하였다. 그림 18은 배수재의 수평타설간격에 따른 침하량을, 그림 19는 수평타설 간격에 따른 압밀완료 시간을 나타내고 있다. 배수재의 수평타설 간격이 작아짐에 따라 압밀완료 시간이 일반적으로 단축은 되지만 그림 19에서와 같이 수평타설 간격과 압밀도 95% 도달시간과의 관계에서는 세 부분의 기울기를 나타내고 있다. 배수재 수평타설 간격이 40cm보다 작거나 120cm 보다 큰 경우에는 수평타설 간격변화량에 따른 압밀완료 시간 변화량이, 40~120cm 간격에서의 수평타설 간격 변화량에 따른 압밀완료 시간 변화량 보다 작은 경향을 보여주었다. 즉, 배수재 수평 타설 간격이 40cm이하이거나 120cm 이상에서는 타설간격이 변화에 따른 압밀 단축효과가 40~120cm 타설간격 변화에 따른 압밀 단축효과 보다 작아지는 결과를 나타내고 있다.

이는 수평으로 드레인 갯수를 추가하여 간격을 좁힘에 따라 일반적으로 압밀도 도달 시간은 단축되나 20cm 이하 또는 120cm이상에서는 드레인을 추가하여 수평간격을 좁힘으로 인한 압밀단축효과가 40~120cm 사이에서 보다 작아져 드레인 갯수 증가에 따른 압밀단축효과가 크지 않아 비경제적 배치가 될수 있음을 나타낸다고 할 수 있겠다.

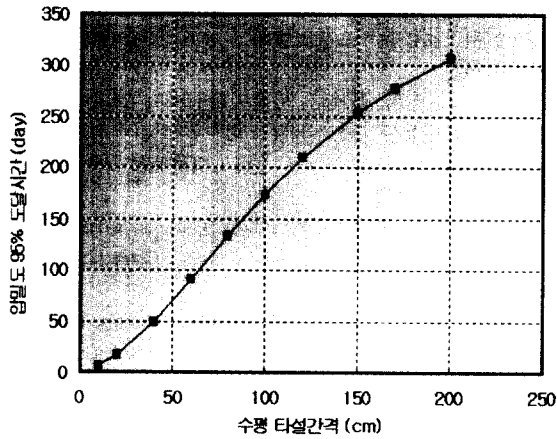


그림 19. 배수재 수평타설간격에 따른 압밀완료시간

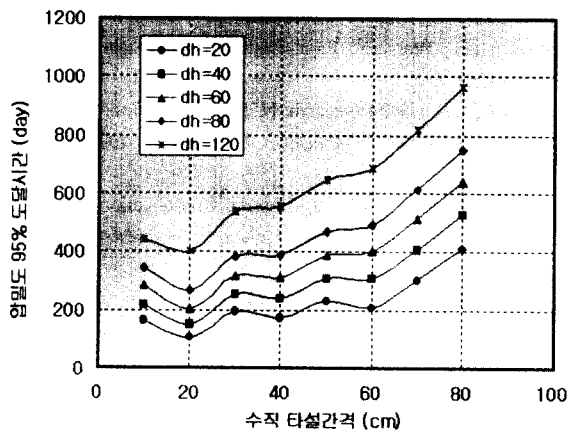


그림 20. 배수재 수직타설간격에 따른 압밀완료시간

#### 4.4.6 배수재 수직설치간격의 영향

배수재의 수직설치간격의 영향을 파악하기 위하여 앞서 해석한 결과를 바탕으로 수평간격을 40~120cm로 변화시키고 지표면과 첫 단 드레인의 간격을 6cm로 고정하였고, 드레인의 배치는 연직방향으로 4단의 경우를 고려하였다. 연직드레인의 간격이 증가함에 따라 토층의 두께가 깊어지는 효과가 나타나기 때문에 목표개량심도를 3.5m로 고정하였을 때의 연직배치 간격의 영향을 파악하였다.

그림 20에서와 같이 모든 수평간격에 대해서 드레인의 간격이 좁아질수록 압밀 소요시간이 단축되는 경향을 보여주고 있으나, 20cm이하에서는 다시 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 결과로 볼 때 일정한 개량심도에서 드레인의 연직갯수가 정해져 있을 경우, 드레인을 간격이 좁아질수록, 즉 드레인의 배치가 일정개량심도의 상부측으로 배치가 될수록 더 빠른 압밀효과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

이는 수치해석상의 결과로서 일정한 개량심도에서 드레인의 연직간격이 감소함으로써 즉, 4단의 드레인이 상부측으로 배치된 경우, 해석 시 상부의 급속한 압밀효과가 하부지반으로 영향을 미치는 속도가, 연직간격이 넓어져 일정개량심도에 일정한 간격으로 4단의 드레인의 균등하게 분포되는 경우보다 빠르게 나타나는데 기인한다고 사료된다. 또한 간격이 20cm이하로 되는 경우에는 간격이 너무 좁아짐에 따라 드레인이 타설이 안된 하부영역이 더욱 증가해 상부에서의 급속한 공극비 감소효과가 하부로 영향을 미쳐나가는 속도가 다시 감소해 가는 원인으로 사료된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 준설매립에 의해 형성된 초연약지반에 수평진공배수공법 적용시의 압밀 현상을 예측하기 위하여 지반의 자중 및 압축성과 투수성의 비선형성을 고려할 수 있는 지배방정식을 구성하였고 해석 시 고려되어야 할 경계조건 등을 구성하여 수평진공배수 공법 적용시의 압밀해석 기법을 연구하였으며, 실내 대형토조시험 모델링 결과 및 해석결과의 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 초연약지반의 비선형 압밀해석을 위해 본 연구에서 유도된 지배방정식 및 경계조건의 설정은 수평진공배수공법 적용시의 압밀현상을 예측할 수 있었다.
- (2) 수평진공배수공법 적용시의 지반의 물성변화 등의 효과를 분석한 결과 하부 미개량 심도가 깊어지는 경우, 드레인이 타설된 상부에서는 균등한 개량효과가 나타나지만 하부지반은 효과가 미약하고 점진적인 압밀효과가 나타났다. 이는 최하단 드레인의 진공압 영향이 하부지반에 충분히 미치지 못하고 주로 자중에 의한 압밀 발생하기 때문으로 해석된다.
- (3) 배수재의 수평 타설간격의 영향을 확인하기 위해 수평 타설간격을 달리하여 해석한 결과 수평 타설간격이 40cm보다 작은 경우와 120cm보다 큰 경우는 수평타설 간격의 변화에 따른 압밀단축 효과가 40~120cm 사이의 간격에서의 수평타설간격 변화에 따른 압밀 단축효과보다 작아지는 결과를 나타냈다. 따라서 수평타설 간격이 40~120cm 사이에서는 간격이 감소함에 따라 효과의 증가가 다른 구간에 비해 크게 증가하기 때문에 다른 요인들을 고려하여

이러한 간격의 범위에서 배수재의 수평간격을 설정함이 바람직하다고 할 수 있겠다.

- (4) 목표개량심도 및 드레인 개수를 일정하게 정한 후 드레인의 연직간격의 영향을 분석한 결과 드레인의 간격이 좁을 수록 즉, 일정수의 드레인을 상부로 배치할수록, 동일갯수 드레인의 연직간격을 증가시켜 개량심도 전체에 배치시키는 경우보다 더 빠른 압밀 효과를 나타냈고, 연직간격 20cm인 경우가 전토층의 압밀완료 소요시간이 빠르게 나타났다. 이러한 배치형태에 인한 압밀효과 대한 실험적 검증이 있어야 할 것이다.

향후 현장시험시공 등의 자료를 바탕으로 실내실험에서 고려될 수 없었던 현상에 대한 연구와 이를 고려한 해석법 등에 대한 연구가 진행되어야 하겠다.

## 참 고 문 헌

1. 김형주, 원명수(1997) "수평배수공법에 의해 개량된 준설편토지반의 압밀 거동에 관한 연구", 한국지반공학회 논문집, 제13권, 제1호, pp.137-144.
2. 황정규, 김홍택, 김석열, 강인규, 김승욱(1998), "플라스틱 배수제재를 이용한 수평배수공법에 관한 연구", 한국지반공학회 논문집, 제14권, 제6호, pp.95-117.
3. 이 송, 이규환, 전제성(1997), "원통형 드레인을 사용한 진공압밀공법의 효과 분석", 대한토목학회 논문집, 제17권 제3-2호, pp.209-216.
4. 이송, 이규환, 전제성(1999), "비선형 유한변형률 압밀 이론을 이용한 압밀해석 프로그램개발", 한국지반공학회 연약지반처리위원회 학술발표회 논문집, pp.36-47.
5. 渡義治, 新舍博, 林健太郎(1985) "水平ドレーン材を利用した真空壓密工法に関する基礎實驗", 五洋建設(株), Vol.14, pp.137-142.
6. 新舍博, 松長作馬, 渡義治, 佐藤秀輝.(1988) "水平ドレーンを利用した真空壓密工法の開發に関する研究(その3)-大分空港埋立地における現場實驗-", 土質工學研究發表會講演集, 第23回, pp.2129-2132.
7. Carrier, W.D., Beckman, J.F.,(1984), "Correlation between Index Test and the Properties of Remoulded clays", *Geotechnique*, Vol.34, No.2, pp.211-228.
8. Chung,Y.I.,1993 "Vacuum consolidation of highly compressible soil with vertical wick drain", ph.D. thesis, South Dakota school of mines and technology, pp.1-209
9. Gibson, R. E., Schiffman, R. L., and Cargill, K. W.(1981), "The Theory of One-Dimensional Consolidation of Saturated Clays II, Finite Non linear Consolidation of Thick Homogeneous Layers", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.18, pp.280-293.
10. Kjellman W.(1952) "Consolidation of Clay Soil by Means of Atmospheric Pressure" Proc. Conf. on Soil Stabilization, MIT, pp.258-263.
11. Koppula, S.D. and Mogenstern, N. R., 1982 "On the Consolidation of sedimenting clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.19, pp.260-268.
12. Pollock G.W.(1988) "Large strain Consolidation of oil sand tailing sludge". Msc Thesis, University of Alberta, Edmonton, Alberta.
13. Shinsha H. et al.(1991) "Improvement of very soft ground by vacuum consolidation using horizontal drains.", *GEO-COST*, pp.387-392.
14. Zaho, P.(1989) "Analysis of Prefabricated Wick Drains by Uncoupled Finite Strain Consolidation Theory", M.S. Thesis, South Dakota School of Mines and Technology, Rapid city, South Dakota.

(접수일자 2001. 3. 16)