

압밀계수변화 및 지층조건이 압밀현상에 미치는 영향

Influence of Changing Coefficient of Consolidation and Layered Condition on Consolidation Behavior

전 제 성* 구 자 갑** 이 송***
Jeon, Je-Sung Koo, Ja-Kap Lee, Song

Abstract

In this study, consolidation analysis methods reflecting various ground condition and changing coefficient of consolidation with consolidation process are presented. Research activities include development of numerical program consists of two parts considering vertical drainage only and both drainage condition with vertical and radial direction. Also, interface equation of adjacent two layers and function for changing coefficient of consolidation are added to developed program. This paper presents the results from a detailed consolidation analyses, which explores consolidation process with time in varying layered system and changing coefficient of consolidation

요 지

본 연구에서는 다양한 지층조건과 압밀특성의 변화를 반영하여, 프리로딩 공법 및 연직배수공법을 독립적 혹은 복합적으로 적용했을 경우 발생할 수 있는 연약지반의 압밀거동을 보다 정확히 예측할 수 있는 방안을 제시하고자 한다. 전체적으로는 수직배수만을 고려한 1차원 압밀현상의 예측과 관련된 내용 및 수직배수와 수평배수를 동시에 고려한 축대칭 압밀현상의 예측에 관한 내용을 포함한 압밀해석 프로그램을 개발하였다. 각 조건별 기본 해석알고리즘의 개발과 함께 이질층에 대한 경계면 방정식 및 유효응력을 함수로하는 압밀계수 함수식을 해석기법에 추가하였다. 이를 이용하여 다양한 경계면 조건과 압밀계수의 변화가 압밀현상에 미치는 영향을 분석하였다.

Keywords : consolidation analysis, finite difference method, numerical analysis, interface of adjacent two layers, variation of coefficient of consolidation

핵심 용어 : 압밀해석, 유한차분방법, 수치해석, 토층경계면, 압밀계수 변화

* 정회원, 한국수자원공사 수자원연구원, 책임연구원

** 정회원, 한경대학교 토목공학과, 교수

*** 정회원, 서울시립대학교 토목공학과, 교수

E-mail : jsjeon@kowaco.or.kr 017-234-6697

• 본 논문에 대한 토의를 2005년 3월 31일까지 학회로 보내 주시면 2005년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

기존의 압밀해석 방법은 고전압밀론과 관련된 압밀 이론 및 해석기법의 한계, 각 이질층에 대하여 등가의 투수성을 고려함으로써 인한 침하속도 예측시의 오류, 압밀계수의 변화를 고려하지 못하는 등 그 한계점을 내포하고 있다. 또한 대부분의 압밀해석이 기존의 해석적 해를 이용하는 수계산에 의해 이루어지고 있는 것도 사실이다. 그러나, 이 경우는 실제 다양한 지층 조건에 대한 압밀현상 예측시, 지반의 압밀 진행 및 이와 관련된 지지력 산정 등 각종 설계분야에 있어 과도한 오류를 발생시키기도 한다.

본 연구에서는 이와 관련하여, 실제 현장상황에 해당하는 이질층 조건 및 유효응력단계에 따른 압밀계수의 변화가 압밀현상에 미치는 영향을 분석하였다. 이와 관련하여, 수직배수 및 수평배수를 동시에 고려하되 다양한 지층조건 및 압밀특성 변화를 고려할 수 있는 수치해석 기법과 프로그램을 개발하였다. 또한 개발 프로그램을 이용하여 경계면 조건과 압밀계수 변화가 압밀현상에 미치는 영향 등에 관하여 살펴보았다.

2. 이론적 배경

본 연구에서는 다양한 경계면 조건과 압밀계수의 영향등을 살펴보고자, 유한차분방법에 의한 수치해석을 실시하였다. 수치해석은 수직 및 수평배수를 동시에 고려할 수 있도록 식 (1)과 같은 지배방정식을 도입하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + c_r \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) \quad (1)$$

NAVFAC Design Manual(DM-7, 1986)에서는 다층지반의 압밀현상 예측에 있어, 각기 다른 압밀 특성을 가지는 각각의 압밀층을 하나의 단일토층으로 환산하여 최종적인 압밀현상 예측에 이용하는 방법을 제안하고 있다. 정규화 대상이 되는 압밀층 i 를 선택한 후, 다른 층의 토층두께를 식 (2)에 의해 변환하고 그 두께를 모두 합하여 압밀예측에 이용하게 된다. 이

때 사용되는 압밀 특성값은 정규화 대상층 i 의 값을 이용하게 된다.

$$H_j' = H_j \sqrt{\frac{c_{vj}}{c_v}} \quad (2)$$

여기서, c_{vj} : 정규화 대상토층의 수직방향 압밀계수
 c_v : 환산토층에 대한 수직방향 압밀계수
 H_j : 원래의 토층두께
 H_j' : 환산 토층두께

임의 시간에 대한 특정 지점의 과잉간극수압 및 압밀도는, 특정 지점에 대한 환산 토층의 좌표를 구한 후, 이에 대한 값을 통해 간접적으로 구할 수 있다.

다층지반에 대한 압밀해석시, 환산 토층두께를 구하는 위의 방식 보다는 각 층의 토층두께는 그대로 적용하되, 식 (3)과 같이, 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 등가 압밀계수에 일정한 계수값을 곱해서 구하는 것이 일반적이다.

$$c_{v,eqv} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n h_i \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\sqrt{c_{v,i}}} \right)^2} \quad (3)$$

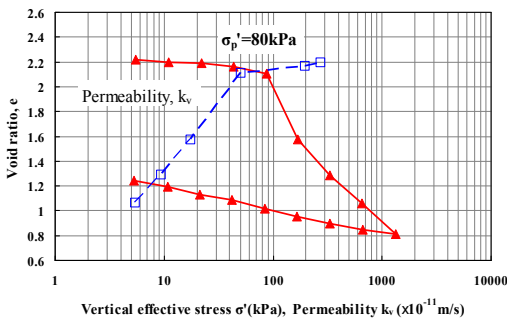
여기서, $c_{v,eqv}$: 전체토층에 대한 수직방향 등가 압밀계수
 $c_{v,i}$: i 번째 토층의 수직방향 압밀계수
 h_i : i 번째 토층의 두께
 n : 전체 토층수

위에서 언급된 환산토층두께 및 등가압밀계수를 이용하는 방법은 모두 같은 개념하에 유도된 방법으로서, 동일 조건에 대한 압밀해석결과는 두 방법이 서로 동일하다.

한편 Gray & Barbr(1945)는 수직방향 배수 및 미소변형 등을 그 기본 가정으로하여, 압밀특성이 다른 두 개의 층이 인접해 있는 경우에 대한 엄밀해를 발표하였는데, Gray & Barbr의 엄밀해를 적용하는데 있어 위의 두 가지 방법과 다른 점은 각 층의 투수계수비가 적용된다는 것이다. Urzua 등은 Gray & Barber의 엄밀해를 이용하되, 각 층의 투수계수와 압밀계수비를 달리한 압밀해석 실시하고, 그 결과를 환산 토층두께 방법에 의한 예측결과와 비교하였다. 그 결과, DM-7 등에서 사용하는 토층두께에 대한 환산식은 $k_1/k_2 = \sqrt{c_{v1}/c_{v2}}$ 의 조건이 만족될 때만 성립함을 언급하고 있다. 이러한 이유로 Urzua등은 다층지반의 압밀현상을 예측하는데 있어, 위 조건이 만족되지 않는 경우는 Gray & Barber의 엄밀해를 이용하거나 수치해석 방법 필요하다는 제안을 하고 있다.

한편, 실제 압밀현상중의 압축성과 투수성은 일정한 값이 아닌 유효응력 단계에 따른 비선형적 거동을 나타내고 있다. Fig. 1은 싱가포르 해성점토에 대한 압밀 시험 결과를 나타내고 있는데, 결과에서 보듯이 유효응력이 증가함에 따라 투수계수 및 체적압축계수, 압밀계수 등이 변화하는 것을 볼 수 있다. 그 변화폭은 지반의 초기 응력조건이 연약할수록 더욱 크게 증가하는 것으로 보고되고 있다.

결론적으로, 투수계수를 적용한 차분해석에 있어서는 유효응력 단계별 변화하는 투수계수의 함수가 고려되어야 함을 알 수 있고, 압밀계수를 적용한 차분해석에 있어서는 과압밀구간과 정규압밀구간에 있어서의 변화값을 적절히 반영해야 함을 알 수 있다.



3. 수치해석

3.1 유한차분방정식

본 연구에서는 다양한 경계면 조건과 압밀계수의 변화가 압밀현상에 미치는 영향등을 살펴보고자, 유한차분방법을 이용한 수치해석을 실시하였다. 유한차분방정식은 implicit 방법에 해당하는 Crank-Nicolson 방법을 이용하여 구성하였으며, 매트릭스 구성에 따른 해는 Gauss-Seidel 방법을 이용하여 구하였다.

3.2 경계조건

현장조건 및 연직배수제의 시공상황, 이질층의 분포 상황에 따른 경계조건은 크게 각 토층의 상부와 하부 및 좌측과 우측의 기본 경계면으로 구분된다. 전체 토층의 상부와 하부는 크게 배수 및 비배수 조건으로 분류되는데, 배수 조건의 경우, 상부 및 하부의 과잉간극수압을 시간에 관계없이 일정한 값으로 모델링 하였다. 비배수 조건의 경우는 상부와 하부 경계면 모두 경계면에서의 깊이에 대한 과잉간극수압 변화가 없다는 조건으로 모델링 하였다. 좌측과 우측 경계면의 경우, 연직배수제가 있는 경우와 인접 지반과의 경계면인 경우로 구분하였는데, 좌측과 우측이 인접 지반과의 경계면으로 고려되는 경우, 좌측과 우측 경계면 모두 경계면에서의 수평방향에 대한 과잉간극수압 변화가 없다는 조건으로 모델링 하였다.

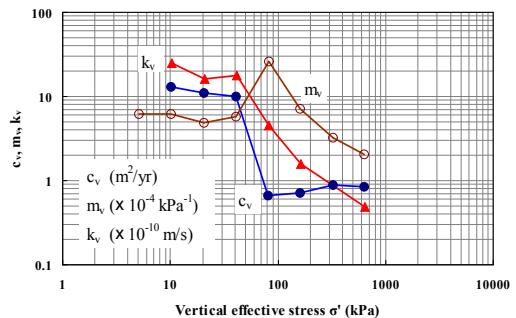


Fig. 1 Oedometer test results on Singapore marine clay(after Bo et al., 2003)

3.3 층별 경계면 방정식

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.

$$k_{nz1} \left(\frac{\partial u_e}{\partial Z} \right)_{nz1} = k_{nz2} \left(\frac{\partial u_e}{\partial Z} \right)_{nz2} \quad (4)$$

토질특성과 압밀특성이 다른 두 이질토층의 경계면을 고려할 때, 위에 존재하는 층 nz_1 의 하부경계면은 아래에 존재하는 층 nz_2 의 상부경계면과 인접해 있다. nz_1 층

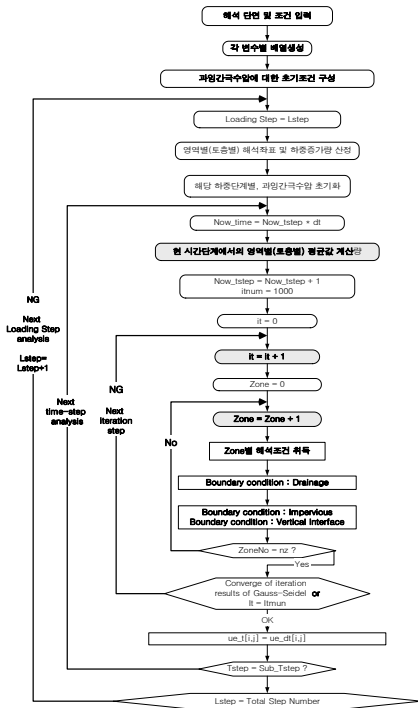


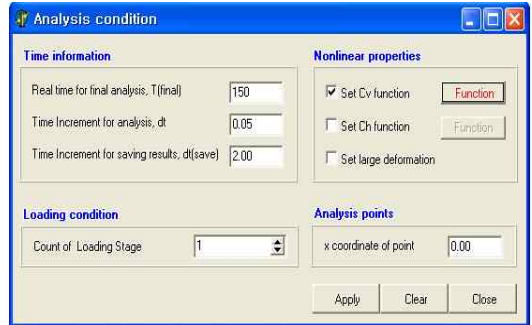
Fig. 2 Flow chart for consolidation analysis

의 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 (4)와 같은 간극수 흐름에 대한 연속 조건으로 구할 수 있다.

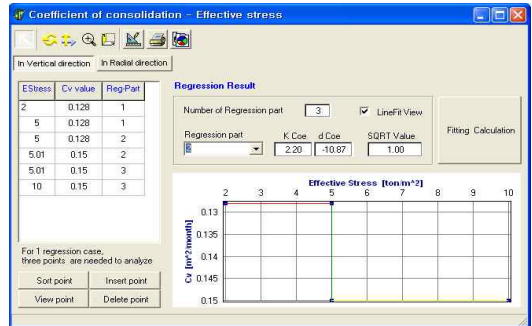
3.4 프로그램 개발

앞서 언급된 수직 및 수평배수를 고려한 압밀모델과 이에 의한 유한차분방정식, 배수 및 비배수 경계면 조건, 이질토층의 경계면 조건 및 압밀계수의 변화 해석 기법, 연직배수재가 부분적으로 관입되어 있는 경우 등에 관한 수치해석 기법을 이용하여 압밀해석 프로그램을 개발하였다. 프로그램은 Window Visual Tool 중의 하나인 Delphi Programming Language를 이용하여 개발되었다.

압밀현상에 비해 상대적으로 복잡한 지반의 초기 유효응력 분포 상태를 고려할 수 있도록 설계되었고, 유효응력단계별 압밀계수 회귀분석 과정 및 탄성론에 의한 지중응력 증가량 계산과정을 포함하도록 설계되었다.



(a) 해석조건



(b) 압밀계수에 대한 회귀분석

Fig. 3 프로그램의 주요 입력과정

프로그램은 총 15개의 실행과정별 폼과 Unit으로 구성되어 있으며 이들 각각은 main unit과 상호 참조되도록 고안되어 있다. 개발 프로그램의 전체적인 해석 순서도는 Fig. 2와 같으며, 이와 관련된 개발된 프로그램의 구성 및 중요 사용자 Interface 등을 살펴보면 Fig. 3과 같다.

3.5 수치해석 결과에 대한 검증

3.5.1 수직배수조건에 대한 기존 해석식과의 비교

수직배수조건에 대하여, 개발 프로그램의 압밀해석 결과와 Terzaghi 1차원 압밀이론에 의한 예측결과를 비교, 분석하였다. 개발 프로그램 및 기존 이론의 동일한 해석조건을 구현하기 위하여, 단일지층 조건과 압

밀진행중 일정한 압밀계수를 가정하여 압밀해석을 실시하였으며, 응력이력 조건은 정규압밀점토(OCR=1.0), 하중은 무한대로 분포한다고 가정하여 전 토층에 걸쳐 균등하게 작용하는 것으로 고려하였다.

Fig. 5는 Terzaghi 1차원 압밀이론에 의한 임의 시간에 대한 토층별 과잉간극수압분포와 개발 프로그램에 의한 예측결과를 비교한 것으로서, 상하부 대칭성을 고려하여 상부 토층에 대해서 나타내었다. 결과에서 보듯이, 수치해석적 오차를 감안하더라도 기존 해석식과 개발 프로그램에 의한 예측결과는 거의 일치하는 경향을 보이고 있다. Fig. 6은 시간에 따른 압밀도와 과잉간극수압 변화를 비교한 것이다. 개발 프로그램에서의 시간에 대한 절점별 계산결과는 과잉간극수압이다.

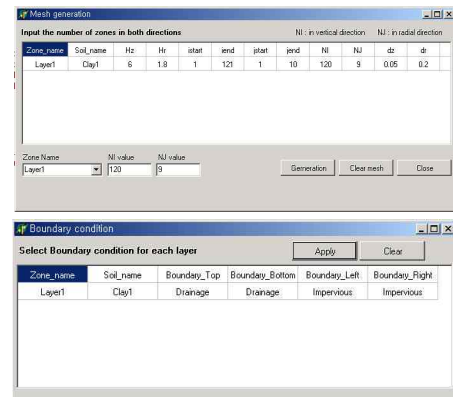
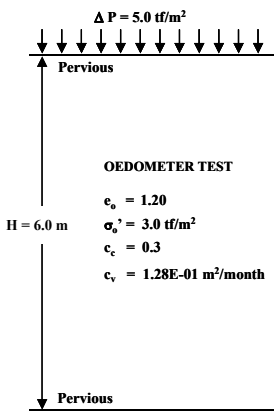


Fig. 4 In-situ condition and input values for mesh generation and boundary conditions considering vertical drainage only

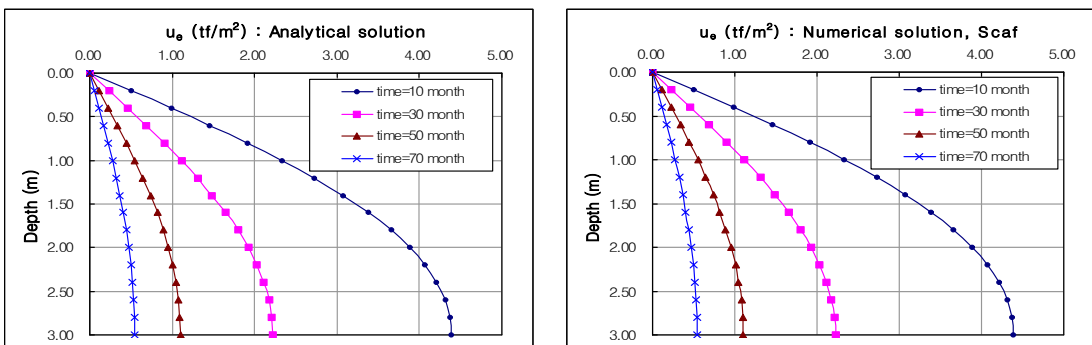
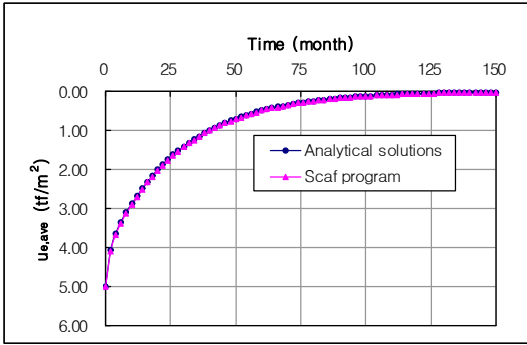
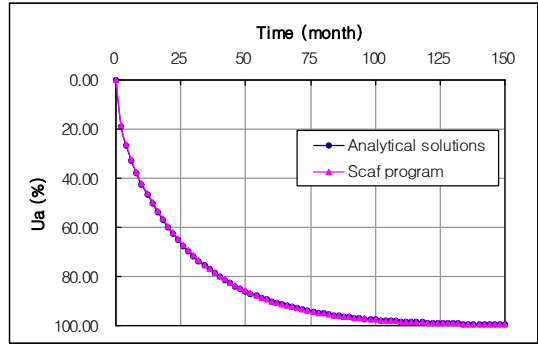


Fig. 5 Plots of excess pore pressure with time for upper layer



(a) Excess pore pressure



(b) Average degree of consolidation

Fig. 6 Plots of consolidation process with time considering vertical drainage only

모든 결과에서 알 수 있듯이, 개발 프로그램의 예측 결과는 기존 해석식의 예측결과와 거의 비슷하게 나타남을 알 수 있으며, 이를 통해 개발 프로그램의 이론과 알고리즘, 결과계산과정 등에 관한 기본적인 신뢰도를 확인 할 수 있다.

3.5.2 수직 및 수평배수조건에 대한 기존 해석식과의 비교

위의 수직배수조건과 동일한 조건에 대하여, 연직 배수재가 시공된 경우에 대한 해석을 실시하였다. 연직 배수재를 고려하는데 있어, 스미어 효과와 웰저항 효과는 없는 것으로 가정하였으며, 수평방향 압밀계수는 수직방향 압밀계수의 2배로 고려하였다.

압밀현상의 예측은 Barron의 압밀이론에 대한 해석식을 이용하였으며, 수직 및 수평방향에 대한 종합적인 압밀도 및 기타 계산내용은 Carillo의 방정식을 이용하였다. 개발 프로그램에서의 경계조건 설정은 Fig. 7과 같다.

Fig. 8은 Barron의 해석식에 대한 결과비교를 나타낸 것으로서, 임의 시간에 대한 과잉간극수압 분포를 배수재로부터의 수평거리별로 나타낸 것이다. 모든 결과에서 알 수 있듯이, 해석식에 의한 거리별 과잉간극수압 및 침하량, 압밀도, 평균 과잉간극수압, 간극비 예측결과는 개발 프로그램에 의한 예측결과와 매우 유사함을 알 수 있고, 이를 통해 개발 프로그램의 신뢰도를 검증할 수 있다.

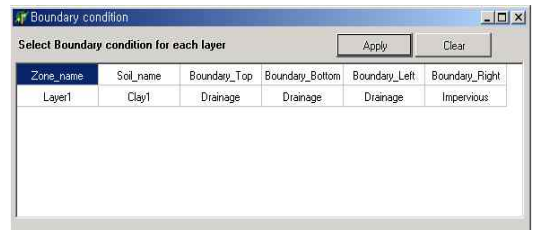


Fig. 7 Boundary conditions considering both vertical and radial drainage

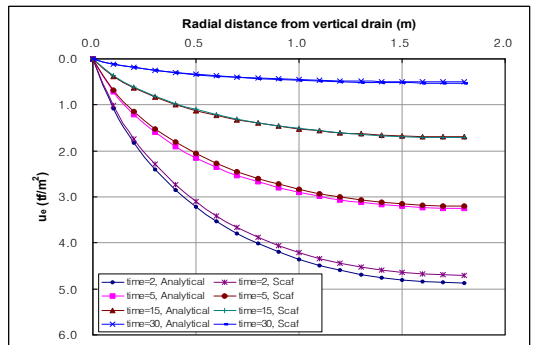
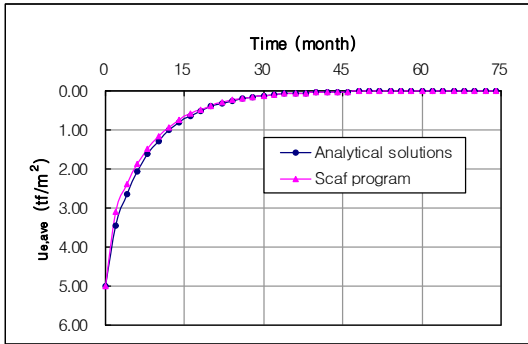


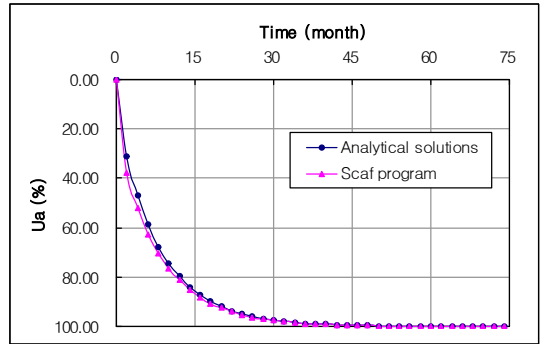
Fig. 8 Plots of excess pore pressure along radial distance with time

4. 압밀계수 변화의 영향

압밀해석의 결과를 크게 시간과 침하의 관점에서 볼 때, 시간과 관련된 가장 중요한 특성값은 압밀계수이다. 일반적인 설계에서는 압밀계수를 유효응력 단계에 관계없이 일정하다고 간주하여 압밀예측에 반영한다.



(a) Excess pore pressure



(b) Average degree of consolidation

Fig. 9 Plots of consolidation process considering both vertical and radial drainage

그러나, Fig. 1에서 보듯이, 압밀계수는 유효응력에 관계없이 일정한 값은 아니며 정규압밀구간과 과압밀구간에 있어 크게 변화하는 값을 알 수 있다. 일반적으로 과압밀구간에서의 압밀계수에 비해 정규압밀구간에서는 그 값이 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 과압밀구간과 정규압밀구간에서의 압밀계수비를 연구한 기존 사례를 보면, 캐나다 동부의 연약점토의 경우 그 값이 100에 이르는 경우도 있으며, 표층건조에 의해 과압밀된 보스턴 점토의 경우 2.0인 경우도 있다. 일반적으로 과압밀구간과 정규압밀구간에서의 압밀계수비는 5.0~10.0으로 알려져 있다.

본 연구에서는 과압밀비를 1.0, 1.5, 2.0으로 변화시키되, 각각의 경우에 대해서 정규압밀구간과 과압밀구간에서의 압밀계수비(RNO)를 1.0, 5.0, 10.0으로 변화시켜 가며 압밀해석을 실시하였다. 전체적인 해석조건은 Table 1과 같으며, 압밀계수의 변화를 고려하는데 있어서, 정규압밀구간 및 과압밀구간내에서는 압밀

계수가 일정하게 유지되지만, 그 값은 상이하게 고려하였다. 토층은 12.0m 두께의 단일층으로 가정하였으며, 수직방향의 상·하부는 완전 배수조건이고, 수직배수체에 의한 수평방향 배수를 허용하도록 고려하였다. Fig. 10은 각 해석경우에 대한 압밀도 및 침하량 산정 결과를 나타내는데, Case1은 과압밀조건을 고려하지 않은 정규압밀조건에 대한 해석결과를 나타낸다. Case2, Case3, Case4는 과압밀비가 1.5인 경우에 대하여, 압밀계수를 달리 적용한 해석결과를 나타낸다. Case2는 과압밀해석을 실시하되, 각 구간별 압밀계수는 동일하게 고려한데 반해, Case3과 Case4는 정규압밀구간과 과압밀구간에서의 압밀계수비를 5와 10으로 고려한 해석결과를 나타낸다.

압밀도에 있어서, 조건이 동일한 Case1과 Case2가 동일한 결과를 보이고 있는 반면, Case2가 Case3 및 Case4와 압밀초기부분에 있어 약간의 차이를 보이고 있다.

Table 1 Analysis cases for considering stress history and changing coefficient of consolidation

Case	Stress history	OCR	RNO	$\sigma_{o'}$ (tf/m ²)	$\sigma_{p'}$ (tf/m ²)	C_v (m ² /month)		C_h (m ² /month)	
						$C_{v(OC)}$	$C_{v(NC)}$	$C_{h(OC)}$	$C_{h(NC)}$
1	NC	1.0	1.0	3.0	3.0	0.128		0.256	
2	OC	1.5	1.0	3.0	4.5	0.128		0.256	
3	OC	1.5	5.0	3.0	4.5	0.640	0.128	1.280	0.256
4	OC	1.5	10.0	3.0	4.5	1.280	0.128	2.560	0.256
5	OC	2.0	1.0	3.0	6.0	0.128		0.256	
6	OC	2.0	5.0	3.0	6.0	0.640	0.128	1.280	0.256
7	OC	2.0	10.0	3.0	6.0	1.280	0.128	2.560	0.256

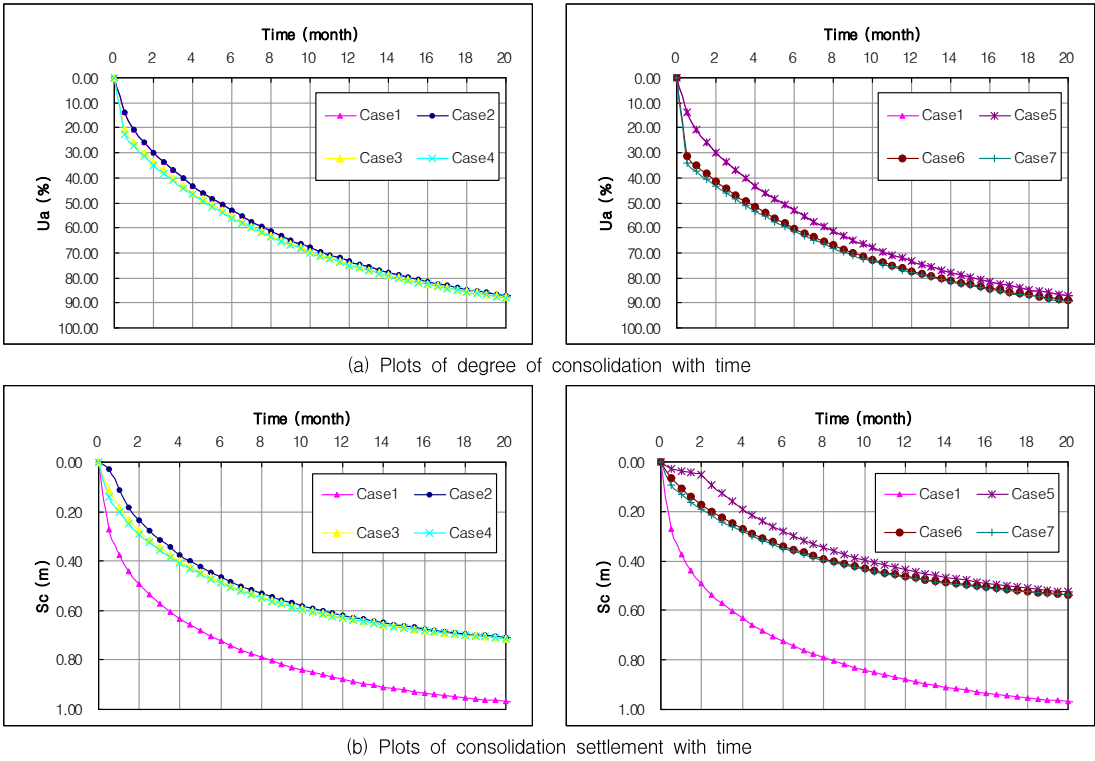


Fig. 10 Results from consolidation analyses considering stress history and changing coefficient of consolidation with effective stress

즉, 과압밀조건을 고려하되 침하량 산정시에만 고려하는 경우와 압밀계수의 변화를 동시에 고려한 경우는 그 결과에 있어 차이를 보이게 되는데, 정규압밀구간에 비해 상대적으로 크게 고려된 과압밀구간의 압밀계수 영향으로 인해 압밀 초기부분에서는 Case1에 비해 Case2와 Case3이 빠른 압밀도 진행을 보이고 있다. 침하량에 있어서도 동일한 경향을 볼 수 있지만, 정규압밀 조건으로 고려한 Case1에서의 침하량이 과압밀 조건으로 고려한다면 경우에 비해 매우 크게 평가됨을 알 수 있다. Case5, Case6, Case7는 위의 해석경우와 동일하되, 과압밀비를 2.0으로 고려했을때의 해석 결과이다. 과압밀비를 크게 고려함으로써 인해, Case5의 결과가 다른 경우의 해석결과에 비해 큰 폭의 차이를 보이고 있다. 압밀도의 경우, 대략 최대 20%정도의 차이를 보이고 있다.

모든 해석결과에서 알 수 있듯이, 과압밀조건을 고려하되 압밀계수의 변화를 고려하지 않은 경우는 그

변화를 고려한 경우에 비해 압밀도를 과소평가한다는 것을 알 수 있으며, 그 정도는 과압밀비가 증가함에 따라 크게 증가 할 수 있다.

본 해석에서는 구간별 압밀계수의 변화는 고려하되, 각각의 구간 내에서는 압밀계수를 일정하게 고려하였다. 그러므로 해석결과에서 알 수 있듯이, 압밀계수의 변화를 고려하되 그 비를 달리한 경우, 그 해석결과에 별다른 차이를 보이고 있지 않음을 알 수 있다. 실제 압밀계수의 변화에 대한 기존 시험연구결과를 살펴볼 때, 각각의 구간내에서는 압밀계수의 변화가 크지 않음을 확인할 수 있다(Bo et al., 2003).

5. 이질토층의 경계면 조건 영향

기존의 압밀이론은 모두 단일층에 대한 해석적인 해를 제시하고 있는 반면, 실제 압밀 대상층이 존재하는 현장의 경우, 지반은 압밀특성이 상이한 다양한 지층

이 복잡하게 분포하는 형태를 띠고 있다. 이러한 다층 지반의 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 수행하는 것이었다. 그러나, 기존 해석방법은 실제 지반의 각 토층두께 및 각 층의 압축성 차이가 커질수록 그 예측결과의 신뢰성이 낮아질 것으로 예상되는 바, 개발 프로그램을 통한 다층지반의 압밀해석을 실시하여, 그 결과를 기존 해석방법의 결과와 비교·분석 하였다. 해석조건을 살펴보면, 총 두께 12m의 지반을 상부(토층 1) 및 하부토층(토층2)으로 구분하고, 각 층의 토층두께와 압밀계수를 바꾸어가며 해석을 실시하였다.

CR과 HR의 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 해석조건을 적용한 개발 프로그램의 해석결과를 비교하였는데, 총 10가지 경우에 대한 구체적인 입력값은 Table 2와 같다.

Case1은 상·하부 토층두께 및 압밀계수가 모두 같은 경우로서, 이는 12.0m의 단일층 조건과 동일한 경우이다. 결과에서도 알 수 있듯이, 기존 압밀이론에 의한 예측결과는 개발 프로그램에 의한 예측결과와 거의 유사하며, 이를 통해 다층해석과 관련된 개발 프

그램의 신뢰도를 확인할 수 있다.

Case2, Case3, Case4는 상부토층의 압밀계수가 하부토층 압밀계수의 2배인 경우에 대하여, 상·하부 토층두께를 각각 4.0m와 8.0m, 6.0m와 6.0m, 8.0m와 4.0m로 변화시킨 경우에 대한 해석결과이다. 시간별 압밀도 및 과잉간극수압의 변화를 살펴보면, 개발 프로그램에 의한 각 토층별 압밀도 및 과잉간극수압 변화는 기존 해석방법에 의한 예측결과와 상이하게 나타남을 알 있다. 압밀계수가 상대적으로 큰 상부 토층의 경우는 빠른 압밀진행 현상을 나타내는 반면, 압밀계수가 작은 하부토층은 상대적으로 느린 압밀진행 현상을 보이고 있다.

Case2의 경우, 30개월에 대한 압밀도에 있어, 기존 해석방법에 의한 결과는 84%, 개발 프로그램에 의한 상부토층의 경우는 93%, 하부토층의 경우는 80%로 나타났다. 즉, 기존 해석방법은 실제 각 토층의 압밀도를 상부토층의 경우는 대략 9% 과소평가하고 있으며, 하부 토층의 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 하부 토층의 경향에 더 가깝다는 것이다. 즉, 임의의 시간에 대한 지반의 압밀도를 평가하고, 이를 통해 지반의 유효 응력 및 전단강도를 평가한다고 했을 때, 기존 해석방법에 의한 결과는 상부토층에 대한 유효응력 및 전단강도를 크게 과소평가하게 되는 동시에, 하부토층에 대해서

Table 2 Input parameters for consolidation analysis of adjacent layers

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	5.0	2.0	0.128	0.064	0.256	0.128	8.0	4.0	0.099	0.198
5		0.5	0.128	0.026	0.256	0.052	4.0	8.0	0.039	0.078
6	10.0	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

* 참고 $CR = c_{v1}/c_{v2}$ or c_{h1}/c_{h2} , $HR = H_1/H_2$

는 유효응력 및 전단강도를 과대 평가할 우려가 있다.

과대평가 혹은 과소평가의 정도는 압밀계수비 및 각각의 토층두께 등에 따라 크게 달라지게 되는데, 이는 Case5~Case10의 결과를 통해 확인 할 수 있다.

Case5, Case6, Case7은 상부토층의 압밀계수가 하부토층 압밀계수의 5배인 경우에 대하여, 상·하부 토층두께를 각각 4.0m와 8.0m, 6.0m와 6.0m, 8.0m와 4.0m로 변화시킨 경우에 대한 해석결과이다.

Case5의 경우, 60개월에 대한 압밀도에 있어, 기존 해석방법에 의한 결과는 83.8% 개발 프로그램에 의한 상부토층의 경우는 98.0%, 하부토층의 경우는 76.4%로 나타났다. 즉, 기존 해석방법은 실제 각 토층의 압밀도를 상부토층의 경우는 14.2% 과소평가하고 있으며, 하부토층의 경우는 7.4%정도 과대평가하고 있다.

Case8, Case9, Case10은 상부토층의 압밀계수가

하부토층 압밀계수의 10배인 경우에 대하여, 상·하부 토층두께를 각각 4.0m와 8.0m, 6.0m와 6.0m, 8.0m와 4.0m로 변화시킨 경우에 대한 해석결과이다. 시간-침하량 변화에 있어, 전체적인 경향은 위의 경우와 동일하지만, 그 차이는 더욱 증가함을 알 수 있으며, 시간별 압밀도 및 과잉간극수압의 변화에 있어서도 기존 해석방법과 개발 프로그램을 이용한 실제 토층별 예측 결과에는 많은 차이가 있는 것을 알 수 있다.

Case10의 경우, 60개월에 대한 압밀도에 있어, 기존 해석방법에 의한 결과는 86.4%, 개발 프로그램에 의한 상부토층의 경우는 98.4%, 하부토층의 경우는 68.7%로 나타났다. 즉, 기존 해석방법은 실제 각 토층의 압밀도를 상부토층의 경우는 대략 12.0% 과소평가하고 있으며, 하부토층의 경우는 대략 17.7%정도 과대평가하고 있다.

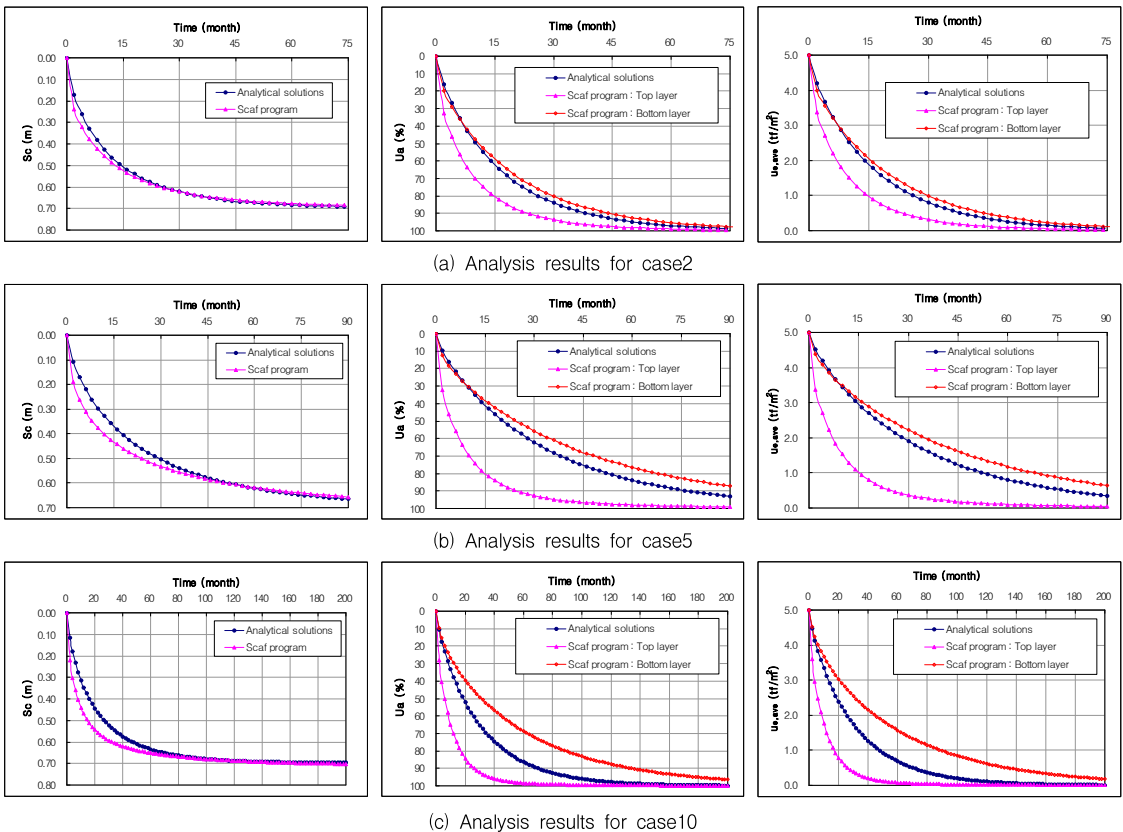


Fig. 11 Plots of settlement, degree of consolidation and excess pore pressure with time for various two layered system

5. 결 론

본 연구에서는 압밀계수 변화 및 다양한 지층조건이 압밀현상에 미치는 영향을 알아보고자, 유효응력에 대한 압밀계수 함수식과 지층 경계면 방정식을 고려한 수치해석을 실시하였다. 수치해석을 위한 프로그램을 개발하였으며, 기존 해석적 해를 통한 개발 프로그램의 검증을 실시하였다.

압밀계수 변화에 대한 영향을 알아보기 위하여, 과압밀구간을 고려하지 않은 경우와 과압밀비를 1.0, 1.5, 2.0으로 변화시킨 경우, 과압밀구간과 정규압밀구간의 압밀계수비를 1.0, 5.0, 10.0으로 변화시킨 경우에 대한 수치해석을 실시하였다.

과압밀구간과 정규압밀구간에서의 압밀계수 차이를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우는 압밀도와 침하량에 있어 큰 차이를 보였다. 즉, 압밀계수 차이를 고려하지 않을 경우, 실제보다 압밀현상을 과소평가하는 경향이 크게 나타났으나, 그 차이의 정도는 과압밀비 및 응력조건에 따라 달라진다. 본 해석결과, 과압밀비가 1.5와 2.0인 경우의 최대 압밀도 차이는 각각 8.7%, 20.0%로 나타났다. 한편, 압밀계수의 변화를 고려하되 그 비를 달리한 경우, 그 해석결과에 별다른 차이를 보이고 있지 않음을 알 수 있다.

다양한 조건에 대한 이질층 해석결과, 기존 해석방법에 의한 예측결과는 각 토층별 압밀진행을 크게 과소 혹은 과대평가함을 알 수 있었다. 특히, 기존 해석방법에 의한 예측결과가 실제 두 토층의 평균적인 압밀진행 현상을 나타내기 보다는 압밀진행이 느린 하부 토층의 경향에 가까운 결과를 나타내었다.

결과적으로 압밀계수의 변화 및 이질층에 대한 고려를 하는데 있어, 기존의 간편화된 방법은 실제 지반의 압밀 진행현상을 예측하는데 있어 큰 오류를 발생시킬 수 있으며, 이런 경우 해석해를 이용하는 대신 수치해석방법을 이용하는 것이 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. Barber, E. S., "Discussion of "Simultaneous consolidation of contiguous layers of unlike

compressible soils by H. Gray" Trans. Am. Soc. Civ. Eng., Vol. 110, 1945, pp. 1345-1349.

2. Barron, R. A., "Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells", Trans. Am. Soc. Civ. Eng., Vol. 113, Paper No. 2346, 1948, pp. 718-742.

3. Bo, M. W., Chu, J. and Choa, V., "Soil Improvement : Prefabricated Vertical Drain Techniques", Thomson, 2003.

4. Cargill, K. W., "Prediction of Consolidation of Very Soft Soil", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 6, 1984, pp. 775-795.

5. Gibson, R. E., Schiffman, R. L. and Cargill K. W., "The Theory of One-dimensional Consolidation of Saturated Clays II. Finite Nonlinear Consolidation of Thick Homogeneous Layers", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 18, 1981, pp. 280-293.

6. Gray, H., "Simultaneous consolidation of contiguous layers of unlike compressible soils", Trans. Am. Soc. Civ. Eng., Vol. 110, 1945, pp. 1327-1344.

7. Navel Facilities Engineering Command (NAFAC), Desing manual 7.01-Soil Mechanics, pp. 235-236.

8. Roy E. Olson and Charles C. Ladd, "One-dimensional consolidation problems", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 105, No. GT1, 1979, pp. 11-30.

9. Schiffman, R. L. and J. R. Stein, "One-dimensional consolidation of layered systems", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 96, No. SM4, 1970, pp. 1499-1504.

10. Terzaghi, K., Peck, R. B. and Mesri, G., "Soil Mechanics in Engineering Practice", John Wiley & Sons, 1996.

11. Urzua, A. and J. T. Christian, "Limits on aCommon Approximation for Layered Consolidation Analysis", Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, Vol. 128, No. 12, 2002, pp. 1043-1045.

(접수일자 : 2004년 8월 6일)