

비선형 압밀계수 산정에 의한 일차원 압밀해석

One-dimensional Consolidation Analysis by Estimation of Nonlinear Consolidation Coefficient

이 송*¹ Lee, Song

전 제 성*² Jeon, Je-Sung

Abstract

Terzaghi's theory of one-dimensional consolidation is restricted in its applicability to relatively thin layers, with initial condition of low water content and small incremental loading, because it assumes infinitesimal strain and linear material function. For this reason, Gibson et al. established a rigorous formulation of the one-dimensional nonlinear finite strain consolidation theory. But this theory has difficulties in the estimation of nonlinear material function, the transformation of coordinate and the modeling of construction history. In this study, nonlinear material function is formed and numerical computer program is developed for the analysis of nonlinear finite strain consolidation theory. The developed program consisted of several forms and modules. These forms and modules with graphic-user-interfaced format are used in the analysis of consolidation practices. The developed program is able to consider step loading construction, regress proper nonlinear material function and apply different finite strain consolidation parameter, $g(e)$ or $\lambda(e)$. For the purpose of the verification of the developed program, the results of case study and the prediction of the developed program are compared. The results of comparison agree fairly well with the prediction and measured data. And with varying finite strain consolidation parameter, $g(e)$ or $\lambda(e)$, the sensitivity of predicted values were examined.

요 지

기존의 Terzaghi 압밀이론은 상대적으로 연약토층이 두껍지 않고, 초기함수비가 낮으며 적은 유효응력의 증가가 예상 되는 곳에 그 적용이 제한되어 있었다. 그 이유는 Terzaghi 압밀이론 자체가 미소변형률과 선형적인 압축성 및 투수성등을 기본적인 가정사항으로 내포하고 있기 때문이다. 이러한 가정사항을 극복하고자 Gibson et al.은 일차원 비선형 유한 변형률 압밀이론에 관한 엄밀해를 제시하였다.

이 이론은 기존의 많은 가정사항들을 극복하여 실제 현상에 더욱 부합하는 예측을 할 수 있는 장점이 있는 반면, 비선형적인 응력-변형 관계, 변형-투수계수 관계의 도입과 좌표변환 및 현장의 시공이력을 그대로 적용하는데 많은 어려움이 있는 것이 사실이다. 본 연구에서는 이러한 비선형 유한변형률 압밀이론을 이용한 압밀현상 예측을 위하여, 비선형적인 응력-변형 관계, 변형-투수계수 관계에 관한 함수식을 구성하고 이를 포함하는 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 개발 프로그램은 많은 폼과 모듈로 구성되어 있는데, 이러한 각각의 폼과 모듈은 GUI기능의 극대화를 통해 복잡한 이론에 익숙하지 않은 실무자들이 쉽게 본 이론을 이용할 수 있도록 설계되었다. 또한 개발프로그램은 다양한 하중단계 및 비선형적인 응력-변형 관계, 변형-투수계수 관계에 관한 회귀분석, 각 유효응력 단계별 상이한 비선형 계수 g 와 λ 를 적용할 수 있으며, 계산을 위한 전처리과정은 물론 계산된 결과를 위한 다양한 후처리과정이 모두 사용자 위주의 GUI기능을 충분히 갖도록 설계되었다. 개발 프로그램의 검증은 위하여 실제 현장의 계측자료 및 기존연구문헌상의 결과와 본 개발 프로그램의 예측결과를 비교·분석하였으며, 다양한 간극비 상태의 비선형 계수가 해석결과에 미치는 영향을 알아 보았다.

Keywords : Nonlinear finite strain consolidation theory, g, λ , Nonlinear material function, Regression, Post process

*1 정희원, 서울시립대학교 도시과학기술대학 토목공학과 교수

*2 정희원, (주)평원엔지니어링 기술연구소 연구원

1. 서론

1967년도 Gibson, England, Hussey 등에 의해 처음으로 발표된 유한변형률 압밀이론은 응력-변형, 변형-투수계수등의 관계를 선형으로 가정한 고전압밀론의 많은 한계를 극복하고 실제 압밀현상에 근접한 예측을 수행하기 위해 국내외의 많은 연구문헌에 인용되었다. 그러나 본 이론에 대한 이해도가 깊지 않은 실무자들이 이 이론을 현상에 적용하는데는 많은 어려움이 있는 것이 사실이다. 즉, 이 이론을 현상에 손쉽게 적용하기 위해서는 각각의 비선형 함수 및 비선형 계수를 구하기 위한 정밀한 실내시험이 요구되며, 복잡하고 방대한 계산을 할 수 있는 컴퓨터 프로그래밍이 필수적이다. 본 연구에서는 기존의 표준압밀시험 결과를 이용하여 유한변형률 압밀이론의 적용에 필요한 각종 함수식과 비선형 계수등을 구할 수 있는 과정 및 다양한 현장초기상태에 맞는 초기조건 산정과정을 포함하고 이를 손쉽게 압밀현상 예측에 이용할 수 있는 해석프로그램을 개발하였다. 또한 실내시험과 국내외의 현장사례를 이용하여 개발된 프로그램의 검증을 실시하였다. 실내시험으로는 Rowe cell을 이용한 압밀시험 및 투수시험, 표준압밀시험등을 수행하였으며, 국외의 현장 사례는 Mikasa에 의한 오사카 해안지역의 압밀침하사례와 국내 OO지역의 연약지반 개량사례를 이용하였다. 한편, 비선형 유한변형률 압밀이론을 적용하는데 있어 필수적인 비선형 계수 즉, g , λ 가 해석결과에 미치는 영향에 대해 알아보았다.

2. 1차원 비선형 압밀이론

2.1 1차원 비선형 유한변형률 압밀이론

1차원 유한변형률 압밀이론은 1967년도 Gibson, England, Hussey 등에 의해 처음으로 발표되었으며, 이후 국내외의 많은 연구에 이용되었으며 그 연구결과도 각종 논문집등을 통해 꾸준히 발표되었다. 1967년도에 발표된 이론은 large strain이 발생하는 초연약 점토지반에서의 경계조건 변화를 고정시키기 위한 물질 좌표를 도입하였는데, 이는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$z(a) = \int_0^a [1 - n(a, 0)] da \quad (1)$$

여기서, z : 물질좌표
 n : 간극률

이러한 좌표계와 함께 압축지수 및 투수계수의 비선형성을 반영한 연속방정식을 유도하였으며, 고전토질역학에서 사용되는 평형방정식을 도입한 1차원 비선형 유한변형률 압밀이론을 발표하였다. 그러나 이때는 흙입자의 비중과 물의 비중을 같다고 가정하여 복잡한 방정식의 일부를 간편화시켰다.

1981년 Gibson et al.은 다시 흙입자의 비중을 고려한 식 (2)와 같은 최종적인 1차원 비선형 유한변형률 압밀이론을 발표하였는데, 식에서 보는바와 같이 매우 복잡한 형태의 방정식을 g 와 λ 라는 비선형 계수의 도입을 통해 식 (2-1)과 같이 간편화시켜 대심도의 초연약 지반에 대한 압밀 거동을 예측하였다. 식 (2) 및 식 (2-1)과 같은 비선형 압밀 지배방정식은 압밀 진행과정에 따른 투수계수 및 압축성의 비선형성을 고려할 수 있으며, 물의 흐름에 있어서도 기존의 Darcy 법칙을 수정하여 물의 이동속도뿐 아니라 흙입자의 이동속도를 함께 고려한 상대속도 개념의 수정 Darcy 법칙을 이용하여 유도되었다. 뿐만 아니라 압밀 진행중 large strain이 발생하는 초연약지반에서의 경계조건 변화를 고려하기 위한 물질좌표계를 도입하여 모든 방정식을 유도하였다.

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \frac{d}{de} \left[\frac{k(e)}{1+e} \right] \frac{\partial e}{\partial z} \\ & + \frac{\partial}{\partial e} \left[\frac{k(e)}{\gamma_w(1+e)} \right] \cdot \frac{d\sigma'}{de} \cdot \frac{\partial e}{\partial z} \\ & + \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 e}{\partial z^2} \mp \lambda(\gamma_s - \gamma_w) \frac{\partial e}{\partial z} = \frac{1}{g} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2-1)$$

여기서, z : 물질좌표

e : 간극비

$k(e)$: 간극비에 따른 투수계수

γ_s, γ_w : 흙입자와 물의 단위중량

g, λ : 비선형 계수

식 (2-1)의 비선형 계수 g, λ 는 각각 식 (3) 및 식 (4)와 같이 간극비에 대한 함수로 표현되는데, 간극비와 유효응력의 관계를 유일한 함수로 가정한다면 비선형 계수는 간극비 혹은 유효응력의 함수로 나타내어질 수 있는 것이다.

$$g(e) = - \frac{k(e)}{\gamma_w} \cdot \frac{1}{(1+e)} \cdot \frac{d\sigma'}{de} \quad (3)$$

$$\lambda(e) = -\frac{d}{de} \left(\frac{de}{d\sigma'} \right) \quad (4)$$

1981년 Gibson et al.은 다양한 간극비 및 유효응력의 함수인 비선형 계수를 구하는데 있어 식 (5) 및 식 (6)과 같은 형태의 경험식을 제안하였으며, 이들에 의해 구해진 비선형 계수를 이용하여 연약지반의 1차원 비선형 압밀거동을 예측하였다.

$$g = \frac{c_v}{(1+e)^2} \quad (5)$$

$$\lambda = -\frac{1}{\sigma'} \log_e \left[\frac{e - e_{\infty}}{e_{\infty} - e_{\infty}} \right] \quad (6)$$

여기서, c_v : 압밀계수

e : 유효응력 단계별 간극비

e_{∞} : 압밀진행전의 간극비

e_{∞} : 압밀종료시의 간극비

2.2 비선형 응력-변형, 변형-투수계수 관계

기존의 Therzaghi 압밀이론에서는 간극비와 유효응력 간의 관계를 압축계수 a_v 로 표현하였는데, 일정한 전응력하에서는 압밀진행과정에 관계없이 고정된 상수로 그 값을 가정하였다. 그러나 실제 간극비 단계별 압축성을 나타내는 압축계수는 고정된 상수가 아닌 비선형성을 띠고 있으며, 지반의 초기함수비가 높을수록 그 비선형성이 증가된다는 사실이 기존의 여러 문헌 및 연구결과를 통해 발표되었다.

1981년 Gibson et al.은 간극비와 유효응력의 관계를 일정한 함수형태로 나타내는 대신 비선형 계수 g , λ 를 통해 간극비와 유효응력간의 비선형적 관계를 압밀해석에 도입하였다. 그러나 뒤에 언급되겠지만 비선형 계수 역시 고정된 상수가 아니며 유효응력 단계에 따라 그 비선형성이 상당히 크게 변화하는 변수이므로, 유효응력 단계에 따른 적정 비선형 계수의 추정 및 간극비와 유효응력간의 비선형성을 압밀예측에 충분히 반영하기 위해서는 간극비와 유효응력의 관계를 일정한 함수형태로 표현하는 것이 필요하다. 간극비와 유효응력의 관계에 대한 기존의 연구 결과를 살펴보면, 1984년 Carrier, Beckman는 식 (7)과 같이, 1984년 Sunara는 식 (8)과 같은 간극비와 유효응력의

관계를 제안하였다.

$$e = \alpha \cdot \left(\frac{\sigma'}{p_0} \right)^{\beta} + \epsilon \quad (7)$$

여기서, α , β , ϵ : 경험상수

$$\alpha = 0.0208 \cdot I_p (1.192 + A^{-1}) \quad (7-1)$$

$$\beta = -0.143 \quad (7-2)$$

$$\epsilon = 0.027 \cdot w_p - 0.0133 \cdot I_p (1.192 + A^{-1}) \quad (7-3)$$

여기서, I_p : 소성지수

w_p : 소성한계

A : 활성도

$$e = \frac{A + B (\ln \sigma')}{1 + C (\ln \sigma') + D (\ln \sigma')^2} \quad (8)$$

여기서, A , B , C , D : 회귀분석 계수

한편 1981년 Shiffman 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 (9)와 같이 제안하기도 하였다.

$$e = (e_{\infty} - e_{\infty}) \exp(-\lambda \cdot \sigma') + e_{\infty} \quad (9)$$

기존의 각종 연구결과 및 본 연구에서 실시한 실내 표준 압밀시험과 Rowe cell 시험의 결과로부터 간극비와 유효응력의 관계는 유일한 함수로 나타낼 수 있다는 것을 알았으며, 본 연구에서는 이를 근거로 하여 간극비와 유효응력의 관계를 식 (10)과 같은 지수함수 형태로 표현하여 비선형 압밀거동 예측에 이용하였다.

$$e = A_{coe} \cdot \sigma'^{-B_{coe}} \quad \text{또는}$$

$$e = A_{coe} \cdot \ln(\sigma') + B_{coe} \quad (10)$$

여기서, A_{coe} , B_{coe} : 실내시험에 의한 계수값

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

Terzaghi의 압밀이론에서는 투수계수와 간극비 관계를 임의의 전응력하에서 일정하다고 가정하였는데, 기존의 연구결과 및 본 연구에서 실시한 실내시험결과에 의하면 간극비 단계에 따른 투수계수는 상당한 비선형성을 보임이 입증되었다. 특히 초기 지반상태가 매우 연약한 즉, 고함수비의 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 어느정도 진행된 부분에 비해 매우 빠른 압밀도 증가를 보인다는 사실을 의미하는 것이다. 본 연구에서는 실내 표준압밀시험 및 로우셀 압밀시험을 이용한 회귀분석 결과에 의해 간극비와 투수계수의 관계를 식 (11)과 같이 표현하여 비선형 압밀 예측에 이용하였다.

$$k(e) = C_{coe} \cdot \text{Exp}(D_{coe}) \text{ 또는}$$

$$k(e) = C_{coe} \cdot e + D_{coe} \quad (11)$$

2.3 비선형 계수

비선형 계수 g , λ 는 식 (2)와 같은 복잡한 형태의 비선형 압밀방정식을 식 (2-1)과 같은 선형적 형태의 압밀방정식으로 변환시키는 값이다.

1981년 Gibson et al. 및 여러 연구자들의 연구내용을 살펴 볼 때, 각 유효응력 단계 혹은 각 간극비 단계에 해당하는 비선형 계수를 식 (5)와 식 (6)등에 의해 구한 후, 이 값을 전체 압밀과정에서의 비선형 계수에 대한 대표값으로 가정하여 1 차원 비선형 압밀거동을 예측하였다. 이러한 가정은 Gibson et al.이 각각의 유효응력 단계별 비선형 계수값을 구해본 결과, 어느 구간의 유효응력 범위에서는 비선형 계수값의 변화폭이 크지 않다는 사실에 기인한 것이며, 예측하고자 하는 압밀 대상지반의 대표적인 유효응력 값을 찾아 그때의 g , λ 값을 구한 후 이를 압밀거동의 예측에 이용하였다.

본 연구에서는 표준압밀시험 및 Rowe cell 압밀시험, Rowe cell 투수시험 등의 실내시험과 앞에서 언급한 비선

형적인 응력-변형, 변형-투수계수 관계를 이용하여 비선형 계수 g , λ 를 각각의 간극비 단계에 따라 식 (12) 및 식 (13)과 같이 유도하였으며, 그 결과는 그림 1 및 그림 2와 같다.

$$g(e) = \frac{k(e)}{\gamma_w} \cdot \frac{1}{(1+e)} \cdot [(A_{coe})^{TB_{coe}} \cdot TB_{coe} \cdot e^{-TB_{coe}-1}] \quad (12)$$

$$\lambda(e) = TA_{coe}^{TB_{coe}} \cdot (1+B_{coe}) \cdot e^{TB_{coe}} \quad (13)$$

여기서, $TA_{coe} = \frac{1}{A_{coe}}$

$$TB_{coe} = \frac{1}{B_{coe}}$$

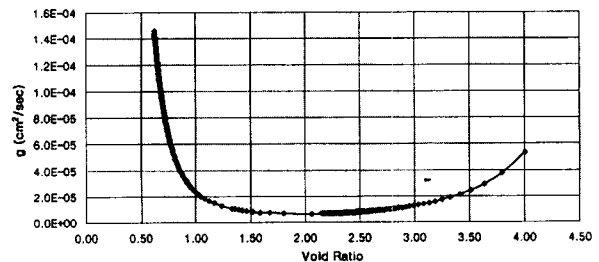


그림 1. 간극비 단계별 g

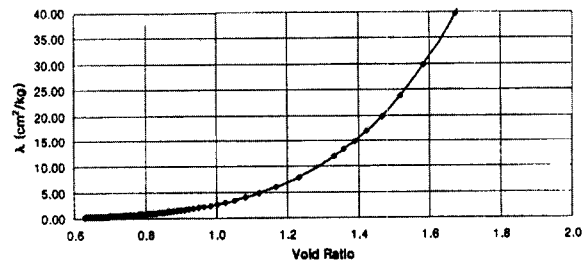


그림 2. 간극비 단계별 λ

최근들어 압밀거동을 예측하는데 있어 비선형 압밀이론을 이용한 예측이 많이 이루어지고 있다. 특히 비선형적인 응력-변형, 변형-투수계수 관계 및 압밀거동에 있어서의 비선형성이 전체적인 예측결과에 큰 영향을 미치는 초연약지반 및 대심도 연약지반의 압밀거동 예측에 비선형 압밀이론이 활발히 적용되고 있다. 그 중 비선형 유한변형률 압밀이론이 Mikasa의 이론과 함께 가장 널리 이용되고 있는데, 이 이론의 적용시 매우 중요한 요소인 비선형 계수의 적용에 있어서 그 산정은 매우 어려운 문제로 대두되는 것이 사실이다.

3.2 초기조건 및 경계조건

압밀현상이 진행되기 전 상태인 원지반의 초기상태는 그림 3과 같다. 즉 원지반의 초기 응력상태는 식 (17)에서 보듯이 깊이별 토층의 자중항과 식 (18)과 같은 초기 유효 응력 분포를 나타내는 항으로 구성되어 있다.

$$\sigma'(z) = (\gamma_s - \gamma_w)z + q_0'(z) \quad (17)$$

$$q_0'(z) = q_{0(coe1)} \cdot z + q_{0(coe2)} \quad (18)$$

식 (17)로 표현되는 원지반의 깊이별 유효응력 분포는 응력-변형 관계를 나타내는 비선형 응력-변형 관계 및 변형-투수계수 관계에 의해 간극비 분포로 변환되며, 이론적인 초기 간극비 분포형태와 실제 현장의 초기 간극비 분포형태를 보정하는데 식 (18)이 이용된다. 현장의 배수조건을 나타내는 경계조건은 양면배수와 일면배수의 두가지 형태로 나눌수 있는데, 양면배수의 경우 배수경계면에서 일정한 간극비를 유지시키는 것으로 그 현상을 표현하였고, 일면배수의 경우 간극수의 유출속도 v_w 와 흡입자의 유출속도 v_s 가 같다는 조건하에 식 (19)와 같은 형태로 표현하였다.

$$\frac{\partial e}{\partial z} + (\gamma_s - \gamma_w) \frac{de}{d\sigma'} = 0 \quad (19)$$

3.3 개발 프로그램

지금까지 언급된 1차원 비선형 유한변형률 압밀이론 및 좌표변환, 비선형적인 응력-변형 관계, 변형-투수계수 관계, 유한차분기법등을 바탕으로 비선형 압밀거동의 예측을 위한 해석 프로그램을 개발하였다. 개발 프로그램은 Windows98 운영체제에 맞도록 설계된 프로그램으로서, GUI의 극대화를 기대할 수 있는 Visual Tool Programming 중 Delphi Programming Language를 이용하여 개발되었다. 모든 변수를 Dynamic array로 처리함으로써 해석하고자 하는 절점수의 제한이 없으며, 사용할려는 폼 및 모듈을 자동으로 생성, 분해하도록 설계하여 계산시간을 최대한 단축하도록 하였다. 프로그램의 구성 및 이용, 사용자 Interface등을 살펴보면, 개발 프로그램은 총 4개의 기본 폼으로 구성되어 있으며, 각 폼은 입력 및 실행을 위한 과정으로 이루어져 있다. 이들 각각에 대한 내용은 다음과 같다

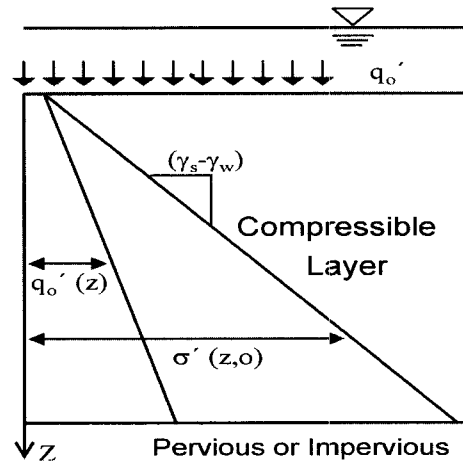


그림 3. 원지반 초기상태의 응력분포

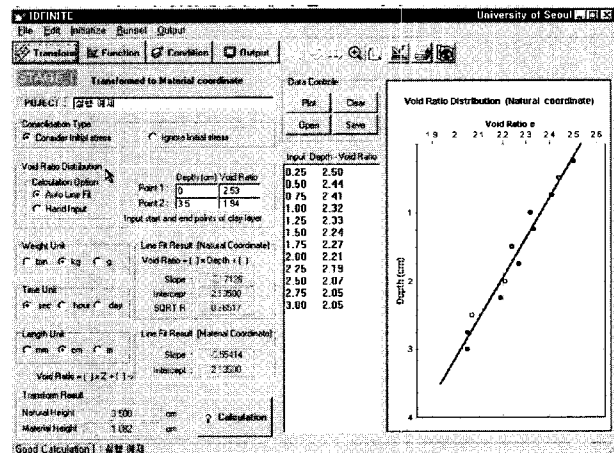


그림 4. 개발 프로그램의 1단계 화면

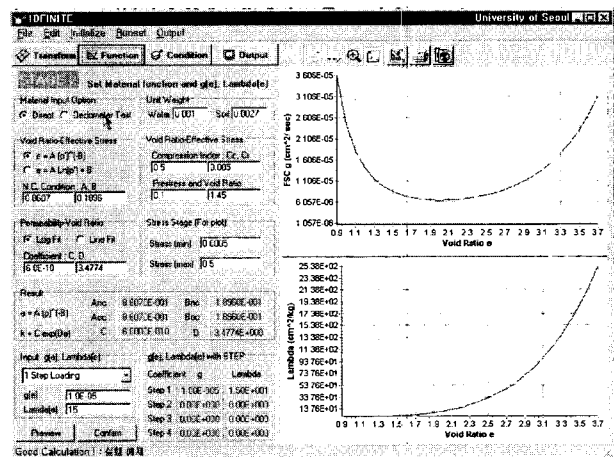


그림 5. 개발 프로그램의 2단계 화면

다. 1단계는 기본적으로 해석대상 지반의 초기상태 및 이를 이용한 좌표변환 과정이다. 그림 4에서 보듯이, 이 과정은 지반의 자중을 제외한 깊이별 초기 유효응력 분포상태 $q_0'(z)$ 의 고려 유·무와 깊이별 초기 간극비 분포의 입력

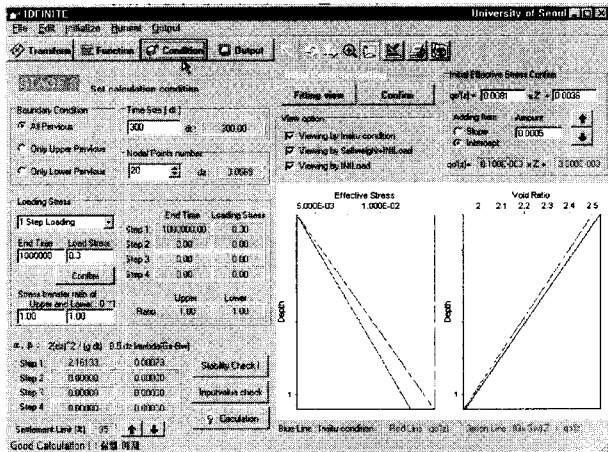


그림 6. 개발 프로그램의 3단계 화면

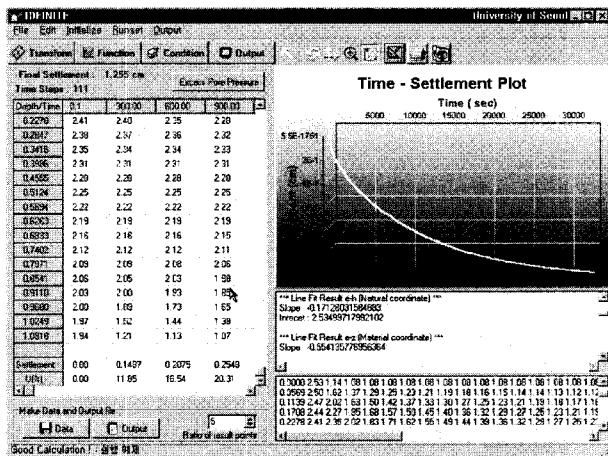


그림 7. 개발 프로그램의 4단계 화면

및 이들의 회귀분석 유·무와 결과, 좌표변환 결과, 사용하는 단위계의 선정, 최종 결과들의 그래픽처리 등으로 이루어져 있다.

2단계는 기본적으로 비선형 계수인 $g(e)$ 와 $\lambda(e)$ 를 결정하는 단계로서, 그림5에서 보듯이 응력-변형 관계나 변형-투수계수 관계를 이용하여 각 유효응력 상태별 $g(e)$ 와 $\lambda(e)$ 를 그래픽 처리하고, 원하는 응력단계에 맞는 비선형 계수를 선택할 수 있는 과정이다. 응력-변형 관계에 있어서는 유효응력과 간극비의 관계를 누승형태 및 로그 함수 형태로 표현할 수 있는 상수를 입력시켜줄 수 있으며, 변형-투수계수 관계는 지수함수 및 선형함수 형태로 표현할 수 있는 상수를 입력시킬 수 있도록 하였다. 또한 이러한 상수들의 직접적인 입력 이외에, 표준압밀시험에서 얻은 결과를 입력하여 간접적으로 $g(e)$ 와 $\lambda(e)$ 를 산정할 수도 있도록 하였다. 한편 단계하중재하를 고려할 수 있는 본 개발 프로그램에서는 압밀이 진행됨에 따라 변화하

는 지반내의 유효응력의 상태에 따라 각기 상이한 비선형 계수를 적용시켜 해석하는 것이 가능하다.

3단계는 그림 6에서 보듯이 기본적으로 해석에 필요한 경계조건 및 초기 응력조건, 하중 재하조건, 해석 절점수, 시간간격, 각 해석단계별 Matrix 구성성분인 α , β 의 확인 등과 이들의 결과를 그래픽 처리하는 과정으로 이루어져 있다. 특히 본 단계는 지반의 자중으로 인한 초기 유효응력을 확인할 수 있으며, 깊이별 초기 유효응력 분포상태 $q_0'(z)$ 을 구하는데 있어서 그래픽적으로 유추할 수 있는 과정이 포함되어 있다.

4단계는 그림 7에서 보듯이 각 단계별 입력치를 기본으로 한 최종 해석결과를 나타내는 과정으로서, 각 시간단계와 해석절점별로 그 해석결과가 간극비 및 과잉간극수압의 형태로 그리드상에 나타나며, 이들 결과값을 기본으로 한 시간-침하곡선 및 시간-과잉간극수압 곡선이 생성된다. 해석에 필요한 초기 입력치 및 각종 회귀분석 결과, 계산 결과등은 그래픽 외에 text file형식으로 생성될 수 있으며, 모든 과정에서 생성되는 그래프들은 사용자의 요구에 따라 3차원 표현 및 다양한 축서식, 그리드 서식, 라벨 서식, bmp, wmf, jpg 그림형식으로의 변환등 다양한 기능을 포함하고 있다.

4. 개발 프로그램의 검증

본 연구에서 개발된 프로그램의 검증은 크게 다음과 같은 세가지 방법을 통해 실시하였는데, 우선 시험실에서 제조한 재성형 시료를 이용한 실내시험 및 국내 00지역의 연약지반 개량사례, Mikasa에 의한 오사카 해안지역의 압밀 침하 연구사례의 결과를 개발 프로그램에 의한 예측결과와 비교·분석 하였다.

4.1 실내시험에 의한 응력-변형, 변형-투수계수 관계 선정 및 개발 프로그램의 검증

유한변형을 압밀이론에서 필요한 응력-변형관계 및 변형-투수계수등의 비선형 관계를 구하고 이를 표현할 수 있는 적정 수식을 찾기 위한 실내시험으로서 Rowe cell 압밀 시험 및 투수시험, 표준압밀시험을 실시하였다. 시험에 사용한 시료는 부산 가덕도에서 채취한 해성 점토를 사용하였으며, 시료의 균질성을 확보하기 위해 #100체로 체가름을 실시하였는데, 구체적인 사용시료의 토성값은 표 1과 같다.

표 1. 사용시료의 토성값

비중	액성한계(%)	소성한계(%)	소성지수	#200 통과율(%)	USCS
2.71	42±3	22±2	20±3	97.5	CL

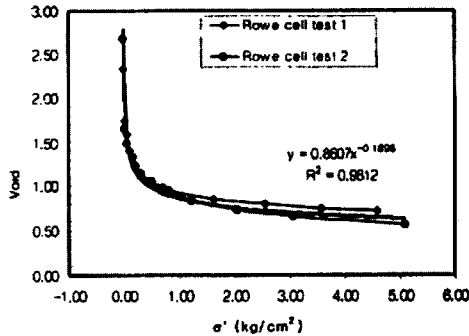


그림 8. 유효응력-간극비 관계

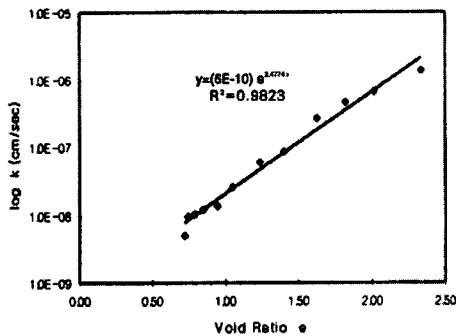


그림 9. 간극비-투수계수 관계

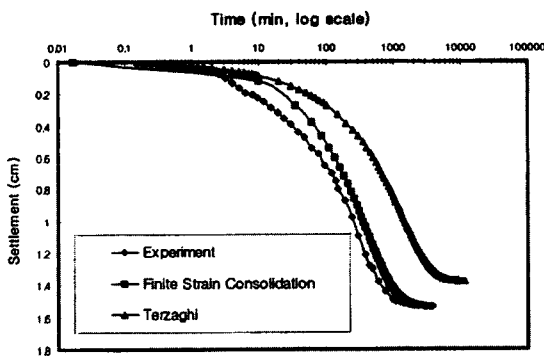


그림 10. 시험결과 및 해석결과

Rowe cell 압밀시험에 의한 응력-변형관계는 재성형한 시료를 압밀셀에 투기한 후, 약 5kPa의 압으로 압밀시켰다. 그 후 유효압을 10, 20, 40, 80, 160, 250, 350, 450, 650kPa로 변화시켜가며 압밀시험을 하였고 각각의 유효응력상태마다 간극비를 계산하여 유효응력-간극비간의 관계를 구했다. 각 유효응력 단계별로 압밀이 종료된 시점

에서 투수시험을 실시하였으며, 초기상태가 상이한 시료에 대해 반복적인 실험을 실시하여 구한 본 시료의 유효응력-간극비 관계와 간극비-투수계수의 관계는 그림 8 및 그림 9와 같다. Rowe cell 시험과 병행하여 실시한 표준압밀시험결과 Cc값은 대략 0.35로 나타났다.

Rowe cell 압밀시험에 의한 실제 압밀과정과 이를 개발 프로그램으로 예측한 결과 및 고전압밀론에 의한 예측치간의 상호 비교결과가 그림 10과 같다. 개발 프로그램에 의한 예측은 Rowe cell 시험에서 구한 응력-변형, 변형-투수계수간의 비선형 함수식을 근거로 하였다. 결과에서 보듯이 실제 압밀침하현상과 비교해 볼 때, 고전압밀론에 의한 예측은 침하량보다 침하시간에 있어서 상당히 차이가 나는 것을 볼 수 있는데, 개발 프로그램에 의한 예측결과가 고전압밀론에 의한 예측결과보다 더욱 빠른 압밀도의 진행을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 지반의 초기상태 시점에서선 압밀이 충분히 진행된 상태에 비해 투수계수와 압축성이 크기 때문이며 이는 기존의 여러 문헌상에 발표된 연구결과와 일치하는 현상이다. 즉, 기존의 고전압밀론에서는 압밀진행상태에 관계없이 동일한 압축성과 투수계수를 가정하는 이유로 압밀이 진행됨으로서 감소하는 투수계수 및 압축성을 예측에 반영하지 못함을 알 수 있다.

4.2 국내 OO지역 연약지반 침하계측에 대한 사례분석

본 연구에서 개발한 프로그램을 이용하여 국내 OO지역 연약지반 처리구간중 프리로딩에 의한 처리가 이루어지고 있는 지역의 압밀침하 예측을 실시하였다. 이 지역은

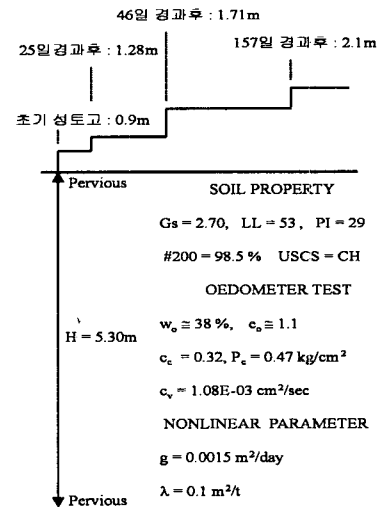


그림 11. 시공이력 및 토성치

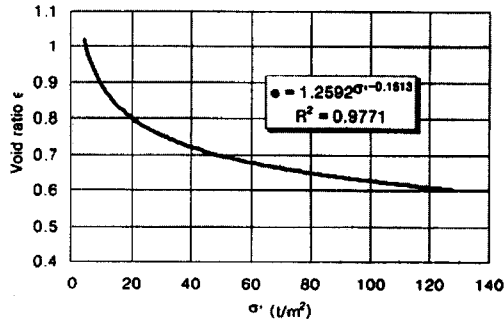


그림 12. 유효응력-간극비 관계

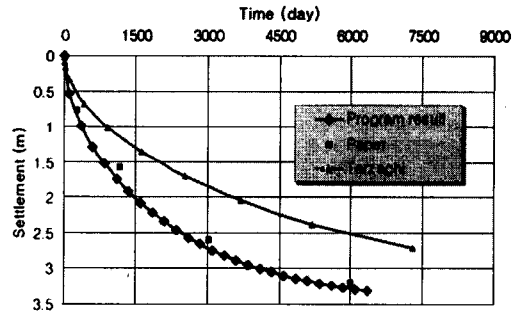


그림 14. 시간-침하곡선

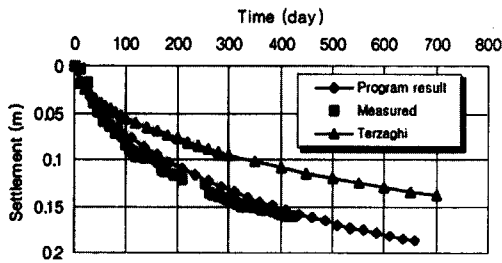


그림 13. 시간-침하곡선

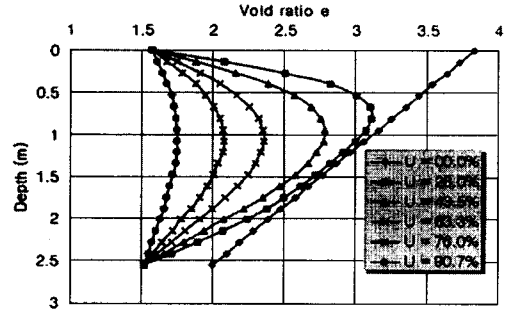


그림 15. 간극비에 대한 등시곡선

상부 5.3m 정도가 해성퇴적층으로서 암회색의 실트질 점토로 이루어진 매우 연약한 층이다. 그림 11은 지금까지의 시공이력 및 토성값을 타나낸 것으로서, 1997년 10월 23일 0.9m를 성토한 후 25일 경과후에 1.28m를 성토했으며 그 후 38일이 경과된 시점에서 1.71m, 성토시작후 157일 후 2.1m를 성토하였다. 성토시점부터 현재까지 침하계측이 이루어지고 있으며, 앞으로도 몇차례의 추가성토가 계획되어 있다. 개발 프로그램에 의한 예측치와 현재까지의 계측결과를 비교분석하여 개발 프로그램의 신뢰성을 검증하였다. 해석에 필요한 각종 함수식들은 기존의 설계보고서 및 표준압밀시험과 토성시험자료를 근거로 추정하였다. 표준압밀시험에 의한 초기간극비는 1.1~0.8까지 나타났으며 비중 2.70, 초기함수비 38.1%, c_c 값이 0.32, c_v 값이 $1.08E-03 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 로 나타났다.

그림 12의 유효응력-간극비 관계는 표준압밀시험에서 얻은 결과를 이용하여 누송형태의 회귀분석을 통해서 구했다. 그림 13에서는 개발 프로그램에 의한 예측치와 현재까지의 계측결과, Terzaghi의 1차원 압밀론을 이용한 예측치를 함께 비교하였다. 미소변형이론인 Terzaghi의 1차원 압밀이론에 의한 예측은 침하량 및 침하시간에 있어서 실제치와 상당히 차이가 나는 것으로 나타나고 있다. 즉 응력과 변형간의 관계를 상수로 가정하며, 토층의 자중을 무시하는 경우 실제의 시간과 침하량을 예측하는 데는 많은 무

리가 있음을 알 수 있다.

4.3 국외 Osaka 해안점토에 대한 사례분석

1981년 Gibson 등은 Mikasa가 발표한 오사카 해안점토의 압밀특성을 이용하여 유한변형률 압밀이론에 의한 압밀 침하해석을 실시하였다. 여기서는 본 연구에서 개발한 프로그램을 이용하여 동일 조건에 대한 압밀침하예측을 하였다.

그림 14에서 보듯이 개발 프로그램에 의한 해석결과와 논문상의 결과는 잘 일치하는 반면, Terzaghi의 1차원 압밀이론에 의한 예측치와는 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 그림 15는 간극비에 대한 등시곡선을 나타낸 것으로서, 지반의 초기 간극비 분포를 선형적 형태로 고려했으며 지반의 자중을 해석에 고려하였기 때문에 등시곡선의 형태가 깊이방향에 대한 비대칭형태로 나타남을 알 수 있다. 또한 자중의 고려로 인해 무한대의 시간이 흘렀을 때, 깊이별 간극비 분포는 동일한 분포가 아닌 상부로부터 깊이별로 감소하는 직선형태가 됨을 알 수 있다.

5. 비선형 계수의 영향분석

1981년 Gibson et al.은 비선형 계수인 g , λ 를 상수로

표 2. 간극비별 비선형 계수

간극비	g (cm^2/sec)	λ (cm^2/kg)
3.51	2.42E-05	1982.66
3.08	1.36E-05	991.33
2.74	9.50E-06	540.73
2.60	8.42E-06	410.21
2.50	7.79E-06	330.44
2.41	7.35E-06	270.36
2.30	6.95E-06	212.43
2.21	6.70E-06	169.94
2.06	6.50E-06	118.96
1.36	1.00E-05	13.22
1.00	2.31E-05	2.64
0.81	5.03E-05	0.85
0.70	8.96E-05	0.40

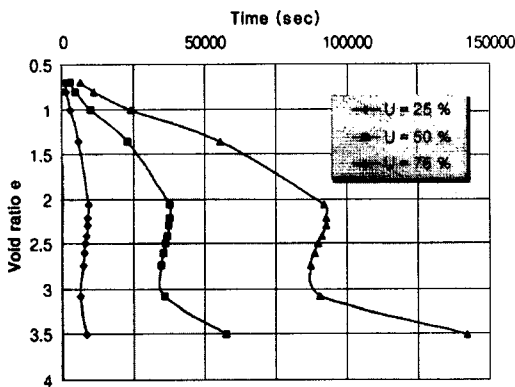


그림 16. 비선형 계수에 따른 압밀거동

고려하여 해석하되, 이러한 비선형계수들의 변화를 고려하지 못한 한계점에 관하여 언급하였다. 특히 지반에 가해지는 유효응력의 크기가 지반의 초기조건에 비해 상대적으로 클 때, 이러한 비선형 계수를 상수로 고려하여 해석한 결과는 실제현상과 많은 차이가 발생할 수 있다. 그림 16은 앞의 해석사례를 기준으로 하여 비선형 계수인 g , λ 의 변화가 압밀침하시간에 미치는 영향을 나타낸 것으로서, 각 간극비별 비선형 계수값을 표 2와 같이 구한 후 각 경우에 대한 비선형 계수값을 해석에 적용시켜 그 최종결과를 비교한 것이다.

그림 16에서 보듯이 대략 간극비가 2.0~3.0 범위에 해당하는 비선형 계수값들에 의한 압밀거동 예측결과는 일정한 값에 수렴하는 양상을 보이는 반면, 이 범위 이외의 간극비에 해당하는 비선형 계수값들에 의한 압밀거동 예측결과는 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 즉 비선형 유한변형률 압밀이론을 이용한 압밀거동의 예측시, 비선형

계수를 상수로 간주하여 해석에 이용하는 것은 일정한 유효응력 범위안에서만 가능함을 알 수 있다. 물론 예측결과가 일정한 수렴영역안에 포함되는 비선형 계수값의 범위는 대상 지반의 특성에 따라 달라진다.

6. 결론

본 연구에서는 1차원 비선형 유한변형률 압밀이론의 적용에 필요한 각종 비선형 응력-변형, 변형-투수계수 관계와 비선형 계수등을 구할수 있는 과정 및 다양한 현장상태와 시공상태에 맞는 조건고려 과정을 포함하고 이를 손쉽게 압밀현상 예측에 이용할 수 있는 해석프로그램을 개발하였다. 또한 실내시험 및 국내외의 현장사례를 이용하여 개발된 프로그램을 검증하였고, 개발된 프로그램을 통한 비선형 유한변형률 압밀이론의 적용에 관한 연구를 수행하였는데, 이를 요약하면 다음과 같다.

우선 1차원 비선형 유한변형률 압밀이론을 이용하되, 다양한 입력조건과 후처리 과정을 포함하는 비선형 압밀 거동 예측 프로그램을 개발하였다. 개발 프로그램을 통해 응력-변형, 변형-시간등의 비선형적 관계를 고려한 압밀 해석 및 유효응력 단계별로 적정 비선형 계수를 적용한 압밀해석과 다양한 초기조건 또는 단계별 하중재하, 변화하는 경계조건 및 지반의 자중을 고려한 비선형 압밀해석을 할 수 있다.

비선형적인 응력-변형 관계, 변형-투수계수 관계에 있어 본 연구에서 실시한 Rowe cell 압밀시험 및 투수시험, 표준압밀시험등의 결과를 통해 각 관계식은 지수함수 및 누승함수의 형태로 표현될 수 있음을 확인했다. 한편 유한변형률 압밀이론의 적용에 가장 큰 어려움으로 작용했던 비선형 계수들의 결정과 단계별 적정값의 적용 사항들에 있어 기존의 표준압밀시험결과를 쉽게 적용시키는 방법을 개발하였는데, 대상지반에 작용하는 유효응력의 범위 또는 변형의 범위가 큰 경우에는 단일한 상수값의 비선형 계수를 통한 비선형 압밀해석에 문제점이 있으며, 적절한 비선형 계수값은 고려하고자 하는 유효응력범위에 기준하여 결정되어야 한다. 만약 초기함수비가 매우 큰 초연약지반의 비선형 압밀현상을 예측하는데 이 이론을 사용한다면, 지반이 경험하는 전체 유효응력 범위에 대하여 균일한 비선형 계수값을 적용시키기 보다는 유효응력 구간별로 적정한 비선형 계수값을 상이하게 적용시키는 것이 보다 현상에 근접한 압밀거동의 예측을 가능하게 할 것이다.

개발 프로그램을 이용한 예측결과와 실내 압밀시험결

과 및 국내외의 현장사례 결과를 비교·분석한 결과, 기존의 Terzaghi 압밀이론은 시간에 따른 침하량 및 압밀도를 실제보다 늦게 평가하였는데, 이는 전체 압밀과정에 있어 동일한 압축성 및 투수성을 기본적인 가정사항으로 내포하고 있기 때문이며 비선형적인 압축성 및 투수성을 고려한 개발 프로그램에 의한 해석결과는 비교적 실제 현상과 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. 이송, 전제성, 이규환(1997), "원통형드레인을 사용한 진공압밀공법의 효과분석", 대한토목학회 논문집, 제17권, 제3-2호, pp. 209~216.
2. 이송, 전제성, 김성택(1998), "Rowe cell 시험을 이용한 고풍수비지반의 비선형 압밀변수산정에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 109~112.
3. 이송, 전제성, 이규환(1999), "비선형 유한변형률 압밀이론을 이용한 압밀 해석 프로그램 개발", 한국지반공학회 연약지반처리위원회 학술세미나 논문집, pp. 36~47.
4. Cargill, K. W.(1984), "Prediction of Consolidation of Very Soft Soil", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 6, pp. 775~795.
5. Chung, Youn-In.(1993), "Vacuum consolidation of highly compressible soil with vertical wick drain", Ph. D. Thesis of South Dakota school of mines and technology, pp. 1~209.
6. 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, pp. 261~273.
7. 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.
8. Lee, K. and Sills, G. C.,(1981), "The Consolidation of a Soil Stratum, Including Self-Weight Effects and Large Strains", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 5, pp. 405~428.
9. Lehner, F. K.(1984), "On the Consolidation of Thick Layers", Geotechnique, Vol. 34, No. 2, pp. 259~262.
10. Lowe, III, J., Zaccaro, P. F. and Feldman, H. S.(1964), "Consolidation Testing with Back Pressure", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 90, No. SM5, pp. 69~86.
11. 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.
12. Monte, J. L., and Krizek, R. J.(1976), "One-dimensional Mathematical Model for Large-strain Consolidation", Geotechnique, Vol. 26, No. 3, pp. 495~510.
13. Pane, V., Croce, P., Znidarcic, D., Ko, H. Y., Olsen, H. W., and Schiffman, R. L.,(1983), "Effects of Consolidation on Permeability measurements for Soft Clay", Geotechnique, Vol. 33, No. 1, pp. 67~72.
14. Pane, V., and Schiffman, R. L.,(1981), "A Comparison between Two Theories of Finite Strain Consolidation", Soils and Foundations, Vol. 21, No. 4, pp. 81~84.
15. Rowe, P. E., and Barden, L.,(1966), "A New Consolidation Cell", Geotechnique, Vol. 16, No. 2, pp. 162~170.

(접수일자 2000. 1. 13)