

성토재 아래의 연약지반에 설치된 연직배수재의 수치모델링

Numerical Modelling of Vertical Drains Installed
in Soft Deposit under Embankment

이 승 래*¹

Lee, Seung-Rae

김 윤 태*²

Kim, Yun-Tae

Abstract

The in-situ consolidation behavior of drainage system-installed deposits has three dimensional characteristics. Therefore, for an approximate 2-D plane strain consolidation analysis, it is necessary to convert the 3-D spatial flow of actual cases into the laminar flow simulated by the 2-D plane strain model.

In this paper, in order to properly model the effect of three dimensional characteristics, an equivalent and efficient model has been applied in a finite element technique for the analysis of the drainage system-installed soil deposits. The equivalent two-dimensional model involves equivalent permeabilities and drainage widths.

To validate the equivalent two dimensional model, three-dimensional analyses were performed by using the ABAQUS program and the results of 3-D analyses were compared with those of the 2-D analyses. By using the proposed equivalent model, one may be able to appropriately predict the consolidation behavior of drainage system-installed soft deposits.

요 지

배수재가 설치된 연약지반의 현장거동은 3차원적인 특성을 나타낸다. 그러므로 보다 효율적인 2차원 평면변형률 수치모델을 이용하여 적절하게 해석하기 위해서는 현장지반의 3차원적인 흐름특성을 평면변형률 모델의 층류흐름으로 전환할 필요성이 있다.

본 논문에서는 배수재가 설치된 연약지반의 3차원적인 거동특성을 고려하기 위하여 등가의 효과적인 모델방법이 유한요소법에 적용되었다. 2차원 등가모델은 등가투수계수와 배수재의 강성도를 고려한 등가폭을 가진다. 제안된 등가모델을 검증하기 위하여 ABAQUS 프로그램을 이용

*¹ 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수

*² 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

한 3차원 압밀해석을 수행하였으며, 3차원 해석결과와 2차원 해석 결과를 비교하였다. 제안된 등가모델을 적용한 2차원 평면변형률 수치해석방법은 현장지반의 3차원적인 거동특성을 비교적 정확히 예측할 수 있다.

Keywords : Consolidation, Equivalent Model, Vertical Drain, Embankment, Soft Deposit

1. 서론

전단강도가 매우 약하고 압축성이 큰 연약지반을 활용하고자 하는 경우에 대두되는 가장 중요한 지반공학적인 문제점은 구조물에 대한 안정성(stability)과 시간의존적인 압밀침하(time-dependent consolidation)이다. 이러한 연약지반을 활용하고자 하는 경우에는 가장 효과적이며 경제적인 방법으로 개량할 필요성이 있다. 일반적으로 연약지반의 투수계수는 매우 작으므로 연약지반층이 매우 두터운 경우에는 요구되는 압밀도에 이르기 위한 압밀시간이 매우 오래 소요된다. 따라서 연약지반층에 연직배수재(vertical drain)를 설치하여 배수거리를 인위적으로 짧게 함으로써 압밀침하를 촉진시키고, 연약지반의 전단강도 증가를 촉진시키기 위하여 각종 성토공법을 병행한 배수공법이 적용되어 왔다.

배수재가 설치된 연약지반의 압밀해석은 Barron(1948), Hansbo(1981) 등이 제안한 해석적인 방법을 사용하거나, 2차원 수치해석적인 방법(Shinsha 등, 1982; Cheung 등, 1991; Chai 등, 1993; Bergado 등, 1994)을 사용하여 얻을 수가 있다. 해석적인 방법은 하나의 배수재를 중심으로 하는 실린더 지반을 등변형률(equal strain)과 자유변형률(free strain) 상태로 가정하여 압밀도를 구하는 방법이다. 그러나 이들 제안식에서는 압밀이 균질한 지반(uniform soil)에서 하나의 배수재를 중심으로 선형압밀이론에 근거해서 일어난다고 가정하였고, 연직방향의 배수효과는 무시하고 반경방향의 배수효과만을 고려하였으며, 횡방향 변형(lateral displacement)을 무시하였다. 따라서

해석적인 제안방법들을 비선형 거동효과가 큰 연약지반에 적용하기에는 한계가 있다. 또한 횡방향 변위가 거의 유발되지 않은 성토재(embankment)의 중심부에서는 어느정도 일치하는 결과를 얻을 수가 있으나, 성토재 끝단 부분과 같이 횡방향 변형이 크게 유발되는 경우에는 위의 해석적인 제안방법들을 적용하기에 어려움이 있다.

한편 유한요소법 및 유한차분법 등과 같은 수치해석기법을 이용하여 연약지반의 압밀을 해석하는 경우에는 연약지반의 비선형성과 배수재의 강성도등을 적절히 고려할 수 있고 층으로 이루어진 비균질한 연약지반에도 적용할 수 있는 장점이 있으나, 배수재가 설치된 현장 연약지반의 거동은 3차원적인 배수(3-D spatial flow) 및 압밀거동특성을 가지므로 이를 고려할 수 있어야 한다. 배수재가 설치된 현장지반의 3차원적인 배수 및 거동특성을 비교적 정확히 해석하기 위해서는 실제의 해석대상지반을 3차원 유한요소망으로 구성하여 해석할 수 있다. 그러나 광범위한 해석영역을 3차원 유한요소망으로 모델하여 해석하기 위해서는 많은 시간과 노력이 필요하다. 따라서 배수재가 설치된 현장지반의 3차원적인 실제의 거동특성을 2차원화하여 평면변형률(plane strain) 상태로 해석할 수 있는 등가의 해석모델에 대한 연구가 진행되어 왔다.

Shinsha 등(1982)과 Cheung 등(1991)이 제안한 기존의 등가압밀해석 방법에서는 실제 대상지반의 반경방향 흐름을 평면방향 흐름으로 가정하였을 때 유발되는 오차를 줄여주기 위하여, 원지반을 하나의 원통형 지반으로 고려한 후 원지반과 모델된 지반의 50% 압밀도를 임

의의 시간에 대하여 동일하게 산정할 수 있는 등가의 투수계수가 제안되었다. 반면 Bergado 등(1994)은 원지반에서의 유출량과 2차원 모델지반의 유출량을 임의의 시간에 대하여 동일하게 산정할 수 있는 방법을 제안하였으며, 교란효과(smear effect)도 고려한 등가의 투수계수를 제안하였다. 또한 Hird 등(1995)은 현장에 설치된 배수재의 효과를 고려하기 위하여 하나의 배수재에 대한 축대칭 원통형 지반의 거동특성이 3차원 현장지반의 거동을 대표한다고 가정하여, 축대칭과 평면변형상태를 각각 포함하는 하나의 단위지반(unit cell)에서 비교적 간단한 이론을 적용하여 배수재의 간격과 지반의 투수계수값을 산정할 수 있는 방법을 제안하였다. 그러나 하나의 단위실린더 지반에서 횡방향의 변위는 없다고 가정하였다.

그러나 위와같은 방법으로 제안된 등가의 투수계수를 이용하는 경우에는 임의의 한 시간에 대한 압밀도 또는 침하량은 어느정도 예측이 가능하지만 전체 압밀과정에서의 거동을 적절히 예측하지 못하는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 임의의 시간에서 원지반의 압밀도와 모델된 지반의 압밀도를 같게 산정할 뿐 아니라, 또 다른 임의의 시간에서 원지반의 압밀속도와 모델된 지반의 압밀속도를 동시에 같게 산정할 수 있는 방법을 모색하였다. 또한 AB-AQUS 프로그램(1993)을 사용하여 배수재가 설치된 연약지반의 3차원 거동특성과 제안된 등가모델을 적용하여 평면변형률로 해석한 거동특성을 비교하여 제안된 등가모델을 검증하였다.

2. 제안된 등가모델

2.1 등가의 투수계수

본 논문에서는 모래배수재(sand drain)가 설치된 연약지반의 3차원적인 거동특성을 2차원화된 지반에서 적절히 모사(simulation)하기 위하여 임의의 시간에서 원지반의 압밀도와 평면변형률로 모델된 지반의 압밀도를 같게 산

정할 뿐 아니라, 또 다른 임의의 시간에서 원지반의 압밀속도와 모델된 지반에서의 압밀속도를 동시에 같게 산정할 수 있는 방법을 모색하였다.

그림 1은 배수재가 설치된 현장지반에서 이상화된 원통형 지반을 단위폭의 층류흐름이 일어나는 지반으로 모델화하는 것을 보여준다. 원지반을 배수재의 간격에 비례하는 등가지름을 가지는 원통형 지반으로 이상화하여 생각할 때 그림 1(a)의 배수재를 통하여 빠져나가는 유출량과 그림 1(b)의 배수재를 통하여 빠져나가는 유출량을 같게 함으로써, 즉 원통형 지반의 압밀속도와 모델된 지반의 압밀속도를 같다고 가정하여 등가의 투수계수를 구할 수 있다. 다음 식 (1)은 원통형으로 이상화된 지반의 배수재를 통해 배수되는 유출량이고, 식 (2)는 2차원 평면변형률로 모델된 지반의 배수재를 통하여 배수되는 유출량을 나타낸다.

$$dQ = \frac{1}{s} \pi d_v k \frac{2A h}{d} dzdt \quad (1)$$

$$dQ' = 2k' \frac{A h}{L} dzdt \quad (2)$$

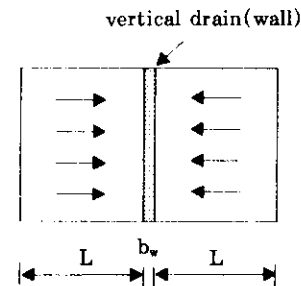
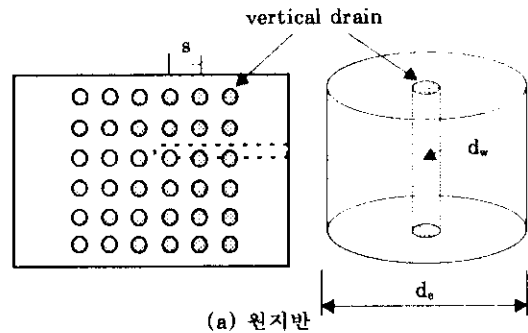


그림 1. 실제 지반의 등가 모델화

여기서, s 는 배수재의 설치간격, L 은 평면변형률 지반에서 배수거리, d_e 는 배수재의 직경, d_w 는 배수재의 등가영향구역(influence zone)의 직경이다. 만약 paper drain 공법과 같이 band type의 단면($a \times b$)을 가지는 배수재의 경우, Hansbo(1981)에 의해 제안된 배수재의 등가직경은 $d_w = 2(a+b)/\pi$ 이다. 배수재가 삼각형 형태(triangular pattern)로 설치되면 $d_w = 1.05s$ 이고 사각형 형태(square pattern)로 설치되면 $d_w = 1.13s$ 이다. k 와 k' 는 현장지반과 평면변형률 지반에서의 수평방향 투수계수를 각각 나타낸다.

위의 두 식으로부터 평면변형률로 모델된 지반과 원통형 지반의 배수량이 같을 때의 등가의 투수계수 k' 를 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$k' = \frac{\pi d_w L}{s d_e} k \quad (3)$$

또한 3차원 흐름을 갖는 원통형 지반의 50% 압밀도와 모델된 지반의 50% 압밀도를 나타내는 시간계수는 각각 다음 식들로 표현될 수 있다.

$$t_{50} = \frac{d_e^2}{k} T_{h50} \gamma_w m_v \quad (4)$$

$$t_{50} = \frac{L^2}{k_h} T_{h50} \gamma_w m_v \quad (5)$$

여기서, $T_{h50} = 0.197$ 은 평면변형률 지반에서의 시간계수이고, T_{h50} 는 대응하는 반경방향(radial flow)의 흐름에 대한 시간계수를 나타낸다. 이들 식으로부터 원통형 지반의 50% 압밀도와 모델된 지반의 50% 압밀도를 같게 해줄 수 있는 등가의 투수계수 k'_h 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$k_b = \left(\frac{L}{d_e} \right)^2 \frac{T_{h50}}{T_{h50}} k \quad (6)$$

식 (6)의 유도과정과 마찬가지로 원통형 지반의 90% 압밀도와 모델된 지반의 90% 압밀도를 같게 해 줄 수 있는 등가의 투수계수 k_{h90} 을 구할 수 있고, 이를 식으로 표현하면 다음 식 (7)과 같다.

$$k_{h90} = \left(\frac{L}{d_e} \right)^2 \frac{T_{h90}}{T_{h90}} k \quad (7)$$

여기서, $T_{h90} = 0.848$ 은 평면변형률 지반에서의 시간계수이고, T_{h90} 는 대응하는 반경방향의 흐름에 대한 시간계수이다.

등변형률(equal vertical strain)인 경우에 반경방향(radial flow)에 대한 Barron(1948) 또는 Hansbo(1981)의 해석적인 해(analytical solution)로부터 식 (8)과 같은 평균압밀도를 구할 수 있다.

$$U_r = 1 - \exp\left(\frac{-8T_b}{\mu}\right) \quad (8)$$

여기서 μ 는 $n = d_e/d_w$, 교란효과, 또는 현장의 교란영역 및 원지반의 투수계수, 배수재의 통수능력(q_w) 등의 값들로부터 구할 수 있는 상수값이다. 만약 등변형률 지반에서 교란효과 및 배수정(well resistance) 효과가 없다고 가정하면 $\mu = n^2 \ln n / (n^2 - 1) - (3n^2 - 1) / (4n^2)$ 로부터 구할 수 있다. 위의 식(8)로부터 반경방향의 흐름에 대한 시간계수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_b = \frac{-\mu}{8} \ln(1 - U_r) \quad (9)$$

식 (9)를 식 (6)과 (7)에 각각 대입하면, 50% 및 90% 압밀도에 이르는 시간계수에 대한 등가조건이 적용된 등가투수계수를 식 (10)과 같이 표현할 수도 있다.

$$k'_b = \left(\frac{L}{d_c}\right)^2 \frac{0.197}{-\frac{\mu}{8} \ln 0.5} k \quad (10a)$$

$$k_{b90} = \left(\frac{L}{d_c}\right)^2 \frac{0.848}{-\frac{\mu}{8} \ln 0.1} k \quad (10b)$$

식 (3)과 식 (6)에서 원지반의 투수계수(k)는 같기 때문에 등가의 투수계수 k_b 는 다음 식 (11)과 같이 표현될 수 있다.

$$k'_b = \left(\frac{L}{d_c}\right)^2 \frac{T_{h50}}{T_{h50}} \frac{sd_c}{\pi d_w L} k' \quad (11)$$

뿐만아니라, 90% 압밀도를 갖게 해주는 투수계수와 유출량을 갖게 해주는 투수계수가 같다고 가정하면, 다음 식 (12)와 같이 원지반과 2차원 평면변형률로 모델된 지반의 유출량에 대한 등가조건과 50% 압밀도 및 90% 압밀도의 등가조건을 동시에 만족할 수 있는 등가의 투수계수를 구할 수 있다.

$$k_b = \left(\frac{L}{d_c}\right)^3 \frac{T_{h50}}{T_{h50}} \frac{T_{h90}}{T_{h90}} \frac{S}{\pi d_w} k \quad (12)$$

2. 배수재의 강성도 고려

성토하중에 의해 유발되는 배수재의 변위는 배수재의 강성도(stiffness)에만 비례하고, 3차원 해석에서 얻어지는 배수재의 침하량(A_{3D})과 2차원 평면변형 해석에서 얻어지는 배수재의 침하량(A_{2D})이 같다고 가정하면 다음 식 (13)을 구할 수가 있다.

$$\frac{A_{3D}}{\kappa_{3D}^S} = \frac{A_{2D}}{\kappa_{2D}} \quad (13)$$

여기서 A와 κ 는 각각 배수재의 단면적과 Cam-clay 모델계수를 나타낸다. κ 는 탄성체적계수(elastic bulk modulus, K)의 역수에 비례한다. 또한 아래첨자 3D와 2D는 각각 현장지반과 평면변형률 모델지반을 나타낸다. 이때

$\kappa_{3D} = \kappa_{2D}$ 로 가정하면 배수재의 강성도를 고려하기 위한 2차원 해석에 사용되는 배수재의 폭 b_w 는 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$b_w = \pi d_w^2 / (4s) \quad (14)$$

3. ABAQUS 프로그램

본 논문에서는 제안된 등가모델을 검증하기 위하여 3차원 압밀해석이 가능한 ABAQUS 프로그램(1993)을 이용하였다. 해석된 결과를 바탕으로 보다 적절한 2차원 등가모델을 개발하고자 하였으며 현장지반에의 적용성을 검토하였다.

ABAQUS 프로그램은 정역학, 동력학 및 파괴해석 등 여러 가지 문제에 대한 적용이 가능하고, 해석대상의 거동을 표현할 수 있는 다양한 구성모델을 제공하고 있다. ABAQUS에서는 흙입자에 의한 유효응력과 간극수에 의한 내부응력이 경계에 가해지는 외부응력에 의해 평형을 이룬다는 개념 하에 평형식을 유도하였다. 또한 질량보존의 법칙으로부터 유도된 연속방정식에 Darcy 법칙이 적용되었으며 평형식과 연속식이 서로 연관(couple)된 비선형 모델을 Newton 방법 등으로 해석을 수행한다.

4. 3차원 압밀해석과 원통형 실린더 지반의 축대칭 압밀해석

Hird 등(1995)은 배수재가 설치된 현장지반의 3차원적인 거동을 간단히 평면변형상태의 2차원 압밀해석으로부터 구하기 위하여 하나의 배수재를 중심으로 한 원통형 실린더 지반이 3차원 현장지반의 거동을 대표한다고 가정하였다. 이로부터 그는 원통형 지반의 축대칭 압밀해석과 하나의 배수재에 대한 평면변형률 해석 결과를 동일하게 산정할 수 있도록 평면변형률 모델지반의 배수재의 배수거리와 투수계수값을 구할 수 있는 matching 이론을 제안하였다.

현장지반의 3차원적인 거동과 하나의 배수

재를 중심으로 한 축대칭 거동을 비교하기 위하여 그림 2 및 3과 같은 유한요소망을 작성하였다. ABAQUS 프로그램을 사용하여 3차원 압밀해석을 수행하기 위한 배수재가 설치된 연약지반의 3차원 유한요소망은 그림 2와 같다. 3차원 해석에 사용된 요소는 변위에 대한 20절점, 간극수압에 대한 8절점의 육면체 요소가 648개로서 사용된 총 절점수는 3632개이다. 배수재가 설치된 연약지반의 깊이는 15m이고 배수재의 설치간격은 3.5m로 그림 1(a)와 같이 사각형 형태로 설치되었다고 가정하였다. 경계조건은 그림과 같이 성토재 중심부와 40m 떨어진 우측부에서 수평변위를 구속하였고, 하부단면의 수직변위를 구속하였다. 배수는 상부표면과 배수재를 통해 유발되고 상부표면의 과잉간극수압은 영이라고 가정하였다.

하나의 배수재를 중심으로 한 원통형 실린더 지반의 축대칭 압밀해석을 수행하기 위하여 그림 3과 같은 유한요소망을 작성하였다. 해석에 사용된 요소는 변위에 대한 8절점, 간극수압에 대한 4절점의 축대칭 요소가 24개로서 사용된 총 절점수는 95개이다. 연약지반의 깊이는 15m이고, 사각형 형태로 배수재가 설치된 지반에서 하나의 배수재가 영향을 미칠 수 있는 영향구역(influence zone)의 직경은 $d_e = 1.13s$ 이므로 3.955m이다. 축대칭 압밀해석에 대한 경계조건은 그림과 같이 배수재의 중심부에서는 대칭에 의해 수평변위를 구속하고, 등가영향구역의 우측부에서도 수평변위를 구속하여 횡방향의 변위는 무시하였다. 또 하부단면의 수직변위를 구속하였으며 배수는 상부표면과 배수재를 통해 유발되고 상부표면의 과잉간극

수압은 영이라고 가정하였다. 이와같은 경계조건은 Hird 등(1995)이 해석한 축대칭 압밀해석의 경계조건과 동일하다.

연약지반의 비선형 압밀거동을 모델하기 위하여 수정 Cam-clay 모델(Roscoe와 Burland, 1968)을 사용하였고, 3차원 및 축대칭 압밀해석을 위한 모델계수는 표 1에 주어진 것과 같이 동일한 물성치를 각각 사용하였다. 연약지

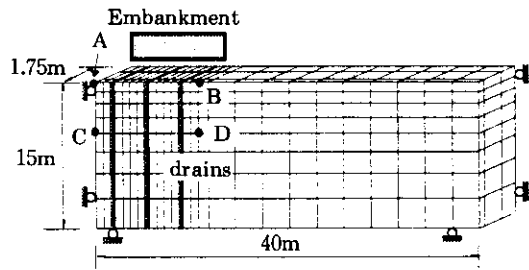


그림 2. 3차원 압밀해석을 위한 유한요소망

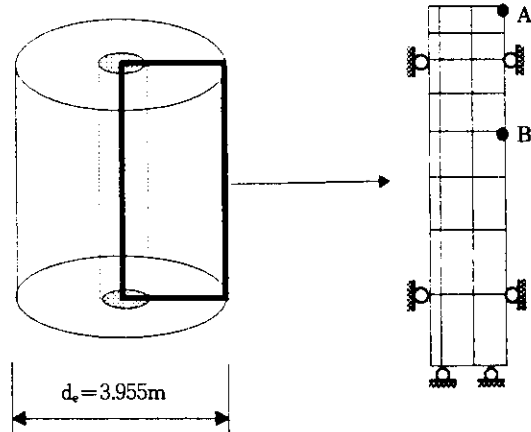


그림 3. 축대칭 압밀해석을 위한 유한요소망

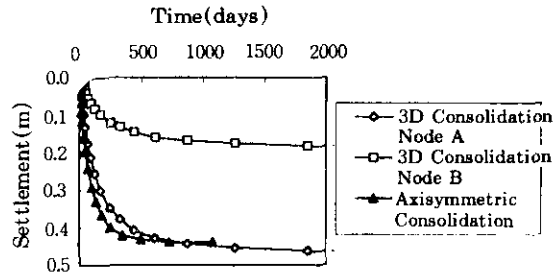
표 1. 수정 Cam-clay 모델계수값

Soil Type	Soil Parameters		
		Case I	Case II
Clay	$\lambda = 0.174, \kappa = 0.026, M = 1.2,$ $\nu = 0.3, \Gamma = 1.65$	$k_h = 5.84 \times 10^{-5} \text{ m/day}$ $k_v = k_h / 2$	$k_h = 5.84 \times 10^{-5} \text{ m/day}$ $k_v = k_h / 2$
Vertical Drains	$\lambda = 0.100, \kappa = 0.026, M = 2.5,$ $\nu = 0.3, \Gamma = 1.65$	$k_h = 5.84 \times 10^{-1} \text{ m/day}$ $k_v = k_h$	$k_h = 5.84 \times 10^{-3} \text{ m/day}$ $k_v = k_h$

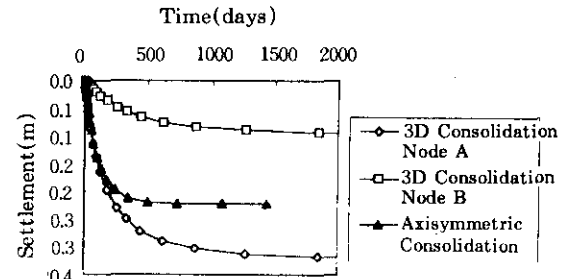
반의 수직방향의 투수계수(k_v)는 수평방향의 투수계수(k_h)의 반이고, 연직배수재의 투수계수값은 등방성이라고 가정하였다. 표 1에서 연직배수재의 투수계수값은 모래 배수재의 경우 clean sand의 투수계수값이 10^{-3} cm/sec정도가 되므로(Yoshikuni and Nakanoko, 1974; Hansbo, 1981), 이것과 비슷하다고 가정하였다 (Case I). Case II의 투수계수값은 배수정 효과(well resistance effect), (filter) clogging등의 영향으로 인하여 배수재의 통수능력이 다소 떨어진다고 가정하여 Case II와 같이 가정하였다.

축대칭 압밀거동이 3차원 압밀거동을 대표할 수 있는지를 살펴보기 위하여 동일한 지반정수값에 대한 3차원 및 축대칭의 지표면 침하량과 깊이 5.2m에서의 침하량 및 간극수압의 시간에 대한 소산과정을 각각 비교하였다. 그림 4(a)에서는 시간에 대한 지표면 침하량의 변화를 나타내고 있다. 성토재가 설치되는 중심부분(그림 2의 A절점)의 침하량과 축대칭 압밀해석(그림 3의 A절점)의 지표면 침하량은 매우 잘 일치하는 경향을 주지만, 성토재의 끝단부분(그림 2의 B절점)의 지표면 침하량은 성토재의 중심부분에 비해 상당히 적게 유발된다. 따라서 축대칭 해석을 사용하여 지표면의 침하량을 구할 경우 성토재 끝단부분에서는 실제의 침하량을 과대 평가하는 경향을 얻을 수가 있다. 지표면으로부터 깊이 5.2m에서 유발되는 침하량은 그림 4(b)에 나타난 것과 같이 축대칭 압밀해석(그림 3의 B절점)에서 얻은 침하량은 성토재 중심아래(그림 2의 C절점)의 침하량을 과소 평가하나, 성토재 끝단부분(그림 2의 D절점)의 침하량은 과대 평가한다.

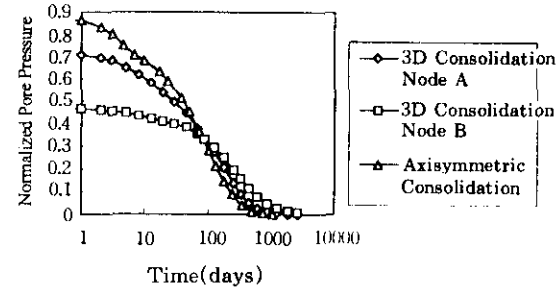
그림 4(c)는 깊이 5.2m에서 시간에 대한 과잉간극수압의 소산과정을 나타낸다. 축대칭 해석에서는 성토재 중심보다 1.3배정도, 성토재 끝단보다 2배정도 큰 초기 과잉간극수압이 유발된다. 또한 3차원 압밀해석의 결과로부터 성토재 중심부분에서 유발된 초기 과잉간극수압은 성토재 끝단부분의 초기 과잉간극수압보다



(a) 지표면에서의 시간에 대한 침하량



(b) 깊이 5.2m에서의 침하량



(c) 깊이 5.2m에서의 시간에 대한 간극수압의 소산

그림 4. 3차원 및 축대칭 압밀해석의 결과 비교

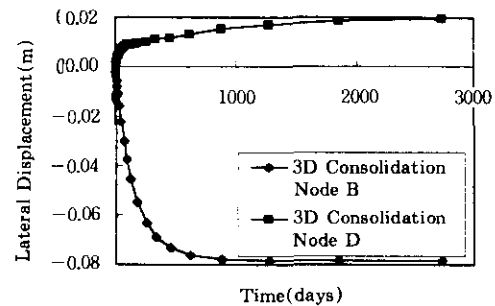


그림 5. 성토재 끝단부분의 횡방향 변위

1.5배정도 크게 유발되는 것을 알 수 있다. 그러나 축대칭 해석에서는 성토재 중심으로부터 성토재 끝단까지 현장지반에서 다르게 유발되는 과잉간극수압의 초기 분포를 고려하기가 어렵다. 뿐만아니라 그림 5에서와 같이 성토하중에 의해 유발되는 횡방향의 변위를 고려할 수가 없다. 그림 5에서는 3차원 수치해석 지반의 절점 B의 경우 좌측방향으로 횡변위가 유발되고, 절점 D에서는 우측방향으로 횡변위가 유발되는 것을 나타낸다.

위의 3차원 및 축대칭 압밀해석의 비교에서 볼때 단순화된 원통형 실린더 지반에 대한 축대칭 해석결과는 성토재 중심부분의 지표면 침하량은 비교적 잘 예측할 수 있다. 그러나 성토재 끝단부분에서 유발되는 침하량이나 임의의 깊이에서 유발되는 간극수압의 소산과정을 잘 예측하기가 어렵다는 것을 알 수 있다. 이와같은 이유로는 축대칭 해석의 경우 그림 5에서와 같이 실제 3차원 현장지반에서 유발되는 횡방향의 변형을 고려하기가 매우 어렵기 때문이라고 사료된다. 또한 성토하중에 의해 유발되는 과잉간극수압의 초기 분포가 그림 4(c)에서와 같이 축대칭 조건에서 유발되는 초기 과잉간극수압의 분포와 차이가 나기 때문이다. 따라서 축대칭 압밀해석으로부터는 현장지반의 3차원 압밀해석의 거동을 정확히 모사하기가 매우 어려우므로 Hird 등이 고려한 하나의 배수재를 중심으로 한 원통형 실린더 지반의 거동은 3차원 현장지반의 거동을 정확히 나타낼 수 없다고 사료된다.

5. 제안된 등가모델의 검증과 비교

2절에서 제안된 등가모델을 검증하기 위하여 ABAQUS 프로그램을 사용하여 그림 6과 같은 유한요소망에 대한 평면변형률 압밀해석을 수행하였다. 사용된 요소는 변위에 대한 8절점, 간극수압에 대한 4절점의 평면변형률 요소로서 216개, 총 719개의 절점이 사용되었다. 유한요소망의 깊이는 15m, 폭은 40m이고 경계

조건은 3차원 해석의 경계조건과 동일하다. 2차원 압밀해석에 적용된 제안된 등가모델은 등가의 수평방향 투수계수와 배수재의 강성도를 고려한 배수재의 등가폭을 사용하였다(표 2). 그리고 수직방향의 투수계수는 현장지반의 수직방향의 투수계수와 같다고 가정하였다. 압밀해석에 사용된 기타의 다른 Cam-clay 모델계수값은 표 1과 동일하다.

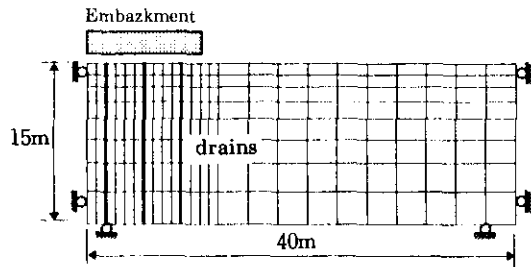


그림 6. 2차원 압밀해석을 위한 유한요소망

표 2. 원지반 및 등가모델

원지반	
해석대상 연약지반의 크기 및 투수계수	폭/2:40m, 깊이:15m $k_h = 5.84 \times 10^{-5} \text{ m/day}$ $k_v = k_h/2$
모래배수재 직경	0.5m
설치간격	3.5m
설치형태	사각형 형태
등가영향 직경	3.955m
등가모델	
해석대상 연약지반의 크기 및 등가투수계수	폭/2:40m, 깊이:15m $k'_h = 3.93 \times 10^{-5} \text{ m/day}$ $k_v = 2.94 \times 10^{-5} \text{ m/day}$
보정된 배수재 폭	0.056m

그림 7은 Case I의 투수계수를 사용하여 수치해석을 수행한 결과로서 성토재 중심아래에서 유발되는 시간에 대한 평균 침하량을 나타낸다. 그림에서 보듯이 현장지반의 배수재의 폭과 현장지반의 투수계수를 그대로 사용한 경우에는 3차원 압밀거동을 크게 과소평가하나,

제안된 방법을 이용할 경우 보다 좋은 결과를 얻을 수가 있다. 성토재 중심아래 5.2m지점에서 시간의 변화에 대한 간극수압의 소산과정을 그림 8에 도시하였다. 현장지반의 배수재의 폭과 현장지반의 투수계수를 그대로 사용한 경우에는 현장지반의 수치해석 결과보다 과잉간극수압의 소산이 일찍 유발되나, 제안된 등가모델을 사용할 경우에 보다 정확한 결과를 얻을 수가 있다. 이러한 결과는 등가모델을 적용하지 않은 평면변형률 해석에서 산정되는 배수재의 강성도가 3차원 현장지반의 배수재의 강성도보다 크게 평가되고, 3차원 현장지반에 설치된 배수재로 배수되는 배수면적보다 평면변형

률 상태의 배수면적이 크기 때문이라고 사료된다. 따라서 2차원 평면변형률 해석시 나타나는 이러한 영향을 줄이기 위하여는 배수재의 강성도에 대한 3차원 효과 및 3차원적인 배수효과를 고려해 주는 방법을 이용할 경우 다소 개선될 수 있음을 알 수 있다.

그림 9 및 10에서는 성토재 끝단부분에서의 3차원 해석결과 및 제안된 등가모델을 사용한 평면변형률 해석의 침하량 결과를 비교하였다. 제안된 등가모델을 사용한 평면변형률 해석으로부터 성토재 끝단부분의 침하량과 비교적 잘 일치하는 결과를 얻을 수가 있다. 또한 성토재 끝단부분의 깊이 5.2m에서 유발되는 과잉간극수압의 시간에 대한 소산도 그림11과 같이 비교적 정확히 일치하는 경향을 얻을 수가 있다.

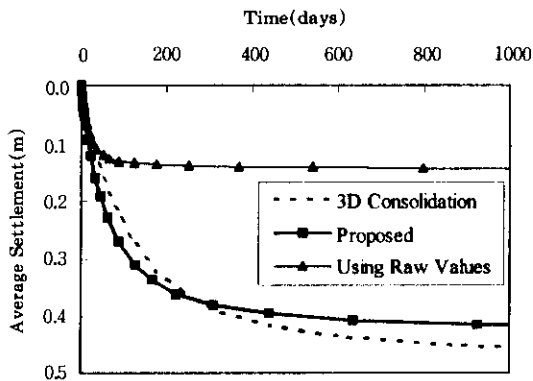


그림 7. 성토재 중심에서의 시간에 대한 침하량 (Case I)

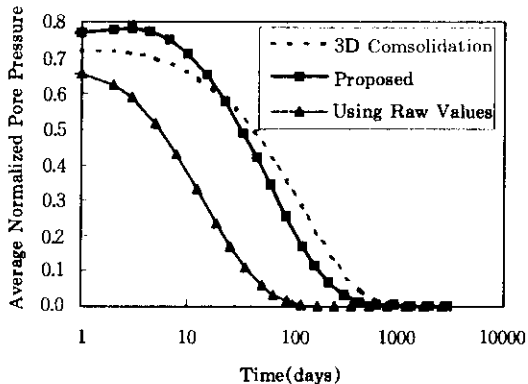


그림 8. 성토재 중심 깊이 5.2m에서의 시간에 대한 간극수압의 소산(Case I)

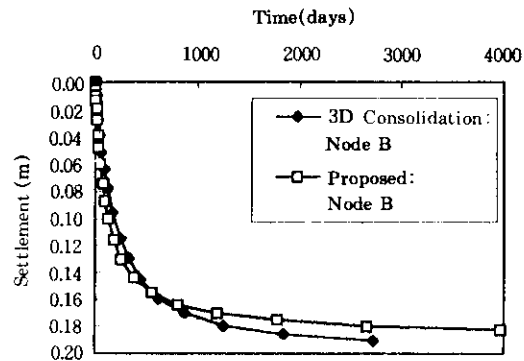


그림 9. 성토재 끝단 지표면에서의 시간에 대한 침하량(Case I)

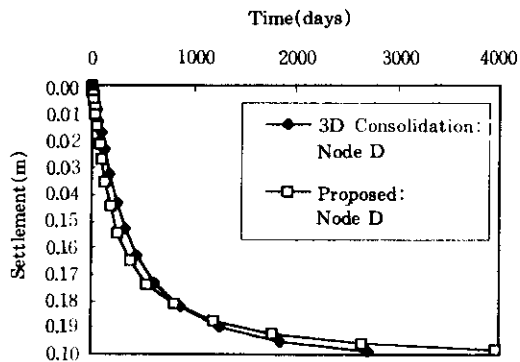


그림 10. 성토재 끝단 깊이 5.2m에서의 시간에 대한 침하량(Case I)

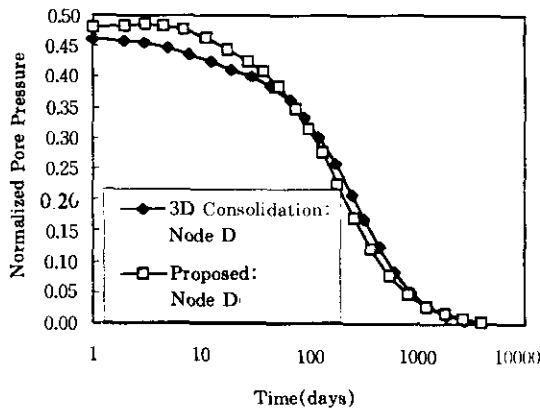


그림 11. 성토재 끝단 깊이 5.2m에서의 시간에 대한 간극수압의 소산(Case I)

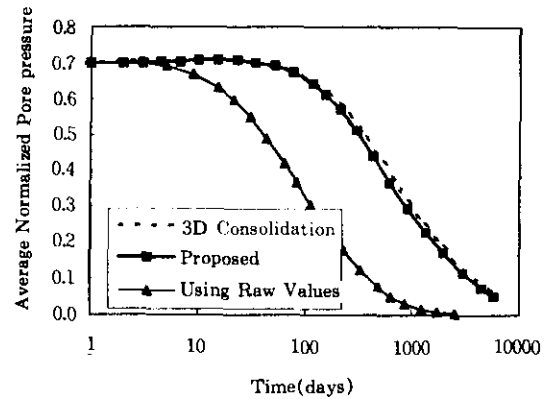


그림 13. 성토재 중심 깊이 5.2m에서의 시간에 대한 간극수압의 소산(Case II)

그림 12와 13은 Case II의 투수계수를 사용하여 수치해석한 시간에 대한 침하량과 간극수압의 소산을 나타낸다. 현장지반의 물성치를 그대로 사용할 경우 2차원 해석에서 과다하게 산정된 수평방향 투수계수에 의해 압밀이 빨리 발생되고, 배수재의 강성도를 과다하게 평가하기 때문에 유발되는 침하량은 3차원 해석결과보다 훨씬 적다. 그러나 제안된 등가모델을 사용하여 예측된 침하량과 간극수압은 3차원 결과에 아주 잘 일치하는 결과를 보여준다. 이로부터 불래 연약지반과 배수재의 투수계수의 차이가 적은 Case II의 경우가 Case I의 경우보다 3차원 해석결과에 더 잘 일치하는 결과를 준다.

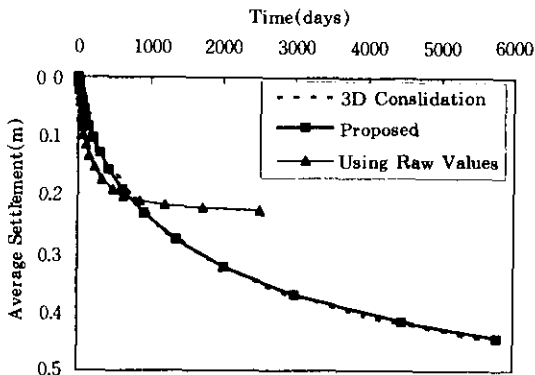


그림 12. 성토재 중심에서의 시간에 대한 침하량 (Case II)

6. 결 론

배수재가 설치된 연약지반의 3차원적인 거동특성을 2차원 평면변형률 수치모델로 적절히 해석하기 위한 등가투수계수와 배수재의 강성도를 고려한 등가폭을 가진 등가모델이 제안되었으며 3차원 ABAQUS 해석결과와 비교 검증을 수행하였다. 해석결과 제안된 등가모델을 사용하여 2차원 평면변형률로 수치해석을 수행할 경우 현장지반의 3차원적인 거동특성을 비교적 정확히 예측할 수 있다는 것을 알 수 있다. 반면 하나의 단순화된 원통형 실린더 지반에 대한 축대칭 해석결과는 성토재 중심부분의 지표면 침하량은 비교적 잘 예측할 수 있지만, 성토재 끝단부분에서 유발되는 침하량이나 임의의 깊이에서 유발되는 간극수압의 소산 과정은 잘 예측하기가 어렵다는 것을 나타낸다. 또한 2차원 해석시 현장지반의 투수계수와 배수재의 폭을 그대로 사용하는 경우에는 실제 3차원 해석결과보다 훨씬 적은 침하량을 산정할 수 있으며, 과잉 간극수압은 실제보다 빨리 소산되는 결과를 얻을 수가 있다.

감사의 글

본 논문의 일부는 현대건설 기술연구소의 연

구비 지원에 의하여 이루어진 연구이며, 귀사에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. ABAQUS USER'S MANUAL(1993), Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. Ver.5.3
2. Barron, R.A.(1948), "Consolidation of Fine-grained Soils by Drain Wells", Trans. ASCE, Vol.113., paper No. 2346, pp. 718~742
3. Bergado, D.T. and Long, P.V.(1994), "Numerical Analysis of Embankment on Subsiding Ground Improved by Vertical Drains and Granular Piles", XII ICSMFE, New Delhi, India
4. Chai, J.C. and Bergado, D.T.(1993), "Some Techniques for Finite Element Analysis of Embankments on Soft Ground", Canadian Geotechnical J., Vol. 30, pp 710~719
5. Cheung, Y.K., Lee, P.K.K., and Xie, K.H. (1991), "Some Remarks on Two and Three Dimensional Consolidation Analysis of Sand-drained Ground", Computers and Geotechnics, Vol. 12, pp 73~87
6. Hansbo, S.(1981), "Consolidation of Fined Grained Soils by Prefabricated Drains", paper 12/22: Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Stockholm, Sweden Vol. 3, pp. 667~682
7. Hird, C.C., Pyrah, I.C., Russell, D. and Cincicoglu, F. (1995), "Modelling the Effect of Vertical Drains in Two-dimensional Finite Element Analyses of Embankments on Soft Ground", Canadian Geotechnical J., Vol. 32, pp 795~807
8. Roscoe, K.H., and Burland, J.B.(1968), "On the Generalized Stress-strain Behaviour of Wet Clay, Engineering Plasticity", Cambridge University Press. pp 535~609.
9. Shinsha, H., Hara, H., Abe, T. and Tanaka, (1982), "Consolidation Settlement and Lateral Displacement of Soft Ground Improved by Sand Drains", Tsuchi-to-kiso, JSSMFE, Vol. 30, No. 2, pp. 7~12.
10. Yoshikuni, H. & Naganodo, H.(1974), "Consolidation of Soils by Vertical Drain Wells with Finite Permeability" Jap. Soc. Soil Mech. Found. Engrg. Vol. 14, No 2 pp. 35~46
(접수일자 1996. 4. 25)