

확장멱함수모형을 이용한 비선형 압밀속도 모형의 개발

Nonlinear Consolidation Model Using an Extended Power Function

원 정 윤*¹

Won, Jeong - Yun

장 병 옥*²

Chang, Pyoung-Wuck

Abstract

One-Dimensional Nonlinear Consolidation Model(NCM) was developed by using an Extended Power Function Model, which could represent the compressibility of soils. A nonlinear finite element program for NCM was developed to analyze the porewater pressure dissipation and the settlement of saturated soils. Parameters used in compressibility model could be easily obtained from conventional oedometer test data. This model has been applied to Yansan-Mulgum area for the comparison with the results of CONSOL program and that of Terzaghi theory. A Good agreement was obtained between this model and CONSOL in settlement and rate of consolidation. The rates of consolidation predicted by this model and CONSOL were faster than that of conventional Terzaghi theory, for they consider the nonlinear characteristics of soils.

Consolidation curves of this model were located between Terzaghi and CONSOL curves. Consolidation curves near drainage boundary, where effective stress varied rapidly, seemed to reflect the variations of compressibility of soils. Consolidation curves near drainage boundary obtained from this model were composed of two parabolic curves. Intersection of the parabolic curves occurred when effective stress reached the value of preconsolidation stress. Moreover, this model could be used to represent the effect of magnitude of applied load, whereas CONSOL and Terzaghi theory could not.

요 지

흙의 일차원 압축거동을 잘 표현할 수 있는 확장멱함수 모형을 이용하여 비선형 압밀속도 모형을 개발하고, 비선형 유한요소 프로그램을 개발하여 침하량과 압밀속도를 계산하였다. 양산-물금

*1 정희원, 서울대학교 대학원 농공학과 박사과정

*2 정희원, 서울대학교 농생대 농공학과 교수

지구 4개 지점의 표준압밀시험 결과를 이용하여 확장역함수의 매개변수를 구하고, 압밀속도와 침하량을 계산한 결과를 비선형 압밀해석 프로그램인 CONSOL의 결과와 비교하였다. 본 모형에 의한 침하량과 압밀속도는 CONSOL의 결과와 잘 일치하고 있다. 본 모형과 CONSOL은 흙의 압축성의 변화를 고려하고 있기 때문에 Terzaghi 압밀이론에 비해 빠른 압밀속도를 얻을 수 있었다.

본 모형에 의해 구해진 압밀곡선은 Terzaghi 압밀곡선과 CONSOL 결과의 중간형태를 띄고 있다. 유효응력의 증가속도가 빠른 배수경계 부근에서의 압밀곡선은 두 개의 포물선으로 구성되어 있으며 두 곡선의 교점, 즉 변곡점은 그 지점의 유효응력이 선행압밀하중에 다다를 때 나타난다.

CONSOL과 Terzaghi 압밀이론에서는 하중 크기에 상관없이 압밀곡선의 거동이 동일한 양상을 보이고 있지만 본 모형의 압밀곡선은 선행압밀하중보다 큰 하중에서만 변곡점이 발생된다. 이것은 본 모형이 하중 크기의 영향을 구현할 수 있다는 것을 보여주고 있다.

Keywords : Nonlinear consolidation model, Nonlinear compressibility, Rate of consolidation, Settlement

1. 서 론

흙의 압밀 문제에서는 침하량과 압밀속도를 정확히 추정하는 것이 매우 중요하다. 전통적인 Terzaghi 압밀이론에서 압밀계수는 압밀속도의 결정에 있어 매우 중요한 인자이며 대부분 도해법으로 구해지고 있지만, 이과정에서 많은 어려움을 겪고 있다(Duncan, 1993). 압밀계수는 흙의 투수성과 압축성의 함수로 표현되며, 압밀과정에서 투수성과 압축성이 변화하기 때문에 일정하지 않다(Terzaghi 등, 1996). Tavenas 등(1983)은 투수성과 압축성을 독립적인 매개변수로 사용하는 것이 심오한 압밀계수에 바탕을 둔 Terzaghi의 방법보다 낫다고 하였다. 압밀속도에 대한 정확한 추정을 위해서는 압밀속도에 영향을 미치는 중요한 인자, 즉 압축성과 투수성에 대한 보다 실제적인 고려가 필요하며 이들에 대한 실제적인 가정 도입하여 압밀이론을 재정립하는 것이 필요하다(Terzaghi 등, 1996).

Davis 등(1965)은 압밀과정에서 압축성과 투수성이 변화하지만 압밀계수가 일정하다고 가정한 비선형 압밀이론을 개발하였다. Mesri와 Rokhsar(1974)는 압축성과 투수성의 변화,

이차압축의 영향 등을 고려한 비선형 압밀모형을 개발하였다. 이 외에도 압밀과정에서 변화하는 투수성, 압축성, 압밀계수를 표현하기 위한 모형까지 흙의 비선형 거동을 나타내기 위한 많은 모형들이 제시되었는데, 이들 모형은 대부분 압축성에 대해 직선적인 $e-\log\sigma$ 의 관계를 적용하고 있다. 한편, 흙에서 압밀속도에 큰 영향을 주는 비선형 압축성에 대한 수학적 모형을 위해 상수, 로그함수, 지수함수, 역함수의 형태까지 다양한 함수들이 제시되어 왔다. 이 중 Liu 등(1991)이 제안한 확장역함수 형태의 모형은 비선형 압밀해석에서 많이 사용되는 로그함수 또는 지수함수 모형의 한계를 극복하면서도 비교적 간단한 형태로 흙의 일차원 압축 거동을 정확하게 나타낼 수 있다.

본 연구에서는 Terzaghi 일차원 압밀이론의 압축성에 대해 비선형 압축모형인 확장역함수 모형을 적용하고, 투수계수를 일정하다고 가정하여 비선형 압밀속도 모형을 개발하였다. 개발된 비선형 압밀속도 모형을 실제 지반에 적용하고 비선형 압밀해석 프로그램인 CONSOL의 결과, 그리고 Terzaghi 압밀이론 결과와 비교하고자 한다.

2. 모형의 개발

2.1 일차원 비선형 압축모형

흙의 일차원 변형을 모형화하는 전형적인 방법은 간극비 e 와 유효응력 σ' 의 로그값간에 선형적인 관계를 가정하는 것이며, 대부분의 비선형 압밀모형은 이 관계를 바탕으로 개발되었다. 이외에도 Oikawa(1987)는 비체적(specific volume) $f=1+e$ 의 개념을 도입하여 고함수비의 점토에 대해 $\log f - \log \sigma'$ 의 관계로 흙의 일차원 압축특성을 설명하였으며, Gibson 등(1967)은 간극비-유효응력 관계를 지수함수로 적용하였으며, Hardin(1989)은 간극비의 역수 $1/e$ 와 σ'^p 가 직선적인 관계에 있다는 일차원 비선형 압축모형을 제시하였다. 여기서, p 는 상수이다. Liu 등(1991)은 점토의 일차원 압축특성을 확장역함수로 나타내었다. 이 모형은 $e - \log \sigma'$ 모형에 간단한 수정을 가하여 초기간극비와 함께 높은 응력 하에서의 간극비를 동시에 표현할 수 있도록 한 모형이다. 간극비와 유효응력간의 관계에 대해 그가 제시한 확장역함수모형은 다음과 같다.

$$e = A(\sigma' + Z)^B \quad (1)$$

여기서, A, B 는 상수이며 Z 는 응력의 단위를 가지는 매개변수이다. 이 확장역함수모형은 유효응력이 0일 때의 간극비를 정의할 수 있으며, 양의 응력상태에서 간극비가 음이 되는 경우가 발생하지 않는 특성을 가지고 있다. 또한, 과압밀과 정규압밀 영역을 단일한 매개변수로 표현할 수 있다. 이 모형에서 사용되는 매개변수 A, B, Z 는 초기간극비를 이용하여 정규화한 뒤에 최소자승법과 simplex method를 통해 목적함수를 최소화함으로써 구할 수 있다. 이때 사용한 목적 함수 J 는 다음과 같다.

$$J = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^N (\bar{e}_j - e_j)^2}}{e_0 \sqrt{N}} \quad (2)$$

여기서 \bar{e}_j 는 주어진 유효응력에 대해 모형에 의해 계산된 간극비이며, e_j 는 이와 동일한 유효응력 하에서 얻은 실험결과의 간극비, e_0 는 유효응력이 0일때의 간극비, 그리고 N 은 데이터의 수를 의미한다. 이때 Z 는 양수이므로 목적함수 J 의 최소값을 얻을 때까지 일정한 값만큼씩 증가시키면서, 다음 식을 이용하여 매개변수 A, B 를 구할 수 있다.

$$A = \exp(\ln e_0 - B \ln Z) \quad (3a)$$

$$B = \frac{\ln e_0 \sum \ln(\sigma + Z) - \sum [\ln e \times \ln(\sigma + Z)]}{\ln Z \sum \ln(\sigma + Z) - \sum (\ln(\sigma + Z))^2} \quad (3b)$$

Table 1.에 표준압밀시험 자료를 이용한 매개변수 계산결과를 제시하였다. Fig.1에서, 본 연구의 적용대상 지반인 양산-물금지구의 표준압밀시험 결과와 확장역함수에 의한 추정치를 비교하고 있다. Fig.2에서는 매개변수 B 와 압축지수들을 비교하고 있다. 확장역함수모형에서의 매개변수 B 는 압축지수와 동일하지는 않지만 선행회귀 결과 높은 상관관계를 가지며 1:1직선 부근에 밀접해 있어 매개변수 B 가 압축지수와 물리적으로 유사한 의미를 가지고 있음을 알 수 있다.

Table 1. Parameters of Extended Power Function Model

Sample I.D.	A	B	Z(t/m ²)
B2-34	9.184	-0.527	28.543
B2-36	11.653	-0.531	41.908
B2-39	3.549	-0.383	10.191
B2-41	3.826	-0.337	19.081

2.2 압축성에 대한 확장역함수모형의 적용

흙 속에서 물의 흐름에 관한 일차원 연속방정식과 Darcy 법칙을 적용하고, 미소변형의 가정과 함께 투수계수 k 가 각 압밀시점과 깊이에서 일정하다고 가정하면, 포화상태 흙의 압밀에 관한 식은 다음과 같다.

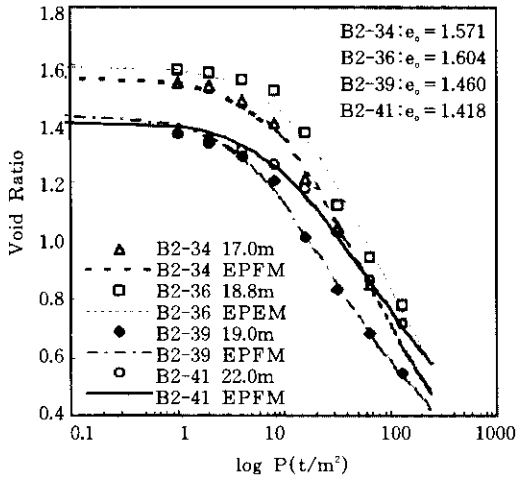


Fig.1 Comparison of Estimated Data by Extended Power Function Model(EPFM) and Oedometer Data of 4 Points in Yangsan-Mulgum Area

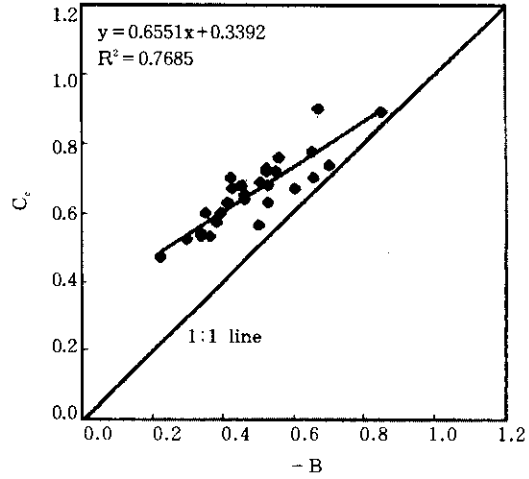


Fig.2 Relationship between C_c and $-B$

$$\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -\frac{1}{1+e_0} \left(\frac{\partial e}{\partial \sigma'} \right) \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4)$$

여기서 u 는 과잉간극수압이다. 이 식에 간극 비-유효응력의 관계를 확장역함수모형으로 적용하고, 압밀하중(q)가 작용했을 때의 유효응력을 전응력 σ 와 정수압 u_s 로 표현하면,

$$-\frac{k(1+e_0)}{\gamma_w} AB(\sigma - u_s + q - u + Z)^{1-B} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (5)$$

이를 다시 정리하면 다음과 같은 일차원 비선형 압밀 미분방정식을 얻게 된다.

$$C(u) \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (6)$$

여기서

$$C(u) = -\frac{k(1+e_0)}{\gamma_w} AB(\sigma - u_s + q - u + Z)^{1-B}$$

위 식(6)에서 $C(u)$ 는 Terzaghi 압밀이론에서의 압밀계수 C_v 와 유사한 의미를 가지지만, 본 모형에서의 $C(u)$ 는 과잉간극수압의 함수로서 표현되며 일정하지 않다.

2.3 비선형 유한요소 정식화

식(6)과 같은 비선형 미분방정식은 적절한 이산화과정과 Galerkin 가중잔차법을 이용하여 유한요소의 형태로 변환될 수 있다(Owen 등, 1980). 정식화 과정에서 일면배수의 경계조건과, 하중이 작용한 직후 시간 $t=0$ 일때 과잉간극수압은 작용된 하중의 값과 같다는 가정을 적용하면 초기조건과 경계조건은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} t=0 & ; u=q \\ z=0 & ; u=0 \\ z=H_{dr} & ; \partial u / \partial z = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

식(6)에서 시간항을 계산하기 위하여 식(8)과 함께 식(9)의 Crank-Nicolson 개념을 이용하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u^{t+\Delta t} - u^{t-\Delta t}}{\Delta t} \quad (8)$$

$$u^t = 1/2(u^{t+\Delta t} + u^{t-\Delta t}) \quad (9)$$

따라서, 식(6)은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\Delta t C(u) \frac{\partial^2 u^t}{\partial z^2} - 2(u^t - u^{t-\Delta t}) = 0 \quad (10)$$

식(10)에서 가중잔차법과 Galerkin 방법을 적용하면, $u = \sum N_i \phi_i$ 로 나타낼 수 있다. 따라서,

$$\int_{\Gamma} \Delta t C(u) \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} dz \phi_i^t + 2 \int_{\Gamma} N_i N_j dz \phi_i^t = 2 \int_{\Gamma} N_i N_j dz \phi_i^{t-\Delta t} \quad (11)$$

여기서, N 은 형상함수이다. 위의 식(11)을 행렬의 형태로 나타내면,

$$H^t \Phi^t = R^t \Phi^{t-\Delta t} \quad (12)$$

여기서,

$$H = \int_{\Gamma} \Delta t C(u) \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} dz + 2 \int_{\Gamma} N_i N_j dz$$

$$R = 2 \int_{\Gamma} N_i N_j dz$$

(식)12와 같은 비선형 유한요소 식은 일반적으로 직접해를 구할 수 없으므로 반복법을 이용하여 해석하게 된다. 가장 일반적인 비선형 유한요소 해법인 수정 Newton-Raphson 방법을 이용하여 해를 구하였다(Zienkiewicz 등, 1991).

2.4 비선형 압밀해석 유한요소 프로그램

비선형 압밀속도를 해석하기 위해 개발된 유한요소 프로그램의 흐름도는 Fig.3과 같다. 비선형 압밀해석 유한요소 프로그램은 지층에 대한 유한요소 구성자료, 지반의 물성치, 압축성 매개변수, 작용하중, 시간조건을 입력받게 된다. Gauss 2점 적분법을 이용하여 적분을 수행하고 유한요소 행렬과 비선형 해법을 위한 Jacobian 행렬을 계산한 뒤, 수정 Newton-Raphson 방법을 이용하여 각 시간 단계에서 수렴될 때까지 반복계산을 수행한다. 이상과 같은 과정을 원하는 시간까지 반복 수행하여 결과를 얻게 된다. 행렬식의 해법은 S.O.R

(successive over relaxation) 방법을 사용하였다. 각 지층의 깊이와 시간, 그리고 이에 해당되는 과잉간극수압 및 압밀도가 출력되게 된다.

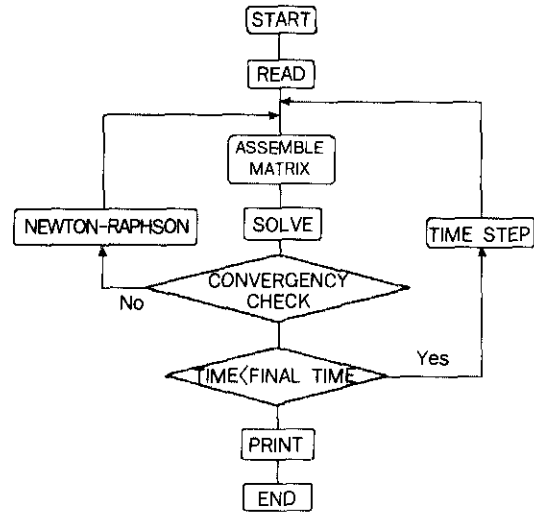


Fig.3 Flow Chart of Nonlinear Finite Element Consolidation Program

3. 모형의 적용

3.1 적용대상 및 해석조건

일차원 압밀의 적용을 위해 양산-물금지구를 선택하여 토질조사보고서를 바탕으로 4개 지점을 선택하여 압밀시험자료를 취하였으며 일면배수 조건을 적용하였다. 4개 지점에서 퇴적층의 중간부분에서 채취한 시료들의 물성치들을 Table 2.에 제시하였다. Table 2.에서 투수계수와 압밀계수의 값은 $16.4t/m^2$ 의 하중(10m 성토)이 작용하는 것으로 가정하였다. 해석 대상의 경계조건 및 초기조건을 그림으로 나타내면 Fig.4와 같다. 상부는 배수, 바닥은 비배수 경계조건을 가지고 있으며 압밀하중(q)이 일시에 작용하는 것으로 사고였다. 포화상태의 지층의 두께(H)에 걸쳐 초기 간극수압

은 직선적으로 분포한다고 가정하였다. 압밀하중으로 인한 초기 과잉간극수압은 전체 깊이에 걸쳐 동일하게 분포한다고 가정하였다. 초기간극비, 단위중량, 투수계수 등은 각 지층에 대해 일정하다고 가정하여 해석하였다. 따라서 유한요소 해석을 수행하는 과정에서 각 세부지층에서의 물성치는 깊이에 대해 일정한 값을 가지고 있다.

Table 2. Soil Properties of Samples in Yangsan-Mulgum Area

Sample ID.	B2-34	B2-26	B2-39	B2-41
H(m)	27.5	26.2	25.8	32.7
$\gamma_s(t/m^3)$	1.629	1.693	1.661	1.759
e_0	1.571	1.604	1.460	1.418
$P_c(t/m^2)$	10.5	12.0	7.0	14.4
OCR	0.90	0.90	0.55	1.00
C_c	0.72	0.68	0.57	0.53
$k(cm/s)$	2.935E-8	3.067E-8	6.602E-8	1.342E-8
$C_v(cm^2/s)$	2.935E-4	4.382E-4	6.057E-4	2.981E-3

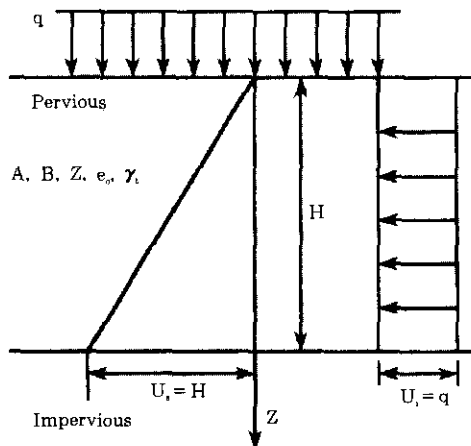


Fig. 4 Initial and Boundary Conditions of the Site Studied

3.2 비선형 압밀속도 모형의 적용결과

확장역함수모형을 이용한 비선형 압밀속도 모형(NCM)을 적용하여 90%의 압밀도를 얻는데 소요되는 시간과 함께 침하량을 계산하여 Terzaghi 이론 및 CONSOL 프로그램의 결과와 비교 분석하였다. 이때 압밀도는 과잉간극수압의 소산으로 정의된다. 침하량은 계산된 과잉간극수압으로부터 유효응력을 구하고 그때의 간극비를 계산하여 구하였다.

CONSOL 프로그램은 Wong과 Duncan 등 (1988)이 개발한 1차원 압밀해석 프로그램이다. Implicit 유한차분법을 이용한 CONSOL 프로그램은 선형적인 $e - \log \sigma$ 관계를 적용함으로써 비선형 압축성을 구현하고 있다. 압밀과정에서 변화하는 유효응력에 따른, 투수계수의 변화는 고려하지 않았다. 다만, 인접한 지층의 투수계수간의 상대적인 값을 계산하여 해석한다. 또한, 각 지층의 압밀계수는 유효응력이나 간극비의 변화에 대해 일정하다고 가정한다. CONSOL에서는 선형압밀하중보다 작은 하중과 그보다 큰 하중에 대해 팽창지수와 압축지수를 각각 달리 적용하여 침하량 및 압밀속도를 계산한다.

Fig.5에서는 CONSOL과 본 모형을 적용하여 계산한 침하량을 비교하고 있다. Fig.6에서는 압축지수가 침하량 결과에 미치는 영향을 보여주고 있다. B2-34L과 B2-34H는 작은 하중과 큰 하중을 주었을 때를 의미하고 있다. Fig.5와 Fig.6을 통해 압축지수가 상대적으로 작아질수록 본 모형에 의한 침하량과 CONSOL의 침하량의 차이가 커짐을 알 수 있다. 또한 하중의 크기가 커질수록 침하량의 차이가 작아짐을 또한 알 수 있다.

Fig.7에서 본 모형에 의한 압밀속도를 Terzaghi 이론의 압밀도 곡선과 비교하고 있다. 본 모형의 압밀곡선은 S형태를 띄지 않고 있는데, Mesri와 Rokhsar(1974)는 특수한 경우에 압밀곡선이 S형태를 띄지 않을 수 있다는 가능성을 밝힌 바 있다. Fig.8에서는 Terzaghi

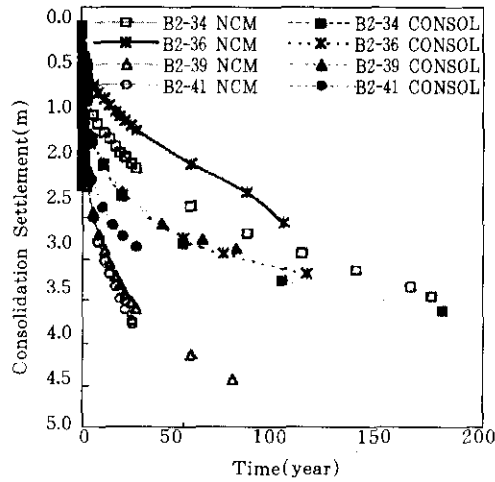


Fig.5 Settlements Calculated by Nonlinear Consolidation Model(NCM) and CONSOL

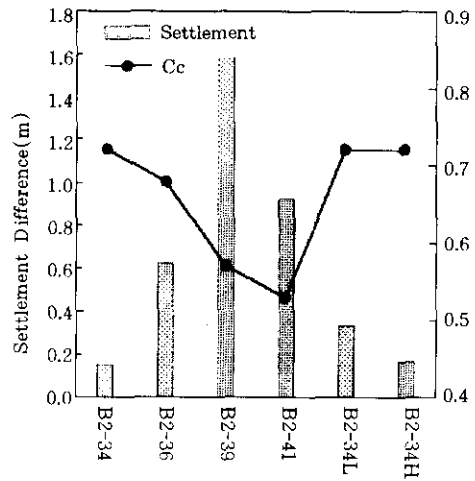


Fig.6 Effect of C_c on Settlement Prediction

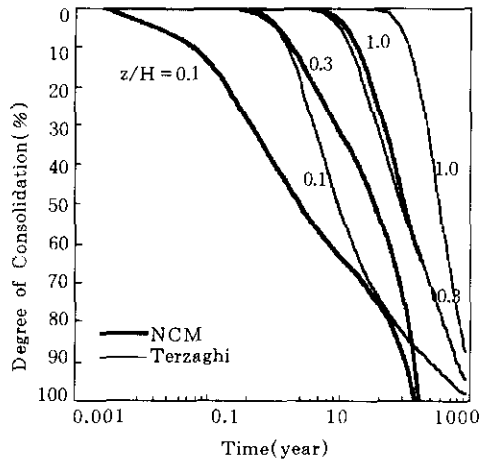


Fig.7 Comparisons of the Degree of Consolidation in NCM and Terzaghi at B2-34 Point

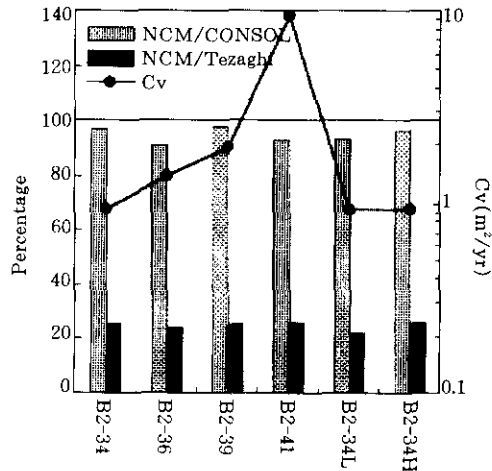


Fig.8 Effect of C_v on Rate of Consolidation

이론, CONSOL프로그램, 확장역함수를 적용한 본 모형의 압밀도를 서로 비교하였다. CONSOL의 결과와 본 모형의 압밀속도 결과는 거의 일치하고 있다. 또한 본 모형과 CONSOL 프로그램이 비선형 압축성을 고려하고 있기 때문에 흙의 압축성에 대해 비선형울

적용하게 되면 압밀계수 값의 대소와 하중의 크기에 상관없이 압밀속도가 크게 향상됨을 알 수 있다. 비선형 모형에 의한 압밀속도가 빨라지는 것은 초기에 과잉간극수압이 빨리 소산되기 때문이라고 할 수 있다(Mesri and Rokhsar, 1974). 이는 표준압밀시험 결과를 이

용하여 계산한 압밀계수의 값이 과압밀영역에서 정규압밀상태로 되면서 급격하게 감소한다는 사실로도 설명할 수 있다(Terzaghi 등, 1996).

Fig.9에서는 본 모형에 의해 계산된 $C(u)$ 의 시간에 따른 변화를 나타낸 것이다. 투수계수를 일정하다고 가정하였기 때문에 $C(u)$ 가 증가하는 것으로 사고되며, 실제로는 압밀과정에서 투수계수가 감소하므로 $C(u)$ 의 변화는 이와 달라질 것이다. 본 모형에 의한 압밀속도의 거동이 CONSOL, Terzaghi 이론과 어떻게 다르게 나타나는지를 살펴보기 위하여 Fig.10에서 평균압밀도 및 $z/H=0.1$ 인 지점에 대해 압밀속도를 비교하였다. 본 모형에 의한 평균압밀도는 CONSOL과 Terzaghi의 압밀도 곡선의 중간 형태를 띄고 있으며, 유효응력의 증가속도가 큰 지표 부근에서의 압밀도 곡선을 살펴보면, CONSOL과 Terzaghi의 압밀도 곡선은 유사한 거동을 보이고 있으나 본 모형의 곡선은 이들과 다소 차이를 보이고 있다.

3.3 압밀곡선의 특징

비선형 압축성이 본 모형에서 어떻게 구현되는지를 확인하기 위하여, 압축성의 변화가 현

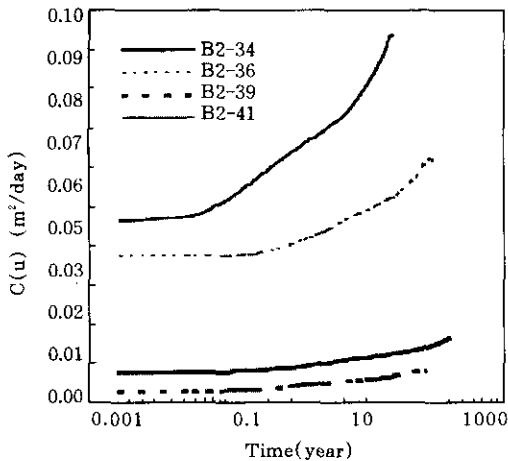
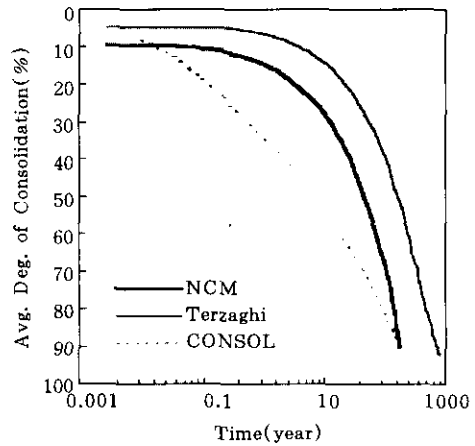
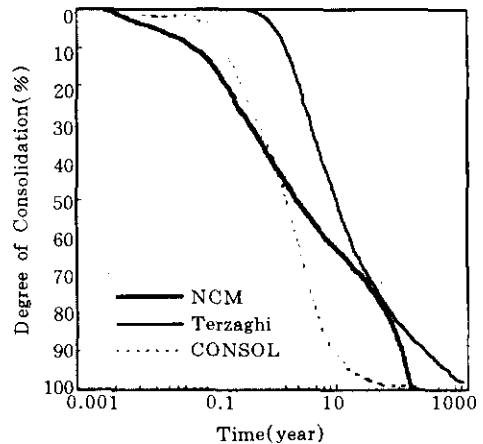


Fig.9 Variation of $C(u)$ with Time(log)

격한 배수경계 부근에서의 압밀도의 변화를 Fig.11에 나타내었다. Fig.11에서 압밀곡선은 서로 다른 포물선으로 구성되어 있으며 압밀곡선의 변곡점은 두 개의 포물선이 중첩되면서 발생됨을 알 수 있다. 이때 포물선의 교점은 지점의 유효응력이 선행압밀하중 부근에 다다를 때 발생하며 이 점을 통과하면서, 즉 지점의 유효응력이 선행압밀응력과 같거나 커지게



(a) Average Degree of Consolidation



(b) Degree of Consolidation at $z/H=0.1$

Fig.10 Comparison of the results in NCM, Terzaghi, and CONSOL at B2-34 Point

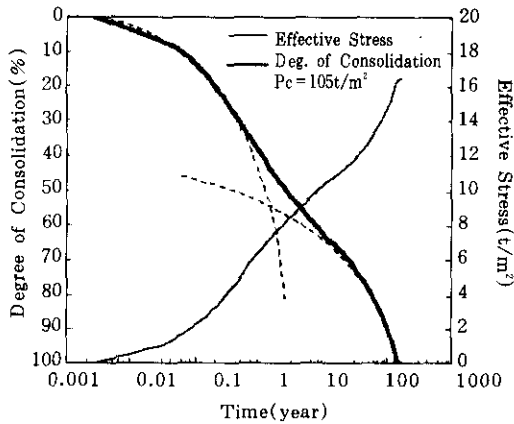


Fig.11 Degree of Consolidation and Effective Stress Near Drainage boundary at B2-34 Point

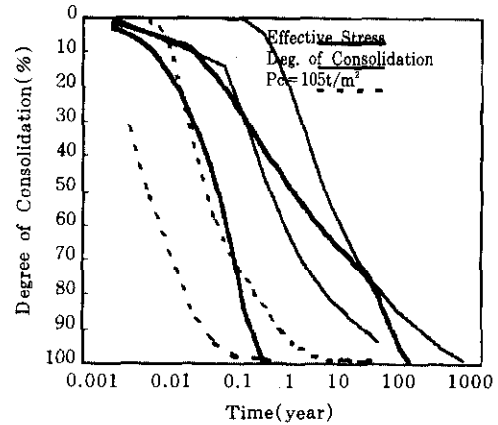


Fig.12 Effect of Magnitude of Consolidation Load on Consolidation Curves at $z/H=0.1$
($L:q=8.25t/m^2$, $H:q=24.75t/m^2$)

되면 압밀속도가 느려지는 것을 알 수 있다. 이를 통해 본 모형이 압축성의 변화를 구현하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 압밀곡선의 형태는 Mesri와 Rokhsar(1974)의 연구에서도 유사한 형태로 제시되어 있다.

하중의 크기에 따른 압밀곡선의 변화를 보기 위하여 선행압밀하중($P_c=10.5t/m^2$)보다 작은 하중($L:q=8.25t/m^2$)과 이보다 큰 하중($H:q=24.75t/m^2$)을 각각 작용시켜 Fig.12에 압밀곡선을 제시하였다. Fig.12를 통해 Terzaghi 이론과 CONSOL 프로그램은 작용하중의 크기에 상관없이 압밀곡선의 형태가 일정하지만 본 모형의 결과는 작용하중이 선행압밀하중보다 큰 경우 변곡점이 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 본 모형이 작용하중 크기의 영향을 고려할 수 있다는 것을 보여주고 있다.

4. 결 론

흙의 비선형 압축특성을 잘 구현할 수 있는 확장역함수모형을 흙의 압축성 모형으로 적용하여 비선형 압밀속도 모형을 개발하였고, 비선형 유한요소 프로그램을 개발하여 압밀해석

을 수행하였다. 양산-물금지구 4개 지점의 표준압밀시험 자료를 이용한 매개변수를 이용하여 본 모형을 적용하고 그 결과를 Terzaghi 일차원 압밀이론의 결과, CONSOL 프로그램의 결과와 서로 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 모형과 비선형 압밀해석 프로그램인 CONSOL과 결과를 비교한 결과, 본 모형의 압밀속도는 CONSOL과 잘 일치하며, 압축지수가 작은 경우에는 CONSOL과의 침하량 차이가 커짐을 알 수 있다.
2. 양산-물금지구 4개 지점에 대해 비선형 압밀모형인 CONSOL과 본 모형은 Terzaghi 압밀이론보다 매우 빠른 압밀속도를 보이고 있다.
3. 본 모형의 압밀곡선은 Terzaghi 압밀곡선과 CONSOL 압밀곡선의 중간형태를 띄고 있다. 간극비의 변화가 심한 배수경계 근처에서는 본 모형의 압밀곡선은, CONSOL, Terzaghi 압밀곡선과 차이를 보이고 있다.
4. 비선형 압밀속도 모형의 압밀곡선은 두 개의 포물선으로 이루어져 있으며, 이때

보여지는 변곡점은 지반의 유효응력이 선행압밀하중에 다다를 때 발생된다. 이것은 본 모형이 흙의 압축성의 변화를 구현할 수 있다는 것을 보여주고 있다.

5. CONSOL 프로그램과 Terzaghi 압밀이론에서는 하중 크기에 상관없이 압밀곡선의 거동이 동일한 양상을 보이고 있지만 본 모형의 압밀곡선은 선행압밀하중보다 큰 하중에서 변곡점이 발생된다. 이것은 본 모형이 하중크기의 영향을 구현할 수 있다는 것을 보여주고 있다.

참 고 문 헌

1. 원정윤(1998), 확장멱함수를 이용한 일차원 비선형 압밀속도 모형의 개발, 석사학위논문, 서울대학교
2. 한국토지공사(1996), 양산불금지구 택지개발사업 조성공사(2단계) 토질조사보고서, 서울
3. Davis, E. H., and Raymond, G. P.(1965), "A Nonlinear Theory of Consolidation," *Geotechnique*, Vol. 15, No.2, pp.161-173
4. Duncan, J. M.(1993), "Limitations of Conventional Analysis of Consolidation Settlement," *Journal of Geotechnical Engineering Div.*, Vol. 119, No.9, pp.1333-1359
5. Duncan, J. M., Smith, R. W., Brandon, T. L., and Wong, K. S.(1988), "CONSOL version 2.0: A Computer Program for 1-D Consolidation Analysis of Layered Soil Masses", *Geotechnical Engineering Report*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksberg, Va.
6. Gibson, R. E., England, G. L., Hussey, M. J. L.(1967), "The Theory of One-Dimensional Consolidation of Saturated Clays: I. Finite Nonlinear Consolidation of Thin Homogeneous Layers," *Geotechnique*, Vol. 17 pp.261-273
7. Hardin, B. O.(1989), "1-D Strain in Normally Consolidation Cohesive Soils," *Journal of Geotechnical Engineering Div.*, Vol. 115, No.5, pp.689-710.
8. Liu, J. C., and Znidarcic, D.(1991), "Modeling One-dimensional Compression Characteristics," *Journal of Geotechnical Engineering Div.*, Vol. 117, No.1, pp.162-169.
9. Mesri, G., and Rokhsar, A.(1974), "Theory of Consolidation for Clays," *Journal of Geotechnical Engineering Div.*, Vol. 100, No. GT8, pp.889-904
10. Mesri, G., and Tavenas, F.(1983), "Permeability and Consolidation of Normally Consolidated Soils," *Journal of Geotechnical Engineering Div.* Vol.109, No.6, pp.869-882.
11. Oikawa, H.(1987), "Compression Curve of Soft Soils," *Soils and Foundation*, JSSMFE., Vol.27, No.3, pp.99-104
12. Owen, D. R., and Hinton, E.(1980), *Finite Elements in Plasticity*, Pineridge Press Ltd.
13. Sridharan, A., Murthy, N. S., and Prakash, K.(1987), "Rectangular Hyperbola Method of Consolidation Analysis," *Geotechnique*, vol.37, No.3, pp.355-368
14. Tavenas, F., Leblond, P., Jean, P., and leroueil, S.(1983), "The Prediction of Permeability of Natural Soft Clays, Part I. Methods of Laboratory Determination," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 20, pp.629-944.
15. Terzaghi, K., Peck, R. B., and Mesri, G.(1996), *Soil Mechanics in Engineering Practice 3rd ed.*, John Wiley & Sons
16. Verruijt, A.(1995), *Computational Geomechanics*, Kluwer Academic P.
17. Zienkiewicz, O. C., and Taylor, R. L.(1991), *The Finite Element Method, 4th ed.*, McGraw-Hill

(접수일자 1998. 6. 15)