

# 플라스틱 배수재를 이용한 수평배수공법에 관한 연구

A Study on the Horizontal Drainage Method Using Plastic Drain Board

|                     |                     |
|---------------------|---------------------|
| 황 정 규* <sup>1</sup> | 김 홍 태* <sup>2</sup> |
| Hwang, Jung-Kyu     | Kim, Hong-Taek      |
| 김 석 열* <sup>3</sup> | 강 인 규* <sup>4</sup> |
| Kim, Seog-Yeol      | Kang, In-Kyu        |
| 김 승 욱* <sup>5</sup> |                     |
| Kim, Seung-Wook     |                     |

---

## Abstract

In the present study, 2-D consolidation theory of the dredged clay by means of the horizontal drain method is proposed. The horizontal drain method to install the drains such as plastic drain board within the dredged clay is a soil improvement method to accelerate the consolidation by expelling pore water in the vertical direction along the horizontal drains. Based on the finite strain consolidation theory by Gibson et al., the partial differential equation of 2-D consolidation due to the horizontal drain is derived. The consolidation due to the horizontal drain can be illustrated from combined self-weight consolidation effect and consolidation effect by horizontal drains. For the prediction of consolidation settlement and degree of consolidation numerical analysis is suggested on the basis of Dufort-Frankel finite differential algorithm.

Also, the analytical procedures proposed in this study are verified by the model tests, and the predictions of the consolidation settlement and degree of consolidation are compared with the results obtained from the tests for the dredged clay gathering at Siwha site in Ansan, Korea. For the predictions, the relationship void ratio vs effective stress and the relationship permeability vs void ratio of the dredged clay are obtained from the oedometer tests. Additionally, the parametric study for consolidation settlement by variations of design parameters related with horizontal drain method is carried out. Based on the results of the parametric study, design charts for the preliminary design are also proposed.

- 
- \*1 정회원, 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수
  - \*2 정회원, 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수
  - \*3 정회원, 농어촌진흥공사 농어촌연구원
  - \*4 정회원, 브니엘 컨설턴트 책임연구원
  - \*5 농어촌진흥공사 농어촌연구원

## 요 지

본 연구에서는, 연약한 준설패립점토지반 내부에 플라스틱 배수재를 수평으로 설치하여 압밀침하의 가속화를 유도하는 수평배수공법의 해석절차 체계화에 초점을 두고 이론적 및 실험적 접근을 진행하였다. 이를 위해, 유한변형률 개념을 근거로 한 Gibson등의 1차원 자중압밀이론을 토대로, 자중압밀효과 및 수평배수재 설치에 따른 추가 압밀효과를 복합적으로 고려하는 지배방정식을 제시하였으며, 본 지배방정식 및 수평배수재 설치효과를 고려한 초기조건 및 경계조건 등을 토대로, Dufort-Frankel의 유한차분화 알고리즘을 이용해 시간경과에 따른 침하량 및 압밀도 등의 변화를 예측하기 위한 해석절차를 제시하였다.

또한 제시된 해석절차의 적용 타당성 확인을 위해, 안산 시화지구 준설패립점토 및 플라스틱 수평배수재를 이용한 실내모형실험을 실시하였다. 실내실험을 통해, 안산 시화지구 준설패립점토의 간극비-유효응력 관계 및 투수계수-간극비 관계 등을 정량적으로 정의하기 위한 기초자료를 획득하였으며, 또한 시간경과에 따른 깊이별 침하량등을 측정하여 본 연구에서 제시된 해석절차에 의한 예측치와 비교·분석하였다. 이외에도 플라스틱 배수재 수평배수공법에 관련된 설계변수가 압밀침하등에 미치는 영향을 제시된 해석절차를 이용해 분석하였으며, 이 결과를 토대로 한 설계도표의 제시도 이루어 졌다.

Keyword : Horizontal drain method, Self-weight consolidation, Finite strain consolidation theory, Finite differential method

### 1. 서 론

일반적으로 연직배수공법은 심층의 연약한 점성토지반 개량에 주로 적용되고 있는 반면에, 수평배수공법은 주로 농업토목에서 수리조건은 비교적 양호하나, 지하수위가 높고, 수온이 낮은 용출수와 수분이 많은 평야지의 배수 불량답에 직경 5cm 정도의 원형암거인 PVC 유공관을 수평으로 설치하여 수두차에 의해 중력방향으로 자연배수시켜 배수불량답을 개량하는데 사용되고 있다.

그러나 근래에 들어 매립을 위한 육상토를 구하기가 점차 어려워지는 실정이며, 따라서 간척지의 조성사업에서도 연약한 해저준설토의 사용이 증가하고 있는 추세이다. 그러나 연약한 준설토를 투기하여 만든 간척지내의 개답지는 대부분 수평배수공법을 적용하지 않고, 자중압밀에 의해서만 처리되고 있어, 장기간 장비 투입이 어렵거나 개답공사의 차기 공정에 차질을 초래하는 등 문제점을 지니고 있다.

따라서 대규모 간척지 매립공사를 진행하면서, 연약한 준설패립점토지반을 조기에 침하시켜 압밀시간을 단축시키고, 지지력을 향상시키며, 또한 침하에 상당하는 토량을 펌프로 준설토 지역에서 공급하게 하여 피복토량이나 샌드매트를 절약할 수 있는 장점 등이 예상되는 수평배수공법의 적용 필요성이 인정된다. 간척지의 개답과 같이 상대적으로 지역이 넓고, 투기된 준설패립 토층이 1m 정도의 두께인 경우에는, 기존의 암거를 이용하는 수평배수공법은 시공이 복잡하고, 공사비가 크며, 시공능률이 떨어지는 단점 등을 지니고 있다. 또한 진공(vacuum)에 의해 강제로 배수시키는 공법의 적용은 시공성 및 경제성 측면에서 여의치 않으므로, 이 보다는 플라스틱 수평배수재를 완만하게 수평으로 설치하여 수두차에 의해 중력방향으로 자연배수시키는 수평배수공법의 적용 필요성이 인정된다.

국내에서는 이동(1994)이 준설패립점토의 자중압밀특성 및 전단강도특성 등에 대한 연구

결과를 발표한 바 있으며, 유등(1996)은 안정에 소요되는 시간추정기법에 관련된 연구를 통하여 준설매립점토지반의 자중압밀해석 프로그램을 개발하고, 원심모형실험을 실시하여 그 결과를 비교한 바 있다.

그러나 현재까지, 배수불량답에 적용되는 압거배수에 관한 경험식 정도를 제외하고는, 플라스틱 배수재를 이용하는 수평배수공법에 관한 이론식 및 체계적인 해석절차 등은 제시된 바 없는 실정이다.

본 연구에서는 이와같은 문제점에 착안하여, 연약한 준설매립점토지반 내부에 플라스틱 배수재를 수평으로 설치하여 압밀침하의 가속화를 유도하는 수평배수공법의 해석절차 체계화에 초점을 두고 이론적 및 실험적 접근을 진행하였다.

이를 위해 우선 본 연구에서는, 유한변형률 (finite strain) 개념을 근거로 한 Gibson등 (1967)의 1차원 자중압밀이론을 토대로, 연약한 준설매립점토지반 내부에 플라스틱 수평배수재가 한줄로 설치되는 경우의 압밀(이하 수평배수압밀로 정의함) 지배방정식을 제시하였다. 이와같은 수평배수압밀은 준설매립점토 자중에 의한 압밀과 수평배수재에 의한 추가 압밀이 복합적으로 작용하게 되며, 본 연구에서는 자중압밀효과와 수평배수재에 의한 추가 압밀효과를 상호 독립적으로 가정한 다음, 이를 선형적으로 중첩시켜, 수평배수압밀에 대한 지배방정식을 유도하였다.

또한, 본 지배방정식 및 수평배수재 설치효과를 고려한 초기조건 및 경계조건 등을 토대로, Dufort-Frankel의 유한차분화 알고리즘 (Hoffman, 1993)을 이용해 시간경과에 따른 침하량 및 압밀도 등의 변화를 예측하기 위한 해석절차를 제시하였다.

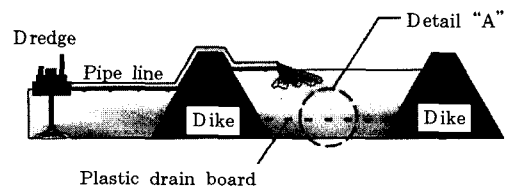
계속해서 제시된 해석절차의 적용 타당성 확인을 위해, 안산 시화지구 준설매립점토 및 플라스틱 수평배수재를 이용한 실내모형실험을 실시하였다. 실내실험을 통해, 안산 시화지구 준설매립점토의 간극비-유효응력 관계 및 투수계수-간극비 관계 등을 정량적으로 정의하

기 위한 기초자료를 획득하였으며, 또한 시간경과에 따른 깊이별 침하량등을 측정하여 본 연구에서 제시된 해석절차에 의한 예측치와 비교·분석하였다.

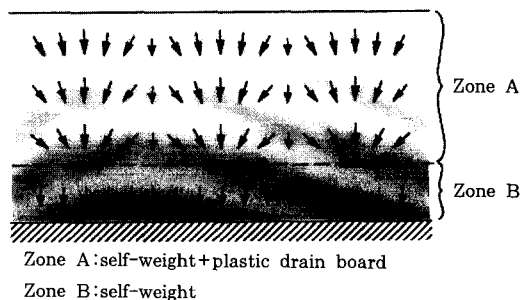
이외에도 플라스틱 배수재 수평배수공법에 관련된 설계변수가 압밀침하등에 미치는 영향을 제시된 해석절차를 이용해 분석하였으며, 이 분석결과를 토대로 한 설계도표의 제시도 이루어졌다.

## 2. 수평배수압밀의 지배방정식 및 해석절차

본 연구 수평배수압밀의 지배방정식 및 해석절차는, 플라스틱 배수재가 준설매립점토지반 내부에 수평으로 한줄만 설치되고, 배수방법으로는 진공 보다는 중력에 의한 자연배수에 초점을 두었으며, 수평배수재 자체의 투수성은 무한한 것으로 가정하였다. 또한 수평배수재의 종방향(y 방향, 그림 1) 배수효과는 무시하였으며, 결국 x 및 z 방향으로의 2차원 물의 흐름에 의한 압밀을 해석대상으로 하였다.



(a) 개요도



(b) 상세도

그림 1. 수평배수압밀 개요

## 2.1 지배방정식

연약한 준설패립점토지반 내부에서 자중에 의한 압밀은, Gibson등이 제시한 1차원 유한변형률 자중압밀이론을 이용하여 식(1)과 같이 정의할 수 있다.

$$\left(\frac{\partial e}{\partial t}\right)_{\text{self-weight}} = \mp (\gamma_s - \gamma_w)g(e)\lambda \frac{\partial e}{\partial z} + g(e)\frac{\partial^2 e}{\partial z^2} \quad (1)$$

여기서,  $g(e) = -\frac{k_z(e)}{\gamma_w} \frac{1}{(1+e)} \frac{d\sigma'_z}{de}$

$$\lambda = -\frac{d}{de} \left(\frac{de}{d\sigma'_z}\right)$$

$\gamma_s$  = 연약토층의 단위중량,

$\gamma_w$  = 물의 단위중량

$k_z(e)$  = 지반흙의 z방향 투수계수

$e$  = 간극비,  $t$  = 임의의 경과시간

식(1)에 포함된  $g$  및  $\lambda$ 는 Gibson등이 제시한 매개변수이며, 본 연구에서  $g$ 는 간극비 및 이에 따른 지반흙의  $z$  방향 투수계수 등의 변화를 고려하는 변수로, 또한  $\lambda$ 는 간극비와  $z$  방향 유효응력( $\sigma'_z$ ) 사이의 관계를 정의하는 다음의 식(2)로 부터 결정되는 상수로 가정하였다.

$$e = (e_{00} - e_{\infty}) \exp(-\lambda \sigma'_z) + e_{\infty} \quad (2)$$

여기서,  $e_{00}$  = 초기상태(시간  $t=0$ )에서 최상부 지표면 흙의 간극비

$e_{\infty}$  = 최종상태(시간  $t=\infty$ )에서의 간극비

또한 수평배수재에 의한 연약한 준설패립점토지반 내부에서의 추가 압밀효과를, 지반내부 물의 흐름이 Darcy의 법칙을 따른다고 가정하고,  $x$  및  $z$  방향(그림 1 참조)으로 연속방정식 및 질량보존의 법칙 등을 적용하여 표현하면 식(3)과 같다.

$$\left(\frac{\partial e}{\partial t}\right)_{\text{drainage}} = (1+e_0) \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{k_x(e)}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{k_z(e)}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3)$$

여기서,  $k_x(e)$  = 지반흙의  $x$ 방향 투수계수

여기서 간극수압( $u$ )의 감소량과 유효응력의 증가량이 서로 같다는 가정(즉,  $du = -d\sigma_z$ )을 토대로, 식(3)의 일부분을 Gibson등이 제시한 식(2)를 이용해 간극비에 대한 표현으로 변환하면 다음의 식(4)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{k_x(e)}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial x} &= \frac{k_x(e)}{\gamma_w \lambda (e - e_{\infty})} \frac{\partial e}{\partial x} \\ \frac{k_z(e)}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} &= \frac{k_z(e)}{\gamma_w \lambda (e - e_{\infty})} \frac{\partial e}{\partial z} \end{aligned} \quad (4)$$

결국, 식(3) 및 (4)를 종합하여 수평배수재에 의한 연약한 준설패립점토지반 내부에서의 추가 압밀효과를 정의하면 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial e}{\partial t}\right)_{\text{drainage}} &= \frac{(1+e_0)}{\gamma_w \lambda} \left( \frac{1}{(e - e_{\infty})} \frac{\partial k_x(e)}{\partial x} \frac{\partial e}{\partial x} - \frac{k_x(e)}{(e - e_{\infty})^2} \left(\frac{\partial e}{\partial x}\right)^2 + \frac{k_x(e)}{(e - e_{\infty})} \frac{\partial^2 e}{\partial x^2} \right) \\ &+ \frac{1}{\gamma_w \lambda} \left( \frac{1}{(e - e_{\infty})} \frac{\partial k_z(e)}{\partial z} \frac{\partial e}{\partial z} - \frac{k_z(e)}{(e - e_{\infty})^2} \left(\frac{\partial e}{\partial z}\right)^2 + \frac{k_z(e)}{(e - e_{\infty})} \frac{\partial^2 e}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

본 연구에서는, 연약한 준설패립점토지반 내부에 플라스틱 배수재가 수평으로 설치되는 소위 수평배수압밀의 경우, 시간경과에 따른 간극비의 총변화량은, 준설패립점토 자중에 의한 압밀효과와 수평배수재에 의한 추가 압밀효과를 상호 독립적으로 가정한 다음, 위의 식(1) 및 (5)에 의해 각각 평가되는 자중압밀 및 수평배수재 추가 압밀에 의한 간극비의 변화량을 선형적으로 중첩하여 식(6)과 같이 결정하였다.

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \left(\frac{\partial e}{\partial t}\right)_{\text{self-weight}} + \left(\frac{\partial e}{\partial t}\right)_{\text{drainage}} \quad (6)$$

$$\mp (\gamma_s - \gamma_w)g\lambda \frac{\partial e}{\partial z} + g \frac{\partial^2 e}{\partial z^2}$$

$$+ \frac{(1+e_0)}{\gamma_w \lambda} \left( \frac{1}{(e - e_{\infty})} \frac{\partial k_x(e)}{\partial x} \frac{\partial e}{\partial x} - \frac{k_x(e)}{(e - e_{\infty})^2} \left(\frac{\partial e}{\partial x}\right)^2 + \frac{k_x(e)}{(e - e_{\infty})} \frac{\partial^2 e}{\partial x^2} \right)$$

$$+ \frac{1}{\gamma_w \lambda} \left( \frac{1}{(e - e_{\infty})} \frac{\partial k_z(e)}{\partial z} \frac{\partial e}{\partial z} - \frac{k_z(e)}{(e - e_{\infty})^2} \left(\frac{\partial e}{\partial z}\right)^2 + \frac{k_z(e)}{(e - e_{\infty})} \frac{\partial^2 e}{\partial z^2} \right)$$

식(6)에 포함된 간극비( $e$ )는, 임의의 경과시간( $t$ ) 및 연약토층 내부의 위치에 따라( $x$  및  $z$ 에 따라, 그림 1 참조) 변화하게 된다.

## 2.2 Dufort-Frankel의 유한차분화 알고리즘

편미분 형태로 표현된 식(6)의 수평배수압밀 지배방정식을, Dufort-Frankel의 유한차분화 알고리즘을 이용해 정리하면 식(7)과 같다. Dufort-Frankel의 유한차분화 알고리즘은, 공간계에서는 중앙차분법을, 시간계에서는 전방차분법을 각각 사용하고 있다.

$$E^{t+\Delta T}(x, z) = (1/C_1) \{ C_2 E^{t-\Delta T}(x, z) + C_3 E^t(x + \Delta x, z) + C_4 E^t(x - \Delta x, z) + C_5 E^t(x, z + \Delta z) + C_6 E^t(x, z - \Delta z) + C_7 E^t(x, z + \Delta z) + C_8 E^t(x, z - \Delta z) - C_9 [E^t(x + \Delta x, z) - E^t(x - \Delta x, z)]^2 - C_{10} [E^t(x, z + \Delta z) - E^t(x, z - \Delta z)]^2 \} \quad (7)$$

여기서,

$$C_1 = \frac{1}{2\Delta T} + \frac{g}{(\Delta z)^2} + A_1 K_x^T(x, z) + A_2 K_z^T(x, z)$$

$$C_2 = \frac{1}{2\Delta T} - \frac{g}{(\Delta z)^2} - A_1 K_x^T(x, z) - A_2 K_z^T(x, z)$$

$$C_3 = A_1 K_x^T(x, z) + (A_1 / 4) [K_x^T(x + \Delta x, z) - K_x^T(x - \Delta x, z)]$$

$$C_4 = A_1 K_x^T(x, z) - (A_1 / 4) [K_x^T(x + \Delta x, z) - K_x^T(x - \Delta x, z)]$$

$$C_5 = A_2 K_z^T(x, z) + (A_2 / 4) [K_z^T(x, z + \Delta z) - K_z^T(x, z - \Delta z)]$$

$$C_6 = A_2 K_z^T(x, z) - (A_2 / 4) [K_z^T(x, z + \Delta z) - K_z^T(x, z - \Delta z)]$$

$$C_7 = A_5 + g/(\Delta z)^2$$

$$C_8 = -A_5 + g/(\Delta z)^2$$

$$C_9 = A_3 K_x^T(x, z)$$

$$C_{10} = A_4 K_z^T(x, z)$$

$$A_1 = \frac{1 + E_0}{\gamma_w [E^T(x, z) - E_\infty] (\Delta x)^2 \lambda}$$

$$A_2 = \frac{1 + E_0}{\gamma_w [E^T(x, z) - E_\infty] (\Delta z)^2 \lambda}$$

$$A_3 = \frac{1 + E_0}{4\gamma_w [E^T(x, z) - E_\infty]^2 (\Delta x)^2 \lambda}$$

$$A_4 = \frac{1 + E_0}{4\gamma_w [E^T(x, z) - E_\infty]^2 (\Delta z)^2 \lambda}$$

$$A_5 = \frac{(\gamma_s - \gamma_w) g \lambda}{2\Delta z}$$

## 2.3 초기조건 및 경계조건

그림 2(a)는 압밀이 바로 시작되는 시점의 초기상태(시간  $t=0$ )를 나타내며, 이때 연약한 준설패립 점토층의 총두께는  $h_0$ 이고, 토층은 완전포화상태에 있다고 가정하였다. 또한 수평배수재는 최상부로 부터 아래쪽으로( $z$ 방향으로)  $d_0$ 만큼 떨어진 지점에 위치하고 있으며, 배수재의 수평방향 설치간격은  $s_0$ 이다. 또한 그림 2(b)는 임의의 시간이 경과하여 수평배수압밀이 진행된 상태를 나타낸다.

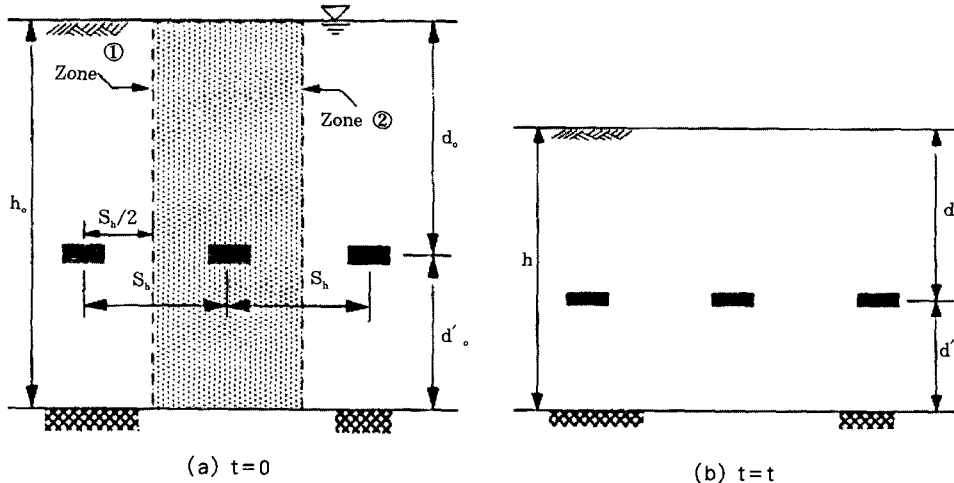


그림 2. 수평배수압밀에 대한 초기조건 및 경계조건

### 2.3.1 초기조건

초기상태에서의 깊이별 유효응력( $\sigma'_z$ )은 식(8)을 토대로 평가된다. 식(8)에 포함된  $q_0$ 는 초기상태에서 지표면에 재하되는 하중을 의미하나, 연약한 준설매립점토지반의 경우 강도가 대부분 취약하여 초기상태에서는 상재하중의 적용이 어려운 점을 감안하여, 본 연구에서는  $q_0=0$ 으로 가정하여 해석이 수행되었다. 만약 자연배수가 아닌, 진공에 의해 강제로 배수시키는 공법을 적용하는 경우에는,  $q_0$ 값을 지표면에 작용하는 대기압 하중으로 처리함이 타당할 것으로 판단된다. 또한 수평배수재가 두줄 이상 설치되는 경우에도, 본 연구 제시 기법을 중첩하여 적용하고, 각 상재하중을 추가로 고려하는

방식에 의해 해석이 가능할 것으로 판단된다.

$$\sigma'_{z(t=0)} = q_0 + (\gamma_s - \gamma_w)z \quad (8)$$

식(8)에서  $q_0=0$ 으로 가정하고, 식(2)의 간극비와 유효응력 사이의 관계식을 유한차분화하면 식(9)와 같다.

$$E^o(x, z) = (E_{00} - E_{\infty}) \exp[-\lambda(\gamma_s - \gamma_w)z] + E_{\infty} \quad (9)$$

### 2.3.2 경계조건

수평배수압밀의 경우 각각의 경계면을 정의하면 그림 2와 같으며, 이들 각각에 대한 경계조건 및 유한차분화 식을 요약·정리하면 표 1과 같다(김, 1998).

표1. 수평배수압밀의 경우 경계조건 및 유한차분화 식

| 구분    |        | 간극비  |  |
|-------|--------|--|--|
| 상부    | 경계조건   | $e(x, 0)_{t=t} = e_{00}$   |  |
|       | 유한차분화식 | $E^T(x, 0) = E_{00}^T$   |  |
| 수평배수재 | 경계조건   | $e(s_h / 2, d)_{t=t} = (e(x, 0)_{t=t} - e_{\infty}) \exp[-\lambda(\gamma_s - \gamma_w)d] + e_{\infty}$ |  |
|       | 유한차분화식 | $E^T(s_h / 2, d) = (E_{00}^T - E_{\infty}^T) \exp[-\lambda(\gamma_s - \gamma_w)d] + E_{\infty}^T$      |  |
| 경계면 ① | 경계조건   | $\partial e / \partial x = 0$  |  |
|       | 유한차분화식 | $E^T(0 + \Delta x, z) = E^T(0 - \Delta x, z)$  |  |
| 경계면 ② | 경계조건   | $\partial e / \partial x = 0$  |  |
|       | 유한차분화식 | $E^T(s_h + \Delta x, z) = E^T(s_h - \Delta x, z)$  |  |
| 하부    | 불투수 조건 | 경계조건   | $\frac{\partial e}{\partial z} - \lambda(\gamma_s - \gamma_w)(e - e_{\infty}) = 0$   |
|       |        | 유한차분화식   | $E^T(x, h) = \frac{E^T(x, h - \Delta z) - \lambda(\gamma_s - \gamma_w)E_{\infty} \Delta z}{1 - \lambda(\gamma_s - \gamma_w) \Delta z}$ |
|       | 투수 조건  | 경계조건   | $e(x, h)_{t=t} = (e_{00} - e_{\infty}) \exp[-\lambda(\gamma_s - \gamma_w)h] + e_{\infty}$  |
|       |        | 유한차분화식   | $E^T(x, h) = (E_{00} - E_{\infty}) \exp[-\lambda(\gamma_s - \gamma_w)h] + E_{\infty}$  |

### 2.4 침하량 및 압밀도의 평가

침하량( $s$ )과 간극비 사이의 관계를 이용해, 임의의 시간( $t$ ) 및 연약토층 내부 임의의 지점( $x$  및  $z$ )에서의 침하량을 정의하면 식(10)과 같다.

$$s(t) = \frac{\Delta e}{1 + e_0} h_0 \quad (10)$$

$$= [e_{t=0} - e_{t=t}] \frac{h_0}{1 + e_0}$$

여기서,  $e_0$  = 초기상태 연약토층 총깊이에 대한 평균간극비

또한 임의의 시간 및 임의의 깊이( $z$ )에서의 압밀도( $U_z$ )는, 최종상태 및 임의의 시간에서의 침하량( $x$  방향으로의 평균침하량)의 비(ratio)

로 정의할 수 있으며, 이를 정리·표현하면 식 (11)과 같다.

$$U_z(t) = \frac{s_{xave}(t)}{s_{xave}(t=\infty)} \times 100(\%) \quad (11)$$

여기서,  $s_{xave}(t) = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} [e_{t=0} - e_{t=t}] \frac{h_o}{1+e_o}$

$$s_{xave}(t=\infty) = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} [e_{t=0} - e_{t=\infty}] \frac{h_o}{1+e_o}$$

$N_i = x$  방향으로의 요소 개수

또한 임의의 시간에서의 연약토층 전체에 대한 평균압밀도( $U_{ave}$ )는 식(12)와 같이 정의된다.

$$U_{ave} = \frac{s_{ave}(t)}{s_{ave}(t=\infty)} \times 100(\%) \quad (12)$$

여기서,  $s_{ave}(t) = \frac{1}{(N_i N_k)} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{k=1}^{N_k} [e_{t=0} - e_{t=t}] \frac{h_o}{1+e_o}$

$$s_{ave}(t=\infty) = \frac{1}{(N_i N_k)} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{k=1}^{N_k} [e_{t=0} - e_{t=\infty}] \frac{h_o}{1+e_o}$$

$N_k = z$  방향으로의 요소 개수

### 2.5 해석절차

앞에서 제시된 수평배수압밀에 대한 해석절차를 요약하여 도시하면 그림 3과 같다. 본 해석절차에 적용되는 간극비는, 시간  $t=0$ 일 때 최상부 지표면 흙에 대한 초기간극비( $e_{00}$ ) 및 연약토층 전체깊이에 대한 평균간극비( $e_0$ ), 임의의 시간에 대한 지표면 흙의 간극비( $e_{00}^T$ ) 및 시간  $t=\infty$ 일 때의 최대간극비( $e_{max}$ ) 등이며, 이중  $e_{00}^T$ 는  $e_{00}$ 와  $e_{max}$ 의 평균값으로 가정하였고,  $e_0$ 는 입력자료가 아니고 해석절차 과정을 통해 결정되는 값이다. 이외의 자료는, 연약토층의 단위중량( $\gamma_s$ ), 물의 단위중량( $\gamma_w$ ), 식(1) 및 (2)를 통해 정의된  $g$  및  $\lambda$ 값, 초기상태 연약토층의 총두께( $h_0$ ), 플라스틱 수평배수재의 지표면으로부터의 설치깊이( $d_0$ ), 배수재의 수평방향 설치간격( $s_h$ ), 해석시의 시간간격( $\Delta T$ ) 등이다. 그림 3에 도시된 해석절차에 따라, 우선 최대간극비에 해당되는 최종 압밀침하량을 평

가한 다음, 초기조건 및 경계조건 등을 이용하여 Dufort-Frankel의 유한차분화 알고리즘에 의거해, 각각의 경과시간별로 간극비, 침하량, 압밀도 및 시간계수 등의 계산이 수행된다.

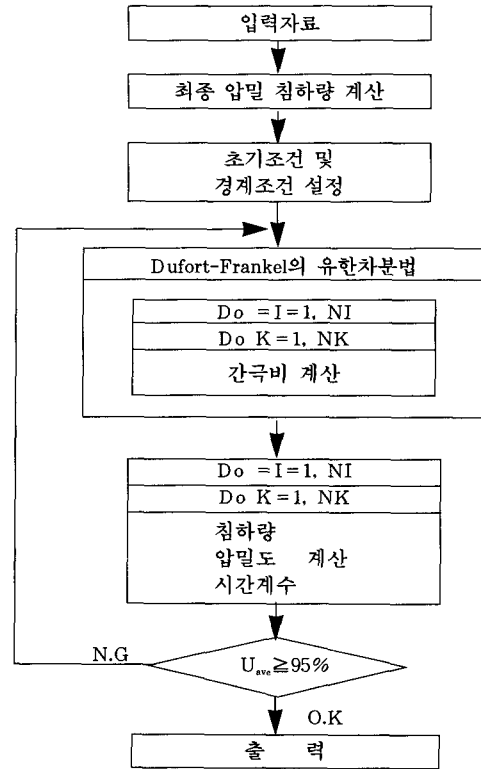


그림 3. 수평배수압밀에 대한 해석절차 개요

## 3. 실내모형실험

### 3.1 실험개요

2장에서 제시된 해석절차의 적용 타당성을 확인하기 위해, 고풍수비의 연약한 준설매립점토를 이용한 실내모형실험을 실시하였다. 본 실험을 통해, 준설매립점토의 간극비-유효응력 관계 및 투수계수-간극비 관계 등을 정량적으로 정의하기 위한 기초자료를 획득하였으며, 또한 시간경과에 따른 깊이별 침하량 및 간극

수압 등을 측정하였다.

본 실험에 사용한 흙시료는 경기도 안산 시화지구의 준설패립점토이며, 토질특성등은 표 2에 정리되어 있다. 또한 실험에 사용된 수평

배수재는 필터슬리브와 코어의 복합적인 통수 능력이 예상되는 플라스틱 배수재인 판형 (MW형, 폭=10cm, 두께=3mm)이다.

표2. 시화지구 준설패립점토의 토질특성등

| 염분<br>(ppm) | 입도<br>(%) |      |     | 단위중량<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 액성<br>한계<br>(%) | 소성<br>한계<br>(%) | 소성<br>지수<br>(%) | 함수비<br>(%) | 비중   | 통일<br>분류 |
|-------------|-----------|------|-----|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------|------|----------|
|             | 점토        | 실트   | 모래  |                              |                 |                 |                 |            |      |          |
| 8,640       | 42.5      | 54.8 | 2.6 | 1.308                        | 54.1            | 26.2            | 27.9            | 218        | 2.67 | CH       |

본 실험장치의 개요는 그림 4와 같으며, 규모는 폭×길이×높이=2.0×5.0×1.0m이다. 실험장치의 외부에는 일정 높이에 미동압력계를 5개 설치하고, 피조미터를 4개소에 설치하여 간극수압의 변화를 측정할 수 있도록 하였으며, 측면에는 아크릴판(폭×높이=20×40cm)을 4개소에 부착하여 압밀침하의 진행상태를 파악할 수 있도록 하였다.

자중압밀과 수평배수재에 의한 배수효과를 살펴보기 위해, 플라스틱 배수재의 끝단을 직경 10cm의 PVC 파이프에 연결시키고, 파이프의 끝단에 밸브를 설치하여 배수측정용 용기를 이용해 배수량을 직접 측정할 수 있도록 하였다. 또한, 자중압밀과 수평배수재에 의한 침하량을 측정하기 위해 침하판을 측면의 아크릴판 쪽에 설치하였다.

수평배수재인 MW형 플라스틱 배수재는 실험토조의 흙시료 표면으로 부터 50cm 깊이에, 80cm의 수평간격으로 3개의 배수재를 한줄만 인력으로 설치하였다(그림 4 참조). 토질특성 분석결과(표 2 참조)에 의하면 안산 시화지구 준설패립점토는 통일분류법상 CH로 분류되며, 함수비는 218% 정도이다. 이와같은 고탍수비의 준설패립토를 투기하였을 경우에는, 일반적으로 침강단계를 거쳐 자중압밀단계로 진행되며, 따라서 실험토조내에서 자중압밀단계를 재현하기 위해서는 자중압밀의 시작점을 알아야 한다. 본 실험에서는, 이러한 자중압밀의 시작점을 알기 위해 실험토조의 흙시료와 동일한 시료를 이용해 예비실험인 컬럼실험(column test)을 실시하였으며, 그 결과를 정리하면 그림 5와 같다.

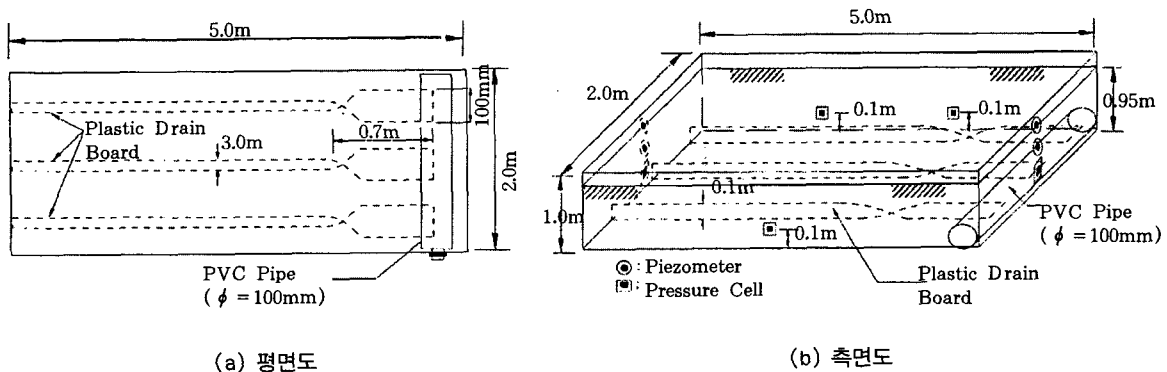


그림 4. 실내모형실험장치 개요도



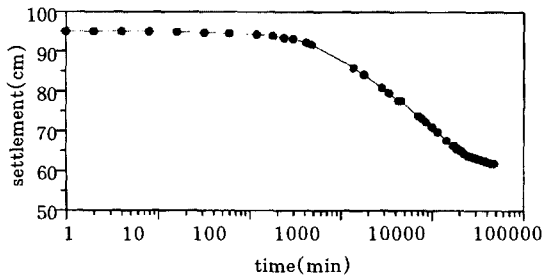


그림 5. 컬럼실험 결과

Kynch(1952)는 현탁액 상부로부터 침강속도가 변곡되는 시점을 자중압밀의 시작점으로 간주하였으며, 이를 근거로 그림 5의 컬럼실험 결과를 분석하면 약 300분이 본 흙시료의 경우 자중압밀의 시작점에 해당된다. 따라서 본 실험에서는 토조에 안산 시화지구 준설매립점토를 투기한 후 약 300분이 지난 시점부터 배수 실험을 실시하였다.

또한 시간경과에 따른 침하량을 측정하기 위해 침하판을 설치하였으며, 침하판은 크기 15 × 15cm의 아크릴판에 봉을 새워 판과 연결하고 봉에는 침하량을 측정할 수 있도록 눈금자를 부착하였다. 침하판은 그림 6과 같이 A, B 및 C의 위치에 각각 설치하였으며, 이 위치는 실험토조의 바닥면으로부터 각각 86cm, 62cm 및 42cm 지점에 해당된다. 침하량은 앞의 컬럼

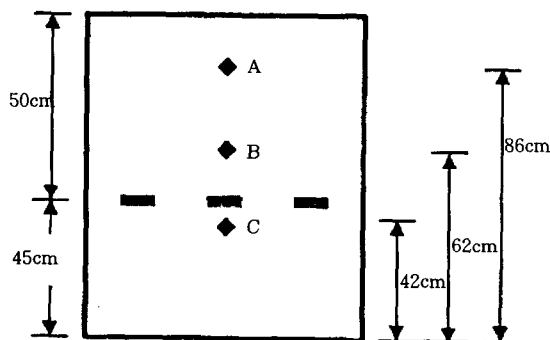


그림 6. 침하판의 위치

실험을 통해 분석된 자중압밀의 시작점(준설매립점토를 투기한 후 약 300분이 지난 시점)을 기준으로, 침하량이 거의 일정한 값에 수렴할 때까지(대략 90일 정도까지) 측정하였다.

또한 압밀도의 평가를 위해, 그림 7과 같이 토조의 바닥면으로부터 깊이별로 서로 다른 위치에 피조미터를 3개소 설치하여 이로부터 간극수압을 측정하였다.

### 3.2 간극비-유효응력 관계

안산 시화지구 준설매립점토에 대한 표준압밀시험을 통해 얻어진 간극비( $e$ )와 유효응력( $\sigma_v'$ )사이의 관계를 정리하면 그림 8과 같다. 본 표준압밀시험은 침강이 완료되고 자중압밀이 시작되는 시점에서 채취한 흙시료(실험토조의 흙시료 표면으로부터 30cm 깊이에서 채취한 흙시료)를 이용해 시행하였다.

그림 8에 점으로 표시된 실험결과를 살펴보면, 간극비-유효응력 사이의 관계가 Gibson등(1981)이 제시한 지수형태의 곡선과 유사한 변화양상을 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서도 간극비-유효응력 사이의 관계를 Gibson 등의 지수형태 곡선으로 가정하여, 상수  $\lambda$ , 시간  $t=0$ 일 때의 초기간극비  $e_{00}$  및 시간  $t=\infty$ 일 때의 최종간극비  $e_{\infty}$  등의 값을 회귀분석하여 결정하였다. 본 과정에서  $e_{\infty}$ 값은 최대간극비

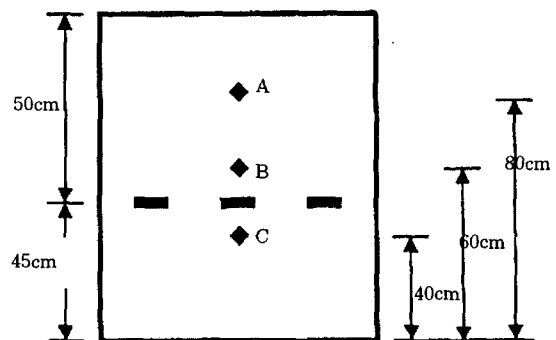


그림 7. 피조미터의 위치

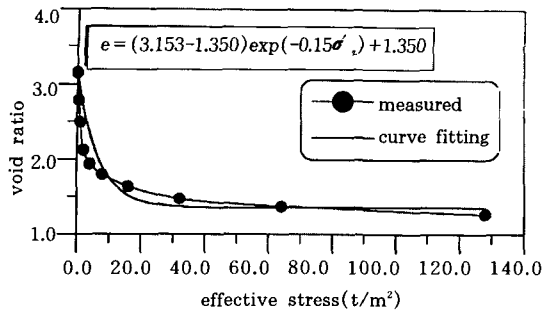


그림 8. 간극비-유효응력 사이의 관계

$e_{max}$  값으로 정의하여 결정하였다. 회귀분석을 통해 결정된 간극비-유효응력 사이의 관계식은 아래의 식(13)과 같다.

$$e = (e_{00} - e_{\infty}) \exp(-\lambda \sigma'_v) + e_{\infty} \quad (13)$$

$$= (3.153 - 1.350) \exp(-0.15 \sigma'_v) + 1.350$$

### 3.3 투수계수-간극비 관계

본 연구에서는 시화지구 준설매립점토에 대해, 투수계수(k)와 간극비 사이의 관계를 함수 형태로 정의하기 위해, 그림 9에 점으로 표시된 표준압밀시험의 결과를 회귀분석하였으며, 그 결과를 정리하면 식(14)와 같다.

$$k = (-8.0 + 11.6e - 5.7e^2 + 1.2e^3) \times 10^{-10} \quad (14)$$

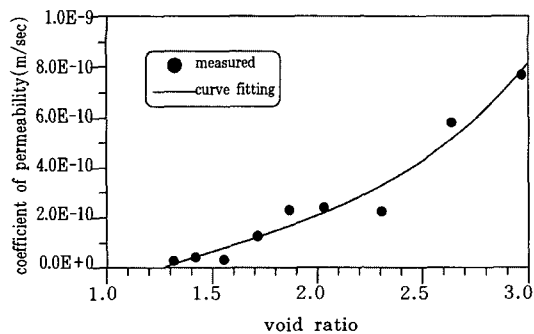


그림 9. 투수계수-간극비 사이의 관계

## 4. 실험결과와의 비교

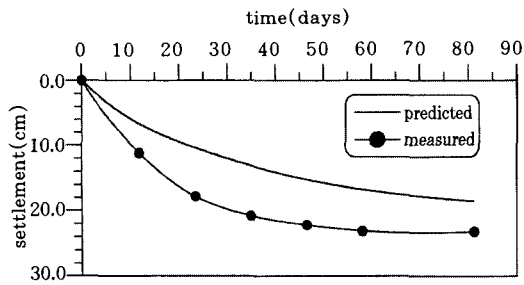
2장에서 제시된 해석절차에, 3장의 실내실험을 통해 파악된 안산 시화지구의 연약한 고함수비의 준설매립점토에 대한 토질특성(표 2 참조)과, 또한 표준압밀실험결과를 토대로 정의된 관계식(식(13) 및 (14) 참조) 등을 적용하여, 시간경과에 따른 침하량 및 압밀도 등을 예측하였으며, 이 예측치를 실내실험 측정(그림 4, 6 및 7 참조)에 의한 결과치와 서로 비교하였다. 2장의 해석절차에 의한 예측과정에서, 준설매립점토의 연직방향 투수계수( $k_v$ )와 수평방향 투수계수( $k_h$ )는 근사적이긴 하나 동일한 값 k로 가정하였으며, 그 크기는 식(14)로부터 결정된다.

### 4.1 침하량 비교

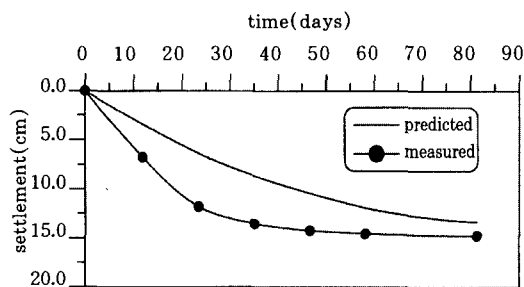
그림 6에 도시된 바와 같이 A, B 및 C 등 3개 지점에 침하판을 설치하고 시간경과에 따른 침하량을 각각 측정하였으며, 본 측정치와 2장의 해석절차 등에 의한 예측치를 함께 도시하면 그림 10과 같다.

그림 10의 결과를 살펴보면, 서로 다른 깊이의 3개 지점 모두, 측정된 침하량이 해석절차에 의한 예측치에 비해 일반적으로 크게 평가되는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 경향은, 불균질성이 예상되는 점토지반 내부 수평배수재 사이에 설치된 침하판이 시간이 경과함에 따라 한쪽으로 기울어지는 문제점이 발생하였으며, 이 경우 평균적인 침하량이 아닌 최대침하량을 기록한 계측상의 오류가 큰 요인으로 판단된다. 그러나 침하량이 거의 수렴하는 최종압밀단계에서는 예측치의 침하량 과소평가 경향이 현저히 둔화되어, 특히 하부쪽 C 지점의 경우에는 측정치와의 차이가 2.6% 정도 이하의 작은 범위에 머무는 현상을 나타내고 있다.

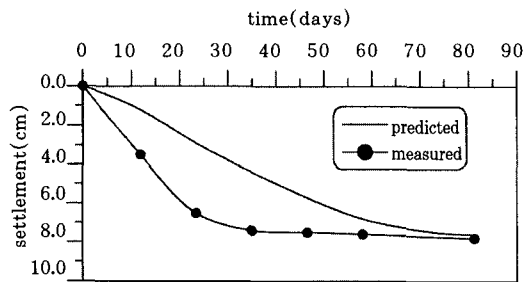
### 4.2 압밀도 비교 1



(a) A지점



(b) B지점

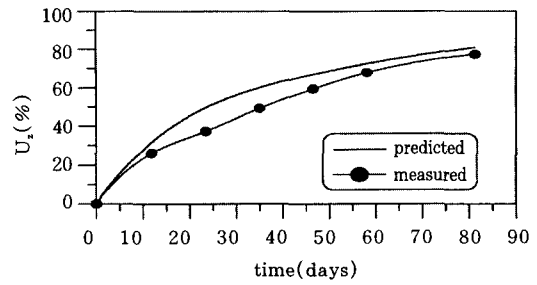


(c) C지점

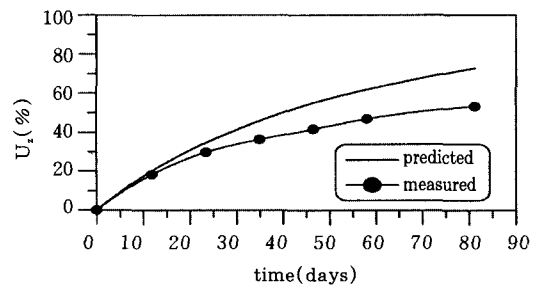
그림 10. 침하량 비교결과

그림 7에 도시된 바와 같이 A, B 및 C 등 3개 지점에 피조미터를 설치하고 시간경과에 따른 간극수압( $u$ )을 각각 측정하였으며, 본 간극수압 및 시간  $t=0$ 일 때의 초기간극수압( $u_0$ )에 의거한 깊이별 측정 압밀도( $U_z$ )와 2장의 해석절차 등에 의한 예측 압밀도를 함께 도시하면 그림 11과 같다.

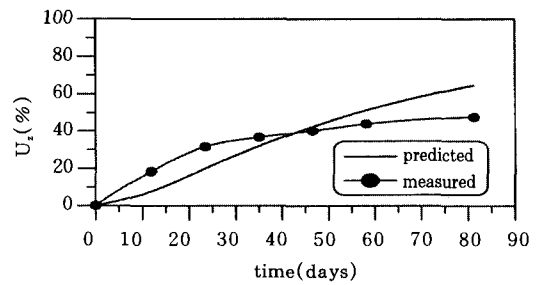
그림 11의 결과를 살펴보면, 플라스틱 수평



(a) A지점



(b) B지점



(c) C지점

그림 11. 깊이별 압밀도의 비교

배수재의 설치위치보다 위쪽에 피조미터가 설치된 A 및 B 지점의 경우는, 측정 압밀도가 예측 압밀도에 비해 작게 평가되는 결과를 보이고 있으나, 이와는 달리 플라스틱 수평배수재보다 5cm 아래쪽에 피조미터가 설치된 C 지점의 경우에는 경과시간 43일까지는 측정 압밀도가 예측 압밀도에 비해 크게 평가되는 경향을 보이다가, 43일 이후부터 측정 종료시

인 81일까지는 오히려 예측 압밀도가 더 큰 경향을 보이고 있다.

이와같은 경향은 간극수압 측정시 피조미터의 위치는 시간에 관계없이 한점에 고정(즉 Eulerian 좌표체계, 참고문헌 5 참조)되어 있으나, 본 연구의 해석절차에 의해 예측된 간극수압의 위치는 시간에 따라 변화(즉, Lagrangian 좌표체계)하기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 좌표체계의 차이로 인해 초기

상태( $t=0$ )에서는 간극수압의 측정위치와 해석절차에 의한 예측위치가 동일한 지점이나, 시간이 경과함에 따라 압밀침하가 발생하여 간극수압의 예측위치가 아래쪽으로 점차 이동하게 된다. 따라서 수평배수재를 중심으로 그 위쪽은 측정위치가 예측위치 보다 수평배수재와 멀리 떨어져 있기 때문에, 측정 압밀도가 예측 압밀도에 비해 낮게 평가되나, 아래쪽은 측정위치가 예측위치 보다 수평배수재와 가깝기 때

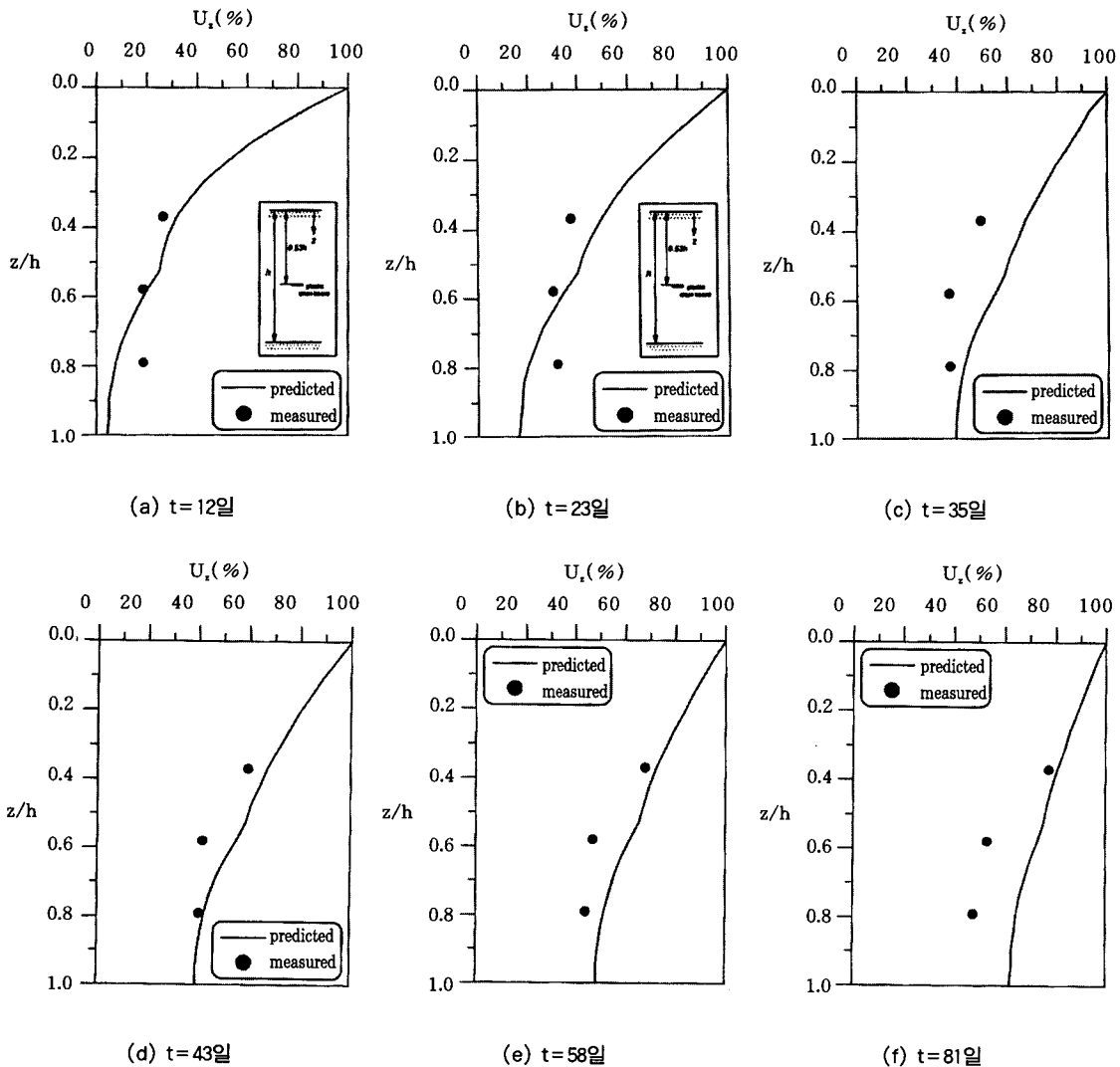


그림 12. 다양한 경과시간 각각에 대한 깊이별 압밀도 비교

문에 오히려 측정 압밀도가 크게 평가된 것으로 판단된다.

### 4.3 압밀도 비교 2

압밀종료에 이르기까지의 다양한 경과시간( $t$ ) 각각에 대해, 피조미터가 설치된 A, B 및 C 등 3개 지점(그림 7 참조) 모두에 대해 간극수압을 토대로 한 압밀도( $U_z$ )와 2장 해석절차 등에 의한 압밀도를 서로 비교한 결과는 그림 12와 같다.

그림 12의 결과에서, 토조의 최상부면(깊이  $z=0.0$ 인 지점)은 경계조건에 따라 초기시점에서부터 100%의 압밀도로 정의되며, 그 아래쪽 지반은 시간이 경과함에 따라 점차 압밀도가 커짐을 알 수 있다.

또한 그림 12의 결과를 분석하면, 플라스틱 수평배수재가 위치하고 있는 지점(그림 12에서  $z/h=0.53$ 인 지점)을 경계로 하여, 상부쪽 지반( $z/h=0.0\sim 0.53$ ) 내부에서는 자중압밀과 수평배수재에 의한 추가 압밀이 복합적으로 진행되는데 반해, 수평배수재 하부쪽 지반( $z/h=0.53\sim 1.0$ )에서는 자중압밀만이 주로 진행되어, 결과적으로 시간경과에 따라 상·하부 지반 사이에 압밀도의 증가율 차이가 발생하게 된다.

## 5. 설계변수의 영향분석 및 설계도표의 제시

4장에서 실내모형실험결과와의 비교를 통해 적용 타당성이 부분적으로 확인된, 2장의 해석절차 등을 이용해, 관련 설계변수가 연약토층의 압밀침하량 및 소요압밀시간 등에 미치는 영향을 분석하였으며, 이 결과를 토대로 설계도표의 제시가 이루어 졌다.

본 분석에 적용된 무차원 형태의 변수는, 시간계수  $T$ 와 지배방정식의 변수  $N$ 이며, 이를 각각 정의하면 다음의 식(15) 및 (16)과 같다.

$$T = \frac{g_0 t}{l_0^2} \quad (15)$$

$$l_0 = \frac{h_0 + s_h}{4(1+e_0)}$$

$$g_0 = \frac{k(e_0)}{\gamma_w(1+e_0)} \left\{ \frac{1}{\lambda(e_0 - e_{max})} \right\}$$

$h_0$  = 초기상태(시간  $t=0$ ) 연약토층의 총두께

$s_h$  = 배수재의 수평방향 설치간격(그림2 참조)

$e_0$  = 초기상태의 연약토층 깊이별 간극비의 평균값

$\lambda$  = 상수(식(1) 및 (2) 참조)

$e_{max}$  = 시간  $t=\infty$ 일 때의 최대간극비

$\gamma_w$  = 물의 단위중량

$k(e_0)$  = 간극비가  $e_0$ 일 때의 투수계수

또한,

$$N = \lambda_0(\gamma_s - \gamma_w) \quad (16)$$

### 5.1 배수재의 수평방향 설치간격의 영향

배수재의 수평방향 설치간격( $s_h$ , 그림 2 참조)이 압밀침하에 미치는 영향을 살펴보기 위해, 상수  $\lambda$ 값(2장의 식(1) 및 (2) 참조)이 0.02, 0.1 및 0.3인 3가지 경우 각각에 대하여, 배수재의 수평방향 설치간격을 0.1m에서 5.0m 까지 다양하게 변화시켜 분석을 시행하였다.

본 분석에서, 연약한 준설매립점토층의 초기상태 총두께  $h_0=1.0$ m, 수평배수재의 설치깊이  $d_0=0.5$ m, 초기간극비  $e_{00}=2.0$  및 최대간극비  $e_{max}=e_{00}/1.5$ 로 각각 가정하였다.

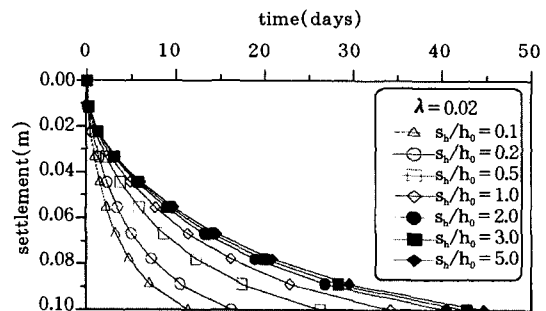


그림 13. 배수재의 수평방향 설치간격-침하량-소요압밀시간 관계( $\lambda=0.02$ )

표3. 배수재의 수평방향 설치간격에 따른 소요압밀시간 요약

| 침하량<br>(평균압밀도,<br>$U_{ave}=90\%$<br>인 경우) | 상수<br>$\lambda$ | 배수재의 수평방향 설치간격에 따른 소요압밀시간(日) |               |               |               |               |               |               |
|---|-----------------|------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|   |                 | $S_h/h_0=0.1$                | $S_h/h_0=0.2$ | $S_h/h_0=0.5$ | $S_h/h_0=1.0$ | $S_h/h_0=2.0$ | $S_h/h_0=3.0$ | $S_h/h_0=5.0$ |
| 0.1m                                      | 0.02            | t=11.3                       | t=16.2        | t=26.2        | t=34.3        | t=40.5        | t=42.8        | t=44.7        |
|   | 0.1             | t=59.2                       | t=84.7        | t=137.9       | t=181.1       | t=215.2       | t=228.0       | t=238.7       |
|   | 0.3             | t=198.4                      | t=285.1       | t=474.7       | t=635.9       | t=770.2       | t=823.5       | t=866.3       |

해석결과를 살펴보면, 배수재의 수평방향 설치간격이 좁아짐에 따라 즉, 수평배수재의 설치밀도가 커짐에 따라 0.1m 침하량에 도달하기 위한 소요압밀시간이 더욱 단축됨을 알 수 있으며, 상수  $\lambda$ 값이 0.02인 경우의 해석결과에 한해 그림 13에 도시하였다.  $\lambda$ 값이 다양한 경우의 해석결과를 종합하여 요약·정리하면 표 3과 같으며, 표 3에서,  $\lambda$ 값이 커질수록 0.1m 침하량에 도달하기 위한 소요압밀시간은 점차 길어짐을 알 수 있다.

표 3의 결과를 살펴보면, 배수재의 수평방향 설치간격( $s_h$ )이 2.0m 보다 작아 배수재의 설치밀도가 큰 경우에는, 0.1m 침하량에 도달하기 위한 소요압밀시간의 증가율이  $s_h$ 값 및 상수  $\lambda$ 값 등에 따라 18.1~43.0% 정도로 비교적 큰 반면에,  $s_h$ 값이 2.0~5.0m 범위에 해당하는 경우에는 소요압밀시간의 증가율이 4.4~5.6% 정도의 소폭으로 둔화되는 현상을 나타내고

있다.  $s_h$ 값이 2.0m 이상인 경우에 소요압밀시간의 증가율이 완만한 현상은, 수평배수재 설치에 따른 추가 압밀효과 보다는 자중압밀이 침하발생에 주된 역할을 하고 있다는 판단을 통해 설명 가능하다.

이외에도 침하량 기준을 서로 달리한 경우(즉, 평균압밀도  $U_{ave}$ 를 50, 70 및 90%로 서로 달리한 경우)에 대한 해석결과는 그림 14에 도시되어 있으며, 또한 상수  $\lambda$ 값이 0.3인 경우 초기간극비( $e_{00}$ )를 2.0에서 5.0으로 변화시켜 해석해 본 결과는 그림 15에 도시되어 있다. 그림 14 및 15의 결과를 종합적으로 살펴보면, 앞의 표 3에 대한 분석결과와 마찬가지로, 배수재의 수평방향 설치간격이 2.0m 이상인 경우에는 수평배수재 설치에 따른 추가 압밀효과 보다는 자중압밀효과가 더 지배적임을 알 수 있다.

참고적으로 그림 15에서, 배수재의 수평방향

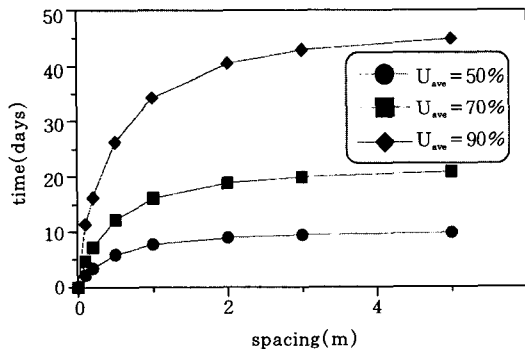


그림 14. 평균압밀도에 따른 배수재의 수평설치간격-소요압밀시간 관계( $\lambda=0.02$ )

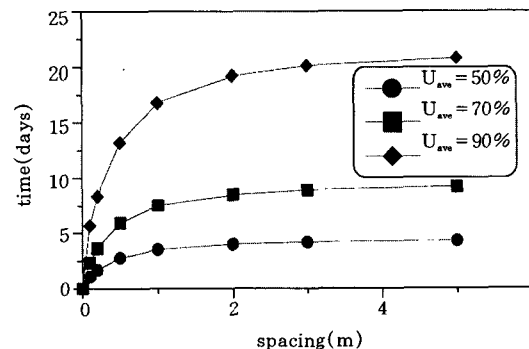


그림 15. 평균압밀도에 따른 배수재의 수평설치간격-소요압밀시간 관계( $\lambda=0.3$ )

설치간격이 3.0m인 경우에(자중압밀이 연약토층 침하발생에 지배적인 역할을 할 것으로 판단되는 경우에), 평균압밀도 90%에 도달하기 위한 소요압밀시간은 20일 정도인 반면에, 수평배수재의 설치간격을 0.1m로 촘촘히 하여 배수재에 의한 추가 압밀효과를 크게 유발하는 경우, 소요압밀시간은 6일 정도로 단축되는 효과가 예상됨을 알 수 있다.

### 5.2 상수 $\lambda$ 값의 영향

간극비-유효응력 사이의 관계를 정의하는 상수  $\lambda$ (2장의 식(1) 및 (2) 참조)값의 변화가 연약토층 평균압밀도에 미치는 영향정도를 살펴보기 위해, 연약토층의 총두께  $h_0=1.0m$ , 수평배수재의 설치위치  $d_0=0.5m$ , 또한 수평방향 설치간격  $s_h=0.5m$ , 초기간극비  $e_0=2.0$  및 최대간극비  $e_{max}=(1/1.5)e_0$ 인 경우에 대해 분석을 수행하였다.

상수  $\lambda$ 값을 0.01, 0.1 및 0.3 등의 3종류로 변화시켰으며, 무차원 형태의 시간계수  $T$ 를 가로축으로 하여 해석결과를 정리하면 그림 16과 같다. 그림 16의 결과를 살펴보면, 다양한 경과시간 각각에 대해, 평균압밀도는  $\lambda$ 값의 크기 변화에 상관없이 거의 일정한 경향을 보이고 있다.

### 5.3 간극비의 영향

일반적으로 압밀침하량은 간극비와 크게 연

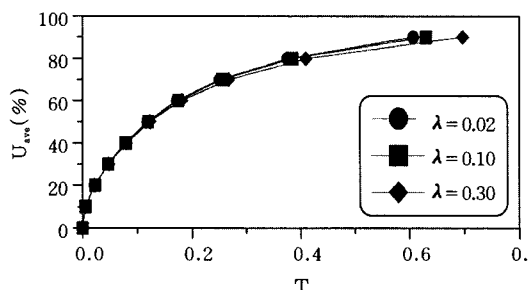


그림 16. 상수  $\lambda$ 의 영향

관되어 있으며, 본 연구 해석절차에 적용되는 간극비는, 시간  $t=0$ 일 때 최상부 지표면에서의 초기간극비( $e_{00}$ ) 및 연약토층 전체깊이에 대한 평균간극비( $e_0$ ), 임의의 시간에 대한 지표면에서의 간극비( $e_{00}^T$ ) 및 시간  $t=\infty$ 일 때의 최대간극비( $e_{max}$ ) 등이며, 이중  $e_{00}^T$ 는  $e_{00}$ 와  $e_{max}$ 의 평균값으로 가정하였고,  $e_0$ 는 입력자료가 아니고 해석절차 과정을 통해 결정되는 값이다.

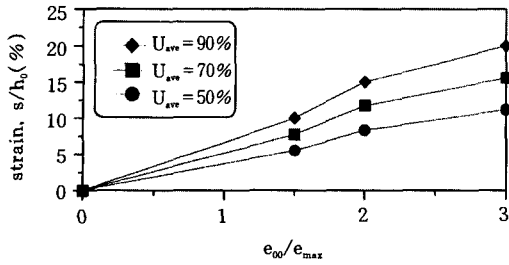
따라서 본 절에서는, 초기간극비( $e_{00}$ ) 및 경과시간  $t=\infty$ 일 때의 최대간극비( $e_{max}$ )가 압밀침하에 미치는 영향 정도를 살펴보기 위해,  $e_{00}$ 값이 2.0, 5.0 및 10.0인 3가지 경우 각각에 대하여,  $e_{max}$ 값을 1.5에서 3.0까지 다양하게 변화시켜 분석을 시행하였다.

본 분석에서, 연약토층의 총두께  $h_0$ 는 1.0m로, 수평배수재의 설치깊이  $d_0$ 는 0.5m로, 각각 가정하였으며, 해석결과(그림 17)는 각각의 평균압밀도( $U_{ave}$ )에 해당되는 침하량( $s$ )을 초기시점 연약토층의 총두께( $h_0$ )로 나눈 변형률( $s/h_0$ )로 정의하여 중축에 표시하고,  $e_{00}$ 와  $e_{max}$ 는 비(ratio) 형태로 횡축에 표시하였다.

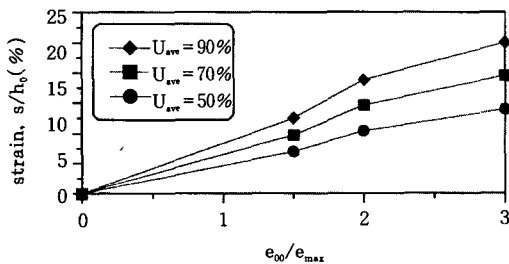
그림 17의 결과를 살펴보면,  $e_{00}$ 값이 2.0, 5.0 및 10.0인 3가지 경우 또한 평균압밀도가 50, 70 및 90%인 3가지 경우 모두에 대하여,  $e_{00}/e_{max}$ 값이 증가할수록  $s/h_0$ 로 정의된 변형률도 점차 커지는 현상을 나타내고 있으며, 이외에도 각각의 경우에 평균압밀도가 증가할 수록 변형률도 커지는 일반적인 현상을 확인할 수 있다.

구체적으로, 초기간극비  $e_{00}$ 값의 변화에 따른 변형률의 변화 정도와,  $e_{00}/e_{max}$ 값의 변화에 따른 변형률의 변화 정도를 서로 비교하여, 각변수 중요성의 경중을 판단하기 위한 추가해석을 수행하였으며, 평균압밀도가 90%인 경우에 대해 그 결과를 도시하면 그림 18과 같다.

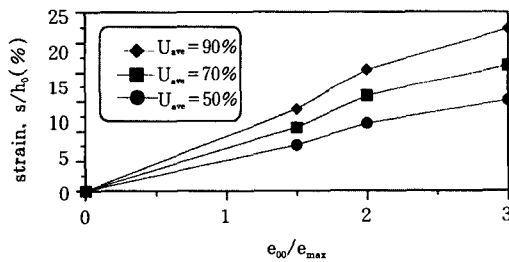
그림 18의 결과를 분석하면,  $e_{00}=2.0$ 일 경우  $e_{00}/e_{max}$ 값이 1.5에서 3.0으로 2배 증가하면 변형률도 10%에서 20%로 2배 증가하고 있으며,  $e_{00}$ 값이 5.0 및 10.0일 경우에도 이와 동일한 크기의 변형률 증가폭을 보이고 있다. 또한



(a)  $e_{00} = 2.0$



(a)  $e_{00} = 5.0$



(a)  $e_{00} = 10.0$

그림 17. 간극비의 영향 (I)

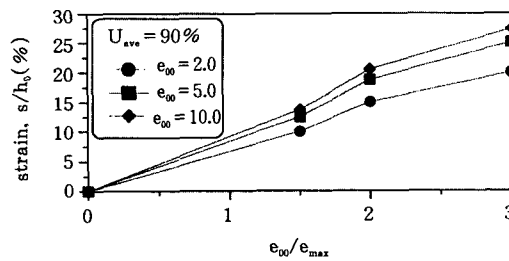


그림 18. 간극비의 영향 (II)

$e_{00}/e_{max}$  값이 일정할 경우  $e_{00}$  값이 2.0, 5.0 및 10.0의 순서로 크기가 증가함에 따른 변형률의 변화 정도를 분석하면,  $e_{00}$  값이 커짐에 따라 변형률도 점차 증가하는 일반적인 현상을 보이지만,  $e_{00}$  값이 2.0에서 5.0으로 커질 때의 변형률 증가폭은 25.0~25.3% 정도의 범위이고,  $e_{00}$  값이 5.0에서 10.0으로 커질 때의 변형률 증가폭은 9.1~9.6% 정도의 범위에 해당되는 현상 즉, 다양한  $e_{00}/e_{max}$  값 각각에 대해  $e_{00}$  값이 커질수록 변형률의 증가폭은 점차 감소하여 둔화되는 현상을 나타내고 있다.

이상의 분석결과를 종합하면,  $e_{00}$ 와  $e_{00}/e_{max}$  모두 압밀침하에 영향을 미치는 변수임에 틀림이 없으나, 특히  $e_{00}/e_{max}$  값이  $e_{00}$  값에 비해 압밀침하에 미치는 영향이 더 큰 현상을 확인할 수 있다.

#### 5.4 수평배수재의 설치깊이 영향

본 분석에서는, 연약토층 내부에 한줄로 설치되는 것으로 가정한, 수평배수재의 설치깊이에 따른 압밀침하의 정도를 분석하여, 배수재의 효율적인 설치깊이를 규명하고자 하였다. 본 분석에서, 연약토층의 총두께  $h_0 = 1.0m$ , 배수재의 수평방향 설치간격  $s_h = 0.5m$ , 초기간극비  $e_{00} = 2.0$  및 최대간극비  $e_{00}/e_{max} = 1.5$ 로 각각 가정하였다.

해석결과는 그림 19에 도시되어 있으며 이를 살펴보면, 평균압밀도( $U_{ave}$ )가 50%인 경우에는 수평배수재의 설치깊이 변화가 소요압밀 시간에 그다지 큰 영향을 미치지 않고 있으나, 이와는 달리 평균압밀도가 90%인 경우에는 배수재의 설치깊이가 최상부 지표면으로 부터 80% 일 때(그림 19에서,  $d_0/h_0 = 0.8$ 인 경우) 소요압밀시간이 가장 작은 즉, 압밀침하효과가 가장 큰 결과를 나타내고 있다. 이와같은 결과는 일반적으로, 수평배수재의 설치위치를 기준으로 그 위쪽 상부지반 내에서는 배수재에 의한 추가 압밀효과가 지배적인 반면에, 배수재 아래쪽 하부지반 내에서는 배수재에 의한 추가



압밀효과 보다는 자중압밀효과가 더 지배적인 데 원인이 있는 것으로 판단된다.

다양한 크기의 평균압밀도 및 경과시간의 경우에도, 앞서 그림 19에서 분석된 효과가 역시 예상되는지 살펴본 결과는 그림 20에 도시되어 있다. 그림 20의 결과중, 평균압밀도 90%에 도달하기 위해 요구되는 소요압밀시간은, 수평배수재 설치깊이가 연약토층 총두께의 80% ( $d_0/h_0=0.8$ )인 경우 8.5일이며 이는, 평균압밀도가 50% ( $d_0/h_0=0.5$ )인 경우의 11.8일에 비해 28% 정도 단축된 시간임을 알 수 있다.

그림 19 및 20의 결과를 종합하면, 본 분석에 의거한 제한적인 결론 즉, 수평배수재를 한 줄로 설치할 경우에는 최상부 지표면으로 부터 연약층 총두께의 80% 정도 위치에 설치하는 것이 가장 효율적임을 알 수 있다.

### 5.5 수평배수재 설치깊이에 따른 깊이별 압밀도의 변화

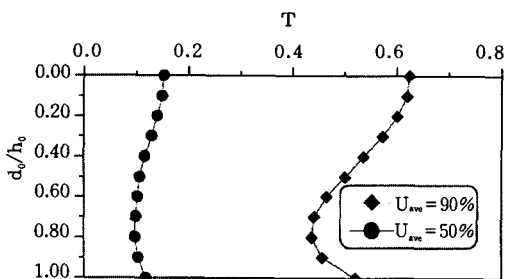


그림 19. 배수재의 설치깊이에 따른 소요압밀시간 변화

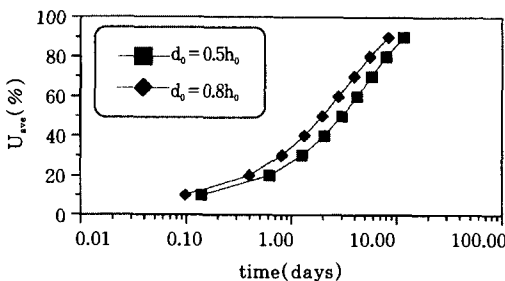


그림 20. 배수재의 설치깊이에 따른 평균압밀도-소요압밀시간 관계

연약토층의 총두께 ( $h_0$ )가 1.0m이고, 수평배수재를 0.5  $h_0$  또는 0.8  $h_0$  깊이에 설치하는 2가지 경우를 대상으로 깊이별 압밀도의 변화를 분석하였다. 본분석에서,  $e_{00}=2.0$ ,  $e_{00}/e_{max}=1.5$  및 배수재의 수평방향 설치간격  $s_0=0.5m$  등으로 가정하였다.

해석결과는 그림 21과 같이 연약토층의 연직방향 깊이 ( $z/h_0$ )를 종축에, 또한 임의의 깊이에서의 압밀도 ( $U_z$ )는 횡축에 도시하였다. 그림 21의 결과를 살펴보면, 수평배수재가 설치된 지점 (0.5 $h_0$  및 0.8  $h_0$ )에서는 다른 지점에 비해 신속하게 압밀이 진행되는 현상을 보여주고 있으며, 또한 연약토층 전체의 평균압밀도가 작을수록 (경과시간이 짧을수록) 수평배수재에 의한 추가 압밀효과가 더욱 크게 작용하는 경향을 보이고 있다.

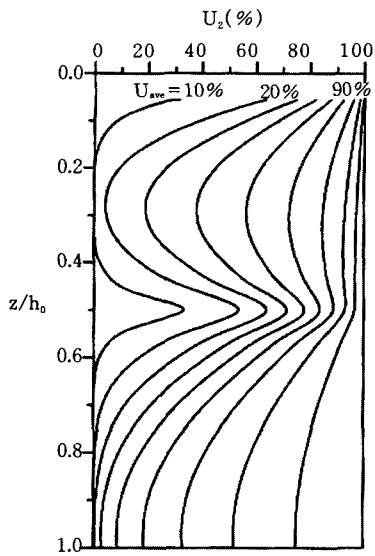
이와같은 결과를 분석하면, 배수재 설치에 따른 추가압밀효과는 압밀초기단계에 급속히 발휘되다가 시간이 경과할수록 점차 둔화되어, 결국 배수재에 의한 추가 압밀효과 보다는 자중압밀효과가 더욱 지배적으로 작용함을 알 수 있다. 또한 배수재가 설치된 지점 하부쪽 연약토층은 배수재에 의한 추가 압밀효과 보다는 자중압밀효과가 더욱 지배적인 경향을 보이고 있다.

### 5.6 설계도표

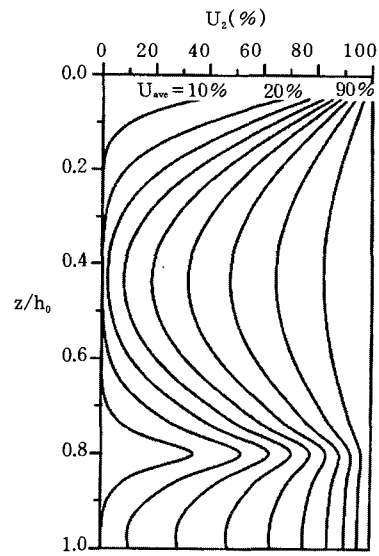
앞의 5.1절 부터 5.5절 까지의 분석결과에 의하면, 수평설치간격이 2.0m를 초과하는 경우에 수평배수재에 의한 추가 압밀효과는 현저하게 감소하는 경향을 보이며, 또한 수평배수재에 의한 추가 압밀효과는 연직방향으로의 배수재 설치깊이가, 최상부 지표면으로 부터 연약토층 총두께의 80% 지점일 때 가장 효과적인 것으로 나타났다.

또한  $e_{00}/e_{max}$ 값이 압밀침하에 미치는 영향이 큰 반면에, 상수  $\lambda$ 값의 크기 변화는 연약토층의 평균압밀도에는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다.

이와같은 주요 분석결과를 토대로, 상수  $\lambda$ 는



(a) 수평배수재 설치깊이 =  $0.5h_0$



(b) 수평배수재 설치깊이 =  $0.8h_0$

그림 21. 깊이별 임의의 지점에서의 압밀도 변화

고려하지 않고 또한 연약토층 총두께의 80% 지점에 수평배수재가 설치되는 경우를 대상으로, 설계도표의 한 예를 그림 22 및 23에 제시하였다.

그림 22 및 23의 설계도표 이용방법은, 배수

재의 수평방향 설치간격( $s_h$ )를 우선 가정한 후, 그림 22의  $s_h - m$ 관계 설계도표로부터 계수  $m(m = G \cdot g_0)$ 값을 결정하고, 이  $m$ 값을 토대로  $G$ 를 산정한 다음, 계속해서 그림 23의  $t - G$  관계 설계도표를 추가로 이용하여 소요압밀시

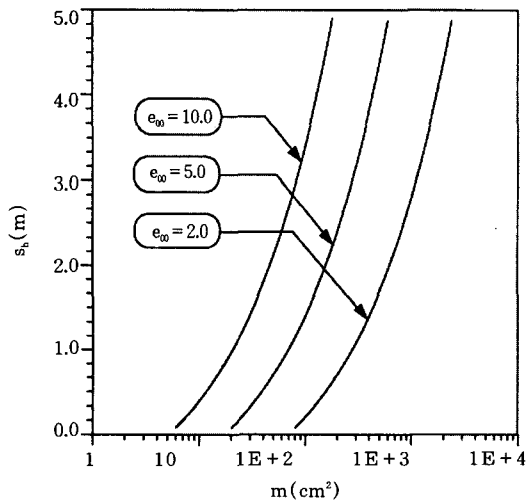


그림 22.  $s_h - m$ 관계 설계도표

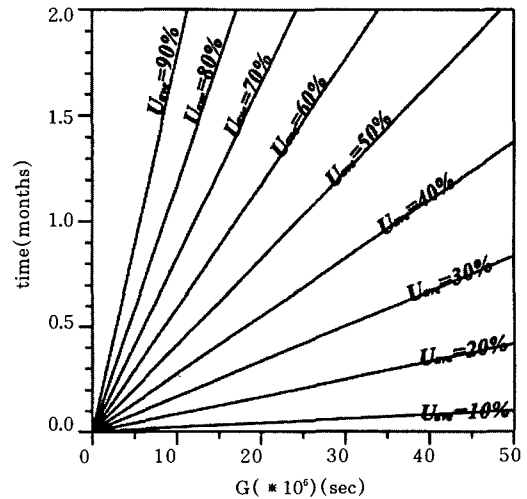


그림 23.  $t - G$  관계 설계도표

간을 결정한다. 만약 설계상의 소요압밀시간과 일치하지 않는 경우,  $s_v$ 를 재차 가정하여 앞의 과정을 반복적으로 수행하고 이를 통해 최종적으로 배수재의 수평설치간격이 확정된다.

그림 23에 한 예로서 제시된 t-G관계 설계도표는  $e_{00}=2.0$ ,  $s_v/h_0=0.1$  및  $e_{00}/e_{max}=1.5$ 인 경우에 해당된다.

## 6. 결론 및 요약

본 연구에서는, 연약한 준설매립점토지반 내부에 플라스틱 배수재를 수평으로 설치하여 압밀침하의 가속화를 유도하는 수평배수공법의 해석절차 체계화에 초점을 두고 이론적 및 실험적 접근을 진행하였다. 이를 위해, 유한변형을 개념을 근거로 한 Gibson등의 1차원 자중압밀이론을 토대로, 연약한 준설매립점토지반 내부에 플라스틱 수평배수재가 한줄로 설치되는 경우의 압밀 지배방정식을 제시하였다. 이와같은 수평배수압밀은 준설매립점토 자중에 의한 압밀과 수평배수재에 의한 추가 압밀이 복합적으로 작용하게 되며, 본 연구에서는 자중압밀효과와 수평배수재에 의한 추가 압밀효과를 상호 독립적으로 가정한 다음, 이를 선형적으로 중첩시켜, 수평배수압밀에 대한 지배방정식을 유도하였다. 아울러 본 지배방정식 및 수평배수재 설치에 따른 초기조건 및 경계조건 등을 토대로, Dufort-Frankel의 유한차분화 알고리즘에 의거해 시간경과에 따른 침하량 및 압밀도 등의 변화를 예측하기 위한 해석절차를 제시하였다.

또한 제시된 해석절차의 적용 타당성 확인을 위해, 안산 시화지구 준설매립점토 및 플라스틱 수평배수재를 이용한 실내모형실험을 실시하였다. 실내실험을 통해, 안산 시화지구 준설매립점토의 간극비-유효응력 관계 및 투수계수-간극비 관계 등을 정량적으로 정의하기 위한 기초자료를 획득하였으며, 또한 시간경과에 따른 깊이별 침하량등을 측정하여 본 연구에서 제시된 해석절차에 의한 예측치와 비교 분석하

였다. 이외에도 플라스틱 배수재 수평배수공법에 관련된 설계변수가 압밀침하 등에 미치는 영향을 제시된 해석절차를 이용해 분석하였으며, 이 분석결과를 토대로 한 설계도표의 제시도 이루어 졌다.

본 연구에서 제시된 해석절차의 적용 타당성 확인을 위한 실내모형실험결과와의 비교결과 및 관련 설계변수가 압밀침하 등에 미치는 영향분석을 통해 얻어진 결과중, 주요부분을 요약·정리하면 다음과 같다.

1) 침하량 비교결과, 서로 다른 깊이의 3개 지점 모두, 측정된 침하량이 예측치에 비해 일반적으로 큰 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이와같은 경향은, 불균질성이 예상되는 점토지반 내부 수평배수재 사이에 설치된 침하판이 시간이 경과함에 따라 한쪽으로 기울어지는 문제점이 발생하였으며, 이 경우 평균적인 침하량이 아닌 최대침하량을 기록한 계측상의 오류가 큰 요인으로 판단된다. 그러나 침하량이 거의 수렴하는 최종압밀단계에서는 해석절차를 토대로 한 예측치의 침하량 과소평가 경향이 현저히 둔화되어, 특히 연약점토층 하부쪽 지점의 경우에는 측정치와의 차이가 2.6% 정도 이하의 작은 범위에 머무는 현상을 나타내고 있다.

2) 압밀도 비교결과에 의하면, 플라스틱 수평배수재 보다 위쪽에 피조미터가 설치된 지점들의 경우는, 측정 압밀도가 예측 압밀도에 비해 작게 평가되는 결과를 보이고 있으나, 이와는 달리 플라스틱 수평배수재 보다 아래쪽에 피조미터가 설치된 지점의 경우에는 경과시간 43일까지는 측정 압밀도가 예측 압밀도에 비해 크게 평가되다가 43일 이후부터 측정 종료시인 81일까지는 오히려 예측 압밀도가 더 큰 경향을 보이고 있다. 이와같은 경향은 간극수압 측정시 피조미터의 위치는 시간에 관계없이 한점에 고정되어 있으나, 본 연구의 해석절차에 의해 예측된 간극수압의 위치는 시간에 따라 변화하기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 좌표체계의 차이로 인해 초기상태에서는 간극

수압의 측정위치와 해석절차에 의한 예측위치가 동일한 지점이나, 시간이 경과함에 따라 압밀침하가 발생하여 간극수압의 예측위치가 아래쪽으로 점차 이동하게 된다. 따라서 수평배수재를 중심으로 그 위쪽은 측정위치가 예측위치 보다 수평배수재와 멀리 떨어져 있기 때문에, 측정 압밀도가 예측 압밀도에 비해 낮게 평가되나, 아래쪽은 측정위치가 예측위치 보다 수평배수재와 가깝기 때문에 오히려 측정 압밀도가 크게 평가된 것으로 판단된다.

또한, 플라스틱 수평배수재가 위치하고 있는 지점을 경계로 하여, 상부쪽 지반에서는 자중 압밀과 수평배수재에 의한 추가 압밀이 복합적으로 진행되는 데 반해, 수평배수재 하부쪽 지반에서는 자중압밀만이 주로 진행되어, 시간경과에 따라 상·하부 지반 사이에 압밀도의 증가율 차이가 발생하게 된다.

3) 플라스틱 배수재의 수평방향 설치간격이 2.0m를 초과하는 경우에 배수재에 의한 추가 압밀효과는 두드러지게 감소하는 경향을 보이고 있으며, 또한 배수재에 의한 추가 압밀효과는 배수재의 연직방향 설치깊이가 최상부 지표면으로부터 연약토층 총두께의 80% 지점일 때 가장 효과적인 것으로 나타났다.

또한 초기간극비( $e_{00}$ )와 최종간극비( $e_{max}$ )의 비로 정의되는  $e_{00}/e_{max}$  값이 압밀침하에 미치는 영향이 상대적으로 큰 반면에, 간극비-유효응력 사이의 관계를 정의하는 상수( $\lambda$ )의 크기 변화는 압밀침하에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다.

향후 계속연구를 통해, 플라스틱 수평배수재를 서로 다른 깊이에 여러개 포설하는 경우, 또한 수평배수재의 중방향 기울기를 고려하는 경우 등을 체계적으로 다루기 위한 이론적 및 실험적 접근이 요구된다. 이외에도 장기적인 측면에서, clogging 현상과 관련하여 플라스틱 수평배수재의 투수성을 체계적으로 분석하기 위한 실험이 필요시 된다.

## 참 고 문 헌

1. 김석열(1998), "플라스틱 배수재를 이용한 수평 배수에 관한 연구", 홍익대학교 박사학위논문.
2. 이송, 양태선, 황규호(1994), "준설매립점토의 자중압밀 특성에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제14권, 제4호, pp. 953~963.
3. 이송, 윤돈규, 백영식(1994), "준설매립점토의 전단강도 특성에 관한 연구", 한국지반공학회지, 제10권, 제4호, pp. 153~166.
4. 유남재, 유건선, 김영길, 이명옥, 이종호, 이기우(1996), 준설토안정에 소요되는 시간추정 기법, 「해안 매립과 연약지반 개량을 위한 신기술 개발」보고서, Vol. I.
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
6. Gibson, R. E, Schiffman, R. L and Cargill, K. W.(1981), "The Theory of One - Dimensional Consolidation of Saturated Clays. II. Finite Nonlinear Consolidation of Thick Homogeneous layers", Can. Geotech. J., Vol. 18, pp. 280~293.
7. Hoffman, J. D.(1993), "Numerical Methods for Engineering and Scientists", McGraw-Hill, Inc., pp.531~533.
8. Kynch, G. J.(1952), "A Theory of Sedimentation", Faraday Society Transactions, Vol.48, pp.166~176.

(접수일자 1998. 8. 6)