

유한 변형률 압밀이론에 의한 연약점토의 자중압밀 침하산정

Estimation of Consolidation Settlement of Soft Clay
due to Selfweight by the Finite Strain Consolidation Theory

유 남 재*¹
Yoo, Nam - Jae
이 명 옥*²
Lee, Myung - Wog
이 종 호*³
Lee, Jong - Ho

Abstract

A numerical study was performed to investigate characteristics of One-dimensional consolidation of soft clay with high void ratios. The numerical technique of explicit finite difference method, based on the governing equation of finite strain consolidation theory, was used to estimate consolidation settlement due to selfweight of clay solids.

Results of centrifuge model tests and standard consolidation tests were analyzed by using the finite strain consolidation and the Terzaghi's infinitesimal consolidation theories. Analyzed results between two theories were compared and their differences were discussed. Infinitesimal theory showed more delayed degrees of consolidation than test results while the finite strain consolidation theory was in good agreements with test result. It was caused by that the finite strain consolidation theory considered decrease of drainage path during consolidation as well as non-linearity of void ratio-effective stress-permeability relations.

요 지

초기간극비가 큰 연약점토의 일차원 압밀특성을 조사하기 위하여 수치해석 연구를 실시하였다. 유한변형률 압밀 지배방정식을 바탕으로 양해차분의 수치해석기법을 사용하여 점토 토립자의 자중에 의한 압밀침하량의 산정을 실시하였다.

*¹ 정회원, 강원대학교 공과대학 토목공학과 부교수

*² 정회원, 강원대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*³ 정회원, 강원대학교 대학원 토목공학과 박사과정

원심모형실험과 표준압밀실험 결과를 유한 변형률 압밀이론과 Terzaghi의 미소변형률 압밀이론을 사용하여 해석하고 결과의 차이를 비교 분석하였다. 미소변형률 압밀이론은 실험결과보다 지연된 압밀도를 보여주었다. 유한변형률 압밀이론은 실험결과와 일치하였으며 이는 압밀중 배수거리 감소와 비선형적 간극비-유효응력-투수계수의 구성관계가 고려되었기 때문으로 판단된다.

1. 서 론

최근 산업발달의 가속화로 인해 가용국토의 확장을 위하여 새로운 단지조성의 필요성, 인공섬 개발에 의한 신도시 계획, 영종도 신공항 개발등 서, 남해안 지역의 해안매립사업, 주변 환경 보존을 위한 준설사업, 광산에서 폐재의 투기를 위한 광재댐의 설치등 큰 압밀침하량이 예상되는 초기간극비가 비교적 큰 연약지반의 압밀에 관한 문제가 최근에 지대한 관심의 대상이 되고 있다.

그러나, 일반적으로 쓰여지고 있는 Terzaghi의 압밀이론식은 흙의 압밀현상을 이론적으로 표현하기 위하여 여러가지 가정을 포함하고 있으며 그중 i) 간극비와 유효응력의 선형적 관계, ii) 압밀이 진행되는 동안 일정한 투수계수, iii) 미소변형(infinitesimal strain)이라는 세가지 가정이 중심이 되고 있다. 이러한 가정하에 유도된 Terzaghi의 압밀이론식으로 커다란 침하량을 보이는 연약지반의 압밀거동을 해석하는 것은 현장조건과 기본가정의 불일치로 인해 적절하지 않다고 판단된다. 따라서, 커다란 압밀침하량이 예상되는 연약점토의 일차원 압밀거동을 해석하는데 유효응력-간극비-투수계수의 구성관계의 비선형 거동과 압밀에 따른 변형률의 영향이 고려된 유한변형 압밀이론의 사용이 요구된다.

본 연구에서는 이와같이 시간변화에 따른 간극비, 투수계수, 압축계수등의 변화와 비선형적인 유효응력-간극비-투수계수를 고려하므로써 현장조건이 충분히 반영된 유한변형률 압밀이론⁽⁴⁾에 의한 지배방정식을 사용하여 유한차분의 수치해석을 실시하였다. 한편, 연약

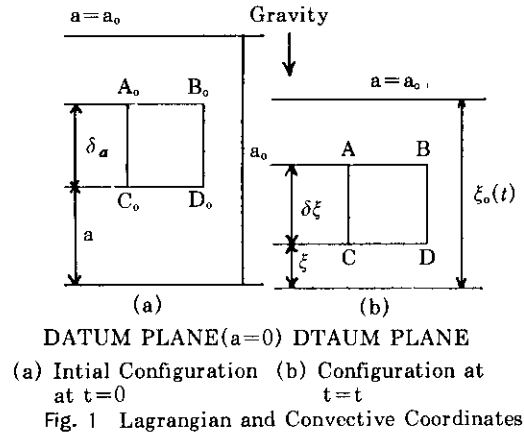
점토의 자중압밀 특성을 조사하기 위하여 기 실시된 원심모형실험결과⁽¹⁵⁾를 유한변형률 압밀이론에 의한 수치해석과 Terzaghi의 고전압밀이론을 사용하여 해석을 실시하고 그 결과를 비교검토 하였다. 한편, 실내에서 재성형한 점토시료를 사용하여 표준압밀실험을 실시하고 실험결과를 두 방법을 사용하여 해석을 실시하고 결과의 차이점에 대하여 토론을 실시하였다.

2. 좌표변환

압밀층의 초기 두께에 비하여 압밀층의 변화량이 미소하여 압밀층 두께가 시간의 변화에 대하여 일정하다고 가정한 미소변형률 압밀이론에서 사용하는 Eulerian좌표는 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 Eulerian좌표의 일반적인 경우인 시간의 변화에 따른 좌표의 변화를 고려한 Convective좌표를 사용하는 한편, Lagrangian좌표와의 변환관계를 이용함으로써, 시간변화에 따른 압밀층 두께변화 및 임의점에서의 간극비 또는 과잉간극수압의 크기를 정확히 추적할 수 있다^(4, 5, 10, 13).

Fig.1은 압밀층의 한 요소에서 압밀진행에 따른 위치변화를 다른좌표들을 사용하여 표시한 것이다. Fig.1(a)에 보인바와 같이 압밀 초기에는 요소의 위치 및 크기를 Lagrangian(a) 좌표를 사용하고, Fig.1(b)에 나타낸 바와 같이

임의시간 경과후 요소의 위치 및 크기를 Eulerian(x)좌표의 일종인 Convective(ξ)좌표를 사용하였다.



특히, Fig.1(b)에서 나타난 바와같이 압밀결과에 따라 Convective(ξ) 좌표의 사용은 요소의 위치 및 크기의 변화가 있음을 알 수 있으나, Lagrangian(a) 좌표상에서는 초기상태와 비교할 때 변화가 없음을 알 수 있다.

Fig.2는 같은 방법으로 공극의 변화를 Lagrangian(a)좌표와 Convective(ξ)좌표를 사용하는 한편, 압밀토층의 임의의 위치를 토립자의 체적으로 변환시켜 표현한 Reduce(z)좌표(5, 10)를 사용하였다. 이러한 Lagrangian좌표와 Convective좌표 Convective좌표와 Reduce좌표, Lagrangian좌표와 Reduce좌표의 체적변화의 변환관계를 다음의 각 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \xi}{\partial a} = \frac{1 + e(a, t)}{1 + e(a, 0)} \quad (1)$$

여기서, $e(a, t)$ 는 Convective좌표에서 임의의 시간 t 일때의 간극비, $e(a, 0)$ 는 Lagrangian좌표에서 초기($t=0$)일때의 간극비.

$$\frac{\partial \xi}{\partial z} = 1 + e(z, t) \quad (2)$$

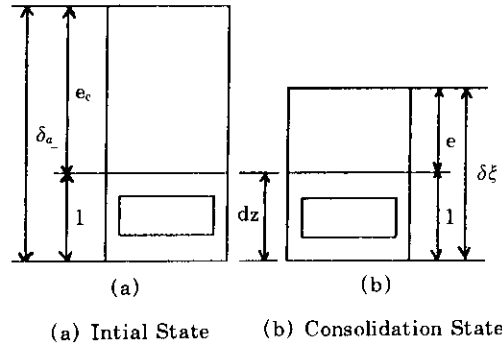


Fig. 2 Change in Void Ratio During Consolidation

여기서, $e(z, t)$ 는 Reduce좌표에서 임의시간 t 일때의 간극비.

$$\frac{\partial z}{\partial a} = \frac{1}{1 + e_0(a, 0)} \quad (3)$$

3. 유한변형률 압밀지배방정식의 특성

연약점토의 일차원 압밀에 관한 이론식은 Terzaghi가 압밀지배방정식을 제안한 이래로 보다 개선된 압밀지배방정식이 소개되었다. Richart(1957)는 얇은 점토층에 관한 일차원 압밀해석을 위하여 유효응력-간극비 관계를 비선형 함수를 사용한 미소변형률에 근거한 압밀지배방정식, Raymond(1969)는 Richart(1957)의 지배방정식을 개선하여 간극비-유효응력-투수계수 관계의 경험식을 고려한 유한변형률 압밀지배방정식, Mikasa(1963)는 초기 간극비가 점토층의 깊이에 따라 일정하다는 제한조건하에 일반적인 유한변형률 압밀지배방정식, Schiffman and Gibson(1964)은 제한조건이 없는 비선형 구성관계를 고려한 일반적인 미소변형률 압밀지배방정식, Davis and Raymond(1965)는 비선형적 유효응력-간극비 관계의 경험식을 사용한 미소변형률 압밀식, Gibson, Schiffman and Cargill(1981)은 일정한 압밀함수 및 간극비-유효응력간의 지

수함수를 사용한 압밀 지배 방정식을 사용하였다.

특히, Gibson, England and Hussey(1967)는 간극의 완전 포화, 유효응력 법칙과 Darcy 법칙의 유효, 토립자와 간극수의 비압축성등의 기본 가정하에 간극수와 토립자로 구성된 혼합체의 힘의 평형, 토립자와 간극수의 시간변화에 대한 질량보존을 고려한 연속정리, 간극비-유효응력-투수계수간의 구성식을 이용하여 다음의 비선형 유한 변형률 압밀 지배방정식을 유도하였다.

$$\left[\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right] \frac{d}{de} \left[\frac{k(e)}{e+1} \right] \frac{\partial(e)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k(e)}{\gamma_w(1+e)} \frac{d\sigma'}{d(e)} \frac{\partial e}{\partial z} \right] = \frac{\partial e}{\partial t} \quad (4)$$

여기서, γ_s 는 흙의 단위중량, γ_w 는 물의 단위중량, e 는 간극비, k 는 투수계수, σ' 은 유효응력, z 는 Reduce좌표, t 는 시간이다.

상기의 지배 방정식의 특징은 간극비-유효응력 및 간극비-투수계수의 관계에 대하여 특정의 제한조건 없이 유효응력과 투수계수의 변화를 간극비의 함수로 표시하므로써 임의의 비선형 구성관계에 대하여도 적용 가능한 비선형 압밀이론으로, Reduce좌표로 구성식을 표시함으로써 Convective좌표로 변환이 가능할 뿐 아니라 점토층의 압밀에 의한 변형률의 크기에 제한을 받지 않는 유한 변형률 압밀 지배방정식의 형태를 지니고 있다. 한편, 과잉간극수압을 변수로 표시한 지배방정식은 토립자의 자중에 의한 압밀효과를 외적규정으로 표시해야 되는 불편함이 있는 반면, 상기의 지배방정식은 간극비의 향으로 표시함으로써 토립자의 자중에 의한 압밀효과가 자동적으로 고려되었다. 상기식은 자중에 의한 압밀효과를 나타낸 첫번째항(convective term)과 상재하중에 의한 압밀효과를 나타낸 두번째항(conduction term)으로 구성되어 있으며, 시료의 두께가 적은 실내 압밀실험이나 현장조건에서 상재하중의 크

기가 점토층의 자중의 크기보다 상당히 클경우에는 두번째항을 무시할 수 있다. 또한 Reduce좌표를 사용함으로써 이동하는 경계조건 문제에서 수치해석을 보다 간단히 할 수 있는 편리함이 있다.

상기의 압밀지배방정식에서 간극비, 유효응력 및 투수계수 사이의 관계를 표시하는 구성식을 다음의 매개변수 식을 사용하여 단순화시킴으로써 다음과 같은 매개변수 압밀방정식⁽¹⁰⁾으로 표시할 수 있다.

$$\frac{\phi_2(e)}{\gamma_w} \frac{\partial^2(e)}{\partial z^2} + \frac{\phi_1'(e)}{\gamma_w} \left(\frac{\partial e}{\partial z} \right)^2 + \gamma^* \phi_1'(e) \left(\frac{\partial e}{\partial z} \right) + \frac{\partial(e)}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

여기서,

$$\phi_1(e) = \frac{k(e)}{e+1}, \quad (6a)$$

$$\phi_2(e) = \frac{k(e)}{e+1} \frac{d\sigma'}{de}, \quad (6b)$$

$$\phi_1'(e) = \frac{d}{de} \left[\frac{k(e)}{e+1} \right], \quad (6c)$$

$$\phi_2'(e) = \frac{d}{de} \left[\frac{k(e)}{e+1} \frac{d\sigma'}{de} \right], \quad (6d)$$

$$\gamma^* = - \left[\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right] \quad (6e)$$

매개변수 식 ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_1' , ϕ_2' 는 실험을 통하여 구한 간극비-유효응력과 간극비-투수계수 관계의 일차 및 이차 도함수로 표시한 식이다.

4. 유한변형률 압밀식의 차분화

매개변수로 단순화시킨 압밀지배방정식을 이용하여 주어진 경계조건 및 초기조건에 대한 해를 구하기 위하여 양해 유한 차분의 수치해석기법을 사용하였다. Fig.3에 나타낸 바와같이 공간계에 대하여는 Reduce좌표로 표시된 점토층 두께, l 을 등간격, δ 로 나누고 시간계에서는 일정한 시간 간격, τ 로 구성된 격자를

형성하였다.

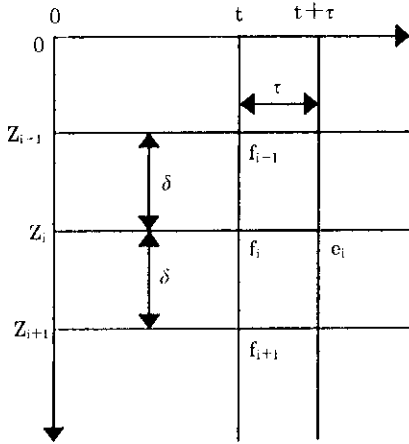


Fig. 3 Explicit Finite Difference Scheme

깊이, z 에 관해서 간극비의 일차 및 이차 편도함수와 시간, t 에 관해서 간극비의 일차편도함수의 계산이 필요하다. 따라서, 압밀 점토층 내의 임의의 위치, Z_i 임의의 시간, t 일때의 간극비를 다음과 같이 함수로 표시할 수 있다.

$$f_i = e(z_i, t) \quad (7)$$

압밀지배방정식의 해를 만족시키면서 주어진 시간에 대한 간극비의 깊이에 따른 분포를 구하기 위하여 공간계에서는 중앙차분법을, 시간계에서는 전향차분법을 사용하여 간극비의 공간에 대한 일차 편도함수와 간극비의 시간에 대한 일차 편도함수를 각각 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{\partial e}{\partial z}(z_i, t) = \frac{\partial f_i}{\partial z} = \frac{1}{2\delta} [f_{i-1} - f_{i+1}] \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 e}{\partial z^2}(z_i, t) = \frac{\partial^2 f_i}{\partial z^2} = \frac{1}{\delta^2} [f_{i-1} - 2f_i + f_{i+1}] \quad (9)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t}(z_i, t) = \frac{1}{\tau} [e_i - f_i] \quad (10)$$

상기와 같이 시간에 대한 전향차분의 1차도

함수와 공간에 대한 중심차분의 일, 이차 편도함수를 대개함수로 치환하여 식5의 압밀지배방정식에 대입함으로써 아래와 같은 양해유한 차분식을 구할 수 있다.

$$e_i = f_i - \tau(A_i + B_i + C_i) \quad (11)$$

$$\text{여기서, } A_i = \gamma^* \phi'_1(f_i) \frac{\partial f_i}{\partial z} \quad (12a)$$

$$B_i = \frac{\phi_2(f_i)}{\gamma_w} \frac{\partial^2 f_i}{\partial z^2} \quad (12b)$$

$$C_i = \frac{\phi'_2(f_i)}{\gamma_w} \left(\frac{\partial f_i}{\partial t} \right)^2 \quad (12c)$$

Fig.3에 나타난 임의점, z 와 임의시간, $t+\tau$ 에서의 간극비, e_i 는 주어진 세점, (z_{i-1}, z_i, z_{i+1}) 과 그에 대응하는 기 계산된 간극비 (f_{i-1}, f_i, f_{i+1}) 에 의하여 결정된다. 따라서, 초기조건과 경계조건이 결정되면 식11은 압밀층 내부의 모든점과 임의의 시간경과에 대하여 적용된다.

정규압밀상태의 연약점토층에서 자중압밀이 진행되는 경우, 두가지의 경계조건을 고려할 수 있다. 압밀층의 상하부면이 간극수가 자유롭게 빠져나갈 수 있는 양면배수의 경우와 상부층은 배수층이고 하부는 불투수층인 경우이다.

상부층($z=0$)에서 배수되는 경우, 압밀직전($t=0$)때 경계면에 작용하는 연직 유효응력, q_0' 와 압밀중 가해지는 상재하중 $\Delta q(t)$ 의 합에 대응하는 간극비를 \bar{e} 라고 할 때 간극비-유효응력 구성 경계조건식으로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$e(0, t) = \bar{e} (\sigma'(0, t)) = \bar{e} (q_0' + \Delta q(t)) \quad (13)$$

압밀층 하부($z=l$)가 배수상태인 경우, 전술의 경계조건에 압밀층의 자중에 의한 연직유효응력이 추가되어 다음식과 같이 표시할 수 있다.

$$e(l, t) = \bar{e} (\sigma'(l, t)) = \bar{e} (q_0' + \Delta q(t))$$

$$+(\gamma_s - \gamma_w) \ell) \quad (14)$$

여기서, l 은 하부경계의 Material좌표로써 다음과 같이 구할 수 있다.

$$l = \int_0^{h(0)} \frac{da}{1 + e(a, 0)} \quad (15)$$

여기서, $h(0)$ 는 Lagrangian좌표로 표시한 압밀층의 초기높이를 나타낸다.

한편, 압밀층 하부($z = \ell$)에서, 비배수 상태인 경우에는 비배수조건, 즉 토립자의 이동속도와 간극수의 이동속도가 동일한 조건과 토립자와 간극수로 형성된 혼합체의 힘의 평형관계를 Reduce좌표로 표시하면 다음식과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{\partial e}{\partial z}(\ell, t) = \frac{\partial \sigma'}{\partial z} \frac{de}{d\sigma'} = (\gamma_s - \gamma_w) \frac{de}{d\sigma'} \quad (16)$$

상기식을 차분식으로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial e}{\partial z}(\ell, t) = \frac{1}{2\delta} [f_{i+1} - f_{i-1}] = (\gamma_s - \gamma_w) \frac{de}{d\sigma'} \quad (17)$$

상기식을 중앙과 우변을 정리함으로써 다음의 유한 차분식으로 표시할 수 있다.

$$f_{n+1} = f_{n-1} + 2\delta \cdot (\gamma_s - \gamma_w) \left[\frac{de}{d\sigma'} \right]_n \quad (18)$$

여기서, f_{n+1} 은 경계면, $i=n$ 에서의 간극비, e_n 을 구하기 위한 가상점 $i=n+1$ 에서의 간극비이다. 한편, 초기조건은 제한 조건없이 압밀층 깊이에 따른 입의 형태의 간극비의 분포를 사용할 수 있다.

5. 원심모형실험 및 결과해석

원심모형 실험은 원심력을 이용하여 연약점

토의 자중압밀시간을 단축시킬 수 있으며, 배수조건과 초기조건을 현장상태와 일치시킴으로써 실험실에서 연약점토의 자중에 의한 압밀 거동의 예측이 가능하다⁽⁶⁾. 따라서, 본연구에서는 원심모형실험기를 사용하여 연약점토의 자중압밀에 관한 실험결과⁽¹⁵⁾를 이용하여 수치해석을 실시하였다. Fig.4는 콜로라도 대학에 소재한 원심모형실험기에 설치한 토조를 나타낸 것으로써 모형토조의 제원은 길이 40.64cm, 폭 15.24cm, 높이 40.64cm이다.

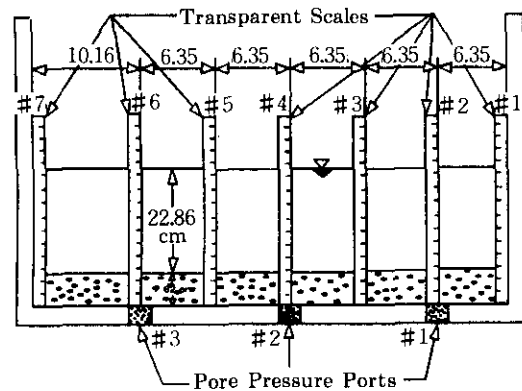


Fig. 4 Model Container

전면을 투명한 Plexiglas로 제작하여 시료를 성형하고 원심모형 실험동안 시료가 가속되어 자중압밀이 유발되는 동안 Still Camera를 이용하여 일정한 시간간격으로 시료의 상부계면을 촬영하므로써 연약점토시료의 침하량을 측정하였다.

시료의 하부의 비배수 경계면에서 점토층의 토립자 자중에 의하여 유발되는 과잉간극수압을 측정하기 위하여 3개의 간극수압계를 토조의 저면에 설치하였다. 점토시료를 초기 간극비가 3.6, 높이 7.62cm로 성형하고 시료표면에서 22.86cm높이 까지 물을 채움으로써 수면하의 점토층의 자중압밀을 유도하였다.

Table 1은 시료로 사용한 Kaolinite계의 Speswhite Fine China Clay⁽²⁾의 물리적 특성을 나타낸 것이다.

Table 1. Soil Properties of Speswhite Fine China Clay(Kaolinite)

Gs	LL(%)	PL(%)	Activity
2.66	53	32	0.29

원심모형실험은 원심모형실험기에 시료를 성형한 토조를 안착한 후, 중력수준 51.2G를 짧은 시간에 증가시켜 토립자의 자중에 의한 과잉간극수압을 발생시키고 배수를 상향방향으로 유도함으로써 점토층의 상부는 배수조건, 하부는 비배수조건하에서 점토의 자중압밀 현상을 재현하였다.

모형실험결과를 원형의 거동으로 정량화시키기 위하여 원형과 모형의 상사법칙을 만족시켜야 한다. 점토의 자중에 의한 압밀현상을 원심모형실험에서 재현시키는 경우 원형과 모형의 상사관계⁽⁶⁾는 Table 2에 요약정리한 바와 같다.

Table 2. Scaling Relations

Quantity	Prototype	Centrifugal Model
Length	N	1
Area	N ²	1
Volume	N ³	1
Stress	1	1
Strain	1	1
Acceleration	1	N
Mass Density	1	1
Time Consolidation	N ²	1
Void Ratio	1	1
Coefficient of Consolidation	1	1
Coefficient of Compressibility	1	1
Coefficient of Volume Change	1	1

따라서, 원심모형실험에서 초기간극비 E, 시료높이 L 인 점토층에 대하여 원심모형실험시

중력가속도를 N중력으로 유지시켰을 때, 원형에서 압밀상황은 초기 간극비 E, 시료의 높이는 L×N이 되고, 모형과 같은 압밀도에 도달하는 시간은 T×N²이 된다. 따라서, 원심모형과 원형사이의 상사관계에 의거하여 모형을 Fig.5의 원형으로 차원 해석에 의하여 변화시킬 수 있다.

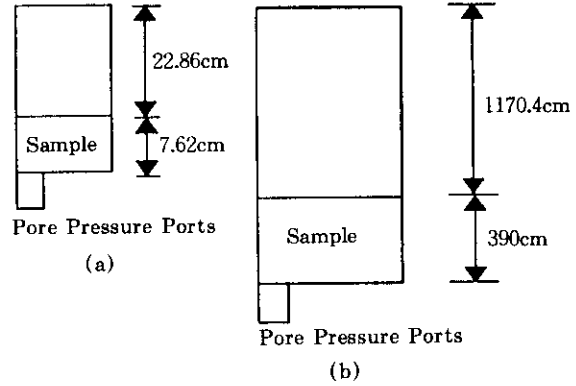


Fig. 5 (a) Model Dimension
(b) Prototype Dimension

원심모형실험중 측정된 점토시료 계면의 침하량과 하부의 비배수면에서 발생하는 과잉간극수압의 시간경과에 따른 소산결과를 바탕으로 해석을 실시하였다. 한편, 실험결과를 실험중 가한 중력수준을 고려하여 상사법칙을 이용한 원형 실물상태로 변환시킨 결과를 Terzaghi의 압밀이론, 유한변형률 압밀이론으로 해석을 실시하였다.

실험결과를 해석하기 위하여 요구되는 시료의 간극비-유효응력, 간극비-투수계수 관계는 CRD압밀실험⁽²⁾(Constant Rate of Deformation Consolidation Test)을 통하여 얻은 결과를 이용하였으며 Figs. 6과 7에 각각 나타낸 바와 같다.

실험결과를 Terzaghi의 미소변형률 압밀이론을 사용하여 해석하기 위하여 요구되는 압밀계수는 선형적 방법으로 산정하였다. 간극비-유효응력 및 간극비-투수계수 관계에서 초기

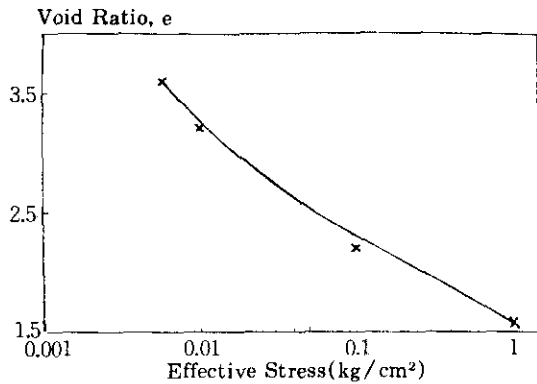


Fig. 6 Void Ratio-Effective Stress Relationship

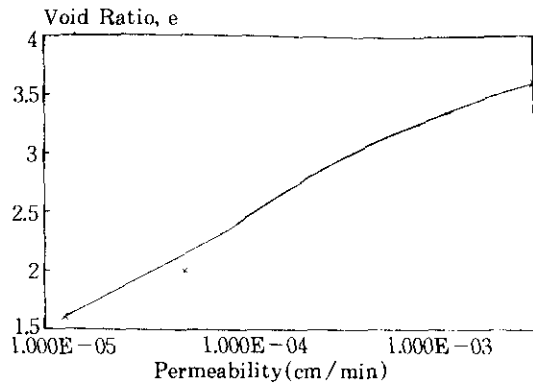


Fig. 7 Void Ratio-Permeability Relationship

간극비($e_0=3.6$)에 상응하는 연직유효응력($\sigma_v' = 0.0056 \text{ kg/cm}^2$)과, 현상상태에서 깊이에 대한 최종간극비의 평균 최종간극비($e_f=2.8$)와 그에 상응하는 연직 유효응력($\sigma_v' = 0.0376 \text{ kg/cm}^2$)을 선형적으로 연결함으로써 압축계수($a_v=25 \text{ cm}^2/\text{kg}$)을 구하고, 초기간극비($e_0=3.6$)와 평균 최종간극비($e_f=2.8$)의 평균치($e_{av}=3.2$)에 상응하는 투수계수($k=4 \times 10^{-4} \text{ cm/min.}$)를 사용하여 압밀계수($c_v=6.4 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{min.}$)를 구하였다.

본 연구에서는 이와 같이 선형적으로 산정하여 구한 압밀계수를 사용하여 Terzaghi 압밀이론에 근거하여 해석을 실시하였으며 깊이에 따라 일정한 간극비로 급속퇴적된 점토층에서 진행되는 일차원압밀의 발생경우에 압밀도 및 과

잉간극수압⁽¹⁴⁾을 각각 다음의 식을 사용하여 산정하였다.

$$U_z(t) = 1 - \frac{32}{\pi^3} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^3} \exp\left[-\frac{C_v(2n+1)^2}{4H^2}t\right] \quad (19)$$

여기서, U_z 는 압밀도, C_v 는 압밀계수(cm^2/day), H 는 시료의 초기두께(cm), t 는 시간을 나타낸다.

$$\frac{U}{\gamma' H}(x, t) = \frac{8}{\pi^3} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \sin\left[\frac{(2n+1)\pi x}{2H}\right] \exp\left[-\frac{C_v(2n+1)^2}{4H^2}t\right] \quad (20)$$

여기서, U 는 과잉간극수압(kg/cm^2), γ' 은 수중단위중량(g/cm^3)을 나타낸다.

Fig.8은 원심모형 실험결과를 고전의 Terzaghi 압밀이론과 간극비-유효응력-투수계수 관계의 비선형적인 관계를 고려한 유한변형률 압밀이론을 바탕으로 수치해석을 실시하여 시간경과에 따른 평균압밀도의 변화를 비교하여 나타낸 것이다. 유한변형률 압밀이론에 의한 해석결과는 원심모형실험결과와 근접함을 보여주는 반면에 Terzaghi의 압밀이론에 의한 해석결과는 매우 지연된 압밀도를 나타내고 있다. 이와같은 차이는 Terzaghi의 압밀이론에서는 자중압밀에 따른 초기 시료높이의 변화를 고려하지 않기 때문에 압밀진행중 배수거리 감소에 따른 압밀시간 단축효과가 반영되지 않았기 때문으로 판단된다. 또한, 간극비-유효응력, 간극비-투수계수간의 구성관계에서 선형적 가정 또는 평균값의 선택에 의한 일정한 압밀계수 산정에 따라 지연된 압밀도를 나타내고 있는 것으로 판단된다. 따라서, 초기 간극비가 매우 큰 연약점토의 자중압밀은 매우 큰 침하량이 예상되고 유효응력-간극비-투수계수 구성관계가 심한 비선형을 이룰것으로 예상되므로 유한변형률 압밀이론에 의한 해석 및 침하예측이 요구된다.

Fig.9는 시료하부의 비배수 경계에서 시간변화에 따른 과잉간극수압의 소산현황을 나타낸 것이다. 이 결과는 압밀도-시간 관계의 해석결과와 일관성있게 Terzaghi의 미소변형률 압밀이론에 의한 해석결과는 시간경과에 따라서 매우 지연된 과잉간극수압의 배수를 보이며 유한 변형률 압밀이론은 실험치와 매우 근접하고 있음을 알 수 있다.

따라서, 초기 간극비가 매우 큰 연약점토의 자중압밀해석시에는 비선형 구성관계와 압밀 진행중 변형효과가 고려된 유한변형률 압밀이론의 사용이 요구되며 한편, 원심모형실험은 현장에서 오랜 압밀시간이 요구되는 연약점토의 자중압밀을 단기간에 재현시킬 수 있는 효율적인 실험방법임을 알 수 있었다.

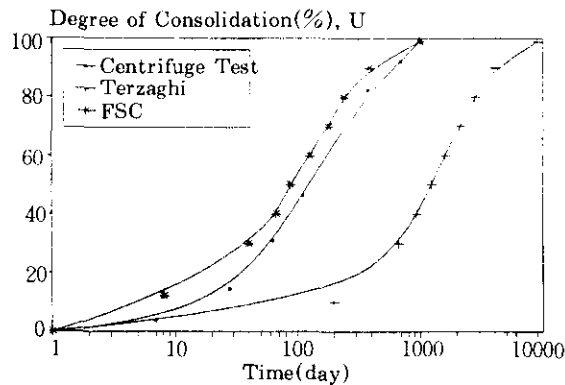


Fig. 8 Degree of Consolidation Time Relationship

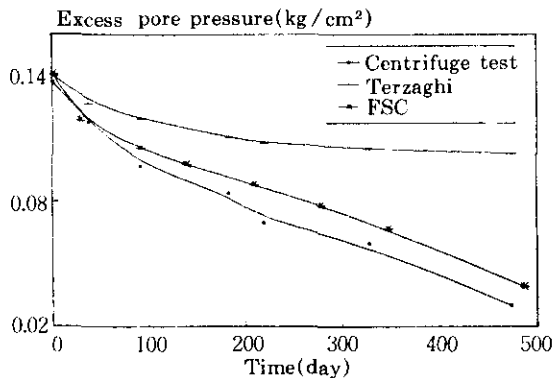


Fig. 9 Variation of Excess Pore Pressure with Time

6. 표준압밀실험 및 결과해석

연약점토에 상재하중을 가하였을 때 그의 압밀특성을 알아보고 전술의 수치해석방법의 유효성을 검증하기 위하여 Table 1에 나타낸 정제된 재성형 Kaolinite 점토를 사용하여 KSF-2316 규정에 의거 실내 표준압밀실험을 실시하고 각 하중단계에 대하여 Terzaghi 압밀이론, 비선형 유한변형률 압밀이론을 사용하여 실험결과를 재분석하여 그 결과의 차이점을 비교 분석하였다. 간극비-유효응력, 간극비-투수계수 관계는 표준압밀실험 결과를 바탕으로 각각 Figs. 10과 11에 나타냈다.

초기 간극비의 크기에 따라 압밀량 및 비선형 정도(Degree of Non-Linearity)가 크게 변화

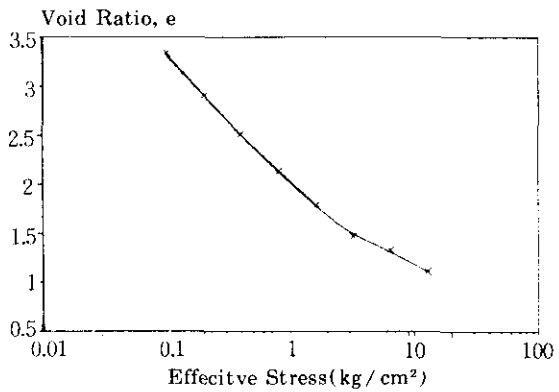


Fig. 10 Void Ratio-Effective Stress Relationship

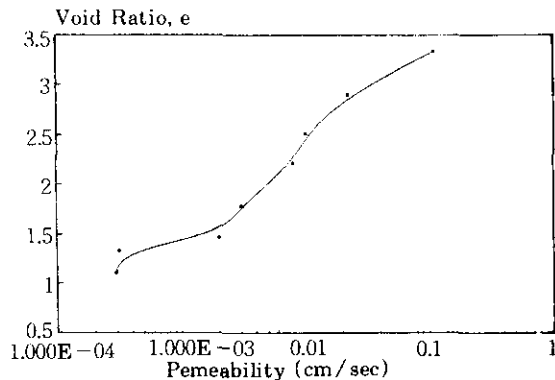


Fig. 11 Void Ratio-Permeability Relationship

므로 여기서는 세개의 다른 하중단계(연직하중 0.2kg/cm²에서 0.4kg/cm², 0.8kg/cm²에서 1.6kg/cm², 3.2kg/cm²에서 6.4kg/cm²로 증가시킨 경우)에 대하여 해석을 실시하였다.

Figs.12~14는 각각 하중증가량 0.2, 0.8, 3.2 kg/cm²인 경우에 대하여 시간에 따른 압밀도의 변화를 Terzaghi의 압밀이론, 비선형 유한변형을 압밀이론을 사용하여 실험결과와 비교한 결과를 각각 나타내었다.

Terzaghi의 압밀이론과 유한변형을 압밀이론 및 실내 실험치와 비교하여 볼때, 압밀도가 증가할수록 압밀침하의 차이를 보이는 것은 Terzaghi압밀이론이 압밀이 진행되면서 시료두께의 감소에 의한 배수거리의 감소가 압밀도에 미치는 영향을 고려하지 않았기 때문이다. 압밀진행중 배수거리의 감소를 고려하지 않고 일정한 시료의 두께로 가정한 미소변형을 압밀이론인 Terzaghi의 이론은 실험결과보다 지연된 압밀도를 보여준다. 하중크기가 중간정도인 Fig.13의 결과는 Fig.12의 결과와 비슷한 시간-압밀도 경향을 보이며 하중의 크기가 크고 초기 간극비가 상대적으로 작은 Fig.14의 연직하중 6.4kg/cm² 경우에는 그 차이가 감소됨을 알 수 있다. 이는 마지막 하중단계에서의 재하 전 시료의 두께가 작기 때문에 배수거리 감소에 따른 압밀도에 미치는 영향이 작기 때문이다.

Fig.15는 0.4kg/cm²의 연직하중상태에서 압밀경과시간 300sec일때 깊이에 대한 과잉간극수압 분포를 나타낸 것으로서, 연직축은 주어진 경과시간에서 임의의 깊이를 시료두께로 나누어 무차원으로 표시한 것이다. Terzaghi에 의한 압밀이론, 비선형 유한변형을 압밀이론의 해석결과는 전술의 해석결과와 일관성있게 주어진 압밀시간에 대하여 Terzaghi의 압밀이론에 의한 해석결과가 유한변형을 압밀이론에 의한 결과보다 지연된 과잉간극수압 분포를 유지하여 큰 과잉간극수압 분포를 나타냄을 알 수 있다. 이와 유사한 해석결과가 연직하중 1.6 kg/cm²과 6.4kg/cm²에 대하여 Figs. 16과 17

에 보여주고 있음을 알 수 있다.

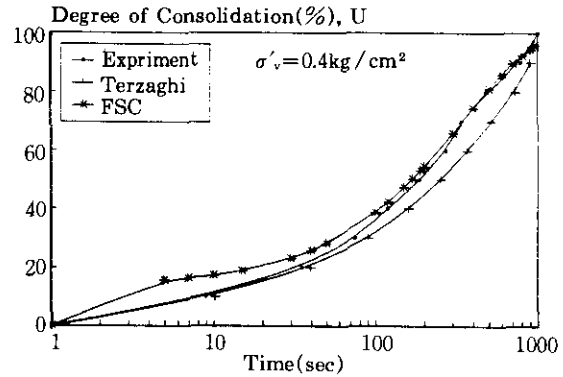


Fig. 12 Degree of Consolidation Time Relationship

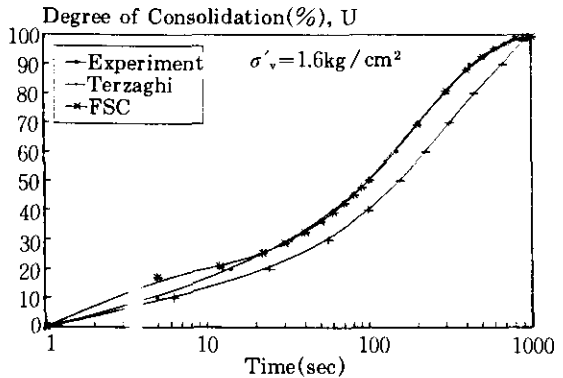


Fig. 13 Degree of Consolidation Time Relationship

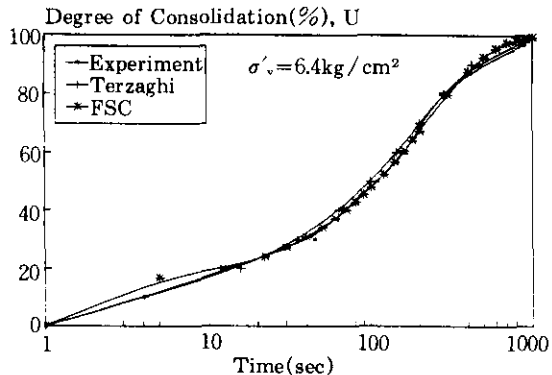


Fig. 14 Degree of Consolidation Time Relationship

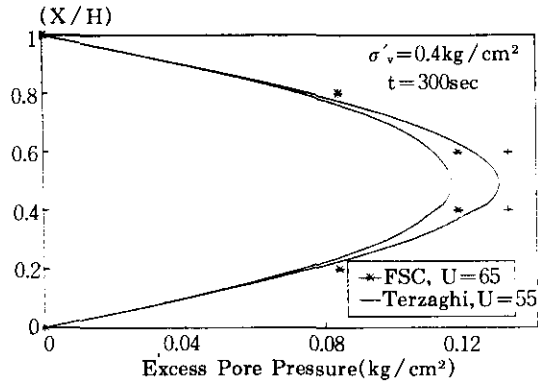


Fig. 15 Variation of Excess Pore Pressure with Time

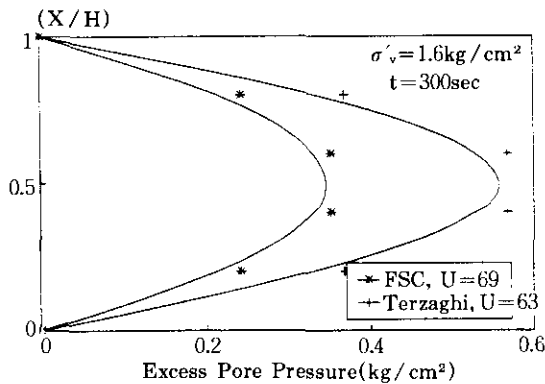


Fig. 16 Variation of Excess Pore Pressure with Time

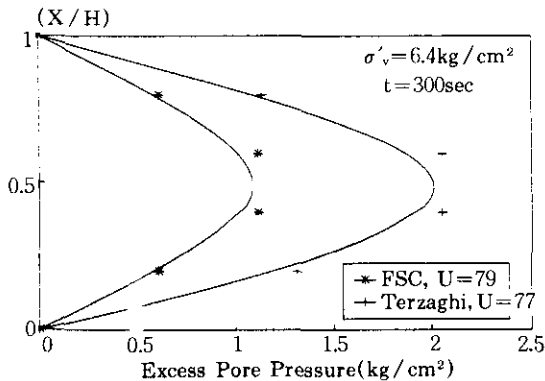


Fig. 17 Variation of Excess Pore Pressure with Time

7. 결 론

초기 간극비가 큰 연약점토의 상재하중하의

압밀과 토립자 자중에 의한 압밀특성을 연구하기 위하여 표준압밀실험 결과와 원심모형 실험 결과를 유한변형률 압밀이론과 Terzaghi의 미소변형률 압밀이론을 사용하여 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 초기 간극비가 큰 연약점토의 자중 및 상재하중하의 압밀 침하량을 정확히 예측 산정하기 위하여 비선형 유한변형률 압밀이론의 사용이 요구된다.
2. Terzaghi의 미소변형률 압밀이론에 의한 시간변화에 따른 압밀도 및 과잉간극수압의 산정은 실험결과와 유한변형률 압밀이론에 의한 해석결과 보다 지연된 압밀도 및 간극수압의 배수를 나타내고, 이는 간극비-유효응력-투수계수의 선형적 가정 및 압밀중 배수거리의 감소에 따른 영향이 고려되지 않았기 때문이라 판단된다.
3. 연약점토의 자중압밀을 실내 실험실에서 재현하기 위한 원심모형실험은 매우 효과적인 방법으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 1993년도 학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 이루어진 연구이며, 동재단에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 유남재(1990), "경계토압계의 개발", 대한토목학회 논문집, 제10권, 제1호, pp.135~143.
2. Croce, P., Znidaricic, D., Ko, H.-Y., Olsen, H.W. and Schiffman, R.L.(1984), "Evaluation of Consolidation Theory by Centrifugal Modeling", Proc. Conf. on Application of Centrifugal Modeling to Geotechnical Design, Univ. of Manchester, U.K., pp.380~401.
3. Davis, E. H., and Raymond, G.P.(1965), "A Non-Linear Theory of Consolidation", Geotechnique, Vol.15, pp.161~173.
4. Gibson, R.E., England, G.L. and Hussey, M.J. L.(1967), "The Theory of One-Dimensional Consolidation of Saturated Clay 1. Finite

- Non-Linear Consolidation of Thin Homogeneous Layers", *Geotechnique*, 17, pp.261~273.
5. Gibson, R.L., Schiffman, R.L. and Cargill, 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.
 6. Ko, H-Y.(1988), "Centrifuges in Soil Mechanics", James and Schofield(Eds), 1988, Balkema, Rotterdam, pp.11~18.
 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 Comparison between Two Theory and Its Application", *Japanese Society of Civil Engineering Reprint from Civil Engineering in Japan*, pp.21~26.
 9. Ortenblan, A.(1963), "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 Civil Engineering, University of Colorado, Boulder, Colorado, pp.1~61.
 11. Raymond, G.P.(1969), "Consolidation of Deep Deposits of Homogeneous Clay", *Geotechnique*, Vol.19, pp.478~494.
 12. Richart, F.E.(1957). "A Review of the Theories for Sand Drains", *Proc. a. Soc. Civ. Engrs.*, SM3, No.1301.
 13. Schiffman, R.L. and Cargill, K.W.(1981), "Finite Strain Consolidation of Sedimention Clay Deposits", *Proceedings, Tenth International Conference on Soils Mechanics and Foundation Engineering*.
 14. Terzaghi, C.(1925), "Principles of Soil Mechanics", *Engineering News-Record*(eight articles), McGraw-Hill, New York, 95, pp. 742~746, 796~800, 874~878.
 15. Yoo, N.J., Schiffman, R.L., Ko, H.Y. and Znidaricic, D.(1986), "Centrifugal Consolidation Testing of Soft Soil, II", *The Second Interim Report to U.S.A.R.D.S.G.-U.K. Department of Civil Engineering, University of Colorado, Boulder, Colorado*.

(접수일자 1995. 3. 15)