

수평배수재가 포설된 준설매립지반의 압밀해석(I) - 프로그램 개발 및 검증 -

Consolidation Analysis of Dredged Fill Ground Installed with Horizontal Drains (I) - Program Development and Verification -

박 정 용¹ Park, Chung-Yong
장 연 수² Jang, Yeon-Soo
박 정 순³ Park, Chung-Soon

Abstract

A finite difference program with 3-D governing equation expanded from 1-D self-weight consolidation is developed to analyze the consolidation behavior of surface dredged soil with horizontal drains. Various boundary conditions with horizontal drains and seepage pressure of pore water infiltrated to the drains are considered in the program. A laboratory soil chamber experiment for the consolidation of dredged soil is performed to validate the program and the measured settlement-time result is compared with the one predicted by the program. The influence of design conditions of horizontal drains such as horizontal installation spacing, installation depth and number of drain layers, on the consolidation is analyzed.

요 지

수평배수재가 매설된 표층 준설 매립지반의 압밀해석을 하기 위한 유한 차분해석 프로그램을 개발하였다. 프로그램의 지배방정식은 1차원 자중압밀이론을 3차원으로 전개시킨 식을 이용하여 수평배수재가 설치된 지반의 다양한 경계조건을 적용하였으며 배수재로 간극수가 침투되는 침투압효과를 고려하였다. 해석프로그램의 타당성 검증을 위해서 실내 토조압밀시험을 실시하고 시간-침하량 의 측정결과와 예측결과를 비교하였다. 수평배수재의 설계조건으로 배수재 횡방향 설치간격, 설치깊이, 설치층수의 변화가 압밀에 미치는 영향을 분석하였다.

Keywords : Depth, Dredged fill, Finite difference program, Horizontal drain, Installation spacing, Self-weight consolidation

1. 서 론

준설매립토는 함수비가 높고 압축성이 크며 자중압

밀 동안에 지반의 지내력이 거의 없는 상태이므로 지반개량을 위한 시공기계의 투입은 물론 사람의 보행조차도 곤란하다. 수평배수공법은 이러한 초연약 준설

1 정회원, 삼보기술단 과장 (Member, Manager, Sam-Bo Engrg.)

2 정회원, 동국대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof. of Dept. of Civil and Environmental Engrg., Dongguk Univ, ysjang@dongguk.edu)

3 정회원, 한국건설교통기술평가원 R&D평가실장 (Member, R&D Evaluation Division, Chief, Kictep)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

점토의 표층부를 신속하게 안정화시키기 위한 대책공법의 하나로써, 준설 투기된 매립지반에 배수재를 수평방향으로 매설하여 중력 혹은 진공압에 의해 간극수의 소산을 촉진시켜 지반의 강도를 증가시키는 공법이다.

함수비가 높고 압축성이 커서 자중 압밀이 큰 준설매립 지반과 같은 해석은 압밀이 발생하는 지반의 투수계수가 일정하다는 가정하에 유도된 Terzaghi의 압밀해석 이론은 한계가 있어 Mikasa(1963)와 Gibson(1967, 1981)은 자중압밀을 고려한 1차원 유한변형률 압밀이론을 제안하였다. Zhao(1989)는 Gibson(1981)의 유한변형률 이론을 확장시켜 3차원 지배방정식을 도출하였으며 Xie 등(1995)은 수직 샌드 드레인과 플라스틱 드레인이 설치된 지반의 압밀거동에 대한 3차원 유한요소해석을 실시한 바 있다. 국내에서는 Chung(1993)이 토조시험 및 수치해석을 통해 진공압밀공법의 연약지반개량에 적용성을 연구하였다.

지반에 수평배수재가 설치된 경우에는 자중 압밀뿐만 아니라, 배수재 부근에서 투수가 3차원적으로 발생되며, 침투압에 의해 압밀 침하를 촉진시키게 된다. 따라서 수평배수재가 설치된 지반의 압밀거동을 해석하기 위해서는 자중에 의한 압밀 거동과 배수재 설치로 인한 침투압 효과를 모두 포함할 수 있는 해석이론이 필요하다.

관련연구로 Kim 등(1995)이 준설토의 표층개량을 위한 수평배수공법의 적합성 판정을 위해 Mikasa의 압밀식을 적용한 수치해석연구를 수행하였다. 국내에서는 김형주 등(1996)이 수평진공배수공법에 의한 연약점성토의 압밀거동에 대해 연구를 수행하였다. 김석열(1998)은 준설매립지반에 수평배수재가 깊이방향으로 1줄로 등간격으로 설치된 경우에 대해 수치해석적 연구를 수행하였으며 이송 등(2001)은 준설매립토의 표층강도증진을 위한 수평진공배수공법 적용시의 압밀거동 예측을 위한 실험 및 수치해석연구를 수행하였다.

본 연구에서는 Zhao(1989)의 3차원 유한변형률방정식을 지배방정식으로 사용하고, 수평배수재에서 침투압 효과를 고려하기 위해 배수재에 대한 경계조건을 도입하여 유한차분 프로그램을 개발하였다. 수평배수재의 압밀 촉진 효과를 규명하기 위해 수행한 중력식 토조시험의 결과를 개발된 프로그램의 수치해석 결과와 비교하여 정확도를 검증하였다. 또한 중력배수시, 수평배수재가 설치된 경우와 자중만에 의한 압밀의 경우를 비교 해석하여 수평배수공법의 효과를 분석하였다.

2. 수평배수공법 해석을 위한 3차원 유한 변형률 압밀 이론

Gibson 등(1967, 1981)은 압밀 중 지반의 높이가 크게 변화하며, 응력과 체적 변화의 관계가 비선형이며, 투수계수가 변화하는 상대적으로 두꺼운 층에 적합한 일차원 유한 변형률 압밀이론을 식 (1)과 같이 제시하였다.

$$(\gamma_s - \gamma_w) g \lambda + g \frac{\partial e^2}{\partial z^2} = \frac{\partial e}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, γ_s : 흙입자의 단위중량

γ_w : 간극수의 단위중량

e : 시간 t 에서의 간극비, z : 축소 좌표계

g : 유한 변형률 압밀계수 $(= \frac{k(e)}{\gamma_w} \frac{1}{1+e} \frac{d\sigma'_z}{de})$

λ : 선형상수 $(= -\frac{d}{de}(\frac{de}{d\sigma'_z}))$ 이다.

Zhao(1989)는 Gibson의 1차원 유한변형률 압밀방정식을 3차원으로 확장시켜 3차원 유한변형률 압밀방정식을 식 (2)와 같이 제안하였으며 본 연구에서는 수평배수공법의 자중에 의한 압밀과 배수재 설치로 인한 압밀 촉진효과를 모두 고려할 수 있는 지배방정식으로 사용하였다.

$$\begin{aligned} \frac{de}{dt} &= (\gamma_s - \gamma_w) g \lambda \frac{\partial e}{\partial z} + g \frac{\partial^2 e}{\partial z^2} \\ &+ \frac{(1+e_0)}{\gamma_w \lambda} \left[\frac{1}{e-e_\infty} \frac{dk(e)}{dx} \frac{de}{dx} - \frac{k(e)}{(e-e_\infty)^2} \left(\frac{de}{dx}\right)^2 + \frac{k(e)}{(e-e_\infty)} \frac{d^2 e}{dx^2} \right] \\ &+ \frac{(1+e_0)}{\gamma_w \lambda} \left[\frac{1}{e-e_\infty} \frac{dk(e)}{dy} \frac{de}{dy} - \frac{k(e)}{(e-e_\infty)^2} \left(\frac{de}{dy}\right)^2 + \frac{k(e)}{(e-e_\infty)} \frac{d^2 e}{dy^2} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, e : 시간 t 에서의 간극비

e_0 : 토층 깊이별 초기 간극비, z : 축소 좌표계

e_∞ : 압밀 종료시의 간극비

$k(e)$: 투수계수 $(= ae^3 + be^2 + ce + de)$ 이다.

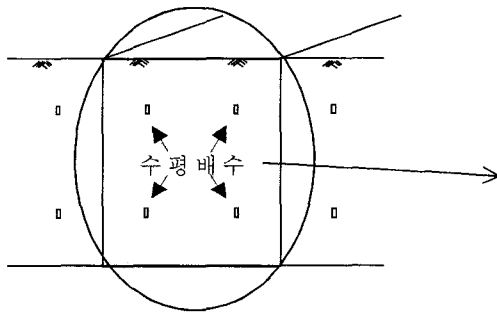
식 (2)의 간극비에 대한 미분방정식을 풀기 위하여 본 연구에서는 Explicit 유한차분법중의 하나인 Dufort-Frankel 방법을 사용하였다. Dufort-Frankel 방법은 해의 안정성을 위해서 공간에 대한 2계 도함수의 차분식에서 기준격자점의 시간단계 T 에서의 간극비인 E^T 를 시간단계 $T-\Delta T$ 와 $T+\Delta T$ 값의 산술평균치 즉 $E^T = (E^{T+\Delta T} + E^{T-\Delta T})/2$ 로 대체하여 해석한다. 식 (2)의 3차원 유한 변형률 압밀 방정식을 유한 차분화시키면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
E^{T+\Delta T}(x_i, y_j, z_k) = & (1/C_1) \{ C_2 E^{T-\Delta T}(x_i, y_j, z_k) \\
& + C_3 E^T(x_i + \Delta x, y_j, z_k) + C_4 E^T(x_i - \Delta x, y_j, z_k) \\
& + C_5 E^T(x_i, y_j + \Delta y, z_k) + C_6 E^T(x_i, y_j - \Delta y, z_k) \\
& + C_7 E^T(x_i, y_j, z_k + \Delta z) + C_8 E^T(x_i, y_j, z_k - \Delta z) \\
& - C_9 [E^T(x_i + \Delta x, y_j, z_k) - E^T(x_i - \Delta x, y_j, z_k)]^2 \\
& - C_{10} [E^T(x_i, y_j + \Delta y, z_k) - E^T(x_i, y_j - \Delta y, z_k)]^2 \} \quad (3)
\end{aligned}$$

여기서, $C_1 \sim C_{10}$ 은 계수이다(부록 A 참조).

2.1 수평배수공법 해석을 위한 초기 및 경계조건

수평배수재가 설치된 준설패립 지반의 압밀 거동을 3차원 유한변형률 압밀방정식을 사용하여 해석하기 위해서는 자중에 의해 압밀되기 전의 지반에 대한 초기조건, 경계부에 대한 경계조건들과 중력배수조건에서 수평배수재 타설에 따른 침투압의 효과를 고려하기 위해 수평배수재에 대한 경계조건을 설정해야 한다. 그림 1은 준설패립지반에 여러 층으로 설치된 수평배수재의



(a) 수평배수재 설치도

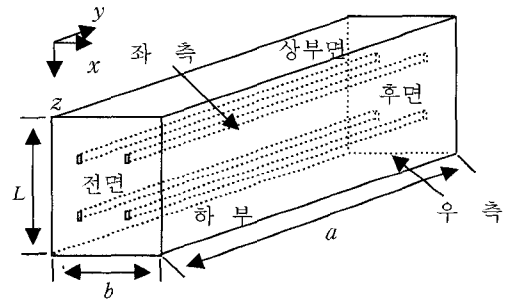
개요도를 보인 것이다.

2.1.1 초기조건

준설토 투기 후 매립지반에서 자중에 의한 압밀이 시작되기 전($t=0$)에 모든 토층 내에서는 동일한 간극비(e_{00})를 갖는 것으로 가정하고, 전 지층의 초기 간극비식과 차분식을 유도하였다(표 1).

2.1.2 해석대상 요소의 경계조건

해석대상 요소를 다수의 드레인이 임의 위치에 설치된 직육면체 형상으로 구성하고 (그림 1(b) 참조) 직육면체의 6개의 면, 즉 상부면과 하부면, 전면과 후면, 좌측면과 우측면에서의 경계조건을 설정하였다. 지표면에서는 초기의 간극비가 압밀 종료시까지 동일하게 유지되는 것으로 가정하고 해석대상 요소의 전면, 측면, 후면부에서 투수가 일어나지 않는 불투수면으로 가정하였다. 또한 해석대상 요소의 하부 경계면은 흙과 간극수의 혼합물에서의 평형조건과 수정된 Darcy 법칙을 사용



(b) 해석대상 요소

그림 1. 준설패립지반에 설치된 수평배수재 개요도

표 1. 수평배수공법의 해석이론식 및 유한차분식

	이론식	차분식	
초기조건	$e(x, y, z)_{t=0} = e_{00}$ 여기서, e_{00} : 초기 간극비	$E_0(x_i, y_j, z_k) = E_{00}$	
경계조건	상부면 ($z=0$)	$E_{sf}(x_i, y_j, 0) = E_{00}$	
	단위셀	전면 : $\frac{\partial e(x, 0, z)}{\partial y} = 0$	$E^T(x_i, +\Delta y, z_k) = E^T(x_i, -\Delta y, z_k)$
		후면 : $\frac{\partial e(x, a, z)}{\partial y} = 0$	$E^T(x_i, b + \Delta y, z_k) = E^T(x_i, b - \Delta y, z_k)$
		좌측면 : $\frac{\partial e(0, y, z)}{\partial x} = 0$	$E^T(+\Delta x, y_j, z_k) = E^T(-\Delta x, y_j, z_k)$
		우측면 : $\frac{\partial e(b, y, z)}{\partial x} = 0$	$E^T(a + \Delta x, y_j, z_k) = E^T(a - \Delta x, y_j, z_k)$
하부면 ($z=L$)	$\frac{\partial e}{\partial z} + \lambda(\gamma_s - \gamma_w)(e - e_{\infty}) = 0$	$E^T(x_i, y_j, L) = \frac{E^T(x_i, y_j, L - \Delta z) + \lambda(\gamma_s - \gamma_w) E_{\infty} \Delta z}{1 + \lambda(\gamma_s - \gamma_w) \Delta z}$	

하여 표현하였다. 이러한 해석대상 요소 경계조건들의 이론식과 차분식을 표 1에 나타내었다.

2.1.3 수평배수재의 경계조건

배수재 설치후 수평배수재의 투수계수가 무한하다고 가정하면 배수재 단부에서 수압은 0이므로, 배수재와 흙입자 사이의 접촉면에서의 침투압에 의해 즉시 발생하게 되는 유효응력은 전응력과 같다. 수평배수재 설치 후 자중에 의한 유효응력 증가량($\gamma_s z_n$)과 침투압에 의한 유효응력 증가량($e_{00} \cdot \gamma_w z_n$)을 더한만큼의 유효응력 증가가 수평배수재에서 발생하게 된다(그림 2).

해석 단면에 다수의 수평배수재가 설치된 경우의 경계조건은 다음과 같이 나타내었다.

$m = 1 \sim N$ 에 대하여,

$$e(x_m, y, z_m) = (e_{00} - e_{\infty}) \exp[-\lambda (\gamma_s + e_{00} \cdot \gamma_w) z_m] + e_{\infty} \quad (4)$$

여기서, N : 해석 대상단면내의 전체 수평배수재 갯수
 x_m, z_m : 임의의 위치에 설치된 수평배수재들의 각각의 좌표(축소 좌표계) 이다.

식 (4)를 차분식으로 나타내면 다음과 같다.

$$E^T(NX_m, y_j, NZ_m) = (E_{00} - E_{\infty}) \exp[-\lambda (\gamma_s + E_{00} \cdot \gamma_w) NZ_m] + e_{\infty} \quad (5)$$

2.2 지반의 시간-침하량 관계 및 평균압밀도 산정

시간 t 일 때 지표면의 임의 위치에서의 침하량은 다음

식과 같다.

$$S(x, y)_{t=t} = \int_0^L [e(x, y, z)_{t=0} - e(x, y, z)_{t=t}] dz \quad (6)$$

여기서, L : 압밀층의 두께(축소좌표계) 이다.

임의 시간에서의 지표면의 평균 침하량 $S_{ave}(t)$ 를 산정하기 위한 식은 식 (7)과 같으며 평균압밀도는 시간 t 에서의 침하량과 최종 침하량의 비로서 식 (8)과 같이 나타내었다.

$$S_{ave}(t) = \frac{1}{a \cdot b} \int_0^L \int_0^b \int_0^a [e(x, y, z)_{t=0} - e(x, y, z)_{t=t}] dx dy dz \quad (7)$$

$$U(t) = \frac{S(x, y)_{t=t}}{S(x, y)_{t=\infty}} \quad (8)$$

여기서, a : 해석단면의 x 방향의 길이

b : 해석단면의 y 방향의 길이

$S(x, y)_{t=\infty}$: $t=\infty$ 에서의 최종 침하량 이다.

2.3 입력자료 및 해석절차의 흐름도

본 연구에 사용된 수치해석의 흐름도를 그림 3에 나타내었다. 프로그램 입력자료로 $t=0$ 일 때의 초기간극비(e_{00}), $t=\infty$ 일 때의 최종간극비(e_{min}), 지표면에서의 간극비($e_{x,y,t}$), 흙의 단위중량(γ_s), 물의 단위중량(γ_w)과 실내 압밀시험으로부터 구한 선형상수 λ 와 유한변형을 압밀 계수 g , 간극비 변화에 따른 투수계수관계식, 해석 단면의 두께, 배수재의 개수, 설치위치와 수평방향 간격 등

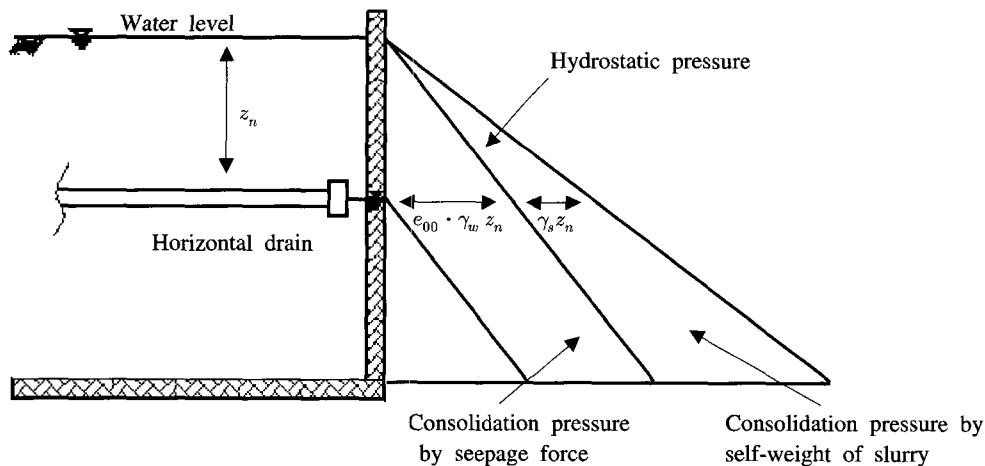


그림 2. 중력식 수평배수공법에서의 침투압 발생원리

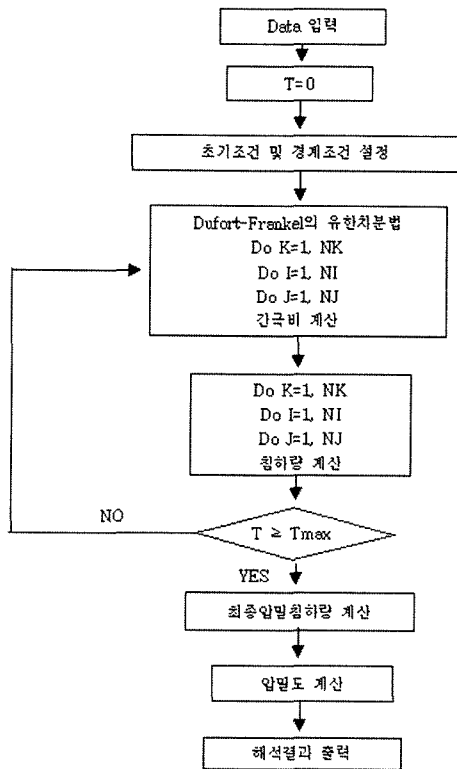


그림 3. 수치해석 프로그램 흐름도

을 입력자료로 사용한다.

해석대상요소의 초기조건과 경계조건을 고려하여 원하는 수평배수재에서의 경계조건을 선정하고 선정된 조건들에 대해 Dufort-Frankel의 유한차분법에 의해 간극비를 계산한다. 계산된 간극비를 이용하여 최종압밀 침하량을 계산하고 각 시간별 압밀도를 산정한다. 최종적으로 압밀시간, 침하량, 압밀도, 간극비가 출력된다.

3. 프로그램의 타당성 검증

개발된 유한차분 수치해석 프로그램의 타당성을 검증하기 위해 수평배수재를 설치한 토조에서의 시간경과에 따른 침하량을 측정하고 동일조건에 대하여 수치

해석을 실시하여 그 결과를 비교하였다.

3.1 토조시험의 구성

토조압밀 시험은 현장조건과 유사하게 다수의 수평 배수재를 설치하고 그 단부를 자유배수조건으로 만들어 배수재 설치지반의 압밀거동을 모형화하였다. 시험에 사용된 시료는 남해안 진해지역의 해성점성토로서, 교란 시료를 채취하여 실험실에서 해수를 첨가하여 고 함수비 상태의 시료로 성형하였다. 시험은 조개껍질이 나 큰 자갈과 같이 시험에 영향을 미칠 수 있는 불순물을 제거하기 위해서 No. 20체로 체가름한 것을 사용하였다. 시험에 사용된 해성점토의 공학적 특성은 표 2에 요약·정리 하였다.


토조시험에서 사용된 수평배수재는 폭 100mm×두께 5mm 단면을 가진 배수재로서 동수구배 $i=0.01$ 조건에서 $800 \sim 1,000 \text{cm}^3/\text{sec}$ 의 통수능력을 보유하고 있다. 본 시험에서는 현장의 배수재 설치간격과 유사하게 접근하기 위하여 현장과 실내시험간의 scale effect를 고려하여 배수재의 크기를 폭 25mm × 두께 5mm로 축소 제작하여 이용하였다(표 3).

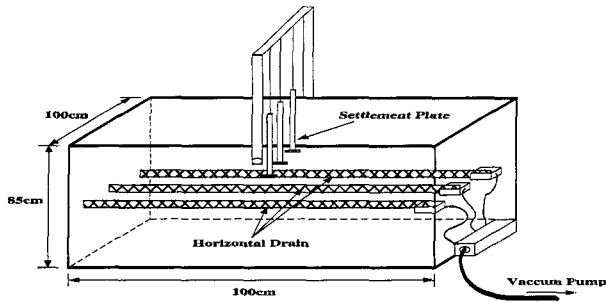
토조압밀 실험은 사각형 단면의 강철프레임으로 이루어진 토조를 이용한 복합압밀배수시험으로서 현장조건과 유사하게 다수의 배수재를 설치할 수 있으므로 배수재간의 상호작용에 의한 배수재 타설지반의 배수압밀거동을 모델화한 실험이다. 그림 4는 토조시험기의 구성도를 나타내고 있다. 본 연구에 사용된 시험기는 (B)100×(L)100×(H)85cm의 강재로 구성되어 있으며 최대 9개까지의 배수재를 설치할 수 있도록 되어있다. 토조의 내부에 설치된 수평배수재는 각각 8mm의 튜브에 연결되어 있으며 각 튜브는 토조 외부에 설치되어 있는 집수관으로 연결되어 시료에서 배수된 간극수는 이를 통하여 배수량 측정 수조로 이동하게 된다. 토조시험 과

표 2. 시험에 사용된 시료의 물성치

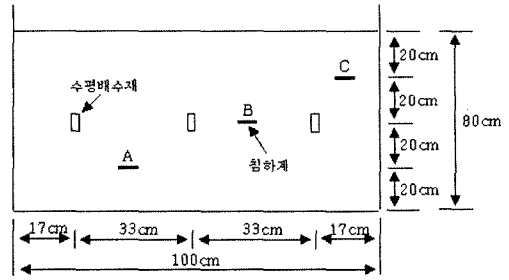
Property	U.S.C.	NO. 200체 통과량(%)	Gs	LL(%)	PL(%)	PI(%)
Value	CH	98	2.70	62	31	31

표 3. 시험에 사용된 수평배수재의 특성 및 단면형상

배수재명	단면크기(폭×두께)	구조적 분류	단면형상
Type-O	100mm×5mm	일체형	



(a) 개략도



(b) 설치단면도

그림 4. 수평배수재 및 침하계가 설치된 토조시험기의 개요도

정에서 발생하는 시료의 침하는 토조의 상부에 설치되어 있는 층별침하계로 측정하였다. 그림 4(b)는 토조시험시 수평배수재와 층별 침하계의 설치단면도를 나타낸 것이다.

3.2 수치해석을 위한 입력 데이터의 결정

선형상수 λ 는 실내압밀시험 결과로부터 얻은 자료를 간극비-유효응력 관계식인 식 (9)에 적합(Curve fitting) 시킴으로써 결정할 수 있다.

$$e = (e_{00} - e_{\infty}) \exp(-\lambda \sigma') + e_{\infty} \quad (9)$$

여기서, e_{00} : 준설매립토가 압밀되기 전 모든 토층에서의 초기 간극비,

e_{∞} : 최종 압밀시의 간극비이다.

그림 5는 λ 를 결정하기 위해 적합(Curve fitted)시킨 그래프를 보여 주고 있다. 이 그림에서 시험 자료점은 CRS 압밀 시험 결과로부터 얻어진 유효응력에 따른 간극비를 나타내고 있으며, 이 실험 자료점을 식 (9)를 사용하여 적합(Curve fitting)시킨 곡선이 점선으로 표시되어 있다. 최종적으로 e_{∞} 값은 0.772로, 선형상수 λ 값은

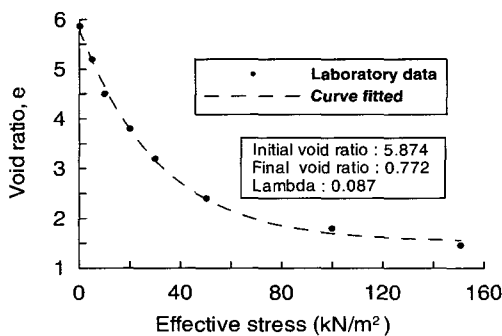


그림 5. 선형상수(λ)의 결정

0.087로 산출되었다(그림 5 참조).

투수계수는 간극비의 변화에 대해 비선형적으로 변화하므로 이러한 관계를 수치해석에 고려하기 위하여, 투수계수와 간극비의 관계에 대한 식을 구해야 한다. 투수계수는 다음 식 (10)과 같이 간극비의 3차함수로 표현될 수 있다. 그림 6은 투수계수-간극비에 대한 CRS 시험 자료점을 3차원 다항식에 피팅시킨 곡선(점선)을 보여주고 있으며, 이로부터 다항식의 계수 a~d를 구할 수 있으며 표 5에 정리하였다.

$$k(e) = ae^3 + be^2 + ce + d \quad (10)$$

여기서, $k(e)$: 투수계수, e : 간극비, a~d : 계수 이다.

유한변형률 압밀계수(g)는 간극비-유효응력 시험결과와 식 (10)을 사용하여 다음 식 (11)에 의하여 계산할 수 있다.

$$g(e) = -\frac{k(e)}{\gamma_w} \frac{1}{1+e} \frac{d\sigma'_z}{de} \quad (11)$$

유효응력은 간극비의 함수이므로 실험결과로부터 얻어진 데이터에 가장 근접하는 피팅 곡선으로부터 유효응력-간극비의 관계를 추정할 수 있는데, 이때 다음과

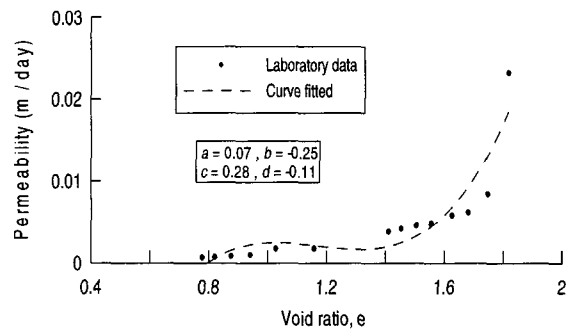


그림 6. 투수계수-간극비 관계

같은 식을 사용하였다.

$$\sigma'_z = a + \frac{b}{e} \quad (12)$$

여기서, σ'_z : 유효응력, e : 간극비, a, b : 계수이다.

식 (12)를 간극비로 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{d\sigma'_z}{de} = -\frac{b}{e^2} \quad (13)$$

식 (13)을 식 (11)에 대입하면 $g(e)$ 는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$g(e) = \frac{k(e)}{\gamma_w} \frac{1}{1+e} \frac{b}{e^2} \quad (14)$$

그림 7은 계수 b 를 결정하기 위해 시험 자료점을 식 (12)로 적합(Curve fitted)시킨 결과를 나타낸 것이다. 적합하여 산정된 b 값과 각 간극비에서의 투수계수 값을

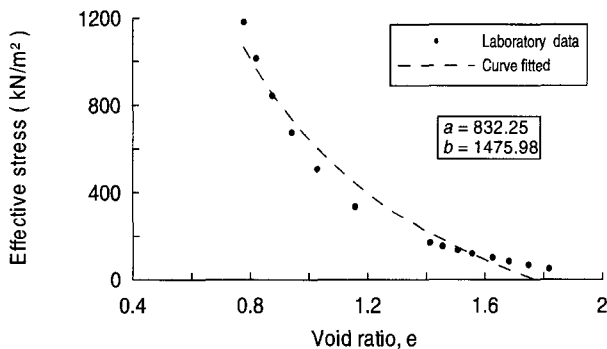


그림 7. 계수 b 결정 위한 유효응력-간극비 곡선

식 (14)에 대입하면 $g(e)$ 값을 결정할 수 있으며 각 간극비에 대해 구해진 $g(e)$ 값을 평균하면 최종적인 $g(e)$ 값은 0.01로 산출되었다(표 4 참조).

이상으로부터 산정된 수치해석에 필요한 입력 데이터들을 요약·정리하여 표 5에 나타내었다.

3.3 토조시험과 수치해석 결과의 비교

토조시험에서 측정한 시간에 따른 각 층별 침하계의 침하량 실측치와 수치해석 결과를 그림 8에 나타내었다. 분석결과, 매설 위치가 가장 높은 C점에서 침하량의 실측치와 해석치가 매우 근접하는 경향을 보이고 있다. 한편 중간층에 위치한 B점과 하부에 위치한 C점에서는 해석치가 실측치보다 약간 크게 나타났다. 따라서 개발된 유한차분 수치해석 프로그램은 수평배수재가 설치된 초연약 준설매립점토의 압밀 침하 거동을 잘 모사할 수 있는 것으로 평가되었다.

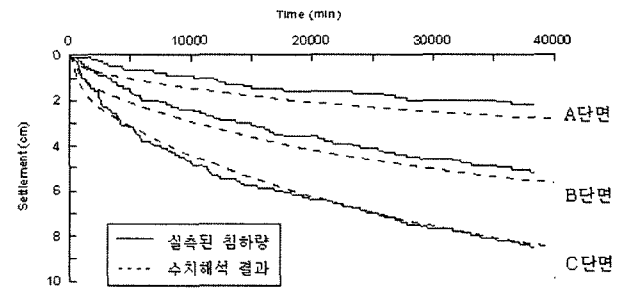


그림 8. 토조시험의 층별 침하량 측정치와 수치해석 결과 비교

표 4. $g(e)$ 값 산정

Void ratio, e	b/e^2	$k(e)$ (m/day)	g (m ² /day)
1.56	590.05	4.890×10^{-3}	0.011
1.45	674.87	4.222×10^{-3}	0.019
1.16	1044.66	1.787×10^{-3}	0.009
1.03	1350.62	1.760×10^{-3}	0.012
0.88	1861.32	8.523×10^{-4}	0.009
0.82	2122.35	5.555×10^{-4}	0.009
0.78	2361.03	6.933×10^{-4}	0.009

표 5. 수치해석에 사용된 입력데이터

지반의 초기높이 h_0 (m)	흡입자 단위중량 r_s (kN/m ³)	초기 함수비 w_0 (%)	초기 간극비 e_{00}	최종 간극비 e_{∞}	유한변형을 압밀계수 g (m ² /day)	선형상수 λ (m ² /kN)
0.8	26.7	220	5.874	0.772	0.01	0.087

$$\text{투수계수 } k(e) = 0.07 e^3 - 0.25 e^2 + 0.28 e - 0.11$$

3.4 수평배수재가 설치된 경우와 자중 압밀의 경우 비교 분석

개발된 프로그램에 의하여 수평배수재 포설에 의한 압밀 촉진 효과를 파악하기 위하여 시간-침하해석을 실시하고 자중만에 의한 압밀의 경우와 비교하였다. 수평배수재가 2층으로 설치된 경우에 대해 수치해석을 실시

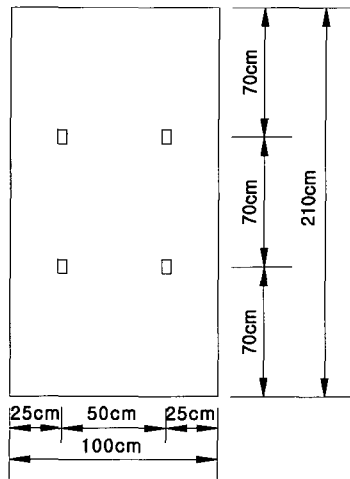


그림 9. 수평배수재 설치단면도

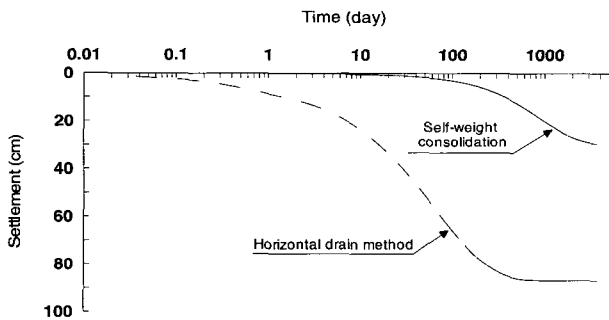
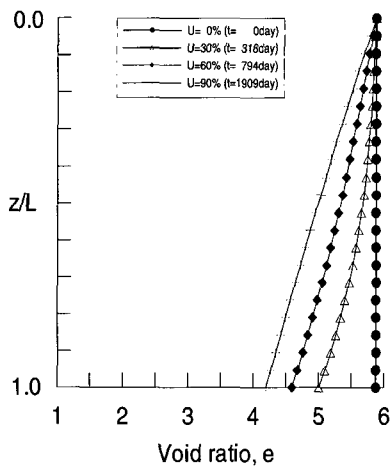
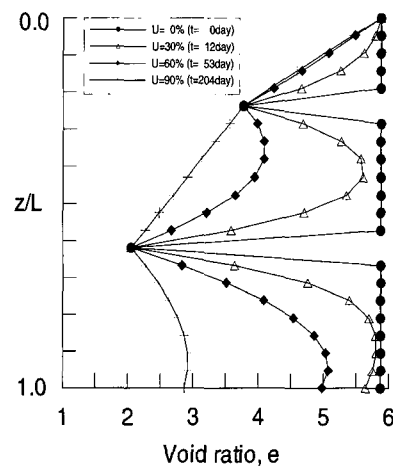


그림 10. 수평배수재 설치시와 자중 압밀시 시간-침하 곡선의 비교



(a) 자중 압밀의 경우



(b) 수평배수공법 적용시

그림 11. 시간에 따른 깊이별 간극비 변화

하여(그림 9) 수평배수재가 2층으로 배치된 경우와, 동일한 지반에서 자중만에 의한 압밀이 진행될 때의 시간-침하 곡선을 그림 10에 나타내었다.

그 결과 수평배수재 설치시 압밀도 90%에 도달하는데 걸리는 시간이 자중 압밀에 비해 대략 9배 단축되는 것으로 나타났으며 또한 최종 침하량에 있어서도 수평배수공법이 적용된 지반에서의 침하량은 자중 압밀의 경우에 비해 약 3배정도 크게 발생하였다. 그림 11에는 자중 압밀의 경우와 수평배수재가 설치된 경우의 $x=0.5m$ 단면에서의 시간에 따른 깊이별 간극비의 변화를 도시하였는데 수평배수공법이 적용된 경우, 간극비가 배수재 근처에서 초기에 현저히 감소되며 점차 주변부에서 간극비가 줄어들지만, 자중압밀의 경우는 지반의 하부로부터 천천히 감소되는 경향을 보였다.

4. 수평배수재의 설계조건 변화에 따른 압밀 촉진효과 분석

수평배수공법을 적용하여 표층을 안정처리 시킬 경우, 수평배수재의 배치 등에 대한 합리적인 설계가 필요하다. 따라서 중력배수시 수평배수재의 설계 조건, 즉 수평배수재의 설치간격, 설치깊이, 설치층수의 변화가 압밀거동에 주는 영향에 대하여 분석하였다.

4.1 초기함수비의 변화

준설패립 지반의 초기 함수비는 준설토의 상태 및 투입 방법 등에 따라 큰 폭으로 변화된다. 표 6은 일본에서 실시된 다양한 준설패립 공사와 현장 실험시의 초기

표 6. 준설매립지반의 초기 함수비 분포

현장	초기함수비(%)
曲滯댐 저질토 준설공사	140 ~ 200
五日시 지반개량 시험 시공	160
大分공항 현장 시험	200 ~ 300
야마구치 지역의 슬러리 처리	500 ~ 600

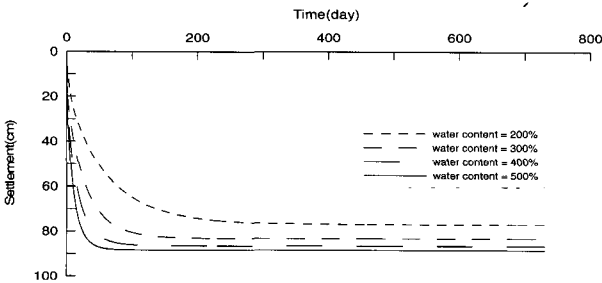


그림 12. 초기 함수비의 변화에 따른 시간-침하 관계

함수비 분포를 보이고 있다.

준설 매립시의 점성토의 초기 함수비가 압밀 거동과 어떤 관계를 갖는지를 파악하기 위하여 수치해석을 실시하였다. 이때 수평배수재는 2m 두께의 지반에 상부로부터 0.5m, 1.5m의 깊이에 설치된 것으로 가정하였고 지반물성치는 표 5의 값을 사용하였다. 초기함수비는 200%~500%로 변화시키며 해석하였다. 그림 12에 보인 것처럼 초기함수비가 500%인 경우는 타 경우에 비해 최종침하량과 압밀속도가 큰 것으로 나타났는데 이는 고함수비일수록 압축성이 크기 때문으로 판단된다.

4.2 횡방향 설치 간격의 영향

배수재 간격의 영향을 분석하기 위하여 지반의 깊이를

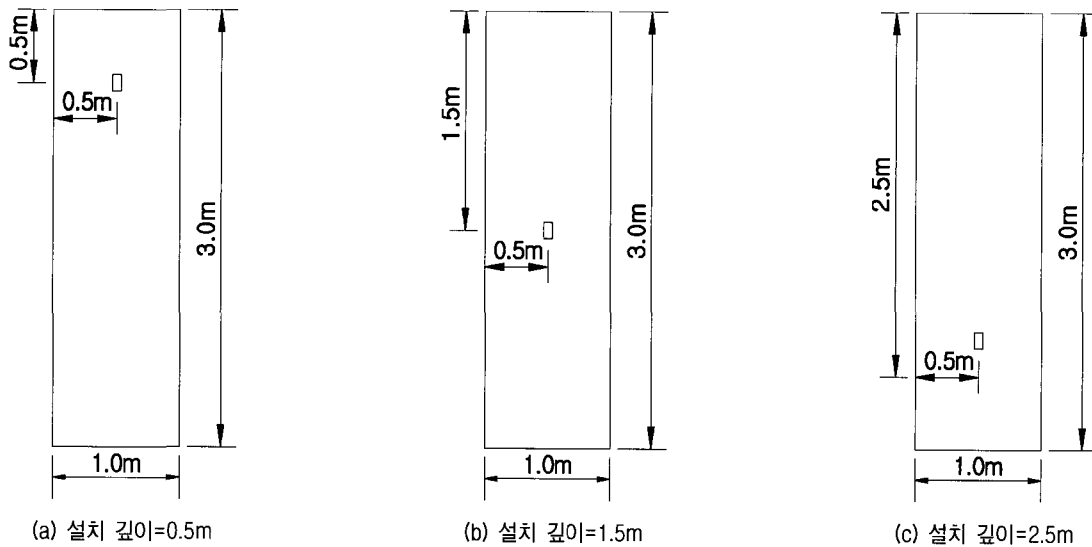


그림 14. 수평배수재의 설치 깊이를 변화시킨 경우의 해석 단면도

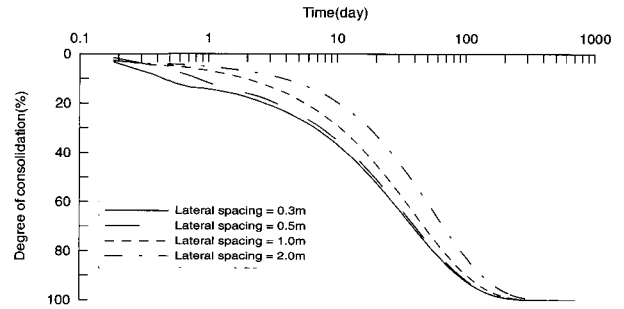


그림 13. 수평배수재의 횡방향 설치 간격에 따른 시간-압밀도 관계

2m로 가정하고, 배수재의 횡방향 설치 간격을 0.3, 0.5, 1.0, 2.0m로 변화시키며 수치해석을 실시하여 그 결과를 그림 13에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 수평배수재의 횡방향 설치 간격이 좁을수록 압밀 촉진 효과가 큰 것으로 나타났다. 특히 배수재 간격이 0.5m인 경우는 간격이 2.0m인 경우에 비해 압밀도 90%에 도달하는데 걸리는 시간이 약 30% 단축되었다. 한편 배수재 간격을 0.5m에서 0.3m로 줄인 경우에는 압밀 촉진 효과가 미미하여 대상지반의 압밀촉진효과를 고려한 최소간격은 0.5m인 것으로 나타났다. 배수재 설계시 이상과 같은 반복계산을 통해서 적절한 배치간격을 산정하는 것이 필요하다.

4.3 설치 깊이의 영향

배수재 설치깊이가 압밀에 미치는 영향을 평가하기 위하여 배수재가 각각 0.5, 1.5, 2.5m 깊이에 설치된 경우(그림 14) 시간-침하량 해석을 실시하였다. 그림 15에는 배수재의 설치 깊이에 따른 중앙단면에서의 간극비

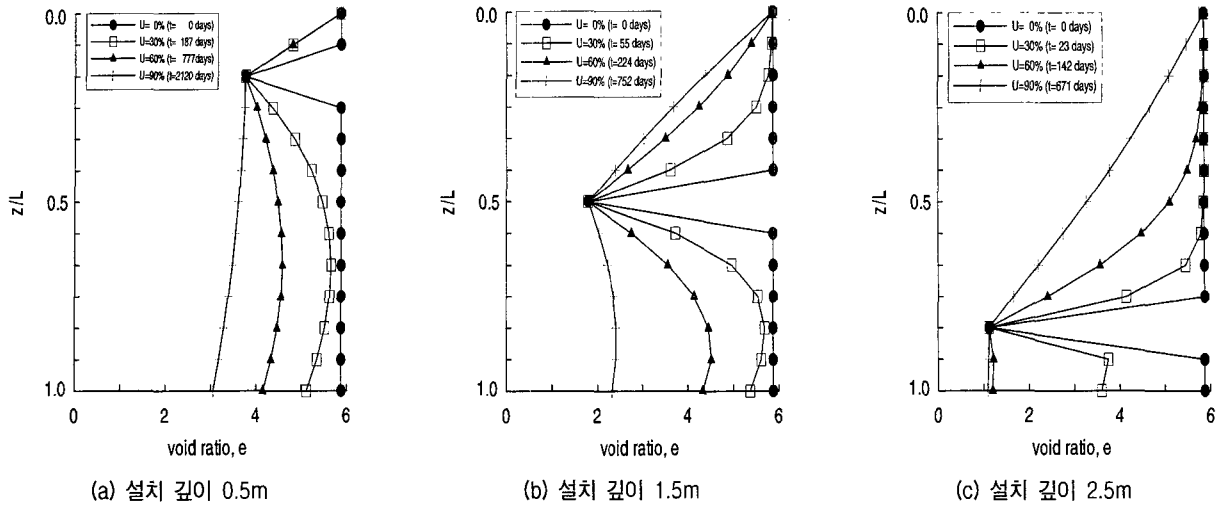


그림 15. 수평배수재 설치 깊이에 따른 지반의 간극비 분포

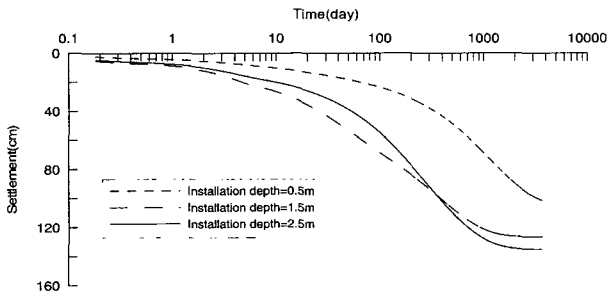


그림 16. 수평배수재의 설치 깊이별 시간-침하량 곡선

변화를 보이고 있는데, 배수재가 하부쪽으로 설치될수록 배수재 부근에서의 간극비가 현저히 감소하였다.

그림 16에는 설치깊이에 따른 시간-침하량 곡선을 나타내었는데, 배수재가 지반의 중간-하부에 매설될 때 소요압밀도에 이르는 시간이 단축되며, 침하량이 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 따라서 중력배수에 의한 수

평배수공법 적용시 수평배수재의 층수가 제한될 때에는 수평배수재를 중간-하부에 설치하는 것이 필요한 것으로 판단되었다.

4.4 설치 층수의 영향

수평배수재가 각각 1층, 2층, 3층으로 설치된 경우에 대해 시간에 따른 압밀거동을 고찰하였는데(그림 17) 그 결과 수평배수재의 설치 층수가 많을수록 침하속도가 빨라지며 최종침하량도 증가하는 것을 알 수 있다(그림 18).

그림 19는 배수재 설치 층수의 변화에 따른, $x = 0.5m$ 에서의 깊이별 간극비 변화를 보인 것인데, 수평배수재가 3층으로 설치된 경우 압밀도 90%에 도달하는데 걸리는 시간은 1층으로 설치된 경우에 비해 약 14배나 빠

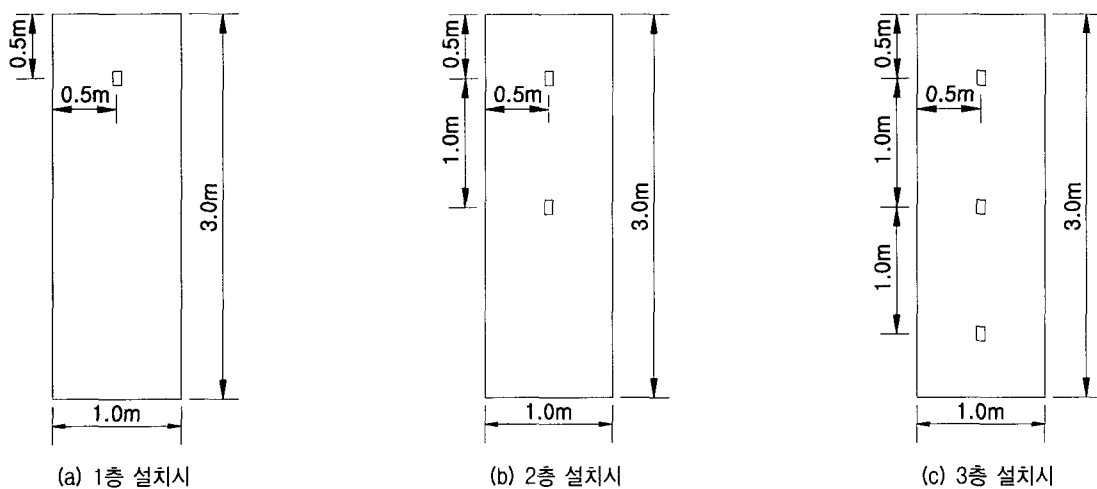


그림 17. 수평배수재 다층 설치시 해석단면도

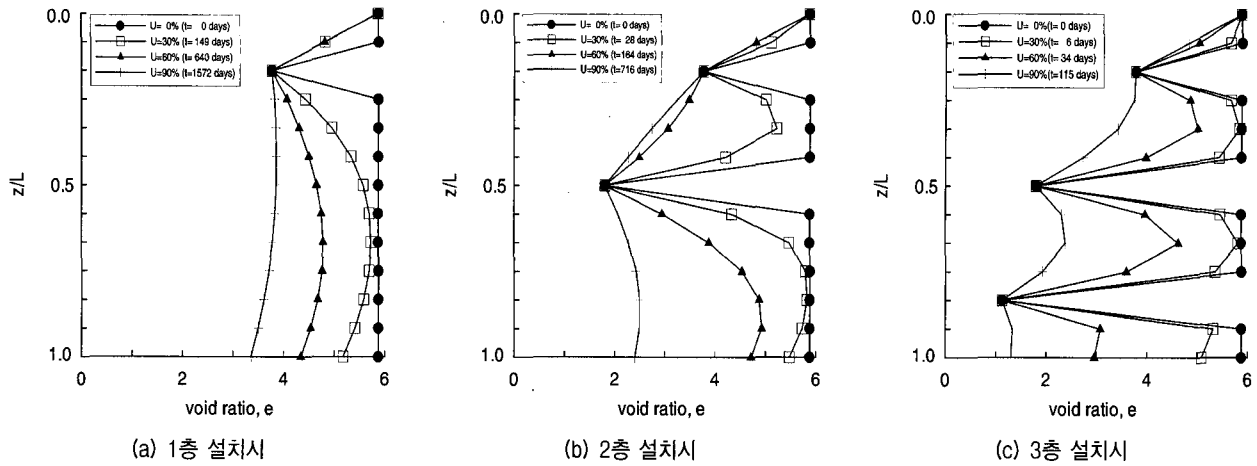


그림 19. 수평배수재 다층으로 설치시의 깊이별 간극비 변화

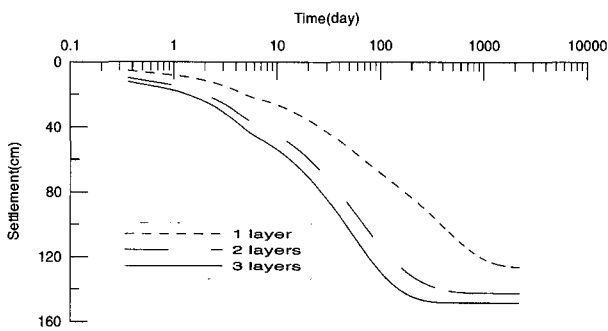


그림 18. 수평배수재 다층 설치시 시간-침하 곡선

른 것으로 나타났다. 따라서 동일한 수의 배수재를 사용하여 표층을 안정처리 시킬 경우 횡방향 설치 간격을 줄이는 것보다는 설치 층수를 증가시키는 것이 더 효과적인 것으로 판단된다.

5. 결론

수평배수재가 설치된 준설패립지반의 압밀 거동을 해석하기 위하여 3차원 유한 변형을 압밀이론을 사용하고, 수평배수재의 투수효과를 고려하기 위한 경계조건을 도입 수평배수공법 해석 프로그램을 개발하여 사용의 타당성을 검토하였다. 무타설지반과 수평배수재 타설지반의 시간-침하량 검토를 통하여 수평배수재의 표층처리 필요성을 알아본 후 수평배수재의 다양한 설치 형태에 따른 압밀 촉진 효과를 분석하였다. 본 연구에서 나타난 결론은 다음과 같다.

(1) 토조시험과 수치해석에서 시간-침하량 변화를 비교한 결과 시험계측결과와 해석결과가 근접하는 것으로

로 나타나 개발된 프로그램이 수평배수재가 설치된 지반의 압밀거동을 잘 모사할 수 있는 것으로 평가되었다.

- (2) 수평배수재를 깊이 210cm의 지반에 2층으로 설치하여 중력 배수시킨 경우 압밀도 90%에 도달하는데 걸리는 시간은 자중압밀에 비하여 약 9배 단축되었고, 최종 침하량은 자중압밀에 비해 약 3배 정도 큰 것으로 나타났다.
- (3) 수평배수재의 횡방향 설치간격과 압밀 촉진 효과와의 관계를 분석한 결과, 배수재 간격이 0.5m인 경우는 간격이 2.0m인 경우에 비해 압밀도 90%에 도달하는데 걸리는 시간이 약 30% 단축되었다. 이는 설치간격이 감소하면 압밀 촉진 효과가 크나 실제 설계시에는 최적 설치간격에 대한 검토가 필요한 것으로 나타났다.
- (4) 수평배수재의 설치 깊이가 0.5m, 1.0m, 1.5m인 경우에 대해 해석한 결과, 배수재가 지반 중간-하부에 설치될 때 소요 압밀도에 이르는 시간이 단축되며, 침하량도 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 하부쪽 배수재에서 보다 더 큰 침투압이 발생하여 압밀촉진 효과를 크게하기 때문으로 분석된다.
- (5) 수평배수재를 3층으로 설치한 경우 압밀도 90%에 도달하는 시간이 1층으로 설치한 경우에 비해 약 14배 빨랐다. 따라서 동일한 수의 배수재를 사용하여 표층을 안정처리할 경우 설치간격을 줄이는 것보다는 설치층수를 증가시키는 것이 더 효과적인 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프린티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술 사업단의 연구비지원(과제번호 : 3-4-2)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 김석열 (1998), 플라스틱 배수재를 이용한 수평배수제에 관한 연구, 홍익대학교 박사학위 논문, 132p.
2. 김형주, 원명수 (1996), “수평배수공법에 의해 개량된 준설점토 지반의 압밀거동에 관한 연구”, *한국지반공학회지*, 제13권, 제1호, pp.137-145.
3. 이송, 강명찬, 김홍석 (2001), “수평진공배수공법이 적용된 준설 매립지반의 압밀해석에 관한 연구”, *한국지반공학회논문집*, 제17권, 제4호, pp.209-220.
4. Gibson, R. E., England, G. L., and Hussey, M. J. L. (1967), “The Theory of One-dimensional Consolidation of Saturated Clay, I. Finite Non-Linear Consolidation of Thin Homogeneous Layers”, *Geotechnique*, Vol.17, No.1, pp.261-273.
5. Gibson, R.E., Schiffman, R.L., and Cargil, K.W. (1981), “The Theory of One-dimensional Consolidation of Saturated Clay, II. Finite Non-Linear Consolidation of Thick Homogeneous Layers”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.18, No.2, pp.280-293.
6. Chung, Y. I. (1993), *Vacuum Consolidation of Highly Compressible Soil with Vertical Wick Drain*, Ph. D. Thesis, South Dakota School of Mines and Technology, Rapid City, South Dakota.
7. Kim, H., Hirokane, S., Yoshikuni, H., Moriwaki, T., and Kusakabe, O. (1995), “Consolidation Behaviour of Dredged Clay Ground Improved by Horizontal Drain Method”, *Proc. of the Int. Symposium on Compression and Consolidation of Clayey Soils*, Hiroshima, Japan, 10~12 May, pp.99-104.
8. Mikasa, M. (1963), *The Consolidation of Soft Clay*, Kajima Institution Publishing Co., Ltd.
9. Xie, Y. L., Pan, Q. Y., and Zeng, G. X. (1995), *Proc. of the Int. Symposium on Compression and Consolidation of Clayey Soils*, Hiroshima, Japan, 10~12 May, pp.485-490.
10. Zhao, 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 2005. 4. 25, 심사완료일 2005. 12. 29)

부록 A. 3차원 유한 변형을 압밀방정식의 유한 차분식

Zhao(1989)는 Gibson의 1차원 유한변형을 압밀방정식을 3차원으로 확장시켜 3차원 유한변형을 압밀방정식을 식 (A1)과 같이 제안하였으며 본연구에서는 수평

배수공법의 자중에 의한 압밀과 배수재 설치로 인한 압밀촉진효과를 모두 고려할 수 있는 지배방정식으로 사용하였다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial e}{\partial t} &= (\gamma_s - \gamma_w) g \lambda \frac{\partial e}{\partial z} + g \frac{\partial^2 e}{\partial z^2} \\ &+ \frac{(1+e_0)}{\gamma_w \lambda} \left[\frac{1}{e-e_\infty} \frac{\partial k(e)}{\partial x} \frac{\partial e}{\partial x} - \frac{k(e)}{(e-e_\infty)^2} \left(\frac{\partial e}{\partial x} \right)^2 + \frac{k(e)}{(e-e_\infty)} \frac{\partial^2 e}{\partial x^2} \right] \\ &+ \frac{(1+e_0)}{\gamma_w \lambda} \left[\frac{1}{e-e_\infty} \frac{\partial k(e)}{\partial y} \frac{\partial e}{\partial y} - \frac{k(e)}{(e-e_\infty)^2} \left(\frac{\partial e}{\partial y} \right)^2 + \frac{k(e)}{(e-e_\infty)} \frac{\partial^2 e}{\partial y^2} \right] \end{aligned} \quad (A1)$$

Dufort-Frankel 방법을 사용하여 식 (A1)을 유한차분화하기 위하여 간극비에 대한 편미분 함수를 차분식으로 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial e}{\partial t} &= (\gamma_s - \gamma_w) g \lambda \frac{\partial e}{\partial z} + g \frac{\partial^2 e}{\partial z^2} \\ &+ \frac{(1+e_0)}{\gamma_w \lambda} \left[\frac{1}{e-e_\infty} \frac{\partial k(e)}{\partial x} \frac{\partial e}{\partial x} - \frac{k(e)}{(e-e_\infty)^2} \left(\frac{\partial e}{\partial x} \right)^2 + \frac{k(e)}{(e-e_\infty)} \frac{\partial^2 e}{\partial x^2} \right] \\ &+ \frac{(1+e_0)}{\gamma_w \lambda} \left[\frac{1}{e-e_\infty} \frac{\partial k(e)}{\partial y} \frac{\partial e}{\partial y} - \frac{k(e)}{(e-e_\infty)^2} \left(\frac{\partial e}{\partial y} \right)^2 + \frac{k(e)}{(e-e_\infty)} \frac{\partial^2 e}{\partial y^2} \right] \end{aligned} \quad (A2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{E^{T+\Delta T}(x_i, y_j, z_k) - E^{T-\Delta T}(x_i, y_j, z_k)}{2\Delta t} \quad (A3)$$

간극비를 각 좌표축으로 미분한 1계 도함수, 2계 도함수를 차분화시키면 다음과 같다.

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{E^T(x_i + \Delta x, y_j, z_k) - E^T(x_i - \Delta x, y_j, z_k)}{2\Delta x} \quad (A4a)$$

$$\frac{\partial E}{\partial y} = \frac{E^T(x_i, y_j + \Delta y, z_k) - E^T(x_i, y_j - \Delta y, z_k)}{2\Delta y} \quad (A4b)$$

$$\frac{\partial E}{\partial z} = \frac{E^T(x_i, y_j, z_k + \Delta z) - E^T(x_i, y_j, z_k - \Delta z)}{2\Delta z} \quad (A4c)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \frac{E^T(x_i + \Delta x, y_j, z_k) - [E^{T+\Delta T}(x_i, y_j, z_k) + E^{T-\Delta T}(x_i, y_j, z_k)] + E^T(x_i - \Delta x, y_j, z_k)}{(\Delta x)^2} \quad (A4d)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial y^2} = \frac{E^T(x_i, y_j + \Delta y, z_k) - [E^{T+\Delta T}(x_i, y_j, z_k) + E^{T-\Delta T}(x_i, y_j, z_k)] + E^T(x_i, y_j - \Delta y, z_k)}{(\Delta y)^2} \quad (A4e)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \frac{E^T(x_i, y_j, z_k + \Delta z) - [E^{T+\Delta T}(x_i, y_j, z_k) + E^{T-\Delta T}(x_i, y_j, z_k)] + E^T(x_i, y_j, z_k - \Delta z)}{(\Delta z)^2} \quad (A4f)$$

투수계수에 대한 편미분을 차분화시키면 다음과 같다.

$$\frac{\partial k}{\partial x} = \frac{k^T(x_i + \Delta x, y_j, z_k) - k^T(x_i - \Delta x, y_j, z_k)}{2\Delta x} \quad (A5a)$$

$$\frac{\partial k}{\partial y} = \frac{k^T(x_i, y_j + \Delta y, z_k) - k^T(x_i, y_j - \Delta y, z_k)}{2\Delta y} \quad (\text{A5b})$$

위의 식 (A2)~식 (A5)의 차분화된 식들을 식 (A1)에 대입하면, 3차원 유한 변형률 압밀방정식에 대한 다음과 같은 유한차분 수치해석식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} E^{T+\Delta T}(x_i, y_j, z_k) = & (1/C_1) \{ C_2 E^{T-\Delta T}(x_i, y_j, z_k) \\ & + C_3 E^T(x_i + \Delta x, y_j, z_k) + C_4 E^T(x_i - \Delta x, y_j, z_k) \\ & + C_5 E^T(x_i, y_j + \Delta y, z_k) + C_6 E^T(x_i, y_j - \Delta y, z_k) \\ & + C_7 E^T(x_i, y_j, z_k + \Delta z) + C_8 E^T(x_i, y_j, z_k - \Delta z) \\ & - C_9 [E^T(x_i + \Delta x, y_j, z_k) - E^T(x_i - \Delta x, y_j, z_k)]^2 \\ & - C_{10} [E^T(x_i, y_j + \Delta y, z_k) - E^T(x_i, y_j - \Delta y, z_k)]^2 \} \quad (\text{A6}) \end{aligned}$$

식 (A6)에 포함된 계수항 $C_1 \sim C_{10}$ 은 다음과 같다.

$$C_1 = \frac{1}{2\Delta t} + \frac{g}{(\Delta z)^2} + P_1 k^T(x_i, y_j, z_k) + P_2 k^T(x_i, y_j, z_k) \quad (\text{A7a})$$

$$C_2 = \frac{1}{2\Delta t} - \frac{g}{(\Delta z)^2} - P_1 k^T(x_i, y_j, z_k) - P_2 k^T(x_i, y_j, z_k) \quad (\text{A7b})$$

$$C_3 = P_1 k^T(x_i, y_j, z_k) + (P_1/4) [k^T(x_i + \Delta x, y_j, z_k) - k^T(x_i - \Delta x, y_j, z_k)] \quad (\text{A7c})$$

$$C_4 = P_1 k^T(x_i, y_j, z_k) - (P_1/4) [k^T(x_i + \Delta x, y_j, z_k) - k^T(x_i - \Delta x, y_j, z_k)] \quad (\text{A7d})$$

$$C_5 = P_2 k^T(x_i, y_j, z_k) + (P_2/4) [k^T(x_i, y_j + \Delta y, z_k) - k^T(x_i, y_j - \Delta y, z_k)] \quad (\text{A7e})$$

$$C_6 = P_2 k^T(x_i, y_j, z_k) - (P_2/4) [k^T(x_i, y_j + \Delta y, z_k) - k^T(x_i, y_j - \Delta y, z_k)] \quad (\text{A7f})$$

$$C_7 = P_5 + \frac{g}{(\Delta z)^2} \quad (\text{A7g})$$

$$C_8 = -P_5 + \frac{g}{(\Delta z)^2} \quad (\text{A7h})$$

$$C_9 = P_3 k^T(x_i, y_j, z_k) \quad (\text{A7i})$$

$$C_{10} = P_4 k^T(x_i, y_j, z_k) \quad (\text{A7j})$$

또한, 식 (A7)중에 포함된 계수 $P_1 \sim P_5$ 는 다음과 같다.

$$P_1 = \frac{1 + E_0}{\gamma_w [E^T(x_i, y_j, z_k) - E_\infty] (\Delta x)^2 \lambda} \quad (\text{A8a})$$

$$P_2 = \frac{1 + E_0}{\gamma_w [E^T(x_i, y_j, z_k) - E_\infty] (\Delta y)^2 \lambda} \quad (\text{A8b})$$

$$P_3 = \frac{1 + E_0}{4\gamma_w [E^T(x_i, y_j, z_k) - E_\infty]^2 (\Delta x)^2 \lambda} \quad (\text{A8c})$$

$$P_4 = \frac{1 + E_0}{4\gamma_w [E^T(x_i, y_j, z_k) - E_\infty]^2 (\Delta y)^2 \lambda} \quad (\text{A8d})$$

$$P_5 = \frac{(\gamma_s - \gamma_w) g \lambda}{2 \Delta z} \quad (\text{A8e})$$