

수평배수재가 설치된 준설패립 점토의 압밀 거동 해석

Analysis of Consolidation Behavior for Dredged Clay with Horizontal Drains

김수삼¹⁾, Soo-Sam Kim, 장연수²⁾, Yeon-Soo Jang, 박정순³⁾, Chung-Soon Park, 오세웅⁴⁾, Se-Woong Oh

¹⁾ 중앙대학교 건설환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng.,
Chung-Ang University

²⁾ 동국대학교 토목환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng.,
Dong-Guk University

³⁾ 동국대학교 토목환경공학과 연구교수, Research Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng.,
Dong-Guk University

⁴⁾ 동국대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Eng.,
Dong-Guk University

SYNOPSIS : The horizontal drain method by installing drains horizontally in the ground is often used to expedite the dispersion of pore water and to increase the strength of dredged soft clay under the action of gravity or vacuum. In this study a numerical analysis method is developed to predict the consolidation process of soft ground with horizontal drains. One-dimensional self-weight consolidation theory is extended to three-dimensional theory with appropriate boundary conditions of horizontal drains. In the condition of pore water drainage by gravity, the behavior of the dredged clay with horizontal drains is compared with that of the clay without drains. The influence of design factors of drains on consolidation process is also analyzed.

Key words : horizontal drain method, dredged clay, consolidation, finite strain theory, drainage by gravity.

1. 서 론

해안 매립공사의 경우 바다에서 용이하게 구할 수 있는 해성점토가 준설패립 재료로 이용되고 있다. 그런데 준설패립토는 고함수비이고 압축성이 크며, 자중압밀 동안에 지반의 강도가 거의 없는 상태이므로 시공기계의 투입은 물론 사람의 보행조차 곤란하다. 수평배수공법은 이러한 초연약 준설패립토의 표층부를 신속하게 안정화시키기 위한 대책공법으로서, 준설패립 토기된 매립지반에 배수재를 수평으로 매설하여 중력 혹은 진공압에 의해 간극수의 소산을 촉진시키며, 지반의 전단강도를 증가시키는 지반 개량 공법이다. 이 공법은 일본의 오야 건설에서 최초로 개발되었으며(渡義治 등, 1985), 일본 大分 공항의 매립지 개량 공사, Kanda 지역의 매립공사, Yamakuchi 지역의 소다 공장 폐수 슬러지 처리등에 적용된 바 있다(新舍博 등, 1987, 1990).

본 연구에서는 수평배수재가 설치된 준설패립 지반의 압밀 거동을 예측하기 위한 수치해석 기법을 개발하였다. 수평배수공법 해석을 위한 압밀방정식은 Zhao(1989)의 이론을 사용하였고, 배수재의 투수 효과를 고려하기 위해 수평배수재에 대한 경계조건을 설정하여 배수재가 설치된 지반의 압밀 거동을 모델

링하였다.

수평배수재의 압밀 촉진 효과를 규명하기 위해 중력배수시, 수평배수재가 타설된 경우와 자중만에 의한 압밀의 경우와 비교, 분석하였다. 또한 수평배수재의 설계조건의 변화, 즉 배수재의 횡방향 타설 간격 및 타설 깊이에 따른 준설 매립토의 압밀 거동을 분석하였다.

2. 수평배수공법 해석

준설매립된 점성토 지반은 배수재가 설치되지 않은 경우, 자중만에 의한 1차원 압밀 침하가 발생하게 된다. 그러나 지반에 수평배수재가 설치된 경우에는 자중 압밀뿐만 아니라, 배수재 부근에서 투수가 3차원적으로 발생되며 압밀 침하를 촉진시키게 된다. 따라서 수평배수재가 설치된 지반의 압밀 거동을 해석하기 위해서는 자중에 의한 압밀과 배수재 설치로 인한 압밀 촉진 효과를 모두 포함할 수 있는 해석 이론이 필요로 되어진다. 본 연구에서는 수평배수공법 해석 이론으로서 Gibson 등(1981)이 제안한 1차원 자중압밀 이론을 3차원으로 확장시킨 Zhao(1989)의 이론을 사용하였으며, 수평배수재에서의 투수로 인한 침투압밀 효과를 반영하기 위해 배수재에 대한 경계조건을 설정하여 수평배수재 해석을 위한 3차원 압밀 지배 방정식을 구성하였다.

2.1 수평배수공법 해석을 위한 3차원 유한 변형률 압밀 이론

압밀이 진행되는 동안 지층의 두께가 변하는 것을 고려하는 3차원 유한변형률 압밀 지배방정식은 다음과 같다.

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

여기서, e : 시간 t 에서의 간극비, e_0 : 토층 깊이별 초기 간극비, e_∞ : 압밀 종료시의 간극비,

z : 축소 좌표계, g : 유한변형률 압밀계수, λ : 선형상수,

v_s : 흡입자의 단위중량, v_w : 물의 단위중량, k : 투수계수

2.2 수평배수공법 해석을 위한 초기 및 경계조건

수평배수재가 설치된 준설매립 지반의 압밀 거동을 해석하기 위해서는 자중에 의해 압밀되기 직전의 지반에 대한 초기조건과 해석단면의 경계부에 대한 경계조건들이 필요하다. 또한 수평배수재 타설에 따른 투수 효과를 고려하기 위해 수평배수재에 대한 경계조건을 설정해야 한다. 그림 1은 준설매립지반에 다층으로 설치된 수평배수재의 개요도를 보인 것이다.

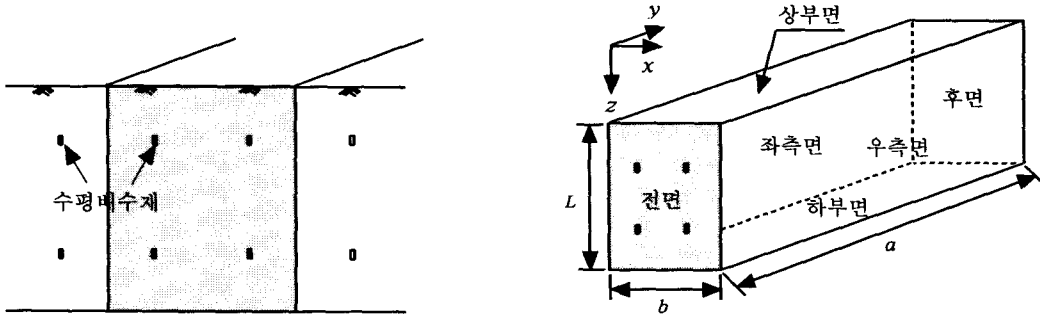
2.2.1 초기조건

준설토의 투기 후 매립지반에서 자중에 의한 압밀이 시작되기 전에 모든 토층은 동일한 간극비를 갖는 것으로 가정하면 전 지층의 초기 간극비는 다음과 같다.

$$e(x,y,z)_{t=0} = e_{00} \quad (2)$$

2.2.2 해석대상 요소의 경계조건

본 수치해석 방법에서는 해석대상 요소를 다수의 드레인이 임의 위치에 설치된 직육면체 형상으로 선택하였다(그림 1(b) 참조). 이때 직육면체의 6개의 면에서의 경계조건이 필요하게 된다.



(a) 수평배수재 설치도

(b) 해석대상 요소

그림 1. 준설패립지반에 설치된 수평배수재 개요도

1) 상부면에서의 간극비

지표면에서는 초기의 간극비가 압밀 종료시까지 동일하게 유지되는 것으로 가정하면, 간극비는 다음과 같다.

$$e(x,y,0) = e_{00} \quad (3)$$

2) 전면, 측면, 후면에서의 간극비

해석대상 요소의 전면, 측면, 후면부에서 투수가 일어나지 않는 것으로 가정하면, 경계조건은 다음과 같다.

$$\textcircled{1} \text{ 전면} : \frac{\partial e(x,0,z)}{\partial y} = 0, \quad \textcircled{2} \text{ 후면} : \frac{\partial e(x,a,z)}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\textcircled{3} \text{ 좌측면} : \frac{\partial e(0,y,z)}{\partial x} = 0, \quad \textcircled{4} \text{ 우측면} : \frac{\partial e(b,y,z)}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

3) 하부면에서의 간극비

해석대상 요소의 하부 경계면을 불투수 조건으로 가정할 경우, 경계조건은 흙과 간극수의 혼합물에서의 평형조건과 수정된 Darcy 법칙을 사용하여 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial e}{\partial z} + \lambda(v_s - v_w)(e - e_{\infty}) = 0 \quad (6)$$

2.2.3 수평배수재에서의 경계조건

중력배수시 수평배수재를 선요소로 설정하고 투수계수가 점토지반에 비해 매우 크다고 가정하면, 배수재와 흙입자 간의 접촉면에 작용하는 유효응력은 전응력과 같게 된다. 그림 1(b)에 보인 바와 같이 해석 단면에 다수의 수평배수재가 설치된 경우의 경계조건은 다음과 같이 간극비에 대한 식으로 나타낼 수 있다.

$$e(x_n, y, z_n) = (e_{00} - e_{\infty}) \exp[-\lambda (v_s + e_{00} \cdot v_w) z_n] + e_{\infty} \quad (7)$$

여기서, x_n, z_n : 수평배수재 각각의 설치 좌표(축소 좌표계)

2.3 수평배수공법 해석을 위한 수치해석

본 수치해석에서는 간극비에 대한 미분방정식을 풀기 위하여 explicit 유한차분법인 Dufort-Frankel 방법을 사용하였다(Hoffman, 1992). 식(1)의 3차원 유한 변형률 압밀 방정식을 유한차분화시키면 다음과 같이 된다(Chung, 1993).

$$\begin{aligned} E^{T+\Delta T}(x_i, y_j, z_k) = & (1/C_1) \{ C_2 E^{T-\Delta T}(x_i, y_j, z_k) \\ & + C_3 E^T(x_i + \Delta x, y_j, z_k) + C_4 E^T(x_i - \Delta x, y_j, z_k) \\ & + C_5 E^T(x_i, y_j + \Delta y, z_k) + C_6 E^T(x_i, y_j - \Delta y, z_k) \\ & + C_7 E^T(x_i, y_j, z_k + \Delta z) + C_8 E^T(x_i, y_j, z_k - \Delta z) \\ & - C_9 [E^T(x_i + \Delta x, y_j, z_k) - E^T(x_i - \Delta x, y_j, z_k)]^2 \\ & - C_{10} [E^T(x_i, y_j + \Delta y, z_k) - E^T(x_i, y_j - \Delta y, z_k)]^2 \} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $C_1 \sim C_{10}$: 유한 차분 계수

식(8)을 사용하여 유한차분 프로그램을 구성하였고, 초기 및 경계조건을 고려하면 시간에 따른 깊이별 간극비 및 침하량, 압밀도 등을 구할 수 있다.

3. 수평배수공법의 압밀 축진 효과 분석

수평배수재에 의한 압밀 축진 효과를 규명하기 위하여, 본 연구에서 개발된 유한차분 프로그램을 사용하여 수치해석을 실시하였다. 해석에 사용된 입력 데이터들은 표 1과 같다.

표 1. 수치해석에 사용된 입력데이터

단위중량 v_s (KN/m ³)	초기 함수비 W_0 (%)	초기 간극비 e_{00}	최종 간극비 e_{∞}	유한변형률 압밀계수 g (m ² /day)	선형상수 λ (m ² /KN)
26.7	220	5.874	0.772	0.01	0.087
투수계수 $k(e) = 0.07e^3 - 0.25e^2 + 0.28e - 0.11$					

3.1 수평배수재가 설치된 경우와 자중 압밀의 경우 비교 분석

수평배수재가 설치된 준설퇴립 지반에 진공압 등 외력이 가해지지 않은 상태에서 중력에 의해서만 배수가 진행될 경우의 배수재에 의한 압밀 촉진 효과를 파악하기 위하여 자중만에 의한 압밀의 경우와 비교하였다.

그림 2에 보인 바와 같이 준설퇴립 지반에 수평배수재가 2층으로 배치된 경우와, 동일한 지반에서 자중만에 의한 압밀이 진행될 때의 시간-침하 곡선을 그림 3에 나타내었다. 수평배수재가 설치된 경우는 압밀도 95%에 도달하는데 걸리는 시간이 자중 압밀에 비해 대략 8배 단축된 것을 볼 수 있다. 또한 최종 침하량에 있어서도 큰 차이를 보이고 있는데, 수평배수 공법이 적용된 지반에서의 침하량은 자중 압밀의 경우에 비해 약 3배나 크게 발생하였다.

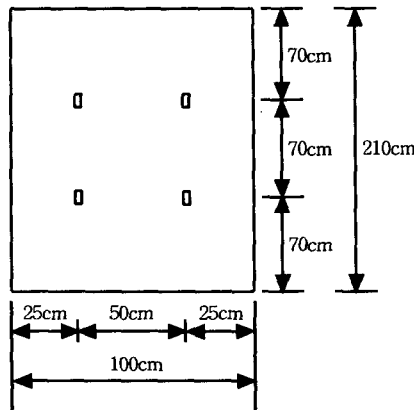


그림 2. 수평배수재 설치 단면도

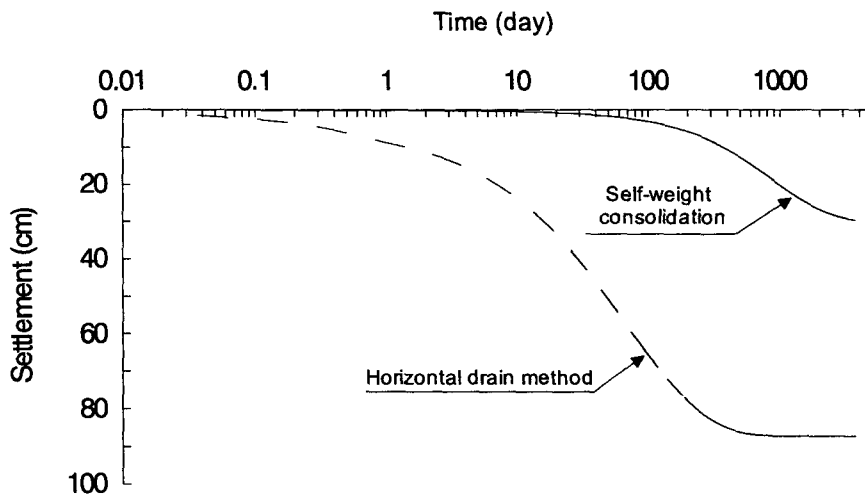


그림 3. 수평배수재가 설치된 경우와 자중 압밀의 경우의 시간-침하 곡선 비교

그림 4에는 자중 압밀의 경우와 수평배수재가 설치된 경우의 시간에 따른 깊이별 간극비의 변화를 보이고 있는데, 횡축은 무차원 축소좌표계를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 수평배수공법이 적용된 경우, 간극비가 배수재 근처에서 초기에 현저히 감소되며 점차 주변부에서 간극비가 줄어들지만, 자중압밀의 경우는 지반의 하부로부터 천천히 감소되는 경향을 볼 수 있다. 따라서 중력배수만에 의한 수

평배수공법 적용시에도 상당한 압밀 촉진 효과 및 간극비 감소에 따른 전단강도 증가 효과를 얻을 수 있는 것으로 평가된다.

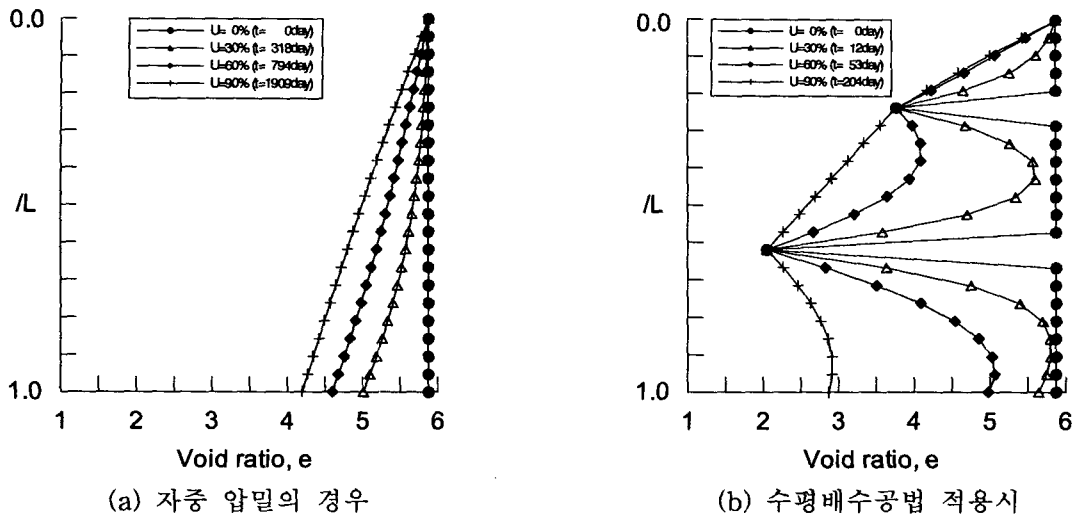


그림 4. 시간에 따른 깊이별 간극비 변화

3.2 수평배수재의 횡방향 타설 간격의 변화가 압밀 거동에 미치는 영향

수평배수재의 타설 간격의 영향을 분석하기 위하여 지반의 깊이를 1m로 가정하고, 배수재 횡방향 설치 폭을 30cm, 50cm, 100cm, 200cm로 변화시키며 수치해석을 실시하였다. 그림 5에는 배수재 타설 간격에 따른 평균 압밀도의 변화를 비교한 것이다. 배수재 간격이 100cm인 경우는 200cm인 경우에 비해 압밀도 95%에 도달하는데 걸리는 시간이 약 40% 단축되어, 수평배수재의 횡방향 설치 간격이 좁을수록 압밀 촉진 효과가 큰 것으로 나타났다. 한편 배수재 간격을 100cm에서 30cm로 줄인 경우에는 압밀 촉진 효과가 그다지 크지 않았는데, 이는 100cm의 간격에서 배수재가 이미 충분한 투수효과를 나타내기 때문인 것으로 분석된다.

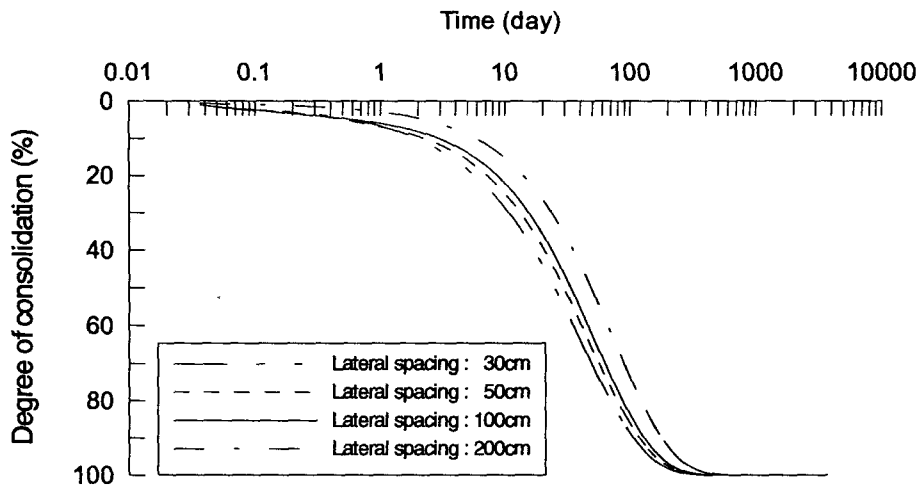


그림 5. 수평배수재의 횡방향 타설 간격에 따른 시간 - 평균압밀도 관계

3.3 수평배수재의 타설 깊이가 압밀 거동에 미치는 영향

수평배수재가 각각 50cm, 100cm, 150cm 깊이에 설치된 경우의 단면도를 그림 6에, 각 경우에 대한 시간 - 침하량 곡선은 그림 7에 나타내었다. 분석 결과 배수재가 지반의 하부쪽으로 매설될수록 소요압밀도에 이르는 시간이 단축되며, 침하량이 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 그림 8에는 배수재의 타설 깊이에 따른 간극비 변화를 보이고 있는데, 배수재가 하부쪽으로 설치될수록 배수재 부근에서의 간극비가 현저히 감소하는데, 이같은 요인이 지반의 침하속도를 가속시키며, 동시에 침하량을 증가시킨 것으로 해석된다. 따라서 중력배수에 의한 수평배수공법 적용시, 개량하고자 하는 지반의 표층부 중에서도 수평배수재를 하부쪽으로 배치하는 것이 효과적인 것으로 평가된다.

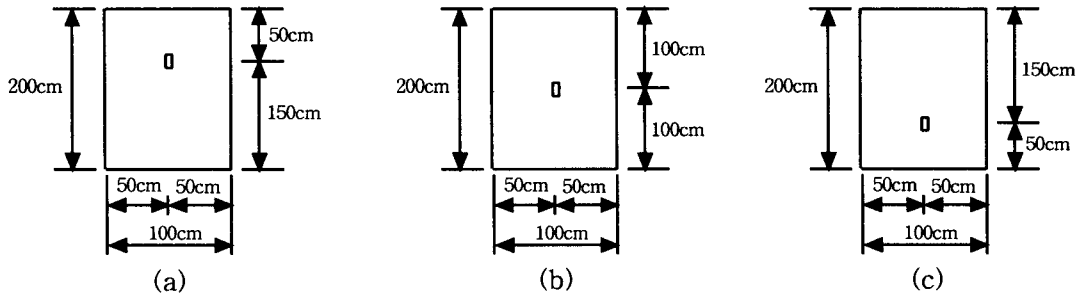


그림 6. 수평배수재 설치 단면도

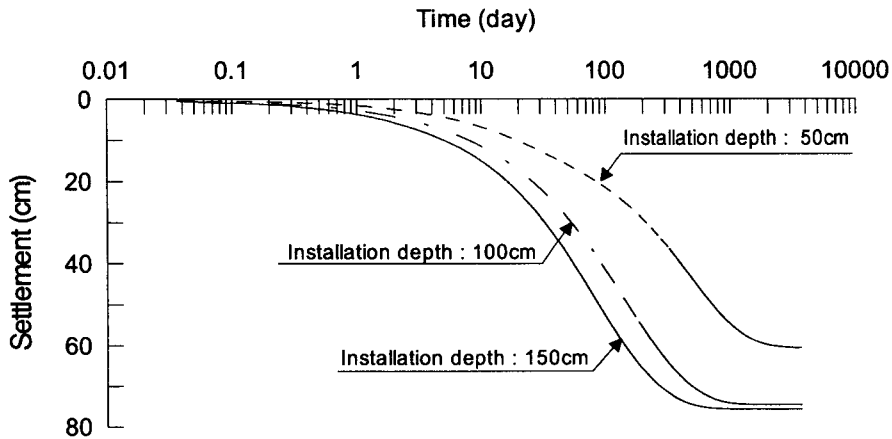


그림 7. 수평배수재의 타설 깊이별 시간-침하량 곡선

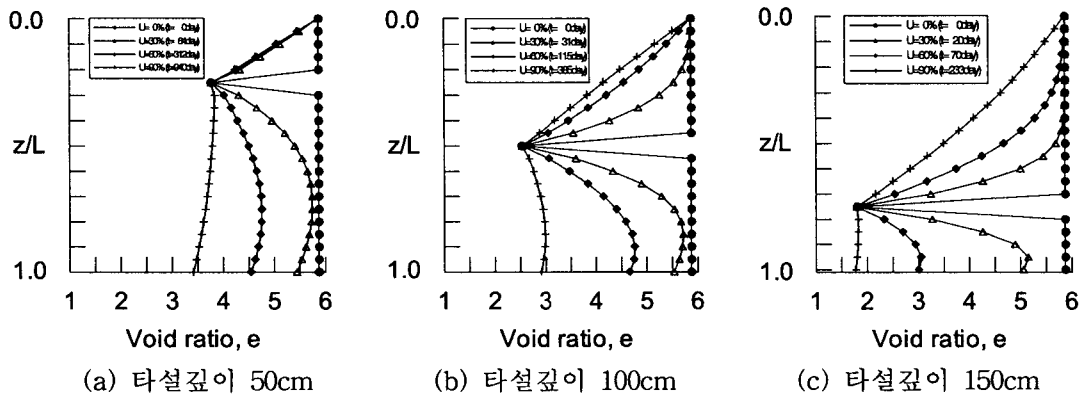


그림 8. 수평배수재 타설 깊이에 따른 지반의 간극비 분포

4. 결론

수평배수재가 설치된 초연약 준설매립 지반의 압밀 거동을 해석하기 위하여 3차원 유한 변형을 압밀 이론을 사용하고, 수평배수재의 투수효과를 고려하기 위한 경계조건을 도입함으로써 수평배수공법 해석 기법을 개발하였으며, 수평배수재의 압밀 촉진 효과를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 중력배수시, 수평배수재가 깊이 210cm의 지반에 2층으로 설치된 경우 압밀도 95%에 도달하는데 걸리는 시간은 자중압밀에 비해 약 8배 단축되었다. 그 이유는 간극수압이 상부 지표면으로 배수될 뿐만 아니라, 수평배수재의 타설로 인해 배수재에서 3차원적으로 신속히 소산되기 때문인 것으로 해석된다.
2. 수평배수재 설치시 침하량은 자중만에 의한 침하량에 비해 약 3배 정도 큰 것으로 나타났다. 이는 수평배수재 설치로 인한 배수재에서의 간극수압의 소산이 유효응력의 증가를 유발시켰고, 결과적으로 전체 침하량의 증가를 가져온 것으로 평가된다.
3. 수평배수재의 횡방향 타설 간격과 압밀 촉진 효과와의 관계를 분석한 결과, 배수재 간격이 100cm인 경우는 간격이 200cm인 경우에 비해 압밀도 95%에 도달하는데 걸리는 시간이 약 40% 단축되었으며, 따라서 타설간격이 감소할수록 압밀 촉진 효과가 큰 것으로 나타났다.
4. 수평배수재의 타설 깊이가 50cm, 100cm, 150cm인 경우에 대해 해석한 결과, 배수재가 지반의 하부쪽으로 설치될수록 소요압밀도에 이르는 시간이 단축되며, 침하량도 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 하부쪽의 배수재에서 보다 더 큰 침투압이 발생하여 압밀 촉진 효과를 주도하기 때문인 것으로 분석된다. 그러므로 중력배수에 의한 수평배수공법 적용시, 개량하고자 하는 지반의 표층부 중에서도 수평배수재를 하부쪽으로 설치하는 것이 효과적인 설계 방법으로 평가된다.

5. 참고문헌

1. 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.
2. 新舍博, 林健太郎, 渡義治(1987), “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2)-長大ドレーンのウェルレジスタンスの評価-”, 土質工學研究發表會講演集, 第22回, pp. 1785-1788.
3. 新舍博, 高野泰, 谷雄一, 嵐義文(1990), “水平ドレーン壓密工法による廢滓軟弱地盤の改良”, 土質工學研究發表會講演集, 第25回, pp. 1865-1868.
4. 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.
5. 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.
6. Hoffman, J. D.(1992), Numerical Methods for Engineers and Scientists, McGraw Hill, New York.
7. 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.