

수평배수를 고려한 비선형 압밀해석

Nonlinear Consolidation Analysis Considering Radial Drainage

이 송*¹ Lee, Song 채 영 수*² Chae, Young-Su
황 규 호*³ Hwang, Koou-Ho 전 제 성*⁴ Jeon, Je-Sung

Abstract

In this study a practical method for predicting the real consolidation behavior of soft ground is described. At first, the equations governing the vertical and horizontal flow of a fully saturated clay layer and considering selfweight of soil and nonlinear characteristics of compression and permeability are derived. And the governing equation is modified to analyze the multi-layered system, ramp loading condition and partially penetrated drain condition of soft clay grounds.

The nonlinear material function is formed by using the results of laboratory testing and a numerical computer program is developed for the prediction of nonlinear consolidation behavior with vertical drainage-installed soft clay grounds. The developed program is able to reflex the step loading construction, regress proper nonlinear consolidation conditions, analyze the multi-layered system, ramp loading condition and partially penetrated drain condition of soft clay grounds.

For the purpose of verification of the developed program, it was applied to analyze field settlement and pore water pressure observations at Ska-Edeby test field in Sweden and laboratory model tests. Also in this study, problems of the analysis method related to multi-layered ground and the effects of ramp loading and partially penetrated drain condition were investigated by using developed program.

요 지

본 연구는 현실에 부합하는 연약지반의 압밀거동을 예측하기 위한 연구로서, 일단 3차원적 배수 조건하에서 지반의 자중 및 압축성과 투수성의 비선형적 성질이 고려된 비선형 압밀모형을 구성하였다.

또한 연직 배수재의 시공과정에서 발생할 수 있는 지반의 교란현상 및 다양한 이질층의 구성, 점증적인 하중재하 조건, 연직 배수재의 부분관입 조건에 대한 고려가 가능하도록 비선형 압밀모형을 수정, 보완하였다. 이상의 연구결과를 바탕으로 유한차분방법에 의한 수치해석을 실시하였고 최종적으로 각종 회귀분석과정을 도입한 3차원 비선형 압밀해석 프로그램을 개발하였다. Ska-Edeby의 시험시공 사례를 통한 개발 프로그램의 검증은 실시하였는데, 시험시공 사례의 경우, 현장에서 측정된 깊이별 침하량 및 간극수압 결과를 개발 프로그램에 의한 예측결과와 비교, 분석하였다. 또한 개발 프로그램을 이용하여 다층지반 해석과 관련된 기존 해석방법의 문제점 및 지반의 교란효과와 연직 배수재의 부분관입 조건, 점증적인 하중재하 조건등이 지반의 압밀거동에 미치는 영향에 대해 살펴보았다.

Keywords : Consolidation, Vertical drain, Numerical analysis, Program, Ramp loading, Multi layer, Partially penetrated drain,

*1 정희원, 서울시립대학교 도시과학대학 토목공학과 교수
*2 정희원, 수원대학교 토목공학과 부교수
*3 정희원, (주)두산건설 토목시공팀 과장
*4 정희원, (주)평원엔지니어링 기술연구소 선임연구원

1. 서론

연직배수재가 설치된 연약지반의 압밀현상 예측은 1948년에 발표된 Barron의 이론 및 이 이론을 부분적으로 수정, 보완한 Yoshikuni, Hansbo, Onoue 등의 이론에서 제시하는 해석적인 해를 이용하여 이루어지고 있다. 그러나 이러한 이론들은 그 기본적인 유도과정에서 압축성과 투수성의 선형성을 가정한 Terzaghi 고전 압밀론의 가정사항을 그대로 받아들였을 뿐 아니라, 배수재의 완전관입 및 토층의 균질함을 기본적으로 가정하고 있다. 그러나 실제 연직배수재를 통한 연약지반 개량시, 압밀과정중 압축성과 투수성은 비선형성을 띄게 되며 지층의 구성 또한 상이한 이질층으로 구성되어 있고 연직배수재의 시공도 여러 가지 이유에서 전토층에 걸쳐 시공하는 완전관입의 형태가 아닌 부분관입 형태로 시공되는 경우를 볼 수 있다. 또한 연직배수재의 시공과정에서 발생할 수 있는 주변 지반의 교란 및 이로 인한 압축성 및 투수성의 변화, 배수재 자체의 유한한 투수성 및 통수능 감소효과등은 전체적인 압밀현상의 예측에 많은 영향을 미치게 된다. 상부하중 재하 과정에 있어서도 실제의 시공은 순간적인 하중증가 형태가 아닌 시간에 따른 점증적인 하중증가 형태를 띠고 있는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 수직배수 및 수평배수를 동시에 고려하되 압축성 및 투수성에 대한 비선형성과 토층의 자중, 점증적인 상부하중 재하, 연직배수재의 부분관입, 지반의 다양한 초기조건등을 압밀현상의 예측에 합리적으로 반영할 수 있는 비선형 압밀모델의 구성과 함께 이를 이용한 수치해석 기법에 관한 연구를 통하여 연약지반의 비선형적 압밀현상을 보다 정확히 예측할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2. 비선형 압밀 지배방정식

2.1 비선형 응력-변형 관계

간극비와 유효응력의 관계에 대한 기존의 연구결과를 살펴보면, 1984년 Carrier, Beckman은 식 (1)과 같이, 1984년 Sunara는 식 (5)와 같은 간극비-유효응력의 관계를 제안하였다.

$$e = \alpha \cdot \left(\frac{\sigma'}{p_0}\right)^\beta + \varepsilon \quad (1)$$

여기서, $\alpha, \beta, \varepsilon$: 경험상수

$$\alpha = 0.0208 \cdot I_p(1.192 + A^{-1}) \quad (2)$$

$$\beta = -0.143$$

$$\varepsilon = 0.027 \cdot w_p - 0.0133 \cdot I_p(1.192 + A^{-1}) \quad (3)$$

I_p : 소성지수, w_p : 소성한계, A : 활성도

$$e = \frac{A + B(\ln \sigma')}{1 + C(\ln \sigma') + D(\ln \sigma')^2} \quad (5)$$

여기서, A, B, C, D : 회귀분석 계수

한편, 1981년 Gibson 등은 유효응력과 간극비의 관계를 구하기 위해 다양한 실내시험을 실시하였는데, 회귀분석 결과 지수함수 형태로 이들의 관계를 표현하는 것이 가장 근사적으로 이들의 비선형적 관계를 표현하는 것임을 제안하였으며, 이와 아울러 압밀이 진행되기 전의 간극비 및 압밀이 종료된 상태에서의 간극비를 통해 이들의 관계를 표현할 수 있는 경험식을 식 (6)과 같이 제안하기도 하였다.

$$e = (e_{\infty} - e_{\infty}) \exp(-\lambda \cdot \sigma') + e_{\infty} \quad (6)$$

기존의 각종 연구결과 및 본 연구에서 실시한 실내 표준 압밀시험과 로우셀시험의 결과로부터 간극비와 유효응력의 관계는 유일한 함수로 나타낼 수 있다는 것을 알았으며, 본 연구에서는 이를 근거로 하여 간극비와 유효응력의 관계를 식 (7)과 같은 누승함수 형태로 표현하여 비선형 압밀거동 예측에 이용하였다.

$$e = A_{coe} \cdot \sigma'^{-B_{coe}} \quad (7)$$

여기서, A_{coe}, B_{coe} : 실내 압밀시험에서 구한 계수값

2.2 비선형 변형-투수계수 관계

간극비와 유효응력간의 관계가 유일한 함수형태로 표현될 수 있다면, 투수계수와 간극비 및 유효응력의 관계도 유일한 함수형태로 표현될 수 있다.

그림 1은 Raymond와 Michaels, Lin등에 의해 발표된 간극비별 수직방향의 투수계수 값을 타나내고 있다. 결과에서 알 수 있듯이 투수계수는 간극비가 대략 0.7~2.0범위에서 감소함에 따라 일정한 값을 갖는 것이 아니라 큰 폭으로 변화하는 것을 볼 수 있다. 특히 초기 지반상태가 매우 연약한 즉, 고태수비의 상당히 큰 간극비를 나타내는 경우에 있어서는 투수계수의 비선형성이 매우 크게 증가함을 알 수 있다. 이는 시간에 따른 압밀현상을 예측하는데 있어 매우 중요한 사항으로서, 압밀 초기부분에서는 압밀이 어

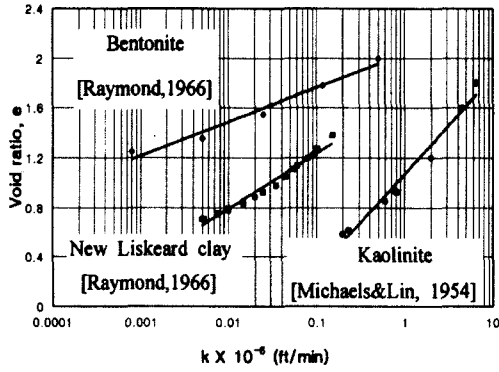


Fig. 1. $e - \log k_v$

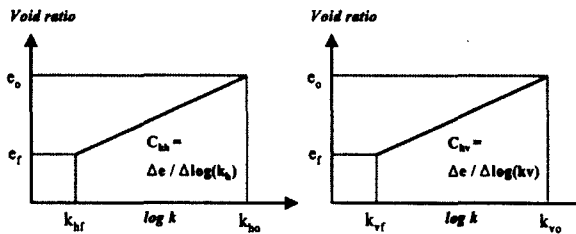


Fig. 2. $e - \log k_h, \log k_v$ (From Mesri, 1985)

는 정도 진행된 부분에 비해 매우 빠른 압밀도 증가를 보인다는 사실을 의미하는 것이다.

1985년 Mesri 등은 간극비의 감소로 유발되는 수평 및 수직방향 투수계수의 변화량을 표현하는데 있어 그림 2와 같이 수평 및 수직방향의 투수계수 지수 C_{kh} , C_{kv} 를 사용하였다.

본 연구에서는 실내 표준압밀시험 및 로우셀 압밀시험을 이용한 회귀분석 결과에 의해 간극비와 투수계수의 관계를 식 (8)과 같이 표현하여 비선형 압밀예측에 이용하였는데, 이는 Mesri의 경우와 동일한 형식의 관계를 이용하는 것이다.

$$k(e) = C_{coe} \cdot \exp(D_{coe} \cdot e) \quad (8)$$

여기서, C_{coe}, D_{coe} : 실내 투수시험에서 구한 계수값

2.3 비선형 압밀모델

x, y, z 방향의 물흐름을 고려하면서 압축성과 투수성의 비선형성 및 점증적인 하중증가, 1차압밀과 2차압밀등을 종합적으로 고려한 평형 방정식 및 연속 방정식등은 각각 식 (9), 식 (10)과 같다.

$$\frac{\partial \sigma'_x}{\partial \xi} = \frac{1}{1+e} (\gamma_s + e \cdot \gamma_w) \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial \xi} [n(v_{ux} - v_{sx})] + \frac{\partial}{\partial x} [n(v_{ux} - v_{sx})] +$$

$$\frac{\partial}{\partial y} [n(v_{uy} - v_{sy})] + \frac{\partial v_{sx}}{\partial \xi} + \frac{\partial v_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial v_{sy}}{\partial y} = 0$$

(10)

1974년 Mesri와 Rokhsar, 1984년 Mesri와 Choi는 시간에 따른 간극비 변화를 나타내는 압축성 관계를 그림 3 및 식 (11)과 같이 표현하였다.

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \left[\frac{\partial e}{\partial \sigma'} \right]_t \frac{\partial \sigma'}{\partial t} + \left[\frac{\partial e}{\partial t} \right]_{\sigma'} \quad (11)$$

즉, 시간에 따른 유효응력의 변화가 존재하는 구간을 일차압밀구간으로 하고 시간에 따른 유효응력의 변화가 발생하지 않는 구간을 이차압밀구간으로 규정하였다. 그림 3에서 보듯이 압밀이 발생하기 전의 초기간극비를 e_0 , 일차압밀과 이차압밀의 경계점에서의 간극비를 e_p 라 하였으며, 일차압밀과 이차압밀이 구분되어지는 시간을 t_p 라 하였다. 일차압밀 및 이차압밀 과정을 거치는 동안에 발생하는 간극비의 총 변화량은 식 (12)와 같으며, 일차압밀 구간에서의 간극비 변화량 및 이차압밀 구간에서의 간극비 변화량은 각각 식 (13)과 식 (14)로 표현된다.

$$\Delta e = (\Delta e)_p + (\Delta e)_s \quad (12)$$

$$(\Delta e)_p = \int_0^{t_p} \left[\left(\frac{\partial e}{\partial \sigma'} \right)_t \frac{\partial \sigma'}{\partial t} + \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_{\sigma'} \right] dt \quad (13)$$

$$(\Delta e)_s = \int_{t_p}^t \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_{\sigma'} dt \quad (14)$$

현재 지반이 받고 있는 유효응력과 유효상재응력, 선행 압밀응력의 크기에 따라 결정되는 정규압밀 구간 및 과압밀 구간에 대한 간극비 변화량은 각각 식 (15) 및 식 (16)과 같다.

$$e = -c_r \cdot \log \left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_o} \right) - c_c \cdot \log \left(\frac{\sigma'}{\sigma'_p} \right) + e_o \quad (15)$$

여기서, c_c : 압축지수, c_r : 재압축지수, σ'_p : 선행압밀응력, σ'_o : 유효상재응력, σ' : 현재의 유효응력

$$e = -c_r \cdot \log \left(\frac{\sigma'}{\sigma'_o} \right) + e_o \quad (16)$$

간극비 변화량을 이용하여 정규압밀구간 및 과압밀 구간에 대한 $\left[\frac{\partial e}{\partial \sigma'} \right]_t$ 을 계산하면 각각 식 (17) 및 식 (18)과 같다.

$$\frac{\partial e}{\partial \sigma'} = -(0.43429) \cdot c_c \cdot \frac{1}{\sigma'} \quad (17)$$

$$\frac{\partial e}{\partial \sigma'} = -(0.43429) \cdot c_r \cdot \frac{1}{\sigma'} \quad (18)$$

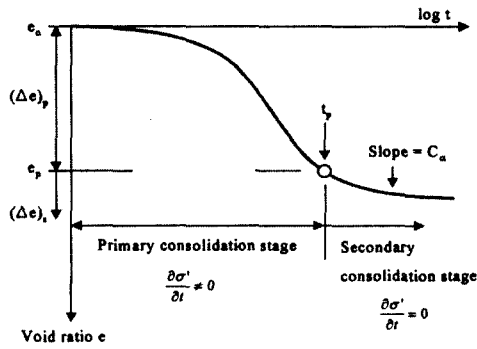


Fig. 3. Definition of primary and secondary consolidation stages (After Mesri & Choi, 1984)

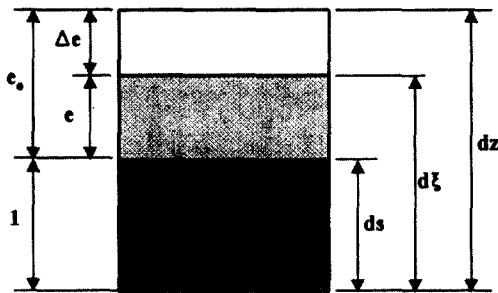


Fig. 4. Description of soil element

한편, 이차압밀구간에서의 $\left(\frac{\partial e}{\partial t}\right)$ 값은 식 (19)와 같다.

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -(0.43429) \cdot c_\alpha \cdot \frac{1}{t} \quad (19)$$

지금까지 미소요소의 z 방향 좌표값으로서 ξ 를 사용하였다. 즉 ξ 는 압밀중 변화하는 z 방향의 좌표를 나타내는데, 압밀이 진행되기 전의 미소요소 길이를 dz 라 한다면, $d\xi$ 는 압밀이 진행되면서 변화한 미소요소의 길이를 나타내게 된다. 여기서 ds 는 미소요소에서 순수하게 흡입자만이 차지하고 있는 길이를 나타낸다. 그림 4는 이와 관련된 전체적인 내용을 나타낸 것이며, 이를 통해 dz 와 $d\xi$ 의 상호관계는 식 (20)과 같이 표현된다.

$$d\xi = \frac{\partial \xi}{\partial z} \cdot dz = \frac{1+e}{1+e_0} dz \quad (20)$$

평형 방정식과 연속 방정식, 압축성 방정식을 흐름조건에 대입한 후, 식 (20)의 좌표관계와 원통좌표계로의 변환 과정을 통해 구성된 최종 지배방정식은 식 (21)과 같다.

이 지배방정식은 토층자체의 자중 및 각 유효응력단계 또는 간극비 단계에 따른 압축성과 투수성의 변화를 고려하고 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = & \frac{(1+e_0)^2}{1+e} \frac{k_z}{\gamma_w} \left[\frac{1}{1+e} - D_{kv} \right] \\ & \left[\frac{\gamma_s + e\gamma_w}{1+e_0} \frac{\partial u}{\partial z} - \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] \\ & + \frac{\sigma'}{(0.43429)c_c} \frac{(1+e_0)^2}{1+e} \frac{k_z}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ & + \frac{1+e}{\gamma_w} k_h D_{kh} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 \\ & + \frac{1+e}{\gamma_w} k_h \frac{\sigma'}{(0.43429)c_c} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right] + \frac{\partial \sigma}{\partial t} \end{aligned} \quad (21)$$

3. 수치해석

3.1 유한차분방정식의 구성

3차원 물흐름을 고려한 비선형 압밀 지배방정식에 대한 수치해석은 유한차분방법중 explicit방법을 사용하였으며, 시간에 대해서는 전진차분방법을 공간에 대해서는 중앙차분방법을 사용하였다. 시간 및 과잉간극수압에 대한 미분식은 식 (22)~식 (26)와 같으며, 여기서의 첨자 s, i, j 는 각각 해석대상층과 수평방향 절점번호 및 수직방향 절점번호를 가리킨다.

$$u^{t+1} = u^t + \frac{\partial u}{\partial t} \cdot \Delta t \quad (22)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_{s,i,j+1} - u_{s,i,j-1}}{2 \cdot \Delta z} \quad (23)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{u_{s,i,j+1} - 2u_{s,i,j} + u_{s,i,j-1}}{(\Delta z)^2} \quad (24)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} = \frac{u_{s,i+1,j} - u_{s,i-1,j}}{2 \cdot \Delta r} \quad (25)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} = \frac{u_{s,i+1,j} - 2u_{s,i,j} + u_{s,i-1,j}}{(\Delta r)^2} \quad (26)$$

여기서, Δt : 시간 증분값,

Δz : 수직방향에 대한 거리 증분값

Δr : 수평방향에 대한 거리 증분값

그림 5는 유한차분해석을 위한 해석요소망을 나타낸다. 해석요소망을 살펴보면, 우선 이질층으로 구성된 다층 지반의 해석을 위해 각 토층별로 구분되어 있으며 각 층의 경계면은 크게 상부와 하부 및 좌측과 우측의 기본 경계면

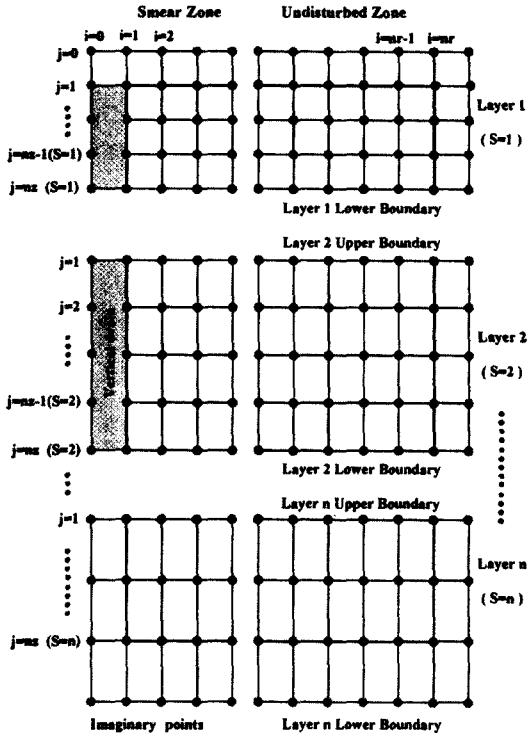


Fig. 5. Finite difference grid of the stratum

으로 구성되어 있다. 각 토층의 경계면 주위에는 인접 요소와의 경계면 처리 및 부분배수 상태의 처리를 위한 가상 절점이 형성되어 있으며, 각 토층은 수직방향별로 상이한 절점간격을 가질 수 있도록 되어 있다. 이는 다층지반의 해석에도 이용될 수 있지만, 단일한 토층내에서 보다 정밀한 해석결과를 요하는 부분에 대한 모델링에도 이용될 수 있다. 한편 연직배수재는 해석 요소망의 좌측에 위치하는데, 연직배수재의 부분관입을 고려하기 위하여 각 층별로 좌측의 연직배수재를 선별적으로 모델링할 수 있도록 되어 있다. 또한 각 토층에 대한 해석 요소는 수평방향에 대해 교란영역과 비교란영역의 두 부분으로 나뉘어져 있는데, 이는 연직배수재의 시공과정에서 발생하는 스미어 효과를 고려하기 위한 것이다.

그림 6은 전체적인 해석대상이 되는 unit cell의 단면으로서, 여기서 r_e 는 unit cell의 영향반경을 나타내고 r_s 는 교란영역 즉 스미어존의 반경을 나타내며 r_w 는 연직배수재의 반경을 나타낸다. 식 (22)~식 (26)을 식 (21)에 대입하여 유도한 차분방정식은 식 (27)과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -2 \left[\frac{c_f}{(\Delta z)^2} + \frac{g_f}{(\Delta r)^2} \right] u_{s,i,j}$$

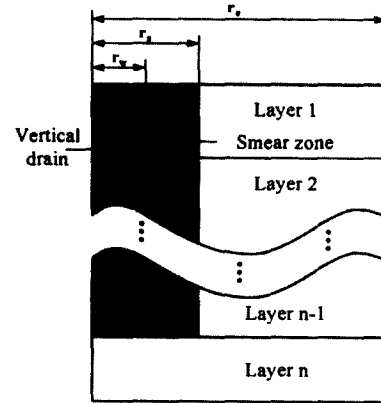


Fig. 6. Cross section of the unit cell

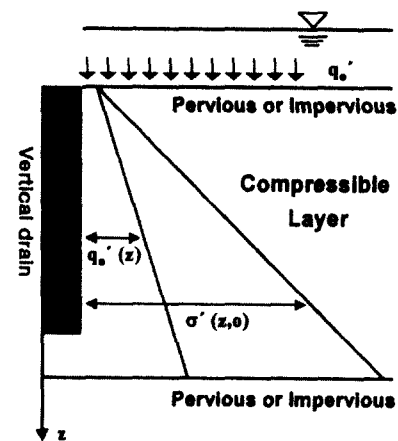


Fig. 7. Initial condition of consolidation layer

$$\begin{aligned} & + \frac{1}{\Delta r} \left[\frac{g_f}{\Delta r} - \frac{d_f}{2} \right] u_{s,i-1,j} \\ & + \frac{1}{\Delta r} \left[\frac{g_f}{\Delta r} + \frac{d_f}{2} \right] u_{s,i+1,j} \\ & + \frac{1}{\Delta z} \left[-\frac{c_f}{\Delta z} - \frac{a_f}{2} \right] u_{s,i,j-1} \\ & + \frac{1}{\Delta z} \left[\frac{c_f}{\Delta z} + \frac{a_f}{2} \right] u_{s,i,j+1} \\ & + \frac{e_f}{4(\Delta r)^2} (u_{s,i+1,j} - u_{s,i-1,j})^2 \\ & + \frac{b_f}{4(\Delta z)^2} (u_{s,i,j+1} - u_{s,i,j-1})^2 + P_{tsf} \end{aligned} \quad (27)$$

$$\text{여기서, } a_f = P_{eoe} P_{tsz} \cdot k_z \left(\frac{1}{1+e} - D_{kw} \right) \quad (28)$$

$$b_f = -\frac{a_f}{P_{tsz}} \quad (29)$$

$$c_f = (P_{eoe} \cdot k_z) / P_{ccr} \quad (30)$$

$$d_f = \frac{P_{\sigma} \cdot k_h}{r \cdot P_{ccr}} \quad (31)$$

$$e_f = P_{\sigma} k_h D_{kh} \quad (32)$$

$$g_f = (P_{\sigma} \cdot k_h) / P_{ccr} \quad (33)$$

$$P_{cc} = \frac{0.43429}{\sigma'} \cdot c_c \quad [\text{NC Condition}] \quad (34)$$

$$P_{cr} = \frac{0.43429}{\sigma'} \cdot c_r \quad [\text{OC Condition}] \quad (35)$$

$$P_{eoe} = \frac{(1 + e_o)^2}{1 + e} \cdot \frac{1}{\gamma_w} \quad (36)$$

$$P_{tsz} = \frac{\gamma_s + e\gamma_w}{1 + e_o} \quad (37)$$

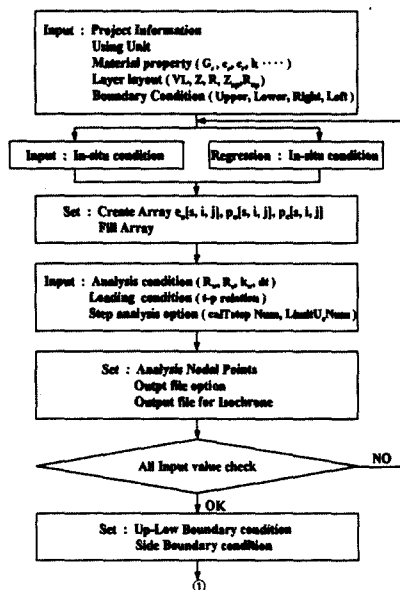
$$k_z = C_{kv} \cdot \text{Exp}(D_{kv} \cdot e) \quad (38)$$

$$k_h = C_{kh} \cdot \text{Exp}(D_{kh} \cdot e) \quad (39)$$

$$P_{\sigma} = \frac{1 + e}{\gamma_w} \quad (40)$$

3.2 초기조건 및 경계조건

압밀현상이 진행되기 직전의 지반상태는 그림 7과 같다. 즉, 원지반의 초기 응력상태는 깊이별 토층의 유효상응력 σ'_o 와 상부의 추가적인 응력증가분 q'_o 의 합으로 표현되는데, 모든 지층에서의 초기응력분포가 그림 7과 같이 직선의 증가형태로 고려되어야 하는 것은 아니며, 임의의 증가 혹은 감소형태를 갖는 다양한 조건으로 고려될 수 있다.



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. 또한 좌측과 우측이 인접 지반과의 경계면으로 고려되는 경우, 좌측과 우측 경계면 모두 경계면에서의 수평방향에 대한 과잉간극수압 변화가 없다는 조건으로 모델링 하였다.

4. 해석 프로그램의 개발 및 검증

4.1 프로그램의 개요 및 순서도

비선형 압밀모델과 이에 의한 유한차분방정식, 배수 및 비배수 경계면 조건, 다층지반의 경계면 조건 및 점증적 하중재하 조건, 스미어 효과와 웰저항 효과, 연직배수재가 부분적으로 관입되어 있는 경우 등에 관한 수치해석 기법을 이용하여 수평배수를 고려한 비선형 압밀해석 프로그램 UOSCON2000을 개발하였다.

UOSCON2000은 Delphi Language를 이용하여 개발되었는데, 많은 해석 절점수와 계산시간을 요하는 관계로 Dynamic array의 사용을 극대화시켰으며, 사용 품 및 모듈을 자동으로 생성, 분해하도록 설계하여 계산시간을 최대한 단축하도록 하였다. 물론 해석 하고자하는 절점수의 제

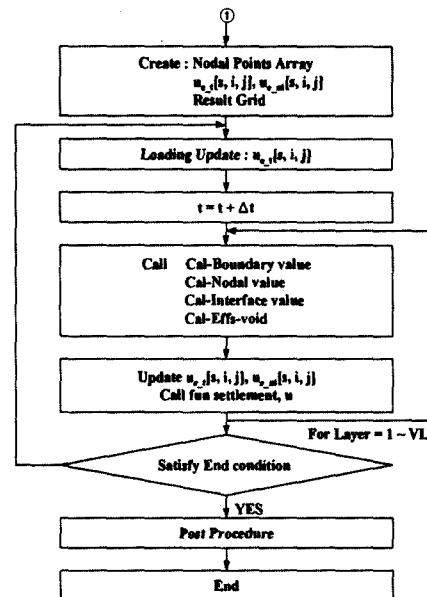
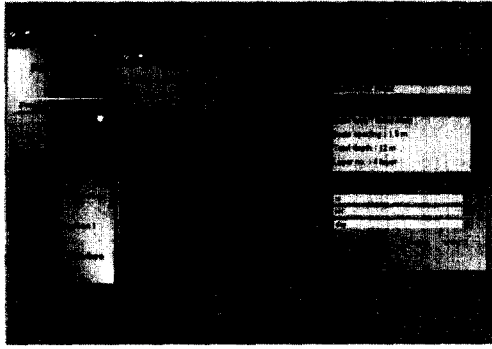
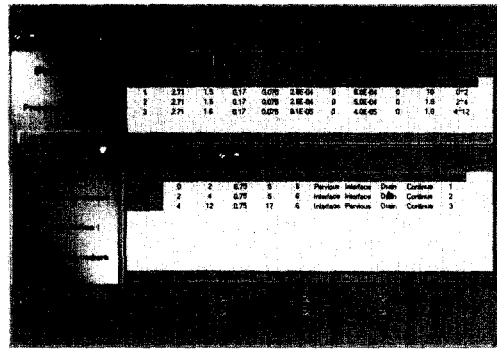


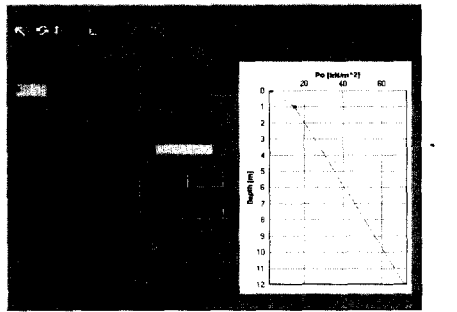
Fig. 8. Flow chart of UOSCON2000



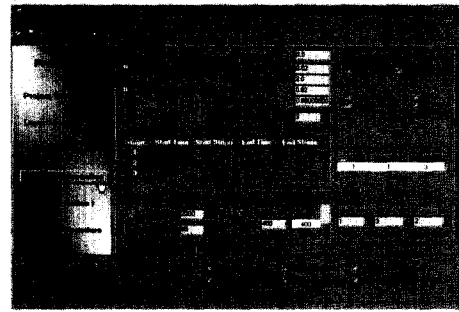
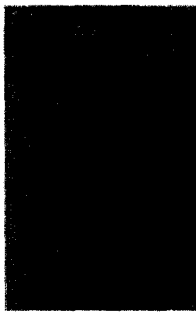
(a) Program information stage



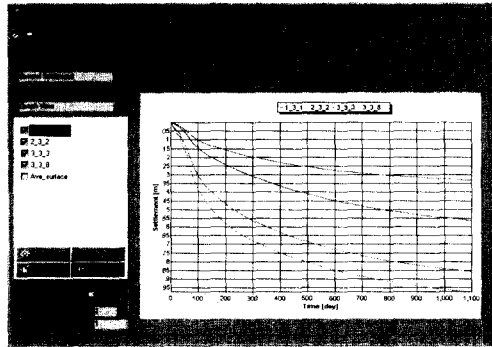
(b) Layer information stage



(c) Regression and Distribution Graph for σ_{vo}'



(d) Analysis information stage



(e) Post procedure stage for Settlement and Excess pore pressure

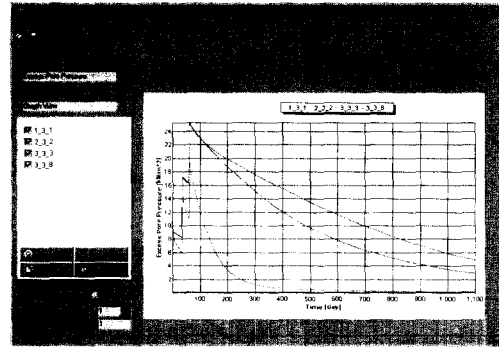


Fig. 9. Interface of each stage at UOSCON2000

한은 없으며, 1차원 압밀현상에 비해 상대적으로 복잡한 지반의 초기간극비 분포나 유효응력 분포 상태를 고려할 수 있도록 설계되어 있다. 개발 프로그램의 해석 순서도 및 구성과, 사용자 Interface 등은 그림 8 및 그림 9와 같다.

4.2 현장사례를 통한 해석결과의 검증

4.2.1 해석대상의 지반조건

개발 프로그램 UOSCON2000의 검증과 적용성 분석을

위하여 국외의 시험시공 사례에 대한 계측결과와 UOSCON2000에 의한 비선형 압밀해석 결과를 비교, 분석하였다. 검증에 이용된 사례는 Ska-Edeby 지역의 시험시공 사례이며, 그 중 Area II 지역에 대한 심도별 압밀침하 결과와 간극수압 분포결과에 대한 비교, 분석을 실시하였다. 이 지역에 대한 지층구성 및 초기조건, 투수계수 등은 그림 11~그림 14과 같다.

Holtz와 Broms는 기존에 발표된 σ_p' 와 σ_o' 값이 시료채취 과정에서의 교란에 의해 오차를 수반하고 있다고 지적하고, 직경 50mm와 80mm의 두 종류에 대한 oedometer

시험을 실시하였다. 그들의 시험결과 σ'_p 와 σ'_o 의 비를 나타내는 과압밀비는 1.05~1.12 였다. 1981년 Hansbo등은 많은 양의 시험결과를 통해 이 지역의 과압밀비를 1.0~1.1 이라고 발표하였으며, 본 논문에서의 비선형 압밀해석을 하는데 있어 각 심도별 과압밀비는 1.0로 하여 해석을 수행하였다.

4.2.2 해석조건

Area II의 초기 지반상태와 투수계수를 이용하여 UOSCON2000에 의한 비선형 압밀해석을 실시하였다. 그림 15는 Area II의 시간에 대한 성토하중의 크기를 나타내는 것으로서, 성토는 크게 3단계로 나뉘어져 실시되었고 최종 성토하중은 27kPa 이다.

전체 연약층의 두께는 12m로 하였으며 이를 3개의 지층으로 구분하여 해석을 실시하였다. 해석에 사용된 절점 수는 수직방향으로 27개, 수평방향으로 6개이며 총 절점 수는 162개이다. 구체적인 해석조건은 표 1~ 표 3과 같다.

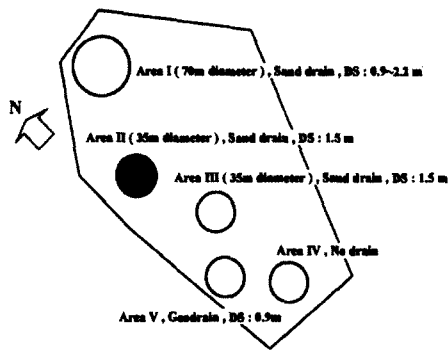


Fig. 10. Plan of test field

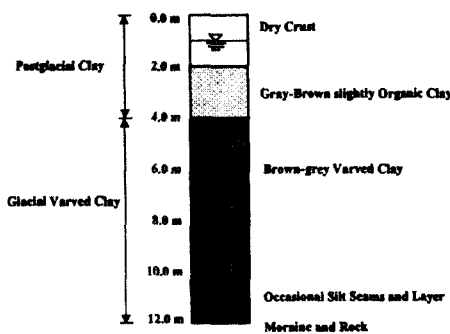


Fig. 11. Geological profile at Area II

4.2.3 Area II에 대한 비선형 압밀해석

그림 16은 지표면과 심도 2.5m, 5.0m, 7.5m 지점의 침하 기록과 UOSCON2000을 통한 비선형 압밀해석 결과를 비교한 것이다. 비선형 압밀해석시 압밀 초기부분에서의 경계면 오차를 감안한 보정을 실시했으며, 보정을 실시하지 않은 경우에 비해 초기부분의 압밀거동을 정확히 예측함을 확인 할 수 있었다. 지반의 초기상태나 투수계수 및 기타 시험자료의 부정확성을 감안할 때 매우 좋은 일치결과를 보이고 있으며, 이로서 본 논문에서의 수치해석 기법 및 개발 프로그램의 신뢰도를 확인할 수 있었다.

그림 17은 지표면과 심도 5.0m에 지점의 과잉간극수압 측정기록과 UOSCON2000을 통한 비선형 압밀해석 결과를 비교한 것이다. 성토하중이 가해진 직후의 측정값은 예측값에 비해 다소 작은 것을 볼 수 있는데, 이는 연직 배수재와 원지반의 강성차이로 인해 실제 상부에 하중이 가해졌을 때의 초기 과잉간극수압 분포가 불균등한 형태를 나타내기 때문이라고 판단된다. 시간의 경과에 따른 측정치와 비선형 해석에 의한 예측치는 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 그림 18은 250일과 1000일에서의 과잉간극수압에 대한 등시곡선을 나타낸다.

4.3 모델시험을 통한 해석결과의 검증

로우셀 압밀시험기에 의한 모델시험 결과를 개발 프로그램의 예측결과와 비교하였다. 로우셀 압밀시험기를 이용한 모델시험은 직경 75mm의 셀에 원지반의 불교란 시료를 세팅한 후, 커팅링을 이용하여 시료 중앙부에 흠을 형성하고 표준사를 자유낙하시키는 방법으로 수평배수를 유도하였다. 시료의 세팅이 끝나면 불교란 시료의 선행압

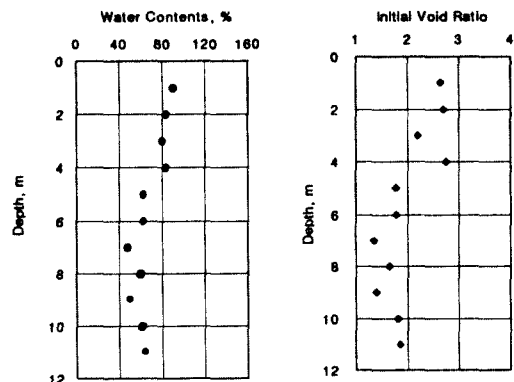


Fig. 12. Subsoil profiles at Area II

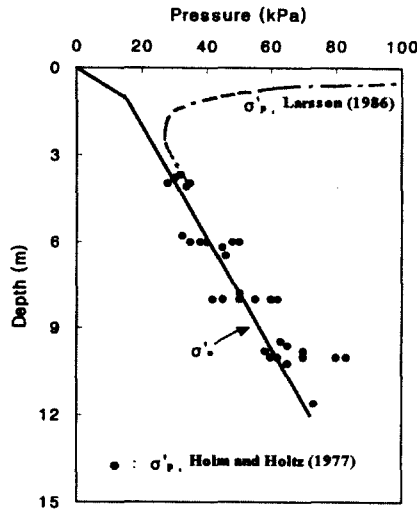


Fig. 13. σ'_{o} and σ'_{p} profiles at Area II

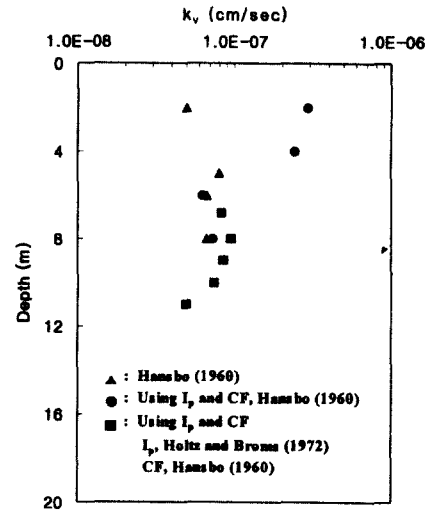


Fig. 14. k_v profiles at Area II

밀 하중값 이상의 압으로 압밀시킨 후 정해진 값의 수직응력을 증가시키고, 그 응력단계에서의 시간별 압밀거동을 관찰하는 방법으로 시험을 실시하였다. UOSCON2000을 이용한 비선형 압밀해석은 앞에서 언급된 수직방향 및 수평방향 배수조건에 대한 압밀시험과 투수시험 결과를 이용하였는데, 구체적인 해석조건은 표 4 및 표 5와 같으며 투수계수의 단위는 cm/sec 이고, 스미어 효과와 웰저항 효과는 없는 것으로 간주하였다.

그림 19는 모델시험의 결과와 개발 프로그램인

Table 1. Dimensions for numerical analysis

| h_o (m) | r_e (m) | r_w (m) |
|-----------|-----------|-----------|
| 12.0 | 0.78 | 0.09 |

Table 2. Analysis condition for numerical analysis

| Layer | Depth (m) | Nodal points | | Boundary condition | | | |
|-------|-----------|--------------|------|--------------------|-----------|-------|----------|
| | | Ver. | Hor. | Up | Low | Left | Right |
| 1 | 0 ~ 2 | 5 | 6 | Pervious | Interface | Drain | Continue |
| 2 | 2 ~ 4 | 5 | 6 | Interface | Interface | Drain | Continue |
| 3 | 4 ~ 12 | 17 | 6 | Interface | Pervious | Drain | Continue |

Table 3. Consolidation property for numerical analysis

| Layer | c_c | OCR | C_{kv} (m/day) | D_{kv} (m/day) | C_{kh} (m/day) | D_{kh} (m/day) |
|-------|-------|------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1 | 1.5 | 10.0 | 2.50E-04 | 0 | 5.00E-04 | 0 |
| 2 | 1.5 | 1.00 | 2.50E-04 | 0 | 5.00E-04 | 0 |
| 3 | 1.6 | 1.00 | 4.00E-05 | 0 | 8.10E-05 | 0 |

UOSCON2000을 이용한 비선형 압밀해석 결과를 시간에 따른 침하량 및 압밀도에 의해 비교한 것이다. 결과에서 알 수 있듯이, 압밀의 초반부에서는 UOSCON2000에 의한 해석이 실제 모델시험의 결과에 비해 압밀속도를 약간 과소평가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 해석대상의 압밀조건을 모델링하는데 있어 해석 초기단계에서 발생할 수 있는 경계조건의 영향 때문이라고 판단된다.

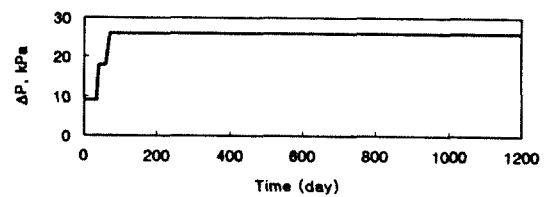


Fig. 15. Construction history at Area II

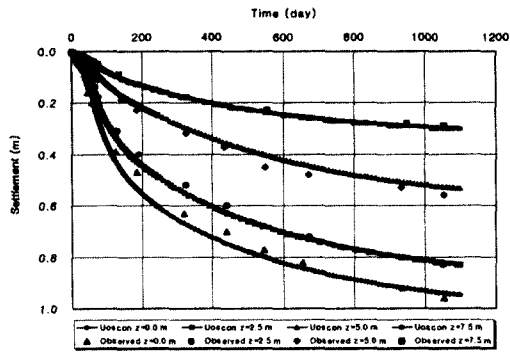


Fig. 16. Comparisons between the observed and computed settlements

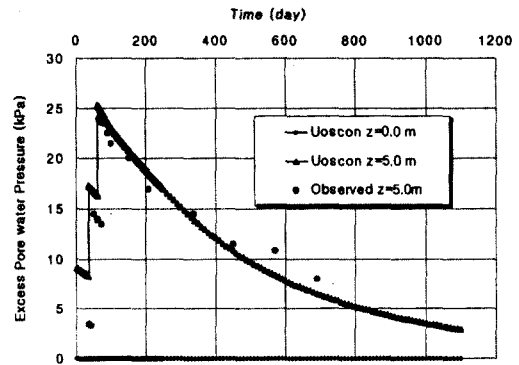
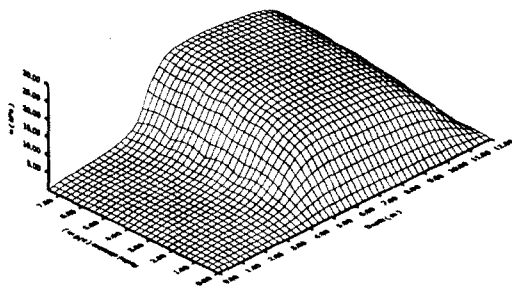
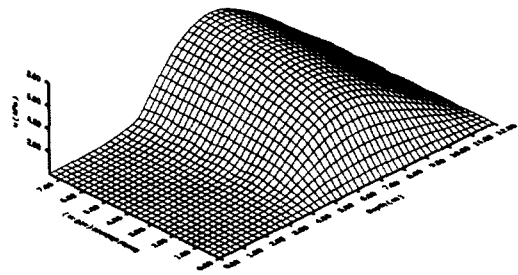


Fig. 17. Comparisons between the observed and computed u_e

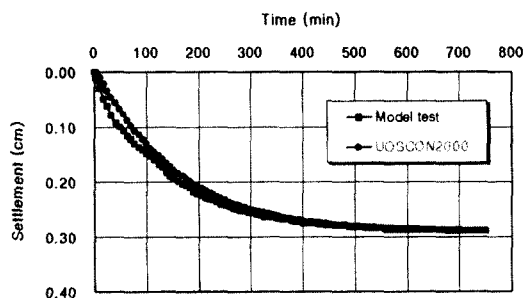


(a) $t=250$ day

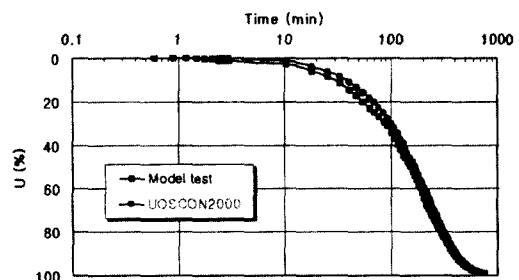


(b) $t=1000$ day

Fig. 18. Isochrones of the excess pore water pressure by numerical analysis



(a) Settlement



(b) Degree of consolidation

Fig. 19. Computed and observed results for Rowe cell model test

Table 4. Test Dimensions

| h_0 (cm) | r_e (cm) | r_w (cm) |
|---------------|---------------|---------------|
| 3.40 | 3.60 | 0.71 |

Table 5. Consolidation property

| c_c | e_o | σ'_o (kPa) | $\Delta\sigma_v$ (kPa) | C_{kv} | D_{kv} | C_{kh} | D_{kh} |
|-------|-------|----------------------|---------------------------|-----------|----------|-----------|----------|
| 0.6 | 1.40 | 78.0 | 80.0 | $2.0E-10$ | 4.6567 | $1.0E-09$ | 4.1886 |

5. 결론

3차원적 배수 조건하에서 지반의 자중 및 압축성과 투수성의 비선형적 성질이 고려된 비선형 압밀모델을 구성하였고, 다양한 시공현상의 고려가 가능하도록 비선형 압밀모델을 수정·보완하였다. 각종 연구내용을 이용한 3차원 비선형 압밀해석 프로그램 UOSCON2000을 개발하였고, 최종적으로 국내외의 현장사례 및 기존 연구결과와의 비교·검토를 통해 개발 프로그램을 검증하였다. 이상

의 연구내용을 통한 결론은 다음과 같다.

연약지반의 Anisotropic 특성 및 압축성과 투수성의 비선형적 성질이 고려된 압밀해석이 기존 선형 압밀이론에 비해 압밀시간을 더욱 정확히 예측함을 알 수 있었다.

특히 지반의 교란현상 및 다양한 이질층의 구성, 점증적인 하중재하 조건, 연직 배수재의 부분관입 조건에 대한 고려를 통해 좀더 현상에 부합하는 압밀해석을 실시할 수 있는데 이러한 해석에 있어, 기존의 선형 압밀이론을 응용한 해석결과는 비선형 해석결과와 비교할 때, 큰 오차를 나타낼 수 있음을 알 수 있었다.

개발 프로그램 UOSCON2000을 이용한 예측결과와 Ska-Edeby 시험시공 사례결과를 비교·분석한 결과, 개발 프로그램에 의한 예측결과는 실제 계측된 침도별 침하량 및 과잉간극수압과 유사함을 확인할 수 있었으며, 본 연구에서 제안한 해석기법 및 개발 프로그램은 연약지반의 압밀현상을 예측하는데 있어 유용하게 이용될 수 있다고 판단된다.

참고문헌

1. Cargill, K. W.(1984), "Prediction of Consolidation of Very Soft Soil", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 6, pp. 775 ~ 795.
2. Carrier, W. D., Beckman, J. F.(1984), "Correlations between Index Test and the Properties of Remolded Clays", *Geotechnique*, Vol. 34, No. 2, pp. 211 ~ 228.
3. 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, pp. 280 ~ 293.
4. Hansbo, S.(1981), "Consolidation of Fine-Grained Soils by Prefabricated Drains", *Proc., 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Vol. 3, pp. 677 ~ 682.
5. Mesri, G., and Rokhsar, A.(1974), "Theory of Consolidation for Clays", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 100, No. GT8, pp. 889 ~ 904.
6. Mesri, G., and Choi, Y. K.(1985a), "Settlement Analysis of Embankments on Soft Clays", *ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division*, Vol. 111, No. 4, April, pp. 441 ~ 464.
7. Mesri, G., and Choi, Y. K.(1985b), "The Uniqueness of the End-of-Primary Void Ratio-Effective Stress Relationship", *Proc., 11th ICSMFE, San Francisco, California*, Vol. 2, pp. 587 ~ 590.
8. Rowe, P. E. and Barden, L.(1966), "A New Consolidation Cell", *Geotechnique*, Vol. 16, No. 2, pp. 162 ~ 170.
9. Terzaghi, K., and Peck, R. B., and Mesri, G.(1996), "Soil Mechanics in Engineering Practice", 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York, pp. 211 ~ 300.
10. Yoshikuni, H., and Nakanodo, H.(1974), "Consolidation of Soils by Vertical Drain Wells with Finite Permeability", *Soils and Foundations*, Vol. 14, No. 2, pp. 35 ~ 46.

(접수일자 2000. 8. 14)