

# 有限變形率 壓密理論에 의한 軟弱 粘土의 一次元 壓密에 관한 數值 解析的 연구

俞 南 在 · 鄭 潤 和\* · 李 明 旭\*\*

## A Numerical Study on One-Dimensional Consolidation of Soft Clay with Finite Strain Consolidation Theory

Nam-Jae Yoo, Yoon-Hwa Jung, Myung-Woog Lee

---

### ABSTRACT

A numerical study was performed to investigate characteristics of one-dimensional consolidation of soft clay.

Results of consolidation tests with the remolded normally consolidation clay of having a very high initial void ratio were analyzed by using the numerical technique of finite difference method based on the finite strain consolidation theory, to evaluate consolidational characteristics of soft clay under surcharges on the top of clay. On the other hand, a numerical parametric study on soft clay consolidated due to its self-weight was also carried out to find its effect on one-dimensional consolidation.

Terzaghi's conventional consolidation theory, finite strain consolidation theories with linear and non-linear interpolation of effective stress - void ratio - permeability relation were used to analyze the test results and their results were compared to each other to figure out the difference between them. Therefore, the validity of theories was assessed.

---

### 1. 序 論

국내의 제한된 국토을 확장하기 위한 해안 매립, 오염된 호수저질의 수질개선을 위한 준

설·매립, 광재담에 퇴적된 광재의 침강 압밀 문제 등 연약지반에 설치하는 토류구조물과 그와 관련된 토질공학적 문제가 현재 관심의 대상이 되고 있다. 이러한 연약점토 지반을 취급함에 있어서 발생하는 압밀 문제중에서 압밀량, 시간에 따른 압밀도 등의 정확한 예측이 요구된다. 그러나, 선형적 유효응력-간

---

강원대학교 공과대학 토목공학과 조교수

\* 강원대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

\*\* 강원대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

극비 관계와 압밀층 압축계수 및 투수계수의 일정 등을 가정한 Terzaghi의 압밀이론의 사용은 연약점토의 기본가정과 현장조건의 불일치에 따라 해석결과의 타당성에 대하여 부정적으로 판단된다. 따라서 현장조건과 적합하게 시간 변화에 따른 간극비, 투수계수, 압축계수 등의 변화와 비선형적인 유효응력-간극비 관계를 고려한 압밀이론을 사용함으로써 연약점토 압밀특성의 정확한 예측이 요구된다.

Terzaghi가 완전 포화토의 일차 압밀이론을 제안한 이래로 연약점토의 압밀특성을 보다 정확하게 해석 예측하기 위한 많은 연구가 수행되어 왔으나, 그의 압밀이론은 압밀정수의 일정, 선형적 구성식, 미소변형률을 사용한 것으로서 큰 압밀량이 예상되는 연약점토층에서의 압밀특성을 해석하기에는 많은 제약이 있다. 따라서 비선형적 구성식, 압밀정수의 변화, 이류좌표(Convective coordinate) 개념에 의한 유한변형률, 3차원 압밀, 토립자 자중에 의한 압밀 등 현장조건과 일치시켜 보다 진전된 압밀이론이 개발되어 왔다. 제한된 재하면적, 두꺼운 압밀층, 다차원적 배수조건을 갖는 연약 점토층에 대하여 압밀의 2차원 또는 3차원 압밀이론<sup>1, 15)</sup>이 개발되었다. 압밀 진행에 따라 간극비의 감소에 의한 투수계수와 압축계수의 변화를 고려함과 동시에 간극비-유효응력-투수계수 관계의 비선형 구성식을 사용하여 보다 현실적인 해석법<sup>2, 5, 6, 13, 14)</sup>이 제안되었다. 한편, 초기 간극비가 큰 연약점토에서 과도한 압밀량의 발생에 따른 압밀층의 두께변화가 압밀특성에 미치는 영향을 고려하기 위하여 기존에 사용한 Eulerian 좌표와 다른 좌표 개념인 축소좌표를 사용한 유한변형률 압밀이론<sup>4, 11, 16)</sup>이 제안되었다.

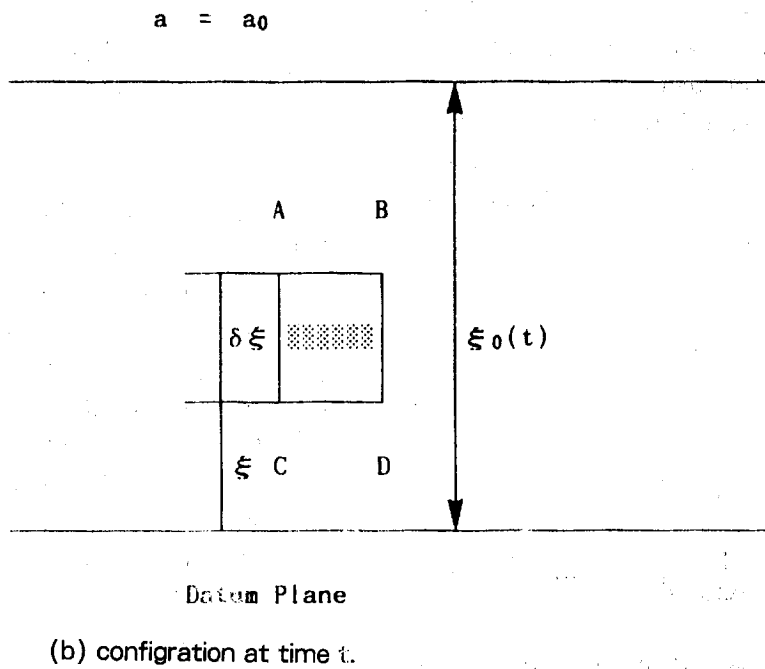
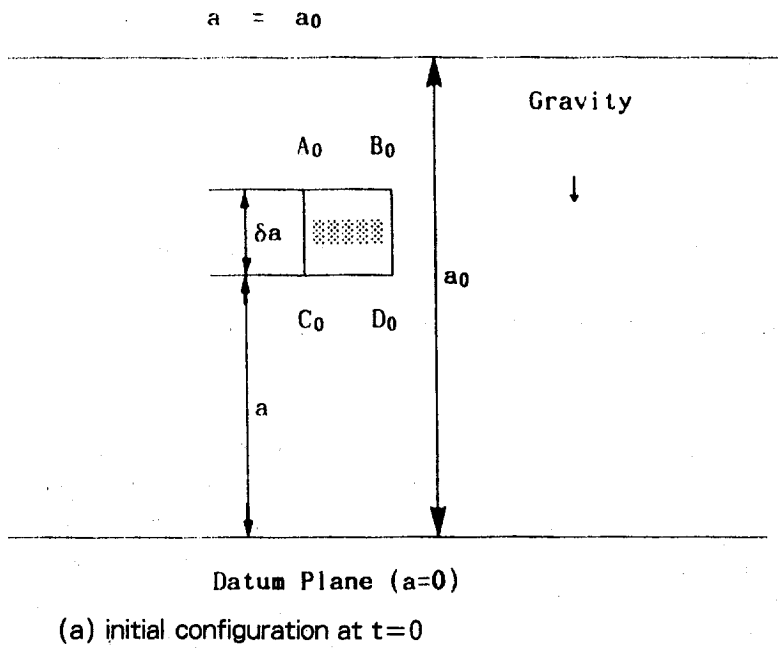
따라서 본 연구에서는 가장 일반적인 압밀 지배 방정식으로 알려진 Gibson, England and Hussey(1967)가 제안한 비선형 유한변형률 압밀이론을 사용하여 상재하중 및 토립자 자중하의 연약점토의 일차압밀 특성에 관한 수치해석적 연구를 실시하였다. 상재하중

하의 연약점토의 압밀특성을 해석하기 위하여 초기 간극비가 큰 정규압밀 점토에 대한 실내 압밀 실험결과를 수치해석 결과와 비교하였고, 토립자 자중에 의한 압밀 특성에 대하여 가정한 현장조건<sup>17)</sup>을 수치해석을 실시하여 압밀특성을 결정하는 요인에 대한 매개변수적 연구를 실시하였다. 특히, 압밀이 진행되는 동안에 배수거리의 감소, 간극비-유효응력-투수계수 사이의 구성관계에 대한 선형 또는 비선형적 해석이 압밀도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Terzaghi, 선형 및 비선형 유한변형률 압밀이론에 의한 해석결과를 상호 비교함으로써 각 이론의 차이점에 대하여 토의를 실시하였다.

## 2. 有限變形率 一次 壓密 支配方程式의 特性

압밀층의 초기 두께에 비하여 압밀층의 변화량이 미소하여 압밀층 두께가 시간의 변화에 대하여 일정하다고 가정한 미소변형률 압밀이론에서 사용하는 Eulerian 좌표는 변형률이 큰 점토층에서는 시간의 변화에 따른 임의의 토립자 위치를 추적할 수 없는 한계성을 지니고 있기 때문에 움직이는 임의의 토립자에 기준점을 두어 상대적인 변위를 알 수 있는 Lagrangian 좌표의 사용이 요구된다. 따라서 유한변형률 압밀이론에서는 Eulerian 좌표의 일반적인 경우인 시간의 변화에 따른 좌표의 변화를 고려한 Convective 좌표를 사용하는 한편, Lagrangian 좌표와의 변환 관계를 이용함으로써 시간 변화에 따른 압밀층 두께의 변화 및 임의점에서의 간극비 또는 과잉 간극 수압의 크기를 정확히 추적할 수 있었다.

그림 1.1은 압밀층의 한요소에서 압밀진행에 따른 위치변화를 다른 좌표들을 사용하여 표시한 것이다. 압밀 초기에는 요소의 위치 및 크기를 Lagrangian(a) 좌표(그림 1.1(a))를 사용하고, 임의시간 경과 후 요소의 위치 및 크기를 Eulerian(x) 좌표의 일종인 Convective( $\zeta$ ) 좌표(그림 1.1(b))를 사용하



**Fig. 1.1** Lagrangian and convective coordinates

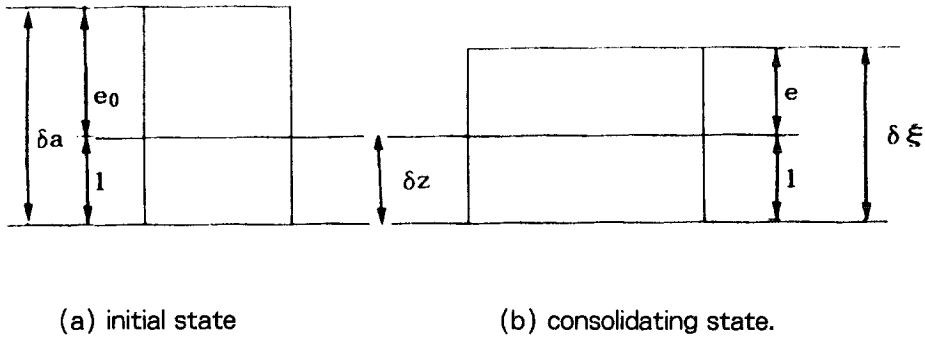


Fig. 1.2 Change in void ratio during consolidation

였다. 특히, 그림 1.1(b)에서 나타난 바와 같이 압밀결과에 따라 Convective( $\zeta$ ) 좌표의 사용은 요소의 위치 및 크기의 변화가 있음을 알 수 있으나, Lagrangian(a) 좌표상에서는 초기상태와 비교할 때 변화가 없음을 알 수 있다.

그림 1.2은 같은 방법으로 공극의 변화를 Lagrangian(a) 좌표와 Convective( $\zeta$ ) 좌표를 사용하는 한편 Reduced(z) 좌표<sup>7, 9)</sup>의 사용은 압밀중 토립자의 체적 변화가 없음을 나타낸 것으로써, 이러한 체적변화의 변환관계를 식으로 표현하면 식(2.1), (2.2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial a} = \frac{1 + e(a, t)}{1 + e_0(a, 0)} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial z} = 1 + e(z, t) \dots\dots\dots (2.2)$$

따라서, 축소좌표는 다음과 같다.

$$\frac{\partial z}{\partial a} = \frac{1}{1 + e_0(a, 0)} \dots\dots\dots (2.3)$$

한편, Gibson, England and Hussey (1967)는 간극의 완전 포화, 유효응력 법칙과 Darcy의 법칙유효, 토립자와 간극수의 비

압축성등의 기본 가정하에 간극수와 토립자로 구성된 혼합체의 힘의 평형, 토립자와 간극수의 시간변화에 대한 질량보존을 고려한 연속 정리, 간극비와 유효응력의 구성식, 간극비와 투수계수의 구성식을 이용하여 다음의 비선형 유한변형을 압밀 지배방정식을 유도하였다.

$$\left[ \frac{\gamma_s - 1}{\gamma_w} \right] \frac{d}{de} \left[ \frac{k(e)}{e+1} \right] \frac{\partial(e)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{k(e)}{\gamma_w(1+e)} \frac{d\sigma'}{de} \frac{\partial e}{\partial z} \right] + \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots (2.4)$$

여기서,  $\gamma_s$ 는 흙의 단위중량,  $\gamma_w$ 는 물의 단위중량,  $e$ 는 간극비,  $k$ 는 투수계수,  $\sigma'$ 는 유효응력,  $z$ 는 Reduced(z) 좌표,  $t$ 는 시간이다.

상기의 지배 방정식의 특징은 간극비-유효응력 및 간극비-투수계수의 관계에 대하여 특정의 제한조건 없이 유효응력과 투수계수의 변화를 간극비의 함수로 표시함으로써 임의의 비선형 구성관계(Nonlinear Constitutive Relation)라도 적용 가능하고, 축소좌표로 구성식을 표시함으로써 이류(Convective) 좌표로 변환시킴이 변형율의 크기에 제한을 받지 않는 비선형 유한변형을 압밀 지배방정식의 형태를 지니고 있다. 한편, 과잉간극수압을 변수로 표시한 지배방정식은 토립자의 자중에 의한 압밀효과를 외적규정으로 표시해

한 식이다. 수치해석에서는 불연속적인 자료 점(Data point)을 연속으로 나타내기 위하여 비선형적인 3차 스플라인 보간법(Cubic spline interpolation)<sup>16)</sup>을 사용하였다. 매개 변수로 단순화시킨 식(3.1)의 압밀 방정식을 이용하여 주어진 경계치 문제(Boundary value problem)의 해를 구하기 위하여 그림 2에 나타난 바와 같이 양해 유한 차분법(Explicit finite difference scheme)을 사용하였다. 압밀 지배방정식의 해를 만족시키면서 주어진 시간에 대한 간극비의 값이에 따른 분포를 구하기 위하여 공간계에서는 중앙 차분법을 시간계에서는 전향 차분법을 사용하여 각계의 일차 및 이차 편도함수를 다음과 같이 표시할 수 있다.

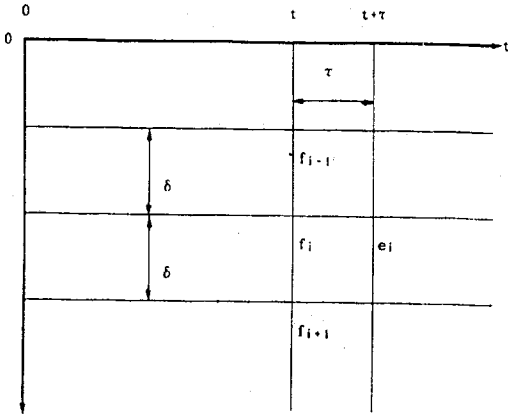


Fig. 2 Explicit finite difference scheme.

축소좌표로 표시된 점토층의 두께,  $\ell$  을 등 간격,  $\delta$  로 나누고 일정한 시간 간격,  $\tau$  로 구성된 격자를 형성하였다. 한편, 식(3.1)을 차분매개함수를 사용하여 다음의 양해 유한 차분식으로 표시하여 주어진 시간과 공간에서의 간극비를 구할 수 있다.

$$\frac{\partial e}{\partial z}(z_i, t) \equiv \frac{\partial f_i}{\partial z} = \frac{1}{2\delta} [f_{i+1} - f_{i-1}]$$

$$\frac{\partial^2 e}{\partial z^2}(z_i, t) \equiv \frac{\partial^2 f_i}{\partial z^2} = \frac{1}{2\delta^2} [f_{i+1} - 2f_i + f_{i-1}]$$

$$\frac{\partial e}{\partial t}(z_i, t) = \frac{1}{\tau} [e_i - f_i]$$

상기와 같이 시간에 대한 전향차분의 일차 도함수와 공간에 대한 중심차분의 1, 2차 편도함수를  $A_i$ ,  $B_i$  및  $C_i$ 의 함수로 치환하여 식(3.1)에 대입함으로써 다음과 같은 양해 유한 차분식을 구하였다.

$$e_i = f_i - \tau(A_i + B_i + C_i) \dots\dots\dots (3.2)$$

$$\text{여기서 } A_i = \gamma * \phi_1'(f_i) \frac{\partial f_i}{\partial z}$$

$$B_i = \frac{\phi_2(f_i)}{\gamma_w} \frac{\partial^2 f_i}{\partial z^2}$$

$$C_i = \frac{\phi_2'(f_i)}{\gamma_w} \left[ \frac{\partial^2 f_i}{\partial z^2} \right]$$

한편, 경계조건에 대해서는 배수조건과 비배수조건으로 구별하여 각 조건을 간극비의 함수로 표시하였다.

상부층( $z=0$ )에서 배수되는 경우 압밀 직전( $t=0$ )때 경계면에 작용하는 연직 유효응력,  $q_0'$ 와 압밀도중 가해지는 상재하중,  $\Delta q(t)$ 의 합에 대응하는 간극비를 간극비-유효응력 구성식에서 구하는 경계조건식을 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$e(0, t) = e(\sigma'(0, t)) = e(q_0' + \Delta q(t))$$

압밀층 하부( $z=\ell$ )가 배수상태인 경우,  $q_0'$ , 시간 변화에 대한 점중하중의 증분,  $\Delta q(t)$ , 그리고 흙의 자중을 합한 유효응력,  $(\gamma_s - \gamma_w)\ell$ 의 합에 대응하는 간극비를 다음식과 같이 표시할 수 있다.

$$e(1, t) = \bar{e}(\sigma'(1, t))$$

$$= \bar{e}(q_0' + \Delta q(t) + (\gamma_s - \gamma_w)\ell)$$

하부 경계( $z=\ell$ )면에서 비배수인 경우에는 비배수 경계조건에 대한 일반식을 유한 차분의 형태로 다음과 같이 표시할 수 있다.

여기서  $f_{n+1}$ 은 경계면( $i=n$ )에서의 간극비,  $e_n$ 을 구하기 위한 가상점( $i=n+1$ )에서의 간극비이다.

야 되는 불편함이 있는 반면, 상기의 지배 방정식은 간극비의 향으로 표시함으로써 토립자의 자중에 의한 압밀효과가 자동적으로 고려되었다. 상기식은 상재하중에 의한 압밀효과를 나타낸 첫번째항(Conduction Term)과 자중에 의한 압밀효과를 나타낸 두번째항(Convective Term)으로 구성되어 있으며, 시료의 두께가 적은 실내 압밀실험이나 현장조건에서 상재하중의 크기가 점토층의 자중의 크기보다 상당히 클 경우에는 첫번째항을 무시할 수 있다. 또한 축소 좌표(Reduced Coordinate)를 사용함으로써 이동하는 경계조건 문제(Moving Boundary Value Problem)에서 수치해석을 보다 간단히 할 수 있는 편리함이 있다. Pane<sup>10)</sup>은 상기의 지배 방정식이 다른 압밀이론에 의하여 유도된 지배 방정식보다 가장 일반적인 식임을 유도 증명했다.

상기의 식을 다른 압밀 지배 방정식과 비교해 보면, Terzaghi의 압밀방정식은 미소변형률 조건, 압밀중 투수계수의 일정, 압축계수, 시간에 따른 유효연직응력, 깊이에 따른 일정한 간극비 등을 가정한 선형 미소변형률 이론으로써, 극히 제한된 조건에서만 사용이 가능한 식이다. Davis and Raymond(1965)에 의해 제한된 압밀 지배 방정식은 미소 변형률 조건, 깊이에 따른 일정한 초기 간극비, 비선형적 유효응력-간극비 관계의 경험식, 일정한 압밀계수 등을 가정한 미소변형률 압밀이론으로써 상기의 지배방정식의 특별한 경우로 간주될 수 있다.

한편, Schiffman and Gibson(1964)이 유도한 압밀식은 가장 일반적인 미소 변형률 압밀 지배 방정식으로 상기의 지배 방정식과 비교할 때 Eulerian 좌표를 사용한 것 이외에는 차이가 없는 식이다. Richart(1957)의 유한 변형률 압밀이론에서는 투수계수의 일정, 얇은 점토층, 시간변화에 대하여 일정한 크기의 상재하중 등 제한조건을 이루었으며, Raymond(1969)의 유한 변형률 지배 방정식은 간극비-유효응력-투수계수 관계의 경험식을 도입

한 이외에는 Richart(1957)의 지배 방정식과 일치한다. 같은 맥락에서 Gibson, Schiffman and Cargill(1981)에 의해 유도된 유한변형률 압밀 지배방정식은 압밀함수  $g(e)$ 의 일정 및 간극비-유효응력의 지수함수의 가정을 둔 식으로 알려졌다. 한편, Mikasa(1963)의 유한변형률 압밀이론에 의한 지배 방정식은 초기 간극비가 깊이에 따라 일정하다는 가정을 한 상기 지배 방정식의 특별한 경우로 간주할 수 있다. 결과적으로 상기의 압밀 지배 방정식은 타 이론에 비하여 가장 일반적으로 표시한 것으로써 타 이론식은 상기식의 특별한 경우이다.

### 3. 有限 次分法을 利用한 有限變形率 壓密 方程式의 數值解析

식(2.4)의 압밀 지배방정식에서 간극비, 유효응력 및 투수계수 사이의 관계를 표시하는 구성식을 다음의 매개변수로 치환하여 단순화 시킴으로써 식(3.1)과 같은 매개변수 압밀방정식으로 표시할 수 있다.

$$\phi_1(e) = \frac{k(e)}{e+1} \dots \dots \dots (3.1a)$$

$$\phi_2(e) = \frac{k(e)}{e+1} \left[ \frac{d\sigma'}{de} \right] \dots \dots \dots (3.1b)$$

$$\phi_1'(e) = \frac{d}{de} \left[ \frac{k(e)}{e+1} \right] \dots \dots \dots (3.1c)$$

$$\phi_2'(e) = \frac{d}{de} \frac{k(e)}{e+1} \left[ \frac{d\sigma'}{de} \right] \dots \dots \dots (3.1d)$$

$$\gamma^* = \left[ \frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right]$$

$$\frac{\phi_2(e)}{\gamma_w} \frac{\partial^2(e)}{\partial z^2} + \frac{\phi_2(e)}{\gamma_w} \left[ \frac{\partial(e)}{\partial z} \right] + \gamma^* \phi_1'(e) \left[ \frac{\partial(e)}{\partial z} \right] + \frac{\partial(e)}{\partial t} = 0 \dots \dots (3.1)$$

매개변수  $\phi_1, \phi_2, \phi_1', \phi_2'$ 는 실내압밀실험을 통하여 구한 간극비-유효응력 및 간극비-투수계수 관계의 일차 및 이차 도함수로 표시

$$f_{n+1} = f_{n-1} + 2\delta(\gamma_s - \gamma_w) \left[ \frac{de}{d\sigma'} \right]_n$$

한편, 초기조건은 제한조건이 없이 압밀층 깊이에 따른 임의 형태의 간극비의 분포를 사용할 수 있다.

#### 4. 實驗結果分析

연약점토의 압밀특성을 알아보기 위해서 현장에서 채취한 교란시료에 대한 압밀실험결과를 전술의 유한변형률 압밀이론에 의한 수치해석 프로그램을 사용하여 분석을 실시하는 한편, Terzaghi의 압밀이론에 의한 해석결과와 비교 검토함으로써 두 이론에 의한 결과의 차이에 대하여 토의를 하였다. 한편, 연약점토에서 자중에 의한 압밀효과를 알아보기 위하여 현장상태의 제원을 가정하여 두 이론을 사용하여 해석을 실시하고 해석결과의 차이점에 관하여 논하였다.

##### 4-1. 壓密實驗 結果分析

연약점토에 상재하중을 가했을때 그의 압밀특성을 알아보기 위하여 교란된 시료를 현장에서 채취하여 실내 표준압밀실험을 실시하였다.

시료는 속초시에 위치한 청초호 저면에서 채취한 것으로 실트가 함유된 연약 해성토로 그의 기본적 물성은 Table 1에 보여준다.

Table 1. Basic Soil Properties

Gs	LL(%)	PL(%)	Sl(%)	Soil Classification (USCS)
2.54	68.9	39.1	5.18	CL

표준압밀실험은 시료를 액성한계의 3배 정도의 함수비 상태에서 2~3일 동안 충분히 침수시킨뒤 한국 공업규격(KS F 2316) 토질시험방법에 준하여 압밀 실험을 실시했다.

그림 3은 압밀실험결과 얻은 간극비-유효응력 관계를 나타냈다.

이러한 결과는 초기 간극비가 큰 정규압밀 점토의 일반적인 압밀특성으로써 재하전 초기 간극비에 대응하는 함수비는 197%로 액성한계의 3배에 해당하며 1.6kg/cm<sup>2</sup>의 상재하중 단계전까지는 심한 비선형적 관계를 나타낸다. 상재하중이 6.4kg/cm<sup>2</sup>에서 12.8kg/cm<sup>2</sup>에서 12.8kg/cm<sup>2</sup>로 증가하는 단계에서의 압축지수, C<sub>c</sub>는 0.465로써 교란시료에 따라 압축지수의 경험식 C<sub>c</sub>=0.007(LL-10)=0.007(68.9-10)=0.412과 비교하여 근사값을 가짐을 알 수 있다.

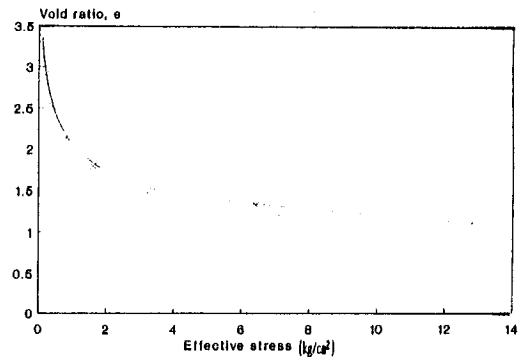


Fig. 3 Void ratio-effective stress relationship.

그림 4는 간극비-투수계수 관계를 나타내며, 이는 각 하중단계에서의 시간에 따른 간극비 변화량에서 Root-t법을 사용하여 압밀계수 C<sub>v</sub>를 구하고, 압밀계수와 투수계수의 관계식을 사용하여 각 간극비에 대응하는 투수계수를 구하였다.

간극비의 변화에 대한 대수축으로 표시한 투수계수 값은 변화가 거의 직선적으로 나타남을 알 수 있다.

간극비-유효응력, 간극비-투수계수가 비선형적으로 작용하는 연약점토의 압밀특성을 정확히 해석하기 위해서는 비선형관계식(Non-linearity)으로 압밀중 압밀층의 변화에 의한 변형률영향(Strain effect)을 고려한

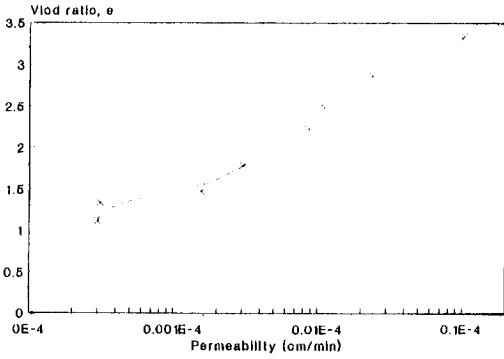


Fig. 4 Void ratio-permeability relationship.

유한변형을 압밀이론이 요구되어 진다.

따라서 본 연구에서는 압밀에 따른 압밀층의 두께를 고려하지 않은 고전의 Terzaghi 압밀이론, 간극비-유효응력-투수계수 관계의 선형적 해석과 변형을 영향을 고려한 유한변형을 압밀이론(Linear finite strain consolidation theory), 그리고 간극비-유효응력-투수계수 관계의 비선형적 관계와 변형을 영향을 고려한 비선형 유한변형을 압밀이론(Non-linear finite strain consolidation theory)을 이용한 각 해석결과의 차이에 대해서 연구를 실시하였다.

초기 간극비의 크기에 따라 압밀량 및 비선형도(Degree of non-linearity)가 크게 변함으로 여기서는 3개의 다른 하중단계(연직하중  $0.2\text{kg/cm}^2 \rightarrow 0.4\text{kg/cm}^2$ ,  $0.8\text{kg/cm}^2 \rightarrow 1.6\text{kg/cm}^2$ ,  $3.2\text{kg/cm}^2 \rightarrow 6.4\text{kg/cm}^2$ )에 대하여 해석을 실시하였다.

그림 5, 6, 7은 각각 하중증가량 0.2, 0.8,  $3.2\text{kg/cm}^2$ 인 경우에 대하여 시간에 따른 압밀도의 변화를 Terzaghi 압밀이론, 선형 유한변형을 압밀이론, 비선형 유한변형을 압밀이론을 사용하여 실험 결과와 비교한 결과를 그림 5, 6, 7에 각각 나타내었다.

비선형 유한 압밀이론에서는 각 하중단계의 간극비-연직응력과 간극비-투수계수의 비선형관계를 3차 방정식인 Spline 해석법을 사용하여 해석을 실시하였고, 선형 유한변형

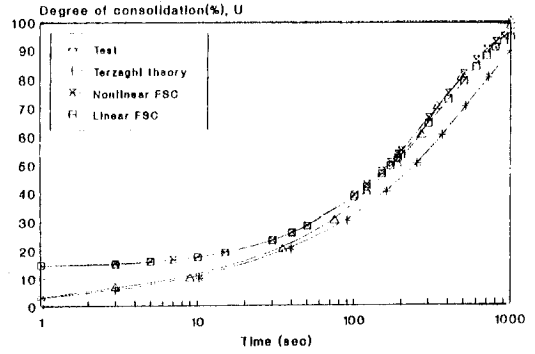


Fig. 5 Degree of consolidation-time relationship,  $0.4\text{kg/cm}^2$

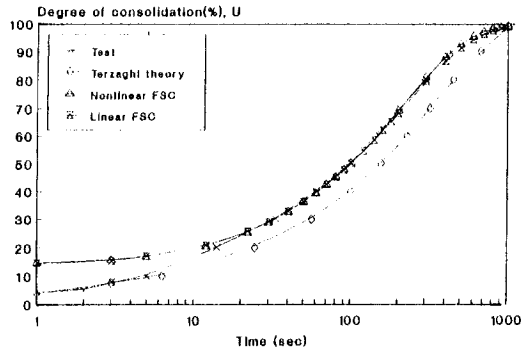


Fig. 6 Degree of consolidation-time relationship,  $1.6\text{kg/cm}^2$

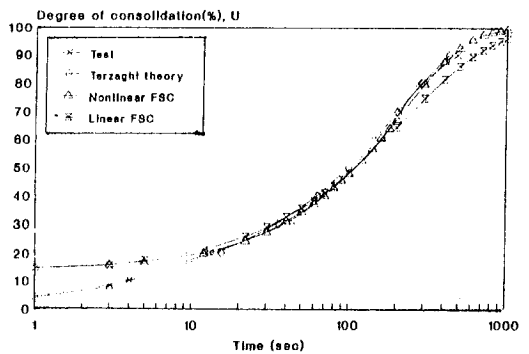


Fig. 7 Degree of consolidation-time relationship,  $6.4\text{kg/cm}^2$



를 압밀이론 및 Terzaghi의 압밀 이론에서는 각 하중단계에서 간극비의 초기치와 최종치를 연결함으로써 선형적으로 해석을 하였다. 선형적으로 해석하는 경우의 각 하중단계에 대한 압밀계수는 표 2에 보인바와 같다.

**Table 2. Consolidation Coefficients for Different Loading Steps**

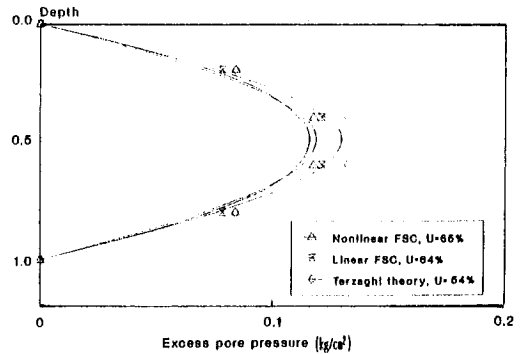
Coefficient of Consolidation	Loading Steps		
	0.2→0.4 kg/cm <sup>2</sup>	0.8→1.6 kg/cm <sup>2</sup>	3.2→6.4 kg/cm <sup>2</sup>
Initial Void Ratio, e <sub>0</sub>	2.901	2.126	1.469
Final Void Ratio, e <sub>f</sub>	2.514	1.785	1.329
Coefficient of Compressibility a <sub>v</sub>	1.935 cm <sup>2</sup> /kg	0.426 cm <sup>2</sup> /kg	0.0438 cm <sup>2</sup> /kg
Compression Index C <sub>c</sub>	1.285	1.133	0.465
Coefficient of Consolidation C <sub>v</sub>	0.01991 cm/min	0.0207 cm/min	0.0170 cm/min
$\frac{\Delta e}{\Delta \log \cdot k}$	31.57 day/cm	6.81 day/cm	55.39 day/cm

그림 5에서 보인바와 같이 선형적 또는 비선형적 유한변형을 압밀이론에 의한 해석결과는 실험 결과치와 대체적으로 일치하며, Terzaghi의 이론에 의한 해석결과는 실험결과 보다 압밀시간이 지연되는 경향이 압밀도가 증가할수록 심화됨을 알 수 있다. 이와 같은 압밀도 차이는 압밀특성의 선형적 또는 비선형적 해석의 차이, 그리고 변형률의 영향 고려등에 기인하는 것으로 판단된다.

유한변형을 압밀이론에 의한 선형해석과 비선형 해석의 차이가 없음은 주어진 하중단계에서 간극비의 변화가 심하지 않아서 간극비-유효응력 또는 간극비-투수계수 관계를

선형적으로 해석하거나 또는, 비선형적으로 해석하여도 차이가 없음을 알 수 있다. 한편, Terzaghi의 압밀이론을 다른 압밀이론 및 실험치와 비교하여 볼때, 압밀도가 증가할수록 그 차이를 보이는 것은 압밀이 진행되면서 시료두께의 감소에 의한 배수거리의 감소가 압밀도에 미치는 영향을 고려하지 않았기 때문이다. 압밀 진행중 배수거리의 감소를 고려하지 않고 일정한 시료의 두께로 가정한 미소변형을 압밀이론인 Terzaghi의 이론은 실험결과보다 지연된 압밀도를 보여 준다. 하중크기가 중간정도인 그림 6의 결과는 그림 5의 결과와 비슷한 경향을 보이며 하중의 크기가 크고 초기 간극비가 상대적으로 적은 그림 7의 연직하중 6.4kg/cm<sup>2</sup> 경우에는 그 차이가 감소됨을 알았다. 이는 마지막 하중단계에서의 재하전 시료의 두께가 적기 때문에 배수거리 감소에 따른 압밀도에 미치는 영향이 적기 때문이다.

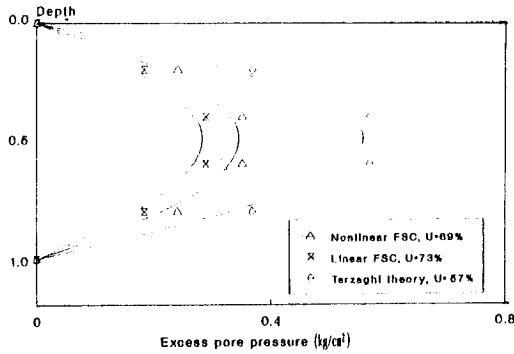
그림 8은 0.4kg/cm<sup>2</sup>의 연직하중상태에서 압밀경과시간 300sec일때 깊이에 대한 과잉 간극수압분포를 나타낸 것으로서, 깊이는 주어진 경과시간에서 임의 깊이를 시료두께로 나누어 무차원으로 표시한 것이다.



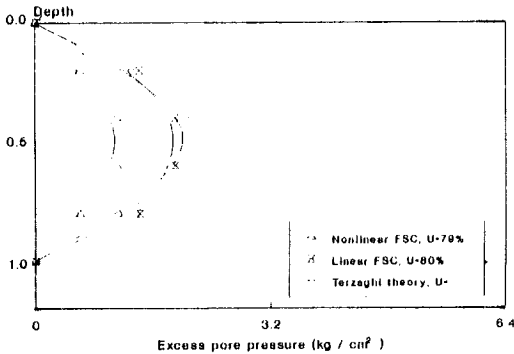
**Fig. 8 Depth-excess pore pressure, after 300sec, 0.4kg/cm<sup>2</sup>**

Terzaghi에 의한 압밀이론(U=55%), 비선형 유한 압밀이론(U=65.87%), 유한 선형 압밀이론(U=63.93%)을 사용하여 해석하였

으며 해석결과는 전술의 시간변화를 나타낸 결과와 일관성있게 주어진 압밀시간에 대하여 압밀도가 클수록 큰 과잉간극수압 분포를 나타냄을 알 수 있다. 이와 유사하게 해석결과가 하중증가량 1.6kg/cm<sup>2</sup>과 6.4kg/cm<sup>2</sup>에 대하여 그림 9, 10에 나타냈다.



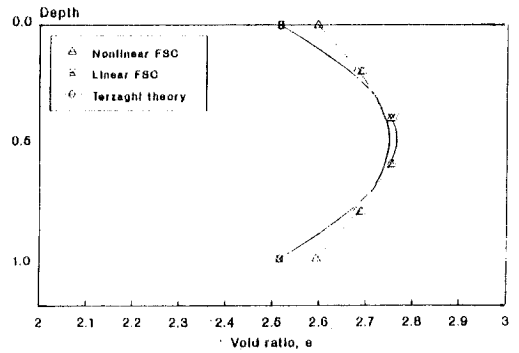
**Fig. 9** Depth-excess pore pressure, after 300sec, 1.6kg/cm<sup>2</sup>



**Fig. 10** Depth-excess pore pressure, after 300sec, 6.4kg/cm<sup>2</sup>

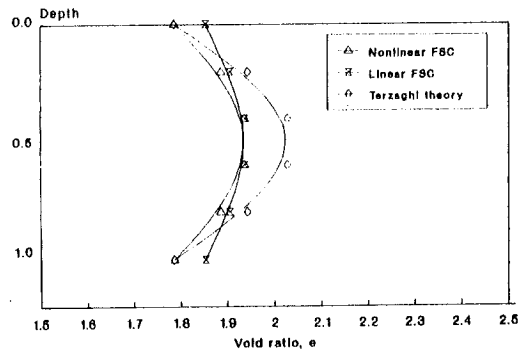
그림 11은 300sec일때 선형 유한변형률 이론, 비선형 유한변형률 이론, Terzaghi에 의한 깊이-간극비 변화를 분석하여 나타냈다.

0.4kg/cm<sup>2</sup>의 하중증가량에서 압밀경과시간 300sec일때 Terzaghi의 압밀이론, 선형 유한변형률 압밀이론, 비선형 유한변형률 압밀이론 등의 깊이에 따른 과잉간극수압의 차이가 작기 때문에 깊이에 대한 간극비는 세가지 모두 일치하는데, 이것은 간극비의 변화량이 크

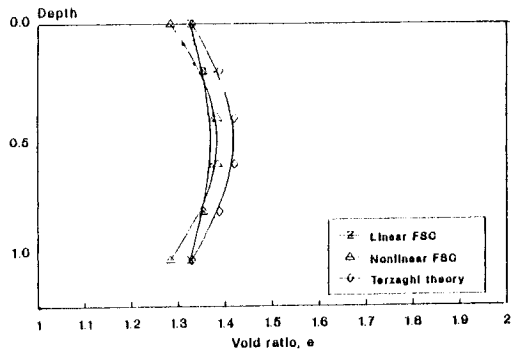


**Fig. 11** Depth-void pore ratio after 300sec, 0.4kg/cm<sup>2</sup>

지 않은 범위에서 해석을 실시했기 때문이다. 이와 유사하게 해석결과가 하중증가량 1.6kg/cm<sup>2</sup>과 6.4kg/cm<sup>2</sup>에 대하여 그림 12, 13에 나타냈다.



**Fig. 12** Depth-void pore ratio after 300sec, 1.6kg/cm<sup>2</sup>



**Fig. 13** Depth-void pore ratio after 300sec, 6.4kg/cm<sup>2</sup>

이상과 같이 시간-압밀도, 시간-과잉간극수압, 깊이-간극비를 실험, Terzaghi의 압밀이론, 선형적, 비선형적 유한변형을 압밀이론 등을 이용하여 비교한 결과 각 이론간에 조금씩 차이를 나타냈다. 이는 압밀층 변형률의 영향과 압밀층 배수거리를 고려하느냐 안하느냐의 차이라고 할 수 있다.

#### 4-2. 自重에 의한 壓密分析

해안 또는 호소의 저면을 준설하여 매립을 실시하는 경우나, 광산에서 부산물로 발생하는 광미를 퇴적시키는 경우, 높은 함수비의 점토를 급속 침강시킴에 따라 깊이에 따른 균등한 초기 간극비를 갖는 연약점토층이 토립자 자중에 의하여 압밀이 진행된다. 이와 같이 연약지반에서 자중에 의한 압밀특성을 해석하기 위하여 전술에서 사용한 세가지 해석방법을 이용하여 그 결과를 비교 검토하였다.

해석을 위한 압밀층의 제원 및 토질계수는 최근 발표된 큰 압밀 침하량의 예측에 관한 수치해석적 연구에 관한 논문<sup>17)</sup>에서 사용한 값들을 사용하였다. 압밀층의 제원은 그림 14에 나타난 바와 같이 점토층의 높이는 31.5ft, 점토의 상부는 수면아래 3.3ft, 비중  $G_s=2.82$ , 수중단위중량  $7.19\text{pcf}$ , 초기 간극비가 14.8로 깊이에 따라 균질하게 분포되었다고 가정했다.

경계조건은 상면 배수, 하면 비배수의 일면 배수에 따른 일축압밀상황이고, 간극비-유효응력, 간극비-투수계수 관계는 다음과 같이 가정했다.

$$e = A(\sigma)^{-B(\text{psf})} \Rightarrow e = 15.07(\sigma)^{0.22}$$

$$k = C(e)^{d(\text{ft/day})} \Rightarrow k = (0.8304 \text{ E-}06)^{4.65}$$

윗 식에서 구한 간극비-유효응력과 간극비-투수계수 관계를 그림 15와 16에 각각 표시하였다.

Terzaghi의 압밀이론과 유한압밀계수를 구하기 위하여 그림 15에서 나타난 간극비-유

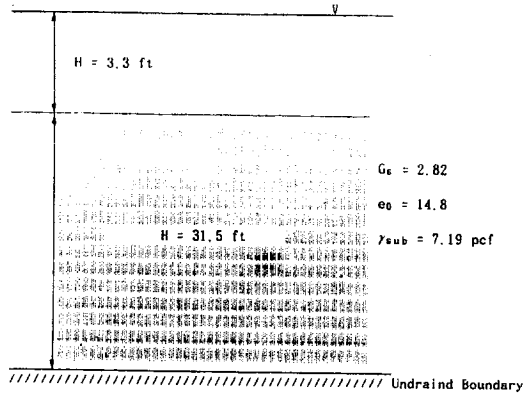


Fig. 14 Thick, homogeneous clay Layer.

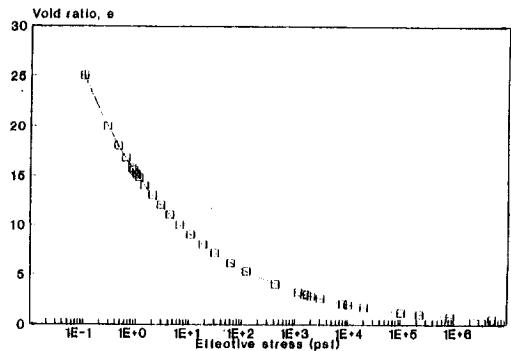


Fig. 15 Void ratio-effective stress relationship.

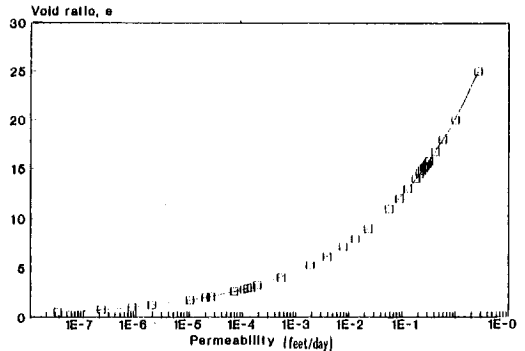


Fig. 16 Void ratio-permeability relationship.

효율력 관계에서 초기 간극비  $e_0=14.8$ 에 대응하는 유효응력관계에서  $\sigma_v' = 1.09 \text{ lb/ft}^2$ 과, 비선형유한 변형을 압밀이론을 이용하여 100% 압밀되었을 때 깊이에 따른 최종 간극비분

포를 구하고 그의 평균치  $e_f=5.987$ 에 대응하는 유효응력  $\sigma_v'=90 \text{ lb/ft}^2$ 인 점을 선형적으로 연결함으로써 압축계수를 다음과 같이 구하였다.

$$\begin{aligned} \text{압축계수 } a_v &= \frac{\Delta e}{\Delta p} = \frac{(14.8 - 5.987)}{(90 - 1.09)} \\ &= 0.099122 \text{ ft}^2/\text{lb} \end{aligned}$$

한편, 선형적 해석을 위한 평균 투수계수  $k_{ave}$ 는 초기 간극비  $e_o=14.8$ 과 최종 간극비의 평균치  $e_f=5.987$ 의 평균치  $e_{ave}=(e_o+e_f)/2=(14.8+5.987)/2=10.39$ 에 대응하는 평균 투수계수  $k_{ave}=0.11605 \text{ ft/day}$ 를 그림 16의 간극비-투수계수 관계에서 구하였다. Table 3은 선형적 해석을 위하여 사용한 압밀계수들의 값을 보여준다.

**Table 3. Soil Parameters**

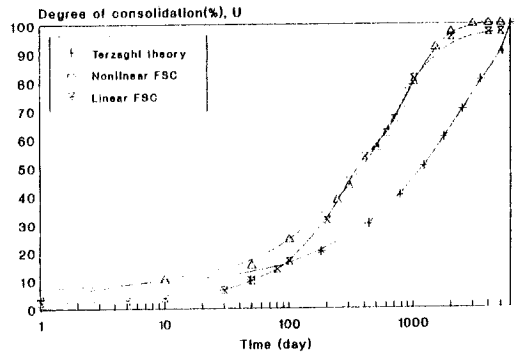
Initial Void Ratio, $e_o$	Buoyant Unit Weight, $\gamma'$ (pcf)	Coefficient of Compressibility, (ft <sup>2</sup> /lb)	Coefficient of Consolidation, (ft <sup>2</sup> /day)
14.8	7.19	0.0991	0.2137

여기서,

$$\begin{aligned} \text{압밀계수 } C_v &= \frac{k_{ave} \cdot (1 + e_{ave})}{a_v \cdot \gamma_w} \\ &= \frac{0.11605(1 + 10.3935)}{(0.099122 \cdot 62.4)} \\ &= 0.2137 \text{ ft}^2/\text{day} \end{aligned}$$

그림 17은 Terzaghi의 압밀이론, 선형 유한변형률 이론, 그리고 비선형 유한변형률 이론 등을 사용하여 시간에 따른 평균압밀도의 변화를 비교하여 나타낸 것이다.

선형 또는 비선형 유한변형률 압밀이론에 의한 해석결과를 검토하여 볼때 전반적으로



**Fig. 17** Degree of consolidation-time relationship.

비슷한 결과를 보이나 압밀초기상태 ( $0 < U < 40$ )와 말기상태 ( $90 < U < 100$ )에서는 비선형적 해석이 선형적 해석보다 압밀이 빨리 진행되는데 이것은 두가지 측면에서 고려해 볼 수 있다. 첫째로 비선형 유한압밀에서는 초기 및 최종 간극비에 대응하는 두 유효응력점을 잇는 곡선상에서 변곡점을 중심으로 기울기를 보면 큰 간극비에서 기울기가 크고, 간극비가 작은 쪽에서 작다. 이는 선형 유한압밀 이론의 압축계수에 영향을 주는 요소로서 초기 및 최종 간극비 부분에 커다란 영향을 주었지만, 비선형 유한변형률 이론에서는 압밀계수  $g(e)$ 의 함수가 비선형적인 해석을 했기 때문에 압밀계수  $C_v$ 와  $g(e)$ 의 차이가 압밀도에 영향을 미쳤다고 생각할 수 있다.

둘째, 선형 유한이론에서는 간극비-투수계수 관계에서 초기 및 최종 투수계수의 평균을 구하여 평균투수계수를 구하였지만, 역시 투수곡선에서 선형적인 평균투수계수가 비선형 유한변형률 이론보다 적게 산출되고, 압밀계수  $C_v$ 가 적어서, 상기 두 부분에서 선형 유한변형률 이론이 비선형 유한변형률 이론보다 압밀도가 적음을 알 수 있었다. 압밀 증기 상태 ( $40 < U < 80$ )에서는 서로 일치하여 보이는데, 변곡점 부분에서는 압축계수의 일치로서 압밀도에 영향을 미쳤다고 생각할 수 있다. 한편 전술의 표준압밀 결과와 해석한 것과 마

참가지로 Terzaghi의 압밀이론에 의한 해석 결과가 선형, 비선형 유한변형률 압밀이론과 비교하여 주어진 압밀도에 대하여 시간이 지연됨을 알 수 있다. 이러한 차이는 압밀 진행 중 압밀층의 두께감소를 고려한 변형률이 압밀에 미치는 영향을 고려하지 않은 결과로 판단된다.

그림 18은 365일 일때의 깊이-과잉간극수압을 나타낸 것이다.

Terzaghi의 압밀이론(압밀도  $U=35.2\%$ ), 선형 유한변형률 이론( $U=51.69\%$ ), 비선형 유한변형률 이론( $U=52.82\%$ )을 사용하여 해석하였으며 해석결과는 전술의 시간변화를 나타낸 상재하중에 의한 압밀결과와 일관성있게 주어진 압밀시간에 대하여 압밀도가 클수록 큰 과잉 간극수압분포를 나타냄을 알 수 있다.

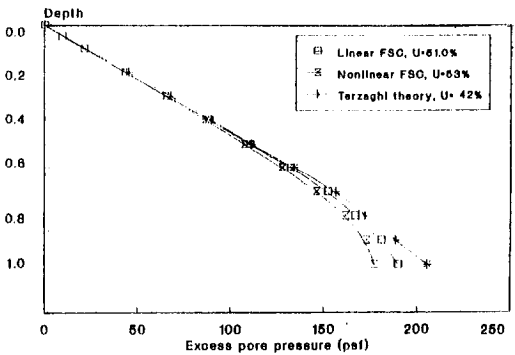


Fig. 18 Depth-excess pore pressure, after 365day.

## 5. 結 論

상재하중 또는 토립자의 자중에 의한 연약점토의 압밀특성을 연구하기 위하여 Terzaghi의 미소변형률 이론, 선형적 또는 비선형적 유한변형률 이론을 사용하여 실험 결과 및 가정된 현장조건을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 상재 하중하의 연약점토의 압밀 특성을

알아 보기 위하여 실내 실험을 Terzaghi의 압밀이론과 유한변형률 압밀이론을 사용하여 해석한 결과 두 이론 모두 실험 결과와 근접한 결과를 얻었으나, 하중의 크기가 증가할수록 더욱 결과가 일치함은 하중의 증가에 따른 초기 시료두께 감소에 기인하여 압밀층 배수거리 감소가 압밀도에 미치는 영향이 감소하기 때문이다.

한편, Terzaghi의 미소변형률 압밀이론에 의한 압밀도가 유한변형률 압밀이론에 의한 것 보다 지연된 압밀도를 나타냄은 압밀층 배수거리 감소효과가 고려되었기 때문이다.

2. 토립자의 자중에 의한 압밀에 관하여 Terzaghi의 압밀이론에 의한 압밀도의 예측은 유한변형률 압밀이론에 의한 예측치보다 매우 지연된 압밀시간을 나타냄은 비교적 두꺼운 초기압밀층의 두께에 기인한 것이다. 유한변형률 압밀이론의 선형적, 비선형적 해석 결과의 차이는 간극비-유효응력-투수계수 구성식의 선형적 가정에 기인하나, 그의 영향은 배수거리 감소가 압밀도에 미치는 영향에 비하여 비교적 적은 편이다.

3. 위의 결과로 Terzaghi의 미소변형률 압밀이론의 사용은 유한변형률 압밀이론에 비하여 지연된 압밀시간을 예측함으로써 안전측의 설계이나 비경제적인 방법이다.

## 6. 參 考 文 獻

1. Biot, M. A., (1941), "General Theory of Three-Dimensional Consolidation", Journal of Applied Physics, 12, pp. 155~164.
2. Davis, E. H. and Raymond, G. P., (1965), "A Non-Linear Theory of Consolidation", Geotechnique, 15, pp. 161~173.
3. Gibson, R. E., England, G. L. and

- Hussuey, M. J. L.,(1967), "The Theory of One-Dimensional Consolidation of Saturated Clay, I. Finite Non-Linear Consolidation of Thin Homogeneous Layers", *Geotechnique*, 17, pp. 261~273.
4. Gibson, R. L., Schiffman, R. L. and Cargill, K. W.,(1981), "The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays, I. Finite non-linear consolidation of thick homogeneous layers", *CAN. Geotech.*, pp. 282~283.
  5. Junbu, N.,(1965), "Consolidation of clay Layers Based on Non-Linear Stress-Strain", *Proc. 6th. Int. Conf. Soil Mech.*, 2, pp. 83~137.
  6. Lo, K. Y.,(1960), "Measurement of the Coefficient of Consolidation of Lacustrine clay", *Geotechnique*, 10, pp. 36~39.
  7. McNabb, A.,(1960), "A Mathematical Treatment of One-Dimensional Soil Consolidation", *Quarterly of Applied Mathematics*, 17, pp. 337~347.
  8. Mikasa, M.,(1963), "The Consolidation of Soft Clay-A new Consolidation Theory and its Application", *Japanese Society of Civil Engineers(Reprint from Civil Engineering in Japan, 1966)*, pp. 21~26.
  9. Ortenblad, A.,(1930), "Mathematical Theory of the Process of Consolidation of Mud Deposits", *Journal of Mathematics and Physics*, 9, No. 2, pp. 73~149.
  10. Pane, V.,(1981), "One-Dimensional Finite Strain Consolidation", M. S. Thesis, Department of Engineering, University of Colorado, Boulder, Colorado.
  11. Pane, V. and Schiffman, R. L.,(1981). "A Comparison between Two Theories of Finite Strain Consolidation", *Soils and Foundations.*, 22, No. 4, pp. 81~84.
  12. Raymond, G. P.,(1969), "Consolidation of Deep Deposits of Homogeneous Clay", *Geotechnique*, 19, pp. 478~494.
  13. Richart, F. E.,(1957), "A Review of The Theories for Sand Drains", *Proc. ASCE.*, SM3, No. 1301.
  14. Schiffman, R. L. and Gibson, R. E., (1964), "Consolidation of Nonhomogeneous Clay Layers, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*", ASCE, 90, No. SM5, Proceedings Paper 4043, pp.1~30.
  15. Schiffman, R. L., Chen, A. T-F. and Jordan, J. C.,(1969), "An Analysis of Consolidation Theories, *Journal of The Soil Mechanics and Foundations Division*", ASCE, 95, No, SM1, Proceedings Paper 6370, pp. 285~312.
  16. Schiffman, R. L. and Cargill, k. W., (1981), "Finite Strain Consolidation of Sedimentation Clay Deposits", *Tenth International Conference on Soils Mechanics and Foundation Engineering.*, pp. 239~242.
  17. Townsend, F. C. and Mcvay, M. C., (1990), "Large strain consolidation", *ASCE*, Vol 116, No 2, pp. 222~243.
  18. 박재연, 수치해석, 정익사, . 220~229.