

다층지반 및 스미어 경계면 해석을 위한 유한차분 압밀해석 기법

Consolidation Analysis for the Interface of Multi-layered and Smeared Soil by Finite Difference Method

윤찬영* · 조경진** · 정충기***

Yune, Chan-Young · Cho, Kyoung-Jin · Chung, Choong-Ki

Abstract

In this research, finite difference (FD) scheme for the interface of the layer between different soil characteristics was suggested. Based on the suggested scheme, FD analysis program for the consolidation analysis of the multi-layered and smeared soil was developed. And the applicability of the program was investigated by the FD analysis conducted for the various soil conditions. Analysis results showed that the permeability near the drainage boundary had a dominant effect on the consolidation rate. And the consolidation rate of the soil with the constant permeability in smeared area was retarded more than the soil with the linear variation of permeability in smeared area. Simple assumption of the constant variation of permeability in smeared area could be used when the decreasing rate of permeability in smeared area was relatively low. But exact assumption of the permeability variation in smeared area should be considered when the decreasing rate of permeability in smeared area was relatively high. Finally, based on the analysis result on Busan area, the analysis considering multi-layered soil should be needed to exactly evaluate time for the completion of consolidation.

Keywords : consolidation analysis, multi-layer, smeared soil, interface, finite difference scheme

요 지

본 연구에서는 연약지반의 압밀해석 시에 물성이 다른 두 층간의 경계면 해석을 보다 정확히 수행할 수 있는 유한차분 해석기법을 제안하였다. 제안된 해석기법을 이용하여 다층지반 및 스미어가 발생된 지반에 대하여 정확한 압밀해석이 가능한 유한차분 해석프로그램을 개발하였으며, 다양한 지반조건에서 해석을 수행하여 제안된 해석 기법을 근간으로 개발된 해석프로그램의 적용성을 검증하였다. 해석결과 다층지반의 압밀속도는 배수면 근처의 투수계수에 지배적인 영향을 받는 것으로 나타났으며, 스미어 발생지반의 압밀속도는 스미어 영역에서의 투수계수 분포가 선형인 경우보다 일정한 경우 압밀이 더 지체되는 것으로 나타났다. 또한 스미어 영향을 고려한 연약지반의 압밀해석에서 스미어로 인한 주변지반의 투수계수 감소가 상대적으로 작은 경우에는 스미어 영역 전체의 투수계수 감소율이 일정하다고 가정한 단순 해석으로도 정확한 압밀거동 예측이 가능하지만, 스미어 발생으로 배수재 주변지반의 투수계수의 감소가 큰 경우에는 배수재로부터의 거리에 따른 투수계수 분포형태를 정확히 가정하고 해석을 수행해야 압밀거동을 정확히 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 마지막으로 부산지역의 다층지반 조건을 고려한 해석결과, 압밀완료 시간을 정확히 예측하기 위해서는 다층지반에 대한 해석이 필요한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 압밀해석, 다층지반, 스미어, 경계면 해석, 유한차분 해석기법

1. 서 론

연약지반의 압밀해석은, 연약지반을 개량 시 그 거동을 예측하고 적절한 설계를 하기 위하여 매우 중요하다. 특히 연직배수재와 선형재하에 의해 개량하는 연약지반의 압밀거동은 스미어, 통수저항, 압밀 중 물성치 변화, 하중재하 이력 등 많은 영향요소에 의하여 영향을 받는데, 이러한 영향요소를 모두 고려하여 이론적인 해를 구하는 것은 거의 불가능

할 뿐만 아니라 실용적이지도 못하다. 따라서 일반적으로 연약지반의 압밀해석을 위해서는 유한요소해석 혹은 유한차분해석과 같은 수치 해석적인 방법을 이용하게 된다. 특히 유한요소해석에 비하여 경제적이며 실용적인 유한차분해석이 연약지반의 압밀해석을 위하여 널리 활용되고 있으며 관련 연구도 많이 수행되어 왔다(Lo, 1991; Chung, 1997; Fox 등, 2003; Basu와 Madhav, 2000; 김팔규 등, 1999; 김윤태 등, 1996; 구자갑과 전제성, 2004).

*정회원 · 교신저자 · 강릉대학교 공과대학 토목공학과 전임강사 (E-mail : yune@kangnung.ac.kr)

**정회원 · 대림산업(주) 사원 (E-mail : jinzoah@freechal.com)

***정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 교수 (E-mail : geolabs@snu.ac.kr)

대부분의 연약지반은 균질한 하나의 층으로 이루어져 있지 않고 지층의 형성 이력에 따라 각 층간 물성치가 다른 다층지반으로 구성되어 있다. 하부의 빙적토(glacial varved clay)와 상부의 후빙기 점토(postglacial clay)로 이루어진 Sk.-Edeby 시험성토 지역 및 20-30m의 해성 점토 사이에 5m 정도의 실트질 점토가 관입되어 있는 Changi 공항 지역이 대표적이며(Lo, 1991), 국내에도 하부의 단단한 점토층 상부에 연약한 점토층이 퇴적되어 있는 부산지역(Chung, 2005)과 두꺼운 하부 저소성 점토층과 상부 실트질 점토층으로 이루어진 서천지역(조성민, 1998) 등 매우 많은 다층지반 현상이 존재한다. 또한 연약지반의 개량을 위한 연직배수공법을 적용할 때, 연직배수재 주변의 스미어(smear) 현상이 대상지반의 압밀속도를 지연시키고 압밀거동에 매우 큰 영향을 준다는 사실도 잘 알려져있다. 따라서 연약지반의 압밀거동을 정확히 평가하고 예측하기 위해서는 다층지반 및 스미어에 대한 해석이 필수적이고 매우 중요하다. 이 때 다층지반과 스미어가 발생한 지반은 모두 물성치가 다른 두 영역이 연직방향과 방사방향으로 존재하는 차이만 있을 뿐 두 층간의 경계면 압밀해석을 수행하게 된다는 점에 있어서 동일하므로 해석기법의 관점에서 매우 유사하다고 볼 수 있다. 이를 해석하기 위하여 국내외에서 많은 연구가 이루어졌으나 기존의 해석방법은 다층지반 사이의 경계 및 스미어 영역과 불교란 지반 사이의 경계 해석 시에 경계면을 따라 발생하는 흐름을 고려하지 못하며 대상지반의 압밀속도를 과대평가하는 문제점이 있다(윤찬영 등, 2007).

이에 본 연구에서는 연약지반의 압밀해석 시에 다층지반 및 스미어가 발생한 지반의 해석을 정확히 수행할 수 있는 유한차분 해석기법을 제안하고 이를 검증하였다. 또한 스미어 영역의 투수계수분포 형태가 압밀거동에 미치는 영향을 추가적으로 검토하였다.

2. 해석프로그램 개발

2.1 압밀지배방정식

연직 및 방사배수 조건의 3차원 압밀해석을 위한 지배방정식은 원통형 좌표계(Cylindrical coordinate system)에서 θ 방향의 변화가 없는 축대칭 조건을 가정하면 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial u}{\partial z} \right) = m_v \gamma_w \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, u : 과잉간극수압

k : 투수계수

m_v : 부피압축계수

γ_w : 물의 단위중량

식 (1)의 지배방정식에서 투수계수 이방성 및 위치별 투수계수 차이를 고려하고, 연직방향의 1차원 변형에 대하여 압밀진행에 따른 간극비 변화를 고려하면 최종적으로 다음 식 (2)와 같이 정리할 수 있다.

$$\left[k_h \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \left(\frac{k_h}{r} + \frac{\partial k_h}{\partial r} \right) \frac{\partial u}{\partial r} \right] + \frac{(1+e_0)^2}{(1+e)^2} \left[k_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \left(\frac{\partial k_v}{\partial z} - k_v m_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \frac{\partial u}{\partial z} \right] = m_v \gamma_w \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

여기서, e : 간극비

e_0 : 초기 간극비

k_v : 연직 방향 투수계수

k_h : 방사방향 투수계수

지배방정식 (2)를 중앙차분법을 이용하여 차분방정식을 전개하면 다음 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} & u_{i,j}^{t+1} \\ &= u_{i,j}^t + \frac{k_h^t i,j}{m_v^t i,j \gamma_w \Delta r^2} \left\{ u_{i+1,j}^t - 2u_{i,j}^t + u_{i-1,j}^t + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta r}{r_i} + \frac{k_h^t i+1,j - k_h^t i-1,j}{2k_h^t i,j} \right) (u_{i+1,j}^t - u_{i-1,j}^t) \right\} \\ &+ \frac{\Delta t}{\Delta z^2} \frac{k_v^t i,j (1+e_0 i,j)^2}{m_v^t i,j \gamma_w (1+e_i^t)^2} \\ &\left\{ u_{i,j+1}^t - 2u_{i,j}^t + u_{i,j-1}^t + \frac{1}{4} \left(\frac{k_v^t i,j+1 - k_v^t i,j-1}{k_v^t i,j} - m_v^t i,j (u_{i,j+1}^t - u_{i,j-1}^t) \right) (u_{i,j+1}^t - u_{i,j-1}^t) \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, 아래첨자 i, j 는 각각 방사방향 절점번호와 연직방향 절점번호이고, 위첨자 t 는 시간단계를 나타낸다. 식 (3)은 임의의 시간단계 $t+1$ 에서의 과잉간극수압을 t 단계에서의 과잉간극수압 및 관련 물성치를 이용하여 계산하는 explicit 형식의 차분방정식이다. Explicit방법은 해석이 간편하고 경제적이면서 해석 정확도가 높고 압밀 중 차분방정식에 포함된 관련물성치의 변화를 손쉽게 고려할 수 있다. 본 연구에서 개발된 해석프로그램 역시 윤찬영과 정충기(2005)에 의하여 제안된 해석기법을 이용하여 압밀 중 간극비, 투수계수, 체적압축계수 등의 비선형적 변화 거동을 고려할 수 있도록 제작되었다.

2.2 스미어영역 경계해석 방법

연직배수재를 타설하는 경우, 배수재 주변에 발생하는 스미어 현상으로 인하여 압밀이 지체된다. 스미어 발생으로 인하여 변화하는 지반 물성치는 흙의 투수성과 압축성이 있다. 일반적으로 스미어 영역에서는 지반의 교란으로 투수계수가 감소한다. 하지만 압축성의 경우에는 스미어 발생전후에 큰 차이가 없어(윤찬영 등, 2007) 결국 투수계수의 변화가 압밀 지체에 지배적인 영향을 미치게 된다. 연직배수재가 타설된 지반은 간극수의 방사방향 흐름이 지배적이므로 일반적으로 스미어 영역내에서의 방사방향 투수계수를 변화시켜 압밀해석을 수행한다. 불교란 영역의 방사방향 투수계수에 대한 스미어 영역내에서의 방사방향 투수계수비는 배수재 설치 방법 및 종류 그리고 지반 특성에 따라 다르게 나타나며, 1/2(Hansbo 등, 1981), 1/5(Madhav 등, 1993), 1/10(Bergado 등, 1996)의 범위의 값들이 제시되어 있다. Hansbo(1997)는 불교란영역에서의 연직방향 투수계수, k_v 를 스미어 영역에서의 방사방향 투수계수, $k_{v,s}$ 로 사용할 것을 제안하기도 하였다. 스미어 영역의 크기 역시 배수재 직경에 대하여 2배(Hansbo 등, 1981; Bergado 등, 1996), 4배(Sharma와 Xiao, 2000), 5배(Hird 등, 1992) 등 연구자에 따라 다양한

범위의 값들이 제시되어 있다.

기존의 스미어 영향을 고려한 압밀수치해석(Lo, 1991)은 스미어 영역과 불교란 영역의 경계 절점에서 흐름의 연속성을 고려하여 경계 절점을 중심으로 좌, 우 두 절점으로부터 과잉간극수압을 계산한다. 그리고 경계절점을 제외한 나머지 절점에서는 상, 하, 좌, 우 네 점을 이용하여 압밀해석을 실시한다. 그러나 흐름의 연속성을 이용한 기존의 스미어 영역 경계해석의 경우 해석시에 다음과 같은 몇가지 문제점이 있다. 첫 번째는 경계절점에서 상, 하, 좌, 우 네 점이 아닌 좌, 우 두 점만을 이용하여 해석을 수행하므로 경계 영역에서 발생하는 연직방향 흐름은 고려할 수 없다는 점이다. 두 번째는 경계절점에서 압밀해석이 아닌 흙의 변형을 고려하지 않는 흐름해석을 실시하므로 실제 과잉간극수압 소산 속도를 과대평가하여 압밀도를 과대평가한다는 점이다. 세 번째는 축대칭조건 해석의 경우 배수면으로 갈수록 배수면적이 감소하므로 경계면에서의 동수경사 변화율이 2차원 평면 해석조건과 달라야 하지만 기존의 흐름연속성을 고려한 해석에서는 축대칭 해석과 2차원 평면해석 모두 경계절점에서 계산되는 동수경사 변화율이 동일하게 나타나 압밀도를 과대평가할 수 있다.

이에 본 연구에서는 스미어 경계 절점에서 상, 하, 좌, 우 네 점을 이용하여 흐름 해석이 아닌 압밀해석을 수행할 수 있도록 하는 새로운 해석 기법을 제안하였다. 이 때 경계절점을 중심으로 좌우 절점에 대하여 투수계수가 다를 뿐만 아니라 스미어 영역에서는 일반적으로 절점간격이 더 작게 설정되므로 절점 간격도 달라져 이들을 고려할 수 있는 해석방법이 필요하다. 이를 위하여 좌, 우 절점에서 투수계수가 다른 경우 및 절점간격이 다른 경우에 압밀해석을 수행할 수 있는 해석기법을 제안하였다.

2.2.1 투수계수 차이 고려 방법

유한차분해석에서 해석의 기본 단위가 되는 절점은 그림 1과 같이 절점 주위의 지배영역(control volume)을 대표한다. 스미어 영역과 불교란 영역의 경계절점도 절점주위의 지배영역을 대표하며 따라서 절점을 기준으로 좌, 우 투수계수가 다르므로 압밀해석 시에 이를 고려하여야 한다. 그림 2와 같이 방사방향으로 투수계수가 다른 층을 이룰 때, 축대칭 조건에서 영역별 수두손실 동일성을 이용하여 계산되는 연직방향 등가 투수계수 및 흐름의 연속성을 고려하여 계산되는 방사방향 등가 투수계수는 각각 다음 식 (4), (5)와 같다(윤찬영, 2005).

$$k_{v eq} = \frac{k_{1v}(r_2^2 - r_1^2) + r_{2v}(r_3^2 - r_2^2)}{r_3^2 - r_1^2} \quad (4)$$

$$k_{h eq} = \frac{\ln(r_3/r_1)}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{k_{1h}} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{k_{2h}}} \quad (5)$$

식 (4), (5)를 식 (3)에 대입하고 경계절점 해석 시 이를 이용하면 스미어 영역과 불교란 영역의 경계절점에서도 일반 절점에서 수행하는 것과 동일하게 네 개의 절점을 이용한 압밀해석을 수행할 수 있다.

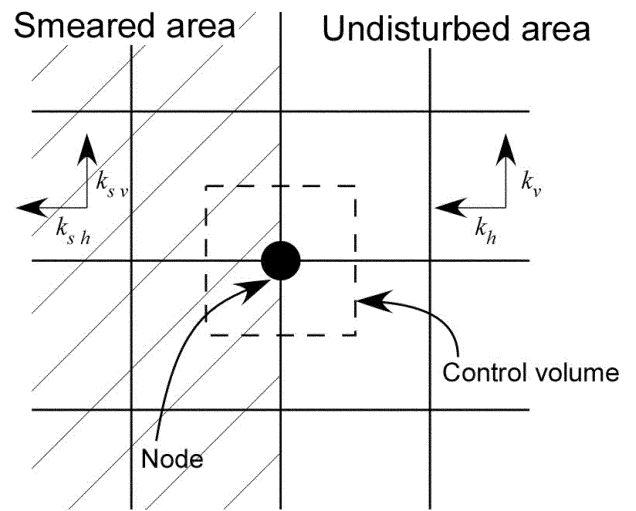


그림 1. 경계절점을 기준으로 하는 지배영역과 투수계수

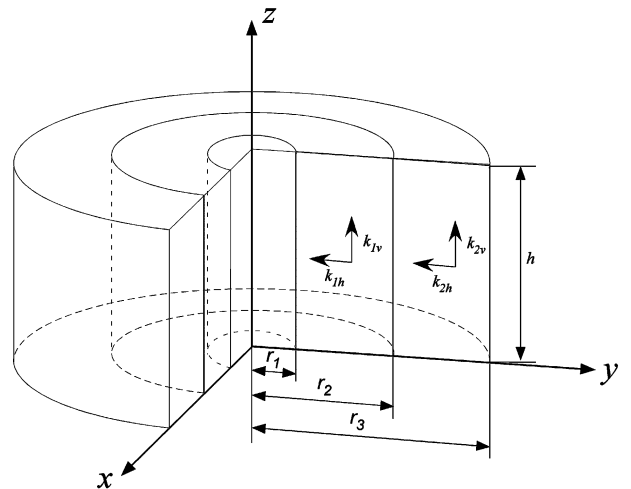


그림 2. 방사방향으로 물성치가 다른 층이 존재하는 경우

2.2.2 절점간격 차이 고려 방법

점성토에서 압밀이 진행될 때는 배수면으로부터의 거리에 따라 동수경사가 변화하며 특히 배수면에 가까울수록 동수경사가 크므로 정확한 해석을 위하여 배수면에 가까울수록 절점간격을 작게 한다. 특히 전체 해석영역에 비하여 스미어 영역은 크기가 작으며 불교란 영역에 비하여 작은 투수계수를 갖기 때문에 동수경사의 변화율도 커서 스미어 영역에서의 절점간격은 불교란 영역에 비하여 작게 결정해야 한다. 따라서 스미어 영역과 불교란 영역의 경계를 중심으로 좌, 우 양쪽의 절점간격이 달라지므로 유한차분해석 시에 이를 고려할 수 있는 방법을 적용해야 한다. Croft와 Lilley (1977)에 따르면 그림 3과 같이 불규칙한 절점간격을 갖는 함수 $f(x)$ 에 대하여 1차 및 2차 미분방정식의 유한차분 식은 다음 식 (6), (7)과 같이 계산된다.

$$\left[\frac{df}{dx} \right]_{x=x_0} = \frac{1}{\Delta x} \left\{ \frac{s_1}{s_2(s_2+s_1)} f_1 - \frac{s_1-s_2}{s_1 s_2} f_0 - \frac{s_2}{s_1(s_2+s_1)} f_{-1} \right\} \quad (6)$$

$$\left[\frac{d^2f}{dx^2} \right]_{x=x_0} = \frac{2}{(\Delta x)^2} \left\{ \frac{s_1}{s_2(s_2+s_1)} f_1 - \frac{1}{s_1 s_2} f_0 + \frac{1}{s_1(s_2+s_1)} f_{-1} \right\} \quad (7)$$

여기서 $x_1 - x_0 = s_2 \Delta x$, $x_0 - x_{-1} = s_1 \Delta x$ ($0 \leq s_1, s_2 \leq 1$)

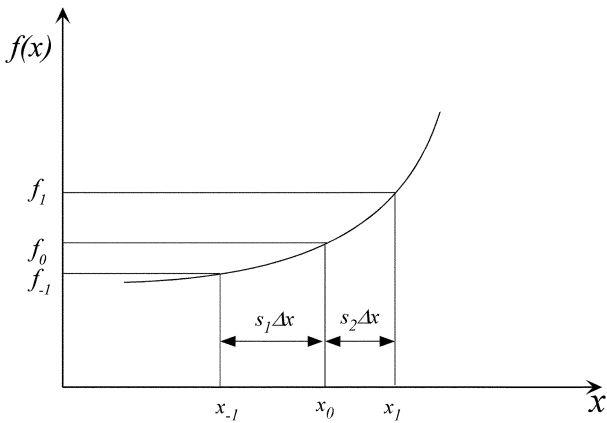


그림 3. 불규칙한 절점 간격을 갖는 함수

따라서 지표면으로부터 m 번째 층의 스미어 영역과 불교란 영역의 경계절점 (i, j) 및 $(i+1, j)$ 에서의 간극수압을 $u_{m,i,j}$, $u_{m,i+1,j}$, 불교란 영역에서의 절점간격을 Δr_s 라고 하면 그림 4와 같은 절점체계에서 과잉간극수압의 r 방향 1차 및 2차 미분항의 차분 방정식은 식 (8), (9)와 같이 표현된다. 이 때 (m, i, j) 및 $(m, i+1, j)$ 는 해석상 스미어 영역과 불교란 영역을 구분하기 위하여 동일한 경계 절점을 두개의 절점 번호로 표기한 것으로 (m, i, j) 는 스미어 영역의 마지막 절점, $(m, i+1, j)$ 는 불교란 영역의 첫 번째 절점을 의미한다.

$$\left[\frac{du}{dr} \right]_{(m,i,j) \text{ or } (m,i+1,j)} = \frac{1}{\Delta r} \left\{ \frac{s_1}{s_2(s_2+s_1)} u_{m,i+2,j} - \frac{s_1-s_2}{s_1 s_2} u_{m,i,j} - \frac{s_2}{s_1(s_2+s_1)} u_{m,i-1,j} \right\} \quad (8)$$

$$\left[\frac{d^2u}{dr^2} \right]_{(m,i,j) \text{ or } (m,i+1,j)} = \frac{2}{(\Delta r)^2} \left\{ \frac{1}{s_2(s_2+s_1)} u_{m,i+2,j} - \frac{1}{s_1 s_2} u_{m,i,j} + \frac{1}{s_1(s_2+s_1)} u_{m,i-1,j} \right\} \quad (9)$$

여기서 $\Delta r_s = s_1 \Delta r$, $\Delta r_u = s_2 \Delta r$ 이다. 이상과 같이 제안된 식 (8)과 (9)를 식(2)에 대입하고 정리하면 경계절점을 중심으로 양쪽 절점간격이 다른 경우에도 압밀 해석을 정확하게 수행할 수 있다.

2.3 다층지반 경계해석 방법

대부분의 연약지반은 균질한 층이 아닌 지층의 형성이력에 따라 여러 층으로 이루어진 다층지반으로 구성되어 있다. 기

존의 다층지반에 대한 해석(Lo, 1991; 김팔규 등, 1999; 구자갑과 전제성, 2004) 역시 스미어 영역의 경계해석과 유사하게 경계절점 상, 하의 두 점에서 흐름의 연속성을 고려하여 경계절점에서의 간극수압을 계산한다. 그러나 이 경우에도 스미어 영역의 해석과 동일하게 경계절점에서 상, 하, 좌, 우 네 점이 아닌 상, 하 두 점만을 이용하여 해석을 수행하므로 경계 영역에서 발생하는 방사방향 흐름은 고려할 수 없다는 문제와 경계절점에서 압밀해석이 아닌 흐름해석을 실시하므로 실제 과잉간극수압 소산 속도를 과대평가하여 압밀도를 과대평가한다는 문제점이 있다. 기존의 연구 중 김윤태 등(1996)의 연구가 경계면에서 4개의 절점을 이용한 해석을 수행하지만 실제 경계절점에서 해석을 수행하는 것이 아니고 배수방향에 따라서 경계절점의 상하 좌우 절점에서의 해석결과에 대한 산술평균을 사용하므로 간접적인 해석방법이라고 할 수 있으며, 또한 각 절점에서의 산술평균을 사용하므로 방사방향으로 절점을 포함한 해석영역의 체적이 변화하는 축대칭 조건에서는 이로인한 오차가 발생할 수 있을 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 다음과 같이 다층지반의 경계에서 더욱 정확하고 합리적인 압밀해석을 수행할 수 있는 해석기법을 제안하였다. 다층지반을 수치적으로 구현하는 것은 스미어 영역에 대한 해석과 매우 유사하다. 즉, 스미어 영역은 방사방향으로 물성치가 다른 두층이 존재하는 것이며 다층지반은 이를 90° 회전시킨 것과 같기 때문이다. 단, 스미어 영역의 해석은 물성치가 다른 방사방향 절점간에 각 절점이 포함하는 배수면적이 다른 반면 다층지반에서는 물성치가 다른 연직방향 절점간에 배수면적의 변화가 없으므로 이를 고려하여 식을 전개할 필요가 있다.

2.3.1 투수계수 차이 고려 방법

그림 5와 같이 상, 하 두 층으로 구성된 지반에서 흐름의 연속성을 고려한 연직방향 등기투수계수와 층별 수두손실 동일성을 이용하여 계산되는 방사방향 등기 투수계수는 다음 식 (10), (11)과 같다.

$$k_{v \text{ eq}} = \frac{h_1 + h_2}{h_1/k_{1v} + h_2/k_{2v}} \quad (10)$$

$$k_{h \text{ eq}} = \frac{h_1 k_{1h} + h_2 k_{2h}}{h_1 + h_2} \quad (11)$$

다층지반에 대한 해석 역시 위와 같이 계산된 식 (10),

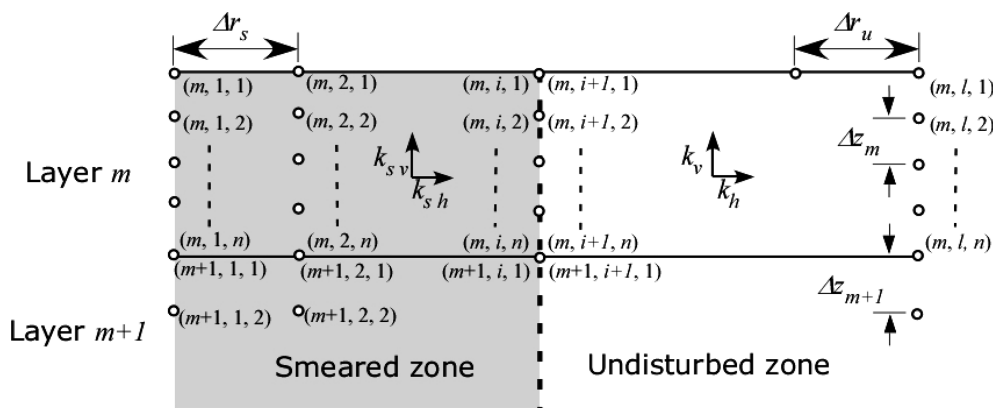


그림 4. 다층 및 스미어 발생 지반에서의 절점 표기 체계

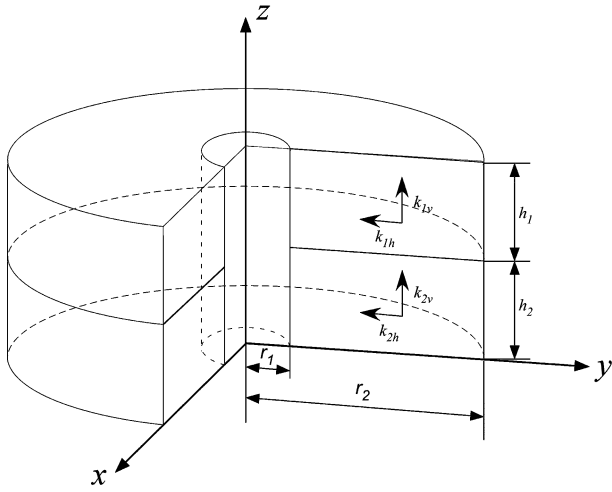


그림 5. 연직방향으로 물성치가 다른 층이 존재하는 경우

(11)을 식 (3)에 대입하고 경계절점 해석시 이를 이용하면 일반 절점에서 수행하는 것과 동일하게 경계절점을 중심으로 상, 하, 좌, 우 네 개의 절점을 이용한 압밀해석을 수행할 수 있다.

2.3.2 절점간격 차이 고려 방법

다층지반의 해석 역시 각 층의 두께가 다르므로 층간 경계절점을 중심으로 상, 하 양쪽의 절점 간격이 다르게 설정된다. 따라서 스미어 영역에 대한 해석과 동일하게 절점간격이 불규칙한 함수에 대하여 Croft와 Lilley(1977)가 제안한 식 (6), (7)을 이용하여 계산한다. 그림 4와 같이 m 번째 및 $m+1$ 번째 층에서의 절점간격을 각각 $\Delta z_m, \Delta z_{m+1}$ 이라고 하면, m 번째 층에서의 연직방향 총 절점수를 n 이라고 했을 때 m 번째 층에서의 마지막 n 번째 절점과 $m+1$ 번째 층에서의 첫 번째 절점은 동일한 절점이 되며, 두 층간의 경계절점에서의 과잉간극수압 소산에 대한 미분 방정식의 차분형태는 다음 (10)과 (11)처럼 표현된다.

$$\left[\frac{du}{dr} \right]_{(m,i,n) \text{ or } (m+1,i,1)} = \frac{1}{\Delta z} \left\{ \frac{s_m}{s_{m+1}(s_m+s_{m+1})} u_{m+1,i,2} - \frac{s_m - s_{m+1}}{s_m s_{m+1}} u_{m+1,i,1} - \frac{s_{m+1}}{s_m(s_m+s_{m+1})} u_{m,i,n-1} \right\} \quad (10)$$

$$\left[\frac{d^2u}{dr^2} \right]_{(m,i,n) \text{ or } (m+1,i,1)} = \frac{2}{(\Delta z)^2} \left\{ \frac{1}{s_{m+1}(s_m+s_{m+1})} u_{m+1,i,2} - \frac{1}{s_m s_{m+1}} u_{m+1,i,1} + \frac{1}{s_m(s_m+s_{m+1})} u_{m,i,n-1} \right\} \quad (11)$$

여기서, $\Delta z_m = s_m \Delta z$, $\Delta z_{m+1} = s_{m+1} \Delta z$, ($0 \leq s_m, s_{m+1} \leq 1$)이다. 이성과 같이 제안된 식 (10)과 (11)을 이용하면 경계절점을 중심으로 상, 하 절점간격이 다른 경우에도 압밀 해석을 정확하게 수행할 수 있다.

3. 해석프로그램 검증 및 적용성 평가

개발된 유한차분 해석을 검증하기 위하여 연직배수 및 방사

표 1. 해석 대상 점성토의 입력 물성치

k_v (m/s)	k_h (m/s)	e_0	C_c	초기유효응력(kPa)
1.67×10^{-9}	2.5×10^{-9}	0.930	0.294	100

배수에 대한 압밀해석을 수행하고 동일한 조건에서 제안된 이론해와 비교하였다. 대상지반은 카올리나이트로 가정하였으며, 카올리나이트에 대한 Yune과 Chung(2005)의 실험 결과로부터 나타난 표 1과 같은 입력물성치를 사용하였다. 기존의 연직배수 및 방사배수 해석이론 중 많은 연구자들에 의하여 신뢰성이 검증된 Terzaghi의 이론해(Terzaghi, 1943) 및 Barron의 이론해(Barron, 1944; Barron, 1948)와 비교 해석을 실시하여 개발된 해석기법을 검증하였다. 이에 더하여 다층지반 및 스미어가 발생한 지반에서 해석을 수행하고 각각의 조건에 대한 압밀거동을 분석하였다.

연직배수 압밀해석의 경우 직경 36cm, 높이 20cm의 카올리나이트 지반을 가정하였으며, 유한차분망은 그림 6과 같이 가로, 세로 11×11로 구성하였다. 초기 연직유효응력 100kPa의 정규압밀지반에 100kPa의 하중을 즉시재하한 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 해석결과는 연직배수 압밀해로 잘 알려진 Terzaghi의 압밀해(Terzaghi, 1943)와 비교하였다. 해석결과는 그림 7과 같으며, 압밀초기 연직방향 절점수가 작기 때문에 나타난 약간의 오차를 제외하면 이론해와 거의

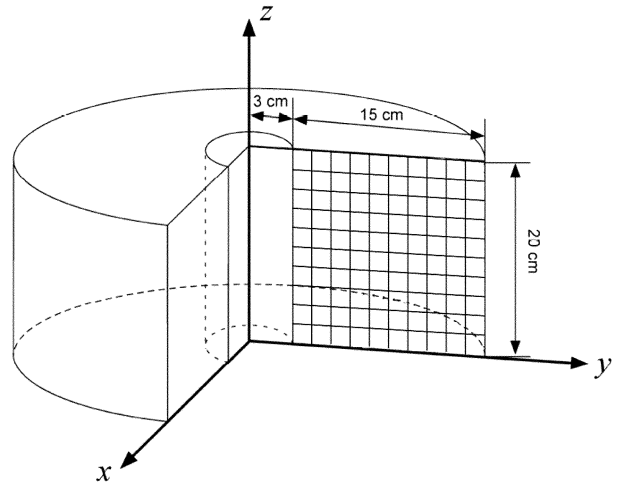


그림 6. 연직배수 조건에 대한 유한차분망

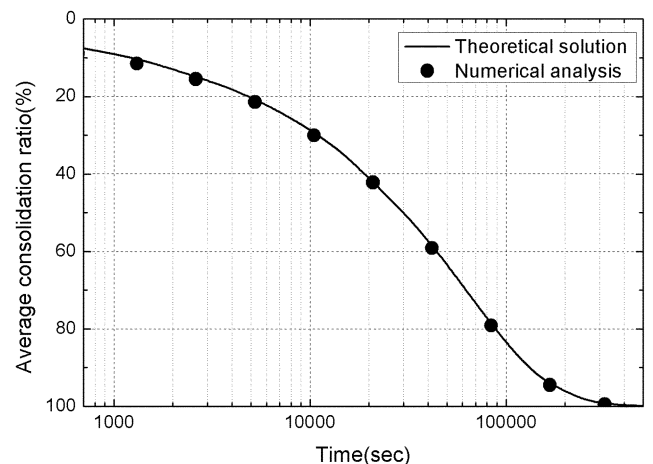


그림 7. 연직배수조건에 대한 해석결과 및 이론해

동일한 해석결과를 보인다.

방사배수조건에서는 스미어 효과까지 고려하기 위하여 방사방향으로 충분히 많은 24개의 절점을 사용하였으며, 연직방향으로는 15개의 절점으로 전체 차분망을 구성하였다. 스미어를 고려한 해석 및 고려하지 않은 해석을 실시하였으며, 스미어를 고려한 경우 시료 직경 72cm에 대하여 $n_{값}(=R_e/r_w)$ 을 12로 가정하여 배수재 직경은 6cm로 결정하였다. 여기서, R_e 는 유효반경, r_w 는 배수재의 반경이다. 스미어 영역의 크기는 기존의 연구에서 배수재 직경의 2~5배정도임을 감안하여 배수재로부터 6cm로 가정하였고 이에 따라 전체 24개의 절점 중 5개의 절점이 스미어 영역에 포함되었다. 방사배수 해석을 위하여 적용된 유한차분망은 그림 8과 같다. 스미어 영역의 방사방향 투수계수는 Madhav 등(1993)의

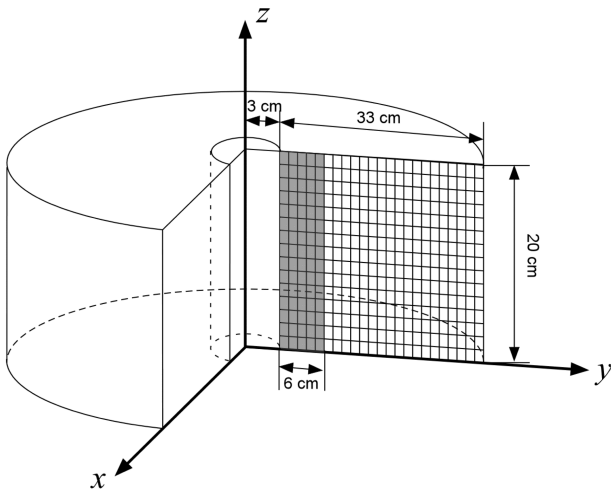


그림 8. 방사배수 조건에 대한 유한차분망

제안과 같이 스미어 영역에서의 투수계수를 불교란 영역의 $1/5(k_{sh}=1/5k_h)$ 을 가정하고 해석을 수행하였다. 해석결과는 자유변형률(free strain) 조건의 방사배수 압밀에 대하여 스미어를 고려하지 않은 이론해(Barron, 1944) 및 스미어를 고려한 이론해(Barron, 1948)와 비교하였다. 해석결과는 그림 9에 나타나 있다. 스미어를 고려한 경우 그렇지 않은 경우에 비하여 압밀이 지체되고 있으며, 두 경우 모두 이론해와 수치해석이 거의 동일한 결과를 보여준다.

개발된 해석프로그램의 다층지반 적용성을 확인하기 위하여 다음과 같은 해석을 수행하였다. 그림 10과 같이 투수계수를 제외한 모든 물성치는 표 1과 동일하고 상부와 하부의 투수계수만 각 층별로 표 1의 1배 및 1/4배로 가정하여 위치만 바꾼 두 경우 및 전체지반이 동일한 등가투수계수를 갖는 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 상부배수로 해석을 수행하였으며, 다층지반의 두 경우 모두 전체 지반에 대한 등가투수계수는 $6.67 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 로 동일하다. 직경 30cm, 높이 20cm의 카울리나이트 원통형 지반을 가정하였으며 초기유효응력 100kPa의 지반에 100kPa의 하중이 추가로 재하된 지반에 대한 해석을 수행하였다. 유한차분망은 축대칭 조건에서 상층과 하층 모두 동일하게 가로, 세로 11×6으로 구성하였고 단일층의 경우에는 가로, 세로 11×12로 구성하였다.

해석결과는 그림 11 및 12와 같이 정리하였다. 그림 11은 압밀시간에 대한 압밀도 곡선으로써 동일한 등가 투수계수를 갖는 지반이라도 배수면 근처에서 더 작은 투수계수를 갖는 경우(Case II)에 그렇지 않은 경우(Case I)에 비하여 압밀이 더욱 지체되는 것을 확인할 수 있다. 또한 상층과 하층 지반의 투수계수를 고려하여 계산된 등가투수계수를 적

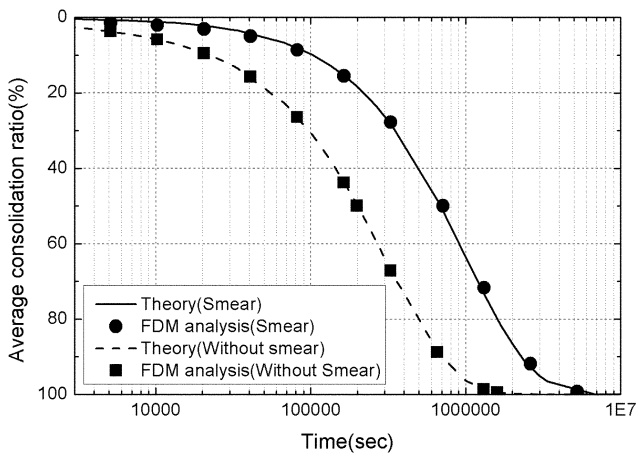


그림 9. 방사배수조건에 대한 해석결과 및 이론해

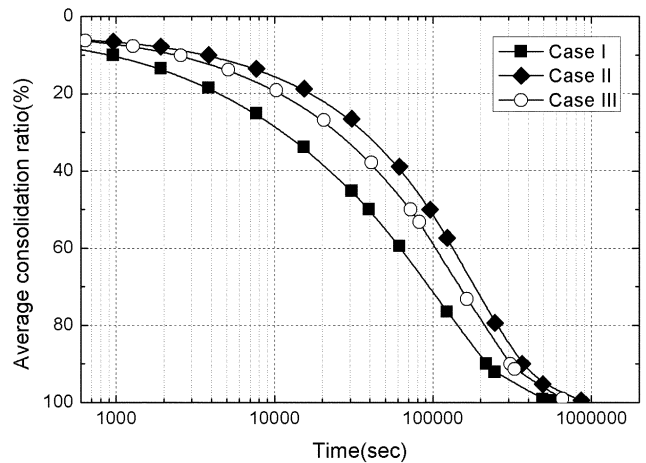


그림 11. 2층 지반 해석결과(평균압밀도)

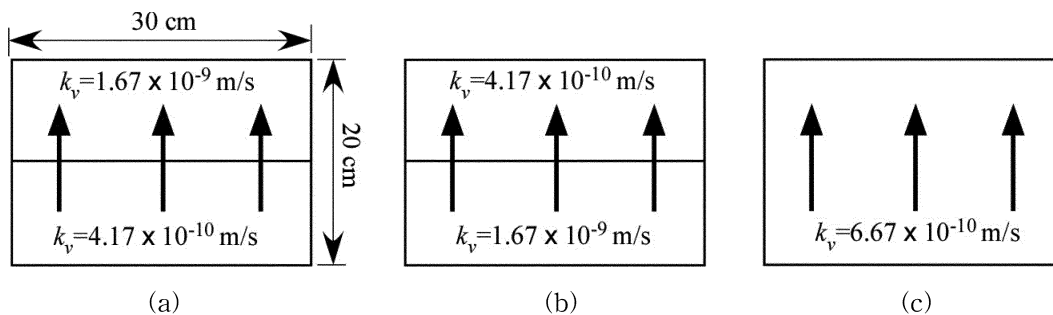


그림 10. 2층 지반 해석조건: (a) case I, (b) case II, (c) case III

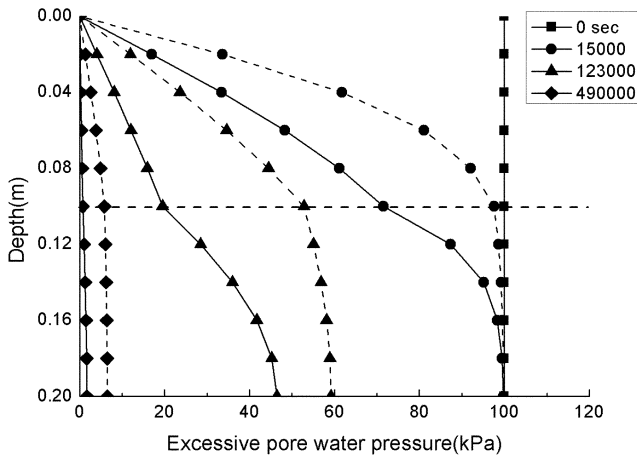


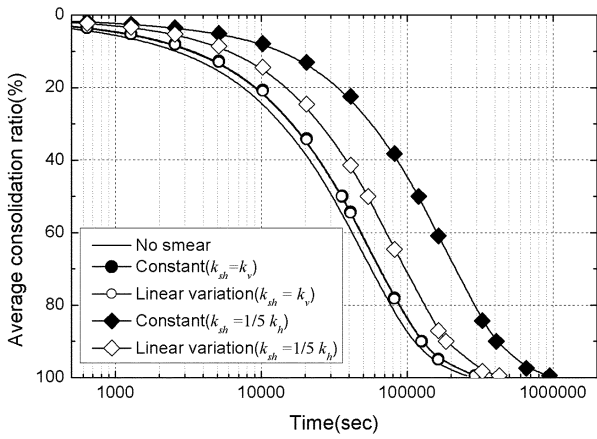
그림 12. 시간별 깊이에 따른 간극수압분포 곡선(실선: Case I, 점선: Case II)

용한 Case III와 비교해도 Case I은 압밀은 더 빠르게 Case II는 압밀이 더 느리게 진행된다. 이때 압밀지체 시간은 Case II가 Case I에 비하여 압밀도 50, 90, 99.5% 시점에서 각각 약 56,000초, 150,000초, 310,000초로 그 절대적인 크기가 증가하고 있다. 그러나 압밀지체 정도를 비교하면 Case II가 Case I에 비하여 압밀도 50, 90, 99.5%에서 압밀시간이 각각 2.43, 1.69, 1.56배로 그 지체정도는 점차 감소하고 있다. 동일 시간에 대한 배수거리에 따른 과잉간극수압 분포형태도 그림 12와 같이 등시곡선으로 도시하였을 때, Case I에 비하여 Case II가 동일 시간에서 과잉간극수압이 크게 나타나 간극수압 소산 속도가 느리다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 두 층간의 경계면을 기준으로 하여 과잉간극수압 소산거동 차이가 명확하게 나타난다. 즉, Case II에서 상층의 작은 투수계수로 인하여 과잉간극수압 소산이 느리게 나타나고 이로 인하여 하층은 투수계수가 크에도 불구하고 과잉간극수압 소산이 지체되어 전체 지반의 압밀속도까지 영향을 받고 있다. 반면에 Case I은 상층이 하층에 비하여 압밀이 빠르게 진행되므로 하층의 압밀이 원활히 진행되고 Case II에 비하여 압밀 속도가 빠르게 나타났다. 기존의 연구(윤찬영과 정충기, 2005; Pyrah, 1996)에서도 이와 유사한 현상이 이미 언급된 바 있으며, 따라서 전체 지반에서의 등가 투수계수(혹은 압밀계수)가 동일하다고 할지라도 배수면 근처에서의 투수계수(혹은 압밀계수)가 더 작은 지반의 압밀속도가 더 느리며, 전체 지반의 압밀속도는 배수면 근처의 투수계수(혹은 압밀계수)에 지배적인 영향을 받는다. 이와 같은 해석결과로부터 다층으로 구성된 지반의 경우에는 등가투수계수를 사용하더라도 정확한 해석결과를 얻을 수 없으며 다층효과를 고려한 해석이 반드시 필요하다는 결론을 얻을 수 있다.

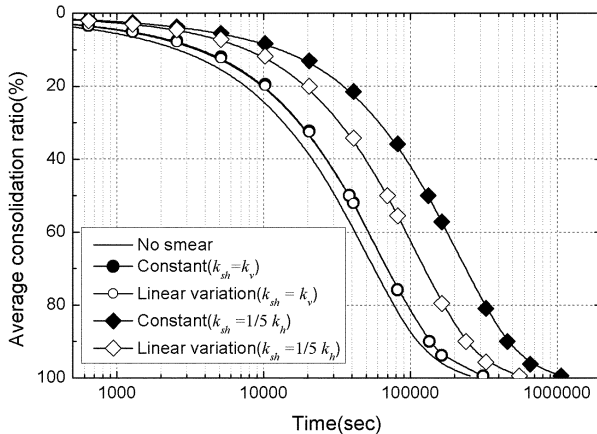
개발된 해석프로그램을 이용하여 스미어 영역에서의 투수계수 분포형태 및 스미어 영역의 크기에 대한 영향을 알아보기 위하여 다음과 같은 해석을 추가로 수행하였다. Madhav 등(1993)의 제안과 같이 스미어 영역에서의 투수계수를 불교란 영역의 $1/5(k_{sh}=1/5k_h)$ 을 사용한 해석 및 Hansbo(1997)의 제안과 같이 스미어 영역에서의 투수계수로 불교란 영역의 연직방향 투수계수($k_{sh}=k_v=0.668k_h$)를 사용한 두 종류의 해석을 수행하였다. 하지만 실제 지반은 스미어

영역전체에서 투수계수가 일정하지 않으며, 배수면 근처에서 가장 작고 스미어 영역과 불교란 영역의 경계면으로 갈수록 점차 증가하는 형태를 갖는다. 이에 따라 실제 지반 조건에 대한 더욱 정확한 모사를 위하여 스미어 영역내에서 선형적으로 변화하는 투수계수 분포를 갖는 경우에 대한 해석을 추가로 실시하였다. 즉, 스미어 영역과 불교란 영역의 경계 절점에서는 불교란 영역의 투수계수를 가지며, 배수면으로 가면서 불교란 영역 투수계수의 1/5까지 선형적으로 감소하는 경우 및 불교란 영역의 연직방향 투수계수와 동일한 값까지 선형적으로 감소하는 경우에 대한 두가지 해석을 수행하였다. 또한 모든 경우에 대하여 스미어 영역의 크기를 배수재 직경의 2, 3, 4배로 증가시켜가면서 스미어 영역의 크기가 해석결과에 미치는 영향을 분석하였다. 그 외의 해석조건은 앞에서 수행한 방사배수 해석과 동일하다.

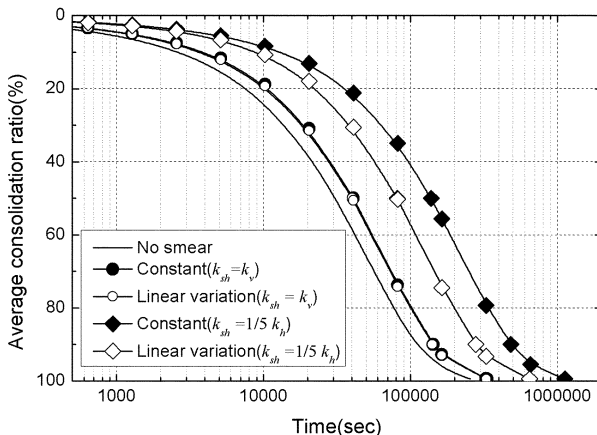
해석결과와의 비교 기준을 삼기위하여 수행한 스미어를 고려하지 않은 해석을 포함하여 총 13회의 해석을 수행하였으며, 그림 13 및 표 2에 해석결과를 정리하였다. 해석 결과에서 알 수 있는 바와 같이 스미어 영역에서의 투수계수 감소율이 클수록 그리고 스미어 영역의 크기가 증가할수록 압밀이 지체된다. 이 때 압밀지체정도는 스미어 영역의 투수계수가 불교란 영역의 0.668배에서 0.2배로 감소함에 따라 150%에서 340%까지 더 지체되고 있으며, 스미어 영역의 크기가 배수재 직경의 2배에서 4배로 증가함에 따라 13%에서 50%정도 더 지체되는 것으로 나타났다. 또한 스미어 영역내에서의 투수계수 분포형태에 따라서 압밀거동을 살펴보면 스미어 영역내에서 투수계수가 일정한 경우가 선형적인 투수계수 분포를 갖는 경우보다 압밀이 더 지체된다. 그러나 $k_{sh}=1/5k_h$ 인 경우에는 스미어 영역내의 투수계수 분포형태에 따른 압밀지체정도가 74%에서 121%까지 크게 나타나지만, $k_{sh}=k_v$ 인 경우에는 압밀지체정도가 모든 경우에 1.1% 이내로 그 영향이 매우 작은 것으로 나타났다. 즉 스미어로 인한 투수계수 감소가 큰 경우(본 연구에서는 불교란 영역 투수계수의 0.2배)에는 스미어 영역내의 투수계수 분포 형태에 따라 압밀거동차이가 매우 크게 나타나는 반면 스미어로 인한 투수계수 감소가 작은 경우(본 연구에서는 불교란 영역 투수계수의 0.668배)에는 스미어 영역내의 투수계수 분포 형태는 압밀거동에 거의 영향을 주지 않는다. 따라서 실제 스미어 영향을 고려한 연약지반 압밀해석을 수행할 경우 스미어로 인한 주변지반의 투수계수 감소가 상대적으로 작은 경우에는 스미어 영역 전체의 투수계수 감소율이 일정하다고 가정할 단순 해석으로도 정확한 압밀거동 예측이 가능하지만, 스미어 발생으로 배수재 주변지반의 투수계수의 감소가 큰 경우에는 배수재로부터의 거리에 따른 투수계수 분포형태를 정확히 파악하고 해석을 수행할 때 압밀거동을 정확하고 합리적으로 예측할 수 있는 것으로 판단된다. 따라서 현재 연약지반 설계에서 스미어 영역에서의 투수계수를 일정하다고 가정하고 수행하고 있는 압밀해석은 압밀소요시간을 과대평가하여 과대설계를 하게 될 가능성이 있다. 하지만 스미어 영역의 투수계수를 일정하게 가정하여 단순해석을 수행할 수 있는 명확한 기준에 대해서는 다양한 지반 특성 및 스미어 영역의 크기 등 여러 영향인자를 고려하여 향후 더욱 심도있는 연구를 수행해야 할 것으로 판단된다.



(a)



(b)



(c)

그림 13. 스미어 영역에서의 투수계수 분포 형태에 따른 압밀거동분석; (a) $r_s/r_w=2$, (b) $r_s/r_w=3$, (c) $r_s/r_w=4$

표 2. 스미어 영역 크기, 투수계수 감소 비율 및 투수계수 분포 형태에 따른 압밀도 99.5%에서의 시간 비율

	No smear	$k_{sh} = 1/5 k_h$		$k_{sh} = k_v = 0.668 k_h$	
		Constant	Linear variation	Constant	Linear variation
(a) $r_s/r_w=2$	1	3.686	1.667	1.142	1.135
(b) $r_s/r_w=3$		4.148	2.155	1.222	1.222
(c) $r_s/r_w=4$		4.378	2.519	1.299	1.283

4. 현장조건 적용

국내의 대표적 연약지반 현장의 하나인 부산신항 건설지역

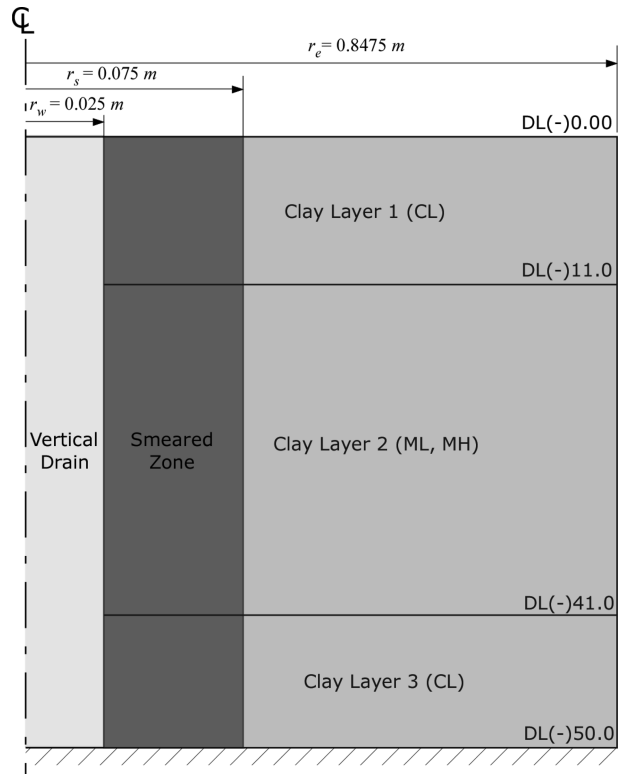


그림 14. 수치해석을 위한 부산신항 지역의 지층 단면

의 대표단면에 대하여 개발된 해석기법을 적용하여 해석을 수행하였다. 부산신항 지역의 연약지반은 N값이 7~20에 이르는 하부의 단단한 점성토 상부에 N값 0~6정도의 연약한 점성토로 이루어진 2개 층의 연약지반으로 이루어져있으며 두 점토층 사이에는 간헐적으로 얇은 모래 층이 나타나기도 있다. 또한 상부 연약층은 위치에 따라 실트질 점토 및 점토질 실트의 2, 3개 층으로 나뉘어지기도 한다(Chung, 2005). 해석에 사용된 대표단면의 물성치는 다음 표 3 및 그림 14와 같다. 하부의 단단한 점성토는 N값 6을 기준으로 하는 대한주택공사의 연약지반 판정기준 혹은 연약층 두께에 따라 N값 4 혹은 6을 기준으로 하는 한국도로공사 기준으로 보았을 때도, 연약지반으로 분류되지 않아 압밀이 거의 진행되지 않을 것으로 예상되는 지반이며 따라서 실제 설계에서도 하부점성토의 압밀은 고려하지 않는다. 이러한 지반 조건에 대하여 해석되는 영역의 최종깊이까지 PBD가 타설된 것으로 가정하고 PBD에 대한 환산직경 0.05m에 대하여 스미어 영역의 직경은 환산직경의 3배인 0.15m로 가정하였으며, 스미어 영역내의 투수계수는 선형적인 분포를 갖는 것으로 가정하여 해석하였다. 배수방향은 연직상향 및 방사내측 배수로 결정하였고, 실제 현장에서의 최종 성토높이를 고려하여 200kPa의 하중이 즉시 재하된 조건을 가정하였다. 상부의 점성토를 2개의 다층으로 가정한 경우와 하나의 등가 층으로 가정한 경우의 해석을 수행하였으며, 이에 더하여 하부의 점성토까지 포함한 3개의 다층지반이 압밀이 되는 세가지 경우에 대하여 해석을 수행하였고 따라서 수행된 해석조건은 다층지반과 스미어가 동시에 고려된 조건이다.

해석결과는 그림 15에 평균압밀도로 정리하여 도시하였다. 해석결과에서 나타나는 바와 같이 대부분의 압밀침하가 발생하는 상부 2개의 층만을 고려하였을 때는 압밀이 가장 느

표 3. 해석에 사용된 다층지반의 물성치

	층두께(m)	e_0	$\gamma_t(t/m^3)$	$k_f(m/s)$	$k_v(m/s)$	$k_{hs}(m/s)$	C_c	$c_v(m/s^2)$
(a) 등가 1층	41	1.633	1.647	8.573×10^{-10}	2.759×10^{-10}	2.759×10^{-10}	0.751	7.526×10^{-8}
(b) 상부 2층	11	1.600	1.648	2.002×10^{-9}	1.001×10^{-9}	1.001×10^{-9}	0.663	8.200×10^{-8}
	30	1.645	1.645	4.376×10^{-10}	2.188×10^{-10}	2.188×10^{-10}	0.839	8.175×10^{-8}
(c) 전체 3층	11	1.600	1.648	2.002×10^{-9}	1.001×10^{-9}	1.001×10^{-9}	0.663	8.200×10^{-8}
	30	1.645	1.645	4.376×10^{-10}	2.188×10^{-10}	2.188×10^{-10}	0.839	8.175×10^{-8}
	9	0.850	1.914	6.418×10^{-10}	3.214×10^{-10}	3.214×10^{-10}	0.319	3.973×10^{-7}

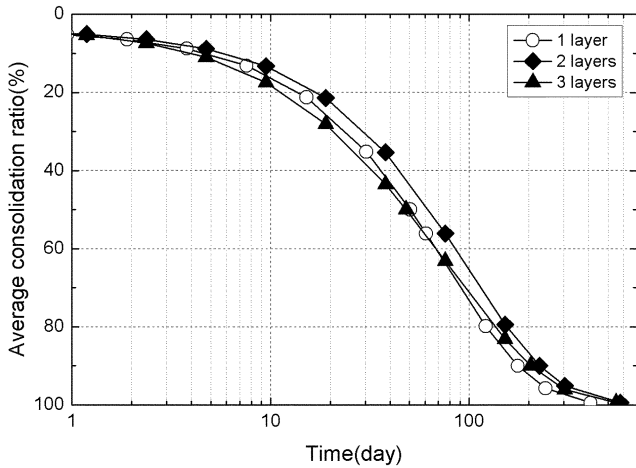


그림 15. 부산지역 점성토에 대한 다층지반 압밀 해석결과

리게 진행되는 것으로 나타났다. 또한 압밀초기에는 하부의 단단한 점토층을 포함하여 3개의 층을 모두 고려하였을 때 압밀이 가장 빠르게 진행되지만 중반 이후에는 등가투수계수를 사용한 1층 해석의 압밀속도가 가장 빨라진다. 압밀초기에는 최하층지반의 작은 압축성 및 큰 압밀계수로 인하여 이를 포함하는 3층해석의 압밀속도가 가장 빠르게 나타나며, 압밀 후반부에는 투수계수가 가장 작은 중앙층의 느린 압밀속도가 전체지반의 압밀속도에 영향을 미쳐 1층 지반보다 2층 및 3층의 다층지반 압밀속도가 더 느리게 나타난 것으로 판단되지만 이에 대해서는 향후 더욱 다양한 지반조건에 대하여 깊이있는 분석이 필요할 것으로 보인다. 압밀도 50% 및 90%에 대하여 3층 해석을 기준으로 보았을 때, 1층해석과 2층해석의 압밀시간 비는 각각 1.048, 0.859와 1.306, 1.104로 나타났다. 이상과 같은 해석결과, 부산신항 건설 현장과 같은 다층지반에서는 스미어를 고려한 압밀해석 수행시 압밀중반까지는 등가투수계수를 고려한 1층해석으로도 정확한 압밀속도를 얻을 수 있지만 최종 압밀시간을 정확히 예측하기 위해서는 다층지반을 고려하는 것이 중요하다는 결론을 얻을 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 연약지반의 압밀해석 시에 다층지반 및 스미어가 발생된 지반의 경계면 해석을 보다 정확히 수행할 수 있는 유한차분 해석기법을 개발, 제안하였다. 정규압밀 카울리나이트 지반의 특성을 근간으로 하여 다층 지반 및 스미어가 발생된 지반에 대한 다양한 조건에서 해석을 수행하

고 제안된 해석 기법 및 개발된 해석프로그램의 적용성을 검증하였으며, 해석결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 본 연구에서 개발, 제안된 유한차분 해석기법은 다층지반 및 스미어가 발생된 지반의 경계면에서도 흐름해석이 아닌 압밀해석을 수행하면서 경계면 주위로 절점간격이 다른 경우도 고려할 수 있어, 기존의 해석방법과 비교하였을 때 다층지반 및 스미어가 발생한 지반에 대한 해석을 더욱 정확하고 신뢰성있게 수행할 수 있다.
2. 스미어 영역내에서의 투수계수 분포형태에 따른 압밀거동을 살펴보면 스미어 영역내에서 투수계수가 일정한 경우가 선형적인 투수계수 분포를 갖는 경우보다 압밀이 더 지체된다. 하지만 이러한 지체정도는 스미어 영역에서의 투수계수를 불교란 영역의 1/5로 가정했을 때 74~121% 까지 크게 나타나는 반면, 스미어 영역에서의 투수계수를 불교란 영역에서의 연직방향 투수계수로 가정하였을 때는 1.1% 이내로 스미어 영역의 투수계수 분포 형태에 따른 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 실제 스미어 영향을 고려한 연약지반 압밀해석을 수행할 경우 스미어로 인한 주변지반의 투수계수 감소가 상대적으로 작은 경우에는 스미어 영역 전체의 투수계수 감소율이 일정하다고 가정한 단순 해석으로도 정확한 압밀거동 예측이 가능하지만, 스미어 발생으로 배수재 주변지반의 투수계수의 감소가 큰 경우에는 배수재로부터의 거리에 따른 투수계수 분포형태를 정확히 파악하고 해석을 수행할 때 압밀거동을 정확하고 합리적으로 예측할 수 있는 것으로 판단된다. 하지만 스미어 영역의 투수계수를 일정하게 가정하여 단순해석을 수행할 수 있는 기준에 대해서는 향후 더욱 심도있는 연구가 필요하다.
3. 다층지반 및 스미어 발생지반에 대한 해석결과 전체 지반의 압밀속도는 배수면 근처의 투수계수(혹은 압밀계수)에 지배적인 영향을 받는 것으로 나타났으며, 스미어가 발생시 압밀지체정도는 스미어 영역에서의 투수계수 감소율이 클수록 그리고 스미어 영역의 크기가 증가할수록 더욱 지체되는 것으로 나타났다. 이 때 압밀지체정도는 스미어 영역의 투수계수가 불교란 영역의 0.668배에서 0.2배로 감소함에 따라 150%에서 340%까지 더 지체되며, 스미어 영역의 크기가 배수재 직경의 2배에서 4배로 증가함에 따라 13%에서 50%정도 더 지체되는 것으로 나타났다.
4. 부산지역의 지반 조건을 이용한 해석 수행결과, 대부분의 압밀침하가 발생하는 상부 2개의 층만을 고려하였을 때는 압밀이 가장 느리게 진행되는 것으로 나타났으며, 압밀초기에는 하부의 단단한 점토층을 포함하여 3개의 층을 모

두 고려하였을 때 압밀이 가장 빠르게 진행되지만 중반 이후에는 등가투수계수를 사용한 1층 해석의 압밀속도가 가장 빨라지는 것으로 나타났다. 따라서 다층지반에서는 스미어를 고려한 압밀해석 수행 시 압밀중반까지는 등가투수계수를 고려한 1층해석으로도 정확한 압밀도를 평가할 수 있지만 최종 압밀시간을 정확히 예측하기 위해서는 다층지반을 고려하는 것이 매우 중요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 강릉대학교 대학 특성화분야 연구비 지원사업의 지원을 받아 이루어졌습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

구자갑, 전제성(2004) 배수 및 지반조건을 고려한 다층지반의 압밀해석, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제24권, 제6C호, pp. 345-356.

김윤태, 이승래, 도남영, 이영남(1996) 배수제가 설치된 압축성 지반의 축대칭 비선형 압밀해석, **한국지반공학학회논문집**, 한국지반공학학회, 제12권, pp. 5-19.

김팔규, 류권일, 구기욱, 남상규(1999) 수치해석에 의한 다층토 압밀의 경계요소면 해석, **한국지반공학학회 학술발표회**, 한국지반공학학회, pp. 349-356.

조성민(1998) 국내 연약 점성토 지반의 성토 재하시 변형 특성 분석, 박사학위논문, 서울대학교.

윤찬영(2005) 압밀 중 간극비의 변화가 연직배수재 설치 점성토 지반의 압밀거동에 미치는 영향, 박사학위논문, 서울대학교.

윤찬영, 정충기(2005) 연직배수재가 설치된 정규압밀 점성토 지반의 점진적 압밀이 차후 압밀거동에 미치는 영향, **한국지반공학학회논문집**, 한국지반공학학회, 제21권, 제6호, pp. 5-18.

윤찬영, 손대진, 정충기 (2007) 스미어에 따른 점성토 지반의 위치별 투수계수 분포 및 압밀 중 변화 거동, **대한토목학회 정기학술대회**, 대한토목학회, pp. 789-792.

윤찬영, 조경진, 정충기(2007) 연약지반 압밀해석을 위한 다층지반 및 스미어 경계 영역에서의 수치해석 기법 개발, **한국지반공학학회 학술발표회**, 한국지반공학학회, pp. 695-698.

Barron, R.A. (1944), The Influence of Drain Wells on the Consolidation of Fine-grained Soils, *Diss. Providence (R.I.) District, U.S. Engineering Office.*

Barron, R.A. (1948) Consolidation of fine-grained soils by drain

wells, *Transactions ASCE*, Vol. 112, No. 2346, pp. 718-742.

Basu, D. and Madhav, M.R. (2000) Effect of prefabricated vertical drain clogging on the rate of consolidation: a numerical study, *Geosynthetics International*, Vol. 7, No. 3, pp. 189-215.

Bergado, D.T., Anderson, L.R., Mura, N., and Balasubramaniam, A.S. (1996) *Soft Ground Improvement in Lowland and other Environments*. ASCE Press, New York.

Chung, S.G. (2005) Geotechnical properties of Pusan clay at the test embankment site, Terminal related facility area, the north part of Busan new port, *Joint Symposium of ISSMGE ATC 7 & KGS TC*, pp. 387-398.

Chung, Y-I. (1997) A study of three dimensional numerical analysis on vacuum consolidation, *Journal of KGS*, Vol. 13, No. 3, pp. 5-20.

Croft, D.R. and Lilley, D.G. (1977) *Heat Transfer Calculations using Finite Difference Equations*, Applied Science Publications LTD, London.

Fox, P.J., Di Nicola, M., and Quigley, D.W. (2003) Piecewise-linear model for large strain radial consolidation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 129, No. 10, pp. 940-950.

Hansbo, S. (1997) Practical aspects of vertical drain design, *14th ICSMFE*, Vol. 3, pp. 1749-1752.

Hansbo, S., Jamiolkowski, M., and Kok, L. (1981) Consolidation by vertical drains, *Geotechnique*, Vol. 31, No. 1, pp. 45-66.

Hird, C.C., Pyrah, I.C., and Russell, D. (1992) Finite element modelling of vertical drains beneath embankments on soft ground, *Geotechnique*, Vol. 42, No. 3, pp. 499-511.

Lo, D.O.K. (1991) *Soil Improvement by Vertical Drains*, PhD. Dissertation, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, USA.

Madhav, R., Park, Y.M. and Miura, N. (1993) Modelling and study of smear zones around band shaped drains, *Soils and Foundations*, Vol. 33, No. 4, pp. 135-147.

Pyrah, I.C. (1996) One-dimensional consolidation of layered soils, *Geotechnique*, Vol. 46, No. 3, pp. 555-560.

Sharma, J.S., Xiao, D. (2000), Characterization of a smear zone around vertical drains by large-scale laboratory tests, *Can. Geotech. J.*, Vol. 37, pp. 1265-1271.

Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*, John Wiley and Sons, New York, 510.

Yune, C.Y. and Chung, C.K. (2005) Consolidation test at constant rate of strain for radial drainage, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 28, No. 1, pp. 71-78.

(접수일: 2008.3.31/심사일: 2008.5.9/심사완료일: 2008.7.10)