

압밀현상 예측을 위한 경계면 및 근사 비선형 해석기법

Layer Interface and Approximated Nonlinear Analysis Method for Consolidation Prediction

이 규 환[†] · 전 제 성¹⁾ · 김 기 영²⁾ · 정 대 석³⁾

Lee, Kyuhwan · Jeon, Jesung · Kim, Kiyoung · Jung, Daesuk

ABSTRACT : The interface layer having different consolidation properties and nonlinear material function with permeability needs to be considered to predict consolidation behavior. In this study, interface equation between different layers has been derived and then applied to existing finite difference scheme for conducting consolidation analysis. These results have been compared with those by conventional method in which different layers are converted to single layer having conversion value of properties. Also, although the conventional consolidation analysis is used to consider non-linearity of the permeability with effective stress, an approximated nonlinear method as a function of consolidation coefficient with effective stress have been developed and applied to the consolidation analysis for various cases.

Keywords : Interface layer, Consolidation, Nonlinear material function, Approximated nonlinear analysis, Finite difference method

요 지 : 압밀현상을 예측하는데 있어, 압밀특성이 상이한 이질층의 존재 및 투수성에 대한 비선형 물질함수 특성을 고려하는 것은 기존 고전 압밀론에서의 많은 가정사항들을 극복하여 실제 현상에 더욱 부합하는 예측결과를 얻는데 있어 중요한 요소라 할 수 있다. 본 연구에서는 이질층에 대한 경계면 방정식을 유도하고, 이를 기존 유한차분해석기법에 포함시켜 이질층에 대한 압밀해석을 실시하였다. 또한 이질층을 단일토층으로 환산하여 압밀예측에 이용하는 기존방법과 본 연구에 의한 압밀해석 결과를 비교, 분석하였다. 한편, 유효응력단계별 투수성의 비선형성을 고려하기 위하여 기존 선형 압밀이론을 이용하되, 각 유효응력 단계별 압밀계수에 관한 함수식을 적용하는 근사 비선형 해석기법을 개발하여 본 압밀해석에 적용하였다.

주요어 : 경계면, 압밀, 비선형 물질함수, 근사비선형 해석, 유한차분법

1. 서 론

Terzaghi(1936), Barron(1948) 등의 압밀이론은 모두 단일층에 대한 해석적인 해를 제시하고 있는 반면, 실제 압밀 대상층이 존재하는 현장의 경우, 지반은 압밀 특성값이 동일한 단일층의 형태로 존재하지 않으며, 그 압축성과 투수성이 상이한 다양한 지층이 복잡하게 분포하는 형태를 띠고 있다. Gray(1945), Barber(1945)는 이러한 다층지반의 경우, 기존 연약지반 해석에 이용된 방법은 여러 층에 대한 각각의 토층두께 및 압밀계수를 이용하여 전토층에 대한 등가 압밀계수 혹은 환산토층두께를 구한 후, 이 값을 이용하여 단일층에 대한 압밀해석을 수행하였다. Urzua(2002)는 기존 방법별 차이 및 모순점에 대한 정량적 제시와 제안을 하였다. 본 연구에서는 기존 경험적 방법 및 수치해석을 이용하여 다양한 조건에 대한 다층지반의 압밀해석을 실

시하였다. 이질층에 대한 경계면 방정식을 유도하고, 이를 기존 유한차분해석기법에 포함시켜 이질층에 대한 압밀해석을 실시하였다. 전체적인 해석경우는 배수조건과 토층조건, 토층별 압밀계수 조건으로 구분하였다. 배수조건은 수직배수만을 고려한 경우와 수직 및 수평배수를 모두 고려한 경우로 구분하였고, 각각의 배수조건에 대하여 층별 토층두께 및 압밀계수값을 변화시켜 가며 해석을 실시하였다.

Barron(1948), Hansbo(1981) 등에 의한 기존의 고전 압밀이론은 임의 유효응력단계에 있어 일정한 투수성을 가정하고 있으나, 실제 압밀진행중의 수직방향 및 수평방향에 관한 투수성은 유효응력 단계에 따라 변화하는 변수이다. Gibson(1967), Schiffman(1981) 등에 의하면 유효응력 단계별 투수계수의 변화는 매우 큰 비선형성을 나타내고 있으며, 방향별 압밀계수 역시 그 변화폭은 투수계수에 비해 작지만 유효응력 단계에 따라 변화하는 변수이다. 이와

† 정회원, 건양대학교 건설시스템공학과 조교수(E-mail : khlee@konyang.ac.kr)

1) 정회원, 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원

2) 정회원, 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원

3) 비회원, 중부대학교 토목공학과 부교수

같은 투수성의 비선형성에 관한 연구가 실내시험 및 수치 해석을 통해 이루어졌으며, 그 결과 전체적인 압밀예측 결과에 있어 투수성의 비선형성이 미치는 영향이 매우 크다는 것이 밝혀졌다. 그러나, 실제 연약지반의 설계과정에 이러한 비선형성을 고려하는 것은 매우 어려운 일로 간주되고 있다. 그 이유는, 기존의 상용 프로그램들은 모두 선형 압밀이론을 그 이론적 배경으로 하고 있으며, 일부 연구목적에서 개발된 수치해석 프로그램에서도 압밀 지배방정식의 고유 비선형성으로 인한 해의 안정성 확보에 큰 어려움이 있기 때문이다. 즉, 이론적 지식이 해박한 사용자가 아닐 경우, 그 해석결과에는 큰 오류가 존재할 수 있으며, 입력조건에 따라 최종 결과가 크게 달라지는 등 해의 민감성에 관한 검증에 큰 어려움이 있다. 본 연구에서는 근사 비선형 압밀해석을 위하여 유효응력 단계별 투수성과 압축성의 비선형적 변화를 고려한 해석기법을 연구하였다.

2. 유한차분해석

본 연구에서는 기존 압밀이론을 이용한 수치해석에 있어 유한차분방법을 이용하였으며, 차분방정식은 implicit 방법의 Crank-Nicolson 방법을 이용하여 구성하였다. 이 방법은 해의 안정성에 대해 매우 안정적이며, 행렬구성에 따른 해는 연립 방정식의 해를 초기값으로 두고, 반복계산에 따라 해를 수렴시키는 방법인 Gauss-Seidel 방법을 통해 최종 해를 산정하였다.

해석 단위셀 및 절점구성은 그림 1 및 그림 2와 같고, 수직 및 수평배수를 고려한 기존 압밀지배방정식의 차분방정식 구성결과는 식 (1)과 같다.

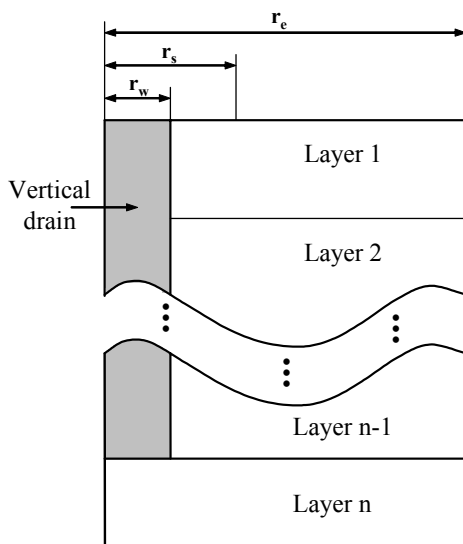


그림 1. 유한차분해석 단위셀

$$\begin{aligned}
 & u_{i-1,j,t+\Delta t} - \frac{\alpha_r}{\alpha_z} \left(\frac{\Delta r}{2r_r} - 1 \right) u_{i,j-1,t+\Delta t} \\
 & - \frac{2}{\alpha_z} (1 + \alpha_r + \alpha_z) u_{i,j,t+\Delta t} \\
 & + \frac{\alpha_r}{\alpha_z} \left(\frac{\Delta r}{2r_r} + 1 \right) u_{i,j+1,t+\Delta t} \\
 & + u_{i+1,j,t+\Delta t} = \\
 & - u_{i-1,j,t} + \frac{\alpha_r}{\alpha_z} \left(\frac{\Delta r}{2r_r} - 1 \right) u_{i,j-1,t} \\
 & - \frac{2}{\alpha_z} (1 - \alpha_r - \alpha_z) u_{i,j,t} \\
 & - \frac{\alpha_r}{\alpha_z} \left(\frac{\Delta r}{2r_r} + 1 \right) u_{i,j+1,t} - u_{i+1,j,t}
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, $u_{i,j,t}$: 임의 시간에서의 과잉간극수압
 $\Delta r, \Delta z, \Delta t$: 방향별 거리 및 시간 증분값
 c_r, c_v : 수평방향 및 수직방향 압밀계수

$$\begin{aligned}
 \alpha_r &= \frac{c_r \Delta t}{(\Delta r)^2} \\
 \alpha_z &= \frac{c_v \Delta t}{(\Delta z)^2} \\
 A_{cont} u &= \frac{\Delta t}{B_{cont,j}} \\
 a_{rz} &= \frac{a_r}{a_z} = \frac{c_r (\Delta z)^2}{c_v (\Delta r)^2} \\
 A_{cont} &= \frac{2}{a_z} (1 + a_r + a_z) \\
 &= 2 \left(\frac{1}{a_z} + \frac{a_r}{a_z} + 1 \right) \\
 &= 2 \left[\frac{(\Delta z)^2}{c_v \Delta t} + a_{rz} + 1 \right]
 \end{aligned}$$

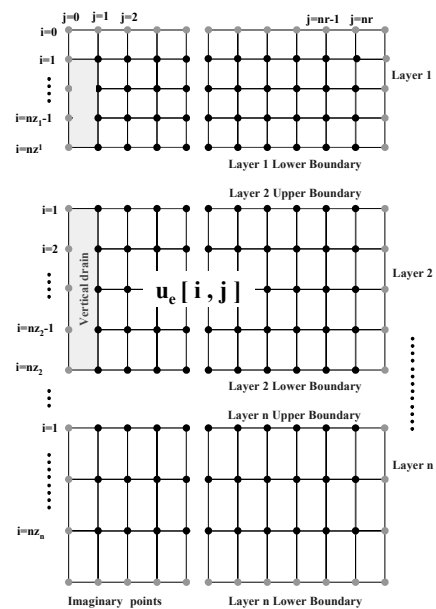


그림 2. 해석절점 구성

$$\begin{aligned}
B_{cont} = & u_{i-1,j,t+\Delta t} \\
& - \frac{\alpha_r}{\alpha_z} \left(\frac{\Delta r}{2r_r} - 1 \right) u_{i,j-1,t+\Delta t} \\
& + \frac{\alpha_r}{\alpha_z} \left(\frac{\Delta r}{2r_r} + 1 \right) u_{i,j+1,t+\Delta t} \\
& + u_{i+1,j,t+\Delta t} + u_{i-1,j,t} \\
& - \frac{\alpha_r}{\alpha_z} \left(\frac{\Delta r}{2r_r} - 1 \right) u_{i,j-1,t} \\
& + \frac{2}{\alpha_z} (1 - \alpha_r - \alpha_z) u_{i,j,t} \\
& + \frac{\alpha_r}{\alpha_z} \left(\frac{\Delta r}{2r_r} + 1 \right) u_{i,j+1,t} + u_{i+1,j,t}
\end{aligned}$$

해석대상의 토층은 투수성 및 압축성과 같은 압밀현상과 관련된 토층의 특성이 동일한 하나의 토층으로 구성될 수도 있지만, 그 특성이 상이한 여러개의 토층으로 이루어질 수도 있다. 실제의 현장 상황을 본다면 균일한 토층보다는 대부분의 경우 그 특성이 상이한 이질층으로 이루어진 것이 사실이다. 압밀해석을 하는데 있어 이와 같은 지반의 비균질성을 고려하기 위해 각 이질층의 경계면에 대한 흐름조건을 유도하였다. 그림 3은 상이한 토질특성 및 모델링 조건을 가진 이질층의 경계면 형태를 나타낸 것으로서, 위에 존재하는 층 nz_1 의 하부경계면은 아래에 존재하는 층 nz_2 의 상부경계면과 인접해 있다. nz_1 층의 투수계수를 k_{nz1} , 깊이별 절점간격을 dz_1 라 하고 nz_2 층의 투수계수를 k_{nz2} , 깊이별 절점간격을 dz_2 라 할 때 두 층의 경계면에서의 과잉간극수압은 식 (2)와 같은 간극수 흐름에 대한 연속 조건으로 구할 수 있다.

$$k_{nz1} \left(\frac{\partial u_e}{\partial z} \right)_{nz1} = k_{nz2} \left(\frac{\partial u_e}{\partial z} \right)_{nz2} \quad (2)$$

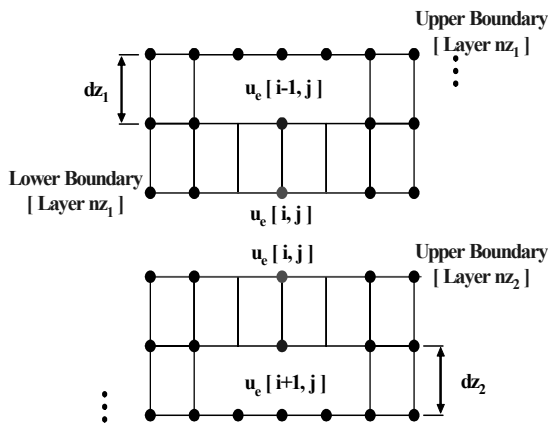


그림 3. 다층지반에 대한 경계면 해석요소

인접해 있는 두 층 경계면에서의 과잉간극수압을 u_α 라 하면, 식 (3)과 같은 조건이 성립되어야 하며, 이때의 간극수 흐름에 대한 연속 조건을 적용한 유한차분방정식은 식 (4)와 같다.

$$u_e(i,j)_{nz1} = u_e(i,j)_{nz2} = u_\alpha \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
-\rho_{bl} u_{i,j,t+\Delta t} = & -\rho_{br} \cdot u_{i,j,t} \\
& + u_{(i-1),v,j,t+\Delta t} + u_{(i-1),v,j,t} \\
& + \rho_{zr} \cdot [u_{(i+1),w,j,t+\Delta t} + u_{(i+1),w,j,t}] \\
& + \rho_{aa} \cdot [u_{i,j-1,t+\Delta t} + u_{i,j-1,t}] \\
& + \rho_{cr} \cdot [u_{i,j+1,t+\Delta t} + u_{i,j+1,t}]
\end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{여기서, } a_r = \frac{c_h \Delta t}{(\Delta r)^2}$$

$$a_z = \frac{c_v \Delta t}{(\Delta z)^2}$$

$$AA = -\frac{\alpha_r}{\alpha_z} \left(\frac{\Delta r}{2r_r} - 1 \right)$$

$$BL = -\frac{2}{\alpha_z} (1 + \alpha_r + \alpha_z)$$

$$BR = -\frac{2}{\alpha_z} (1 - \alpha_r - \alpha_z)$$

$$CR = \frac{\alpha_r}{\alpha_z} \left(\frac{\Delta r}{2r_r} + 1 \right)$$

$$\rho_{zr} = \frac{k_{z,w}}{k_{z,v}} \frac{\Delta z_v}{\Delta z_w}$$

$$\rho_{aa} = \frac{AA_v + \rho_{zr} \cdot AA_w}{2}$$

$$\rho_{bl} = \frac{BL_v + \rho_{zr} \cdot BL_w}{2}$$

$$\rho_{br} = \frac{BR_v + \rho_{zr} \cdot BR_w}{2}$$

$$\rho_{cr} = \frac{CR_v + \rho_{zr} \cdot CR_w}{2}$$

근사 비선형해석과 관련하여, 본 연구에서는 유효응력에 대한 수직 및 수평 압밀계수 값을 직접 입력한 후, 이에 대한 회귀분석을 실시, 적절한 회귀분석 함수식을 구성하도록 하였다. 실제 압밀해석시는 각 유효응력단계별 적정 압밀계수값을 회귀분석 함수식으로부터 자동적으로 구하여 해석에 적용시키도록 하였는데, 이 방법은 비선형 투수계수함수를 적용하는 비선형 압밀해석기법에 비해, 각 해석단계별 수치해석 오차를 최소화하고 안정적인 해를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다.

3. 경계면 해석

경계면에 대한 기존 압밀해석 방식을 살펴보면, 전체적인 환산토층두께를 산정하거나 등가 압밀계수를 산정하는 두가지 방식이 가장 보편적으로 이용되고 있다.

환산 토층두께를 구하는 방식보다는 각 층의 토층두께는 그대로 적용하되, 전체토층에 대한 등가 압밀계수를 구한 후 이를 압밀해석에 적용하는 방법이 널리 이용되고 있다. 이때의 수직방향 등가 압밀계수는 아래 식과 같이 구할 수 있으며, 수평방향 등가 압밀계수는 수직방향 압밀계수에 일정한 계수값을 곱해서 구하는 것이 일반적이다.

$$c_{v,eqv} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n h_i \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\sqrt{c_{v,i}}} \right)^2} \quad (5)$$

그러나, 기존 해석방법은 실제 지반의 각 토층두께 및 각 층의 압축성 차이가 커질수록 그 예측결과의 신뢰성이 낮아질 것으로 예상되는 바, 위의 경계면 방정식을 이용한 압밀해석을 실시하여, 그 결과를 기존 해석방법의 결과와 비교·분석 하였다.

해석조건을 살펴보면, 총 두께 12m의 지반을 상부 및 하부 토층으로 구분하고, 각 층의 토층두께와 압밀계수를 바꾸어가며 해석을 실시하였다. CR과 HR은 각각 상부토층 및 하부토층의 압밀계수비와 토층두께비를 나타낸 것으로서, CR은 1.0, 2.0, 5.0, 10.0, HR은 0.5, 1.0, 2.0으로 변화시켰다. 각각의 해석조건에 대한 등가 압밀계수를 구한 후, 이를 이용한 기존 압밀이론의 예측결과와 각각의 해석결과를 비교하였는데, 총 10가지 경우에 대한 구체적인 입력값은 표 1과 같다. 기존 이론에 의한 압밀해석시 Terzaghi(1936)의 수직배수 압밀이론 및 Barron(1948)의 수

평배수 압밀이론이 적용되었다.

Case1은 상·하부 토층두께 및 압밀계수가 모두 같은 경우로서, 이는 12.0m의 단일층 조건과 동일한 경우이다. 결과에서도 알 수 있듯이, 기존 압밀이론에 의한 예측결과와는 본 연구에서의 수치해석방법에 의한 예측결과와 거의 유사하며, 이를 통해 경계면해석의 기본적 신뢰도를 확인할 수 있다. 단, 초기상태에서의 차이는 초기 경계조건 영향이 과도하게 표현되는 수치해석의 한계로 인해 발생한다고 판단된다.

Case2, Case3, Case4의 경우, 기존 이론에 의한 예측결과가 압밀 전반부에 있어 침하량을 수치해석 방법에 비해 약간 과소평가하는 것으로 나타났다. 시간별 압밀도 및 과잉간극수압의 변화를 살펴보면, 수치해석 결과에 있어 압밀계수가 상대적으로 큰 상부토층의 경우는 빠른 압밀진행 현상을 나타내는 반면, 압밀계수가 작은 하부토층은 상대적으로 느린 압밀진행 현상을 보이고 있다.

Case2의 경우, 기존 해석방법은 실제 각 토층의 압밀도를 상부토층의 경우는 대략 9% 과소평가하고 있으며, 하부토층의 경우는 대략 4% 정도 과대평가하고 있다. 이는 상식적인 결과에 속하지만, 중요한 점은 기존 해석방법에 의한 예측결과가 실제 두 토층의 평균적인 압밀진행 현상을 나타내기 보다는 압밀진행이 느린 하부토층의 경향에 더 가깝다는 것이다.

즉, 임의의 시간에 대한 지반의 압밀도를 평가하고, 이를 통해 지반의 유효응력 및 전단강도를 평가한다고 했을 때, 기존 해석방법에 의한 결과는 상부토층에 대한 유효응력 및 전단강도를 크게 과소평가하게 되는 동시에, 하부토층에 대해서는 유효응력 및 전단강도를 과대 평가할 우려가 있다.

Case5, Case6, Case7의 경우, 전체적인 시간-침하량 변화에 있어, 각각의 경우 모두 기존 이론에 의한 예측결과가 압밀 전반부에 있어 침하량을 수치해석 방법에 비해 과

표 1. 경계면 해석조건

Case	CR	HR	c_v (m ² /month)		c_h (m ² /month)		Layer Height, H (m)		$c_{v,eqv}$	$c_{h,eqv}$
			c_{v1}	c_{v2}	c_{h1}	c_{h2}	H_1	H_2		
1	1.0	1.0	0.128	0.128	0.256	0.256	6.0	6.0	0.128	0.256
2	2.0	0.5	0.128	0.064	0.256	0.128	4.0	8.0	0.079	0.157
3		1.0	0.128	0.064	0.256	0.128	6.0	6.0	0.088	0.176
4		2.0	0.128	0.064	0.256	0.128	8.0	4.0	0.099	0.198
5	5.0	0.5	0.128	0.026	0.256	0.052	4.0	8.0	0.039	0.078
6		1.0	0.128	0.026	0.256	0.052	6.0	6.0	0.049	0.099
7		2.0	0.128	0.026	0.256	0.052	8.0	4.0	0.065	0.129
8	10.0	0.5	0.128	0.026	0.256	0.052	4.0	8.0	0.021	0.043
9		1.0	0.128	0.026	0.256	0.052	6.0	6.0	0.030	0.059
10		2.0	0.128	0.026	0.256	0.052	8.0	4.0	0.043	0.086

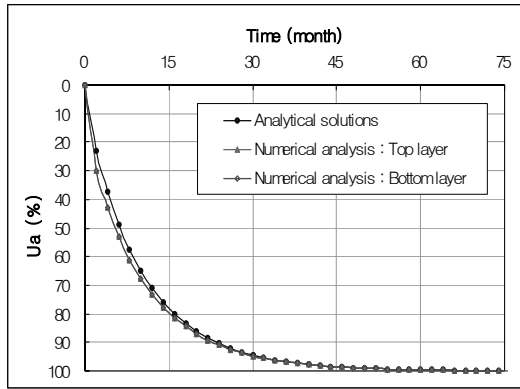


그림 4. 시간별 압밀도 - Case1

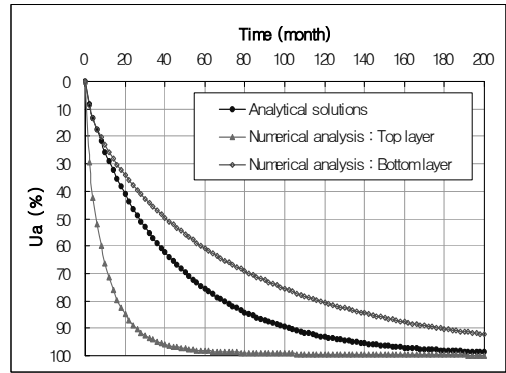


그림 8. 시간별 압밀도 - Case9

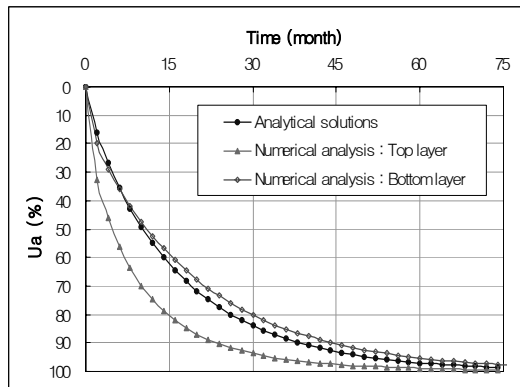


그림 5. 시간별 압밀도 - Case2

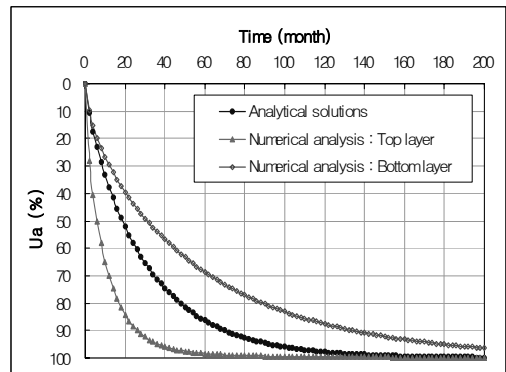


그림 9. 시간별 압밀도 - Case10

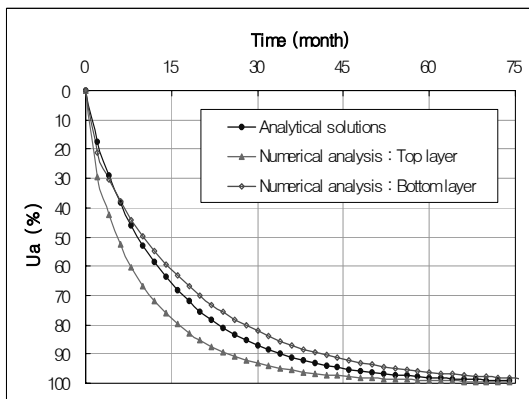


그림 6. 시간별 압밀도 - Case3

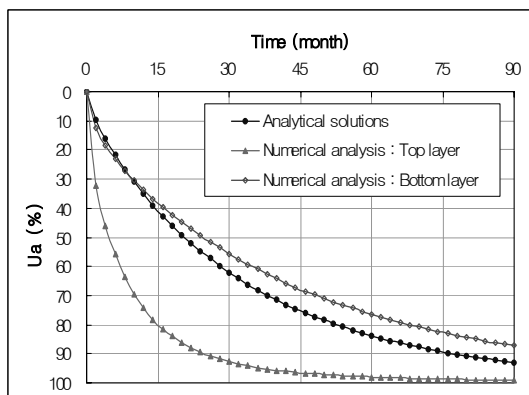


그림 7. 시간별 압밀도 - Case5

소평가하는 것으로 나타났는데, 그 정도는 하부토층이 두꺼울수록 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 압밀계수가 작은 하부토층의 영향으로 실제보다 전체적인 압밀이 늦게 진행되는 것으로 평가되기 때문이다.

시간별 압밀도 및 과잉간극수압의 변화를 살펴보면, 수치해석 결과상의 각 토층별 압밀도 및 과잉간극수압 변화는 기존 해석방법에 의한 예측결과와 상이하게 나타남을 알 있다. 압밀계수가 상대적으로 큰 상부토층의 경우는 빠른 압밀진행 현상을 타나내는 반면, 압밀계수가 작은 하부토층은 상대적으로 느린 압밀진행 현상을 보이고 있다.

Case5의 경우, 기존 해석방법은 실제 각 토층의 압밀도를 상부토층의 경우는 대략 14.2% 과소평가하고 있으며, 하부토층의 경우는 대략 7.4% 정도 과대평가하고 있다. 마찬가지로, 임의의 시간에 대한 지반의 압밀도를 평가하고, 이를 통해 지반의 유효응력 및 전단강도를 평가한다고 했을 때, 기존 해석방법에 의한 결과는 상부토층에 대한 유효응력 및 전단강도를 크게 과소평가하게 되는 동시에, 하부토층에 대해서는 유효응력 및 전단강도를 과대 평가할 우려가 있으며, 그 정도역시 Case2, Case3, Case4에 비해 증가함을 알 수 있다.

Case8, Case9, Case10의 경우, 시간-침하량 변화에 있어, 그 차이는 더욱 증가함을 알 수 있으며, 시간별 압밀도 및

과잉간극수압의 변화에 있어서도 기존 해석방법과 수치해석을 이용한 실제 토층별 예측결과에는 많은 차이가 있는 것을 알 수 있다.

Case10의 경우, 기존 해석방법은 실제 각 토층의 압밀도를 상부토층의 경우는 대략 12.0% 과소평가하고 있으며, 하부토층의 경우는 대략 17.7% 정도 과대평가하고 있다.

4. 근사 비선형 해석

기존 압밀이론의 예측결과와 수치해석에 의한 근사 비선형 해석결과를 비교·분석하기 위하여, 압밀기간중 지반이 경험하는 유효응력을 $3.0\text{tf/m}^2 \sim 8.0\text{tf/m}^2$ 이라 가정하고 각각의 해석방법에 따른 압밀해석을 실시하였다.

기존 압밀이론에 의한 예측시, 평균 유효응력에 해당하는 수직 및 수평방향 압밀계수($c_v=0.128\text{m}^2/\text{month}$, $c_h=0.256\text{m}^2/\text{month}$)를 적용하였으며, 근사 비선형 해석의 경우는 수직방향 압밀계수의 경우, $0.256 \sim 0.064\text{m}^2/\text{month}$, 수평방향 압밀계수의 경우, $0.512 \sim \text{m}^2/\text{month}$ 범위로 변화하는 함수식을 구성하여 해석에 적용하였다.

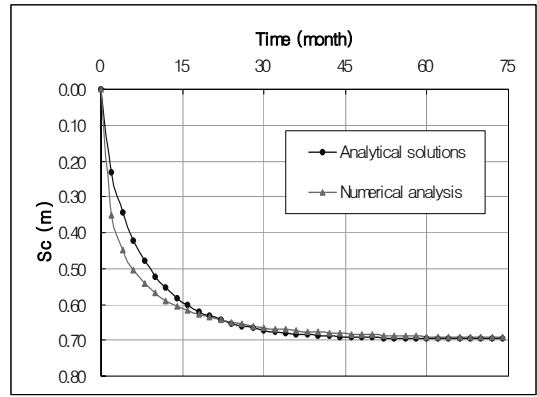
근사 비선형 해석시, 압밀계수에 관한 회귀분석 식으로부터 각 시간단계별 유효응력 결과에 대응하는 압밀계수 값을 계산한 후, 이를 각 스텝별 압밀해석에 적용시키도록 하였다.

그림 10은 특정 압밀계수에 대한 기존 압밀이론의 예측결과와 압밀계수에 대한 함수식을 적용시킨 근사 비선형 압밀해석 결과를 보여주고 있다. 결과에서 알 수 있듯이, 유효응력 단계에 관계없이 일정한 압밀계수 값을 적용시킨 예측결과와 비교할 때, 근사 비선형 해석의 경우, 유효응력 단계에 따라 압밀진행 경향이 다르게 나타나는 것을 알 수 있다.

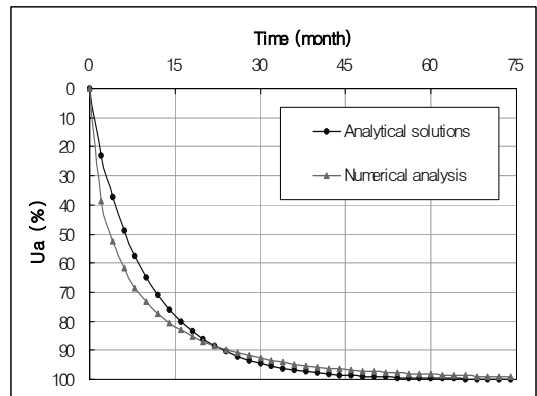
근사 비선형 해석의 경우는 압밀 초반부에 상대적으로 큰 압밀계수가 적용되었고, 압밀 후반부에는 상대적으로 작은 압밀계수가 적용되었기에, 결과에서도 압밀 전반부는 기존 이론의 결과에 비해 상대적으로 빠른 압밀진행을 보이고 있으며, 후반부에서는 반대의 경향을 보이고 있다.

물론 전체적인 경향과 그 차이는 입력되는 압밀계수의 함수식에 따라 변화하지만, 이러한 비선형적 압밀특성을 수치해석에 적용하는데 있어, 별도의 큰 노력없이 실내시험값을 그대로 적용시키면서 동시에 안정적인 해를 얻는 것이 가능하다.

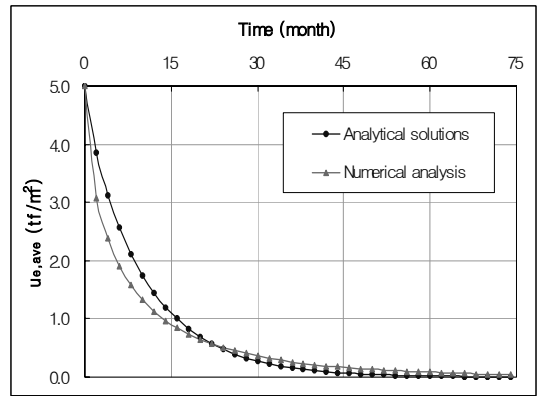
본 해석사례에서는 단일토층을 대상으로 유효응력 단계별 압밀계수만을 변화시켰지만, 실제 현장의 경우는 다층 지반 분포 및 각 토층별 압축성 및 투수성이 상이한 다양한 조건의 양상을 띠게 될 것이다.



(a) 시간별 침하량



(b) 시간별 압밀도



(c) 시간별 과잉간극수압

그림 10. 근사 비선형 해석결과

5. 결 론

본 연구에서는 경계면에 대한 차분 방정식을 유도하였으며, 이를 이용하여 각 토층두께와 압밀계수를 변화시켜 가며 조건별 압밀해석을 실시하였다.

전체적인 시간-침하량 변화에 있어, 각각의 경우 모두 기존 이론에 의한 예측결과는 수치해석방법상의 예측결과에 비해 압밀 전반부의 침하량을 과소평가하는 것으로 나타났다. 그 정도는 하부토층이 두꺼울수록 증가하는 경향

을 나타내는데, 이는 압밀계수가 작은 하부토층의 영향으로 실제보다 전체적인 압밀이 늦게 진행되는 것으로 평가되기 때문이라고 판단된다. 즉, 임의의 시간에 대한 지반의 압밀도를 평가하고, 이를 통해 지반의 유효응력 및 전단강도를 평가한다고 했을 때, 기존 해석방법에 의한 결과는 상부토층에 대한 유효응력 및 전단강도를 크게 과소평가하게 되는 동시에, 하부토층에 대해서는 유효응력 및 전단강도를 크게 과대 평가할 우려가 있음을 알 수 있다. 물론, 그 정도는 현장의 지층조건 및 압밀 특성값에 따라 변화하지만, 기존 해석방법은 실제 압밀현상을 예측하는데 있어 큰 오류를 발생시킬 수 있으며, 본 연구에서의 수치해석 방법을 이용하여 좀 더 현실에 부합하는 압밀해석이 가능함을 알 수 있었다.

한편 본 연구에서는 기존 선형 압밀이론을 이용하되, 각 유효응력 단계별 압밀계수에 관한 함수식을 적용하는 근사 비선형 해석기법을 개발하였다. 특정조건에 대한 압밀 해석 결과, 유효응력 단계에 관계없이 일정한 압밀계수 값을 적용시킨 예측결과와 비교할 때, 근사 비선형 해석의 경우, 유효응력 단계에 따라 압밀진행 경향이 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 전체적인 경향과 그 차이는 입력되는 압밀계수의 함수식에 따라 변화하지만, 본 방법을 통해 이러한 비선형적 압밀특성을 수치해석에 적용하는데 있어, 별도의 큰 노력없이 실내 시험값을 그대로 적용시키면서 동시에 안정적인 해를 얻는 것이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Barber, E. S.(1945), Discussion of “Simultaneous Consolidation of Contiguous Layers of Unlike Compressible Soils” by H. Gray. Trans. Am. Soc. Civ. Eng., Vol. 110, pp. 1345~1349.
2. Barron, R. A.(1948), Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells. Trans. Am. Soc. Civ. Eng., Vol. 113, Paper No. 2346, pp. 718~742.
3. Gibson, R. E., England, G. L., and Hussey, 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.
4. 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, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 18, No. 2, pp. 280~293.
5. Gray, H.(1945), Simultaneous consolidation of contiguous layers of unlike compressible soils. Trans. Am. Soc. Civ. Eng., Vol. 110, No. 2258, pp. 1327~1344.
6. Hansbo, S., Jamiolkowski, M. and Kok, L.(1981), Consolidation by Vertical Drains. *Geotechnique*, Vol. 31, No. 1, pp. 45~66.
7. Schiffman, R. L. and J. R. Stein(1970), One-dimensional consolidation of layered systems. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 96, No. SM4, pp. 1499~1504.
8. Terzaghi, K. and O. K. Frohlich(1936), *Theorie der Setzung von Tonschichten*. Leipzig, Deutike, 166.
9. Urzua, A. and J. T. Christia(2002), Limits on a Common Approximation for Layered Consolidation Analysis. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol. 128, No. 12, pp. 1043~1045.

(접수일: 2007. 8. 9 심사일: 2007. 8. 24 심사완료일: 2007. 10. 15)