

준설매립 점토의 자중압밀 특성에 관한 연구

A Study on Self-Weight Consolidation Characteristics in Dredged and Reclaimed Clay

李 松* · 梁泰善** · 黃圭鎬**

Lee, Song · Yang, Tae Seon · Hwang, Kouu Ho

Abstract

Treatment techniques of soft clay layers is needed sophisticated technology in civil engineering. Especially, dredged and reclaimed clay has high liquid limit and water content, so it is difficult to use. Now it comes to the applicability as good construction materials by predicting the behaviors. This paper is to evaluate the characteristics of sedimentation and self-weight consolidation of extremely soft clay, and is to find the way of applying model test result of reconstructing the in-situ condition to design. The consolidation properties of soft clay layers changing the size of the cell are investigated by large-scale consolidation test apparatus and the behaviors of self-weight consolidation are predicted by numerical analysis.

요 지

연약 점토 지반의 처리 기술은 고도의 토목공학적인 기술을 요한다. 특히 준설매립토는 액성한계가 크고 자연함수비가 매우 높아 매립재로는 부적합하지만 기술의 발달로 재료의 거동을 예측하여 안정한 재료로 활용할 수 있는 단계에 있다. 본 연구에서는 초연약 준설 점토의 침강거동 및 자중 압밀거동의 특성을 알아보고 현장의 상황을 재현한 모형실험으로 얻어진 결과를 현장에서 활용할 수 있는 방안을 모색하고자 하였다. 이를 위해 압밀시험기는 대형으로 제작하였으며 높이와 직경의 변화에 따른 압밀거동의 특성을 고찰해 보고 수치모델로 자중압밀의 거동을 예측하였다.

1. 서 론

최근 준설토를 이용한 매립공사가 활발히 진행되고 있다. 군장, 울산, 아산 공업단지, 광양 컨테이너 부두, 여천 공업단지, 인천남항 등이 그 예이다. 준설연약점토는 해안 어디서나 구할 수 있으므로 물

량확보가 쉽고 경제적인 재료이다. 해성점토는 액성한계나 소성한계가 높고 함수비가 커서 초연약한 상태이므로 큰 압축성을 가지며 압축고화가 장기간에 걸쳐 진행되고 투기시 오염확산이 생기기 쉽다.^(3,4,6,7,9,12) 서구나 일본에선 이미 초연약 해성점토에 관한 연구가 많이 진행되고 있지만 우리나라에서는 이에 대한 연구가 시작 단계에 들어선 실정이다.

* 정회원 · 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 부교수
** 정회원 · 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

준설토의 운송은 대개 펌프로 이루어지는데 바로 침강되는 것이 아니라 확산되어 퍼져나가 인근 해역을 오염시키므로 이를 방지하기 위해 Pond를 설치해야 하는데 그 크기는 투입된 점토의 양에 따라 결정된다. 투입된 준설토는 시간이 지남에 따라 침강, 퇴적되기 시작한다. 침강이 완료된 후 장시간 동안 자중압밀이 시작되고 압밀이 진행되면서 유효응력이 서서히 증가한다. 자중압밀이 끝난 후에도 큰 하중은 견디지 못하므로 시공을 위한 소요강도를 얻도록 강도의 증가가 필요하다. 압밀 시간은 공기에 지대한 영향을 미치고 강도의 증진은 지반의 안정성과 직결되는 문제이므로 침강단계와 자중압밀과정에 관한 연구는 준설 매립공사의 공법 선정이나 공사기간, 준설점토의 투입량 등을 결정하는 중요한 이론적 근거가 될 것이다.

점토의 보편적인 압밀해석 이론인 Terzaghi의 이론에서는 투수계수나 압밀계수를 상수로 하고 하중의 증가에 따른 체적의 변화를 일정하다고 가정한다. 그런데, 초연약 점토에서는 투수계수나 압밀계수, 체적변화계수 등이 비선형이므로 그대로 적용할 수 없다. 이런 Terzaghi의 압밀이론의 모순을 수정, 보완한 것이 Mikasa와 Gibson의 이론이다.^(3,4,5,10,11) 준설토의 자중압밀에 관한 이론적인 연구를 최초로 시행한 Mikasa나 Gibson의 연구는 서로 독자적으로 이루어졌지만 거의 차이가 없다는 것이 여러 사람들에게 의해 밝혀졌다.

본 논문의 목적은 해안 매립현장에서 채취한 #60 채 통과의 흙을 이용, 침강 및 자중압밀시험을 실시하여 기본적인 압밀특성을 알아보고 수치해석으로 압밀거동을 예측해 보는데 있다.

2. 이론적 배경

2.1 침강이론

고함수비의 준설토를 투기하면 입자가 침강과정을 거치는데 이 과정에서는 입자와 입자사이의 간격이 좁아서 서로 영향을 미치고 염분의 농도도 자유침강을 방해하는 요인으로 작용한다.

Imai는 침강의 형태를 4가지로 구분했는데 먼저 분산침강은 흙의 농도가 낮아서 응집이 일어나지 않아 서로 영향을 미치지 않고 자유롭게 침강한다. 초기 함수비가 2000% 이상인 고함수비에서 이와같

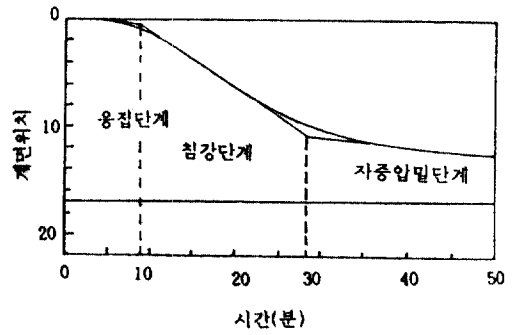


그림 1. 구간침강의 전형적인 침강곡선

은 현상을 관찰할 수 있다. 응집침강은 흙입자들이 모이고 서로 다른 크기의 floc을 형성하는데 floc의 크기가 큰 것이 먼저 가라앉고 어떤 형태의 계면도 존재하지 않는다. 그리고, 구간침강은 그림 1에서와 같이 침강곡선상에서 응집단계와 침강단계, 자중압밀단계가 명확히 구분된다.^(4,7)

또, 압밀침강은 혼합물(물+점토)의 농도가 진한 경우 주로 자중 압밀에 의해 침강이 일어난다.

2.2 자중압밀이론

자중압밀에 관한 이론은 크게 다음의 두 가지로 나뉘어 연구되었는데 침강과정을 연구해서 자중압밀의 거동을 설명하려는 방향(Kynch, McRoberts와 Nixon, Lin과 Lohnes, Lee와 Sills 등)과 침강이 끝난 후에 자중압밀과정을 관찰해서 거동을 밝히려는 방향(Mikasa, Gibson, Monte와 Kriezsek, Kopula와 Morgenstern 등)으로 이루어졌다.^(5,6,8,10,11,13,15)

고함수비의 초연약점토는 자중에 의해 압밀이 발생하는데 변형이 크게 일어나므로 미소변형을 기본 가정으로하는 Terzaghi의 압밀이론은 자중압밀을 해석하기에 적절하지 못하다. 특히, 자중의 영향을 무시하고, 체적변화계수와 투수계수, 압밀계수를 일정하다고 가정하는 것은 초연약 점토에선 흙자체의 무게가 압밀의 원인이 되기때문에 반드시 고려되어야 할 사항이다. 이러한 이론의 모순을 보완하여 Mikasa, Gibson의 이론이 연구되었다.

2.2.1 Mikasa의 압밀이론

이 이론은 Terzaghi 압밀이론의 가정에 2가지를 추가해 모순이 되는 가정들을 완화시켰다.

먼저, Terzaghi의 가정은 (1) 점토는 균질하다. (2) 점토는 완전 포화되어 있다. (3) 토립자의 압축은

1차원이다. (4) 토립자와 물은 비압축성이다. (5) Darcy의 법칙이 성립한다.^(8,10,11,14) 그리고, Mikasa에 의하여 새로 도입한 기본가정은

A. 흙의 압축성과 투수계수는 체적비의 함수이고 시간과 관계없다.

B. 유효응력이 없는 Soil Suspension은 제외한다. 위의 기본가정으로 유도된 식은

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \zeta^2 \left[C_v \frac{\partial^2 \zeta}{\partial z_0^2} + \frac{dC_v}{d\zeta} \left(\frac{\partial \zeta}{\partial z_0} \right)^2 - \frac{d}{d\zeta} (C_v m_v \gamma') \frac{\partial \zeta}{\partial z_0} \right] \quad (1)$$

여기서 ζ 는 압밀비, z_0 는 원시좌표, C_v 는 압밀계수, m_v 는 체적변화계수, γ' 은 수중단위중량

2.2.2 Gibson의 압밀이론

운동량 보존의 법칙과 연속방정식을 적용하여 다음과 같이 유도된다.^(7,10,11,14)

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[g(e) \frac{\partial e}{\partial z} \right] \pm f(e) \frac{\partial e}{\partial z} = \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2)$$

여기서

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

$$f(e) = - \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \frac{d}{de} \left[\frac{k(e)}{1+e} \right] \quad (4)$$

Lagrangian 좌표계(a)와 물질좌표계(material coordinate : Z)의 관계는

$$z(a) = \int_0^a \frac{da'}{1+e(a', 0)} \quad (5)$$

전술한 두 압밀방정식은 동일하고 이론 전개도 거의 비슷하지만 Mikasa는 초기함수비가 자중압밀과정에 영향을 미치고 압밀비 ζ 에 대한 변화를 나타냈고 Gibson은 초기 상태에 제한을 두지 않고 간극비 e에 대한 변화 관계를 나타낸다는 차이점이 있다.

2.3 침투 압밀 이론

Imai에 의해 제안된 침투 압밀 이론은 토립자 자체의 체적력(Body Force)이 압밀응력이 되어 압밀되는데 이를 침투압밀이라 한다. 요소내에 작용하는 침투압밀 응력은 다음 그림 2와 같다.⁽⁷⁾

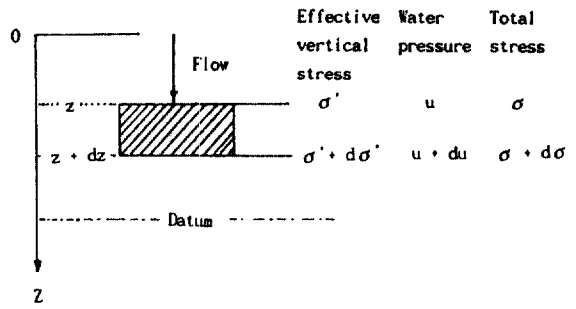


그림 2. 요소에 작용하는 침투압밀 응력

요소 내에 작용하는 침투압밀응력은 전응력과 유효응력의 관계에서 다음과 같이 유도된다. 전응력의 변화는 요소의 중량과 같으므로

$$d\sigma = \gamma_w dz \quad (6)$$

유효응력의 변화는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d\sigma' = \gamma_w dz - du \quad (7)$$

Z면에서의 전수두는 그림 2에서

$$h = (Z - z) + \frac{u}{\gamma_w} \quad (8)$$

$$Z + dz = (Z - z - dz) + \frac{u + du}{\gamma_w} \quad (9)$$

깊이에 따른 유효응력의 변화는 다음과 같다.

$$\frac{d\sigma'}{dz} = -\gamma_w \frac{dh}{dz} + \gamma' \quad (10)$$

여기서 $-\gamma_w \frac{dh}{dz} = \gamma_w i = j$ 이므로

$$\frac{d\sigma'}{dz} = j + \gamma' \quad (11)$$

따라서 비배수 상태에서는 침투력 j가 0이므로 깊이에 따른 유효응력의 증가는 식 (11)에서 γ' 를 적분해서 구하고, 하향배수 조건에서는 $j + \gamma'$ 을 깊이에 따라 적분해서 구한다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험방법

시료는 전남 광양 콘테이너 부두 투기장에서 평

균해수면 보다 4.0 m 아래 되는 곳의 준설도와 해수를 채취했다. 예비실험으로 200%~1500%의 범위에서 함수비를 변화시켜 침강실험을 한 결과 침강과 자중압밀의 경계가 가장 잘 나타나는 함수비 약 500% 정도의 함수비를 본 실험의 함수비로 이용했다.

시료는 해성점토이므로 노건조해서 얻은 함수비는 염분이 흙 속에 포함되어 있어서 실제 값보다 적게 나오므로 바닷물 속에 포함되어 있는 염분의 농도를 측정해서 진함수비(True water content)로 보정해서 사용하였다.⁽⁴⁾

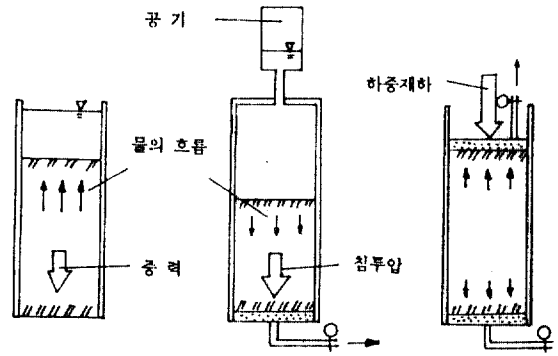
실험은 4단계로 나누어 저응력 상태에서 표준압밀응력의 영역까지 행해지며 각 단계에 소요되는 시간은 다음과 같다.

먼저 침강은 자연건조시킨 흙을 분쇄하여 #60의 체로 거른 시료를 함수비 500%의 혼합액(점토+바닷물)으로 만들었다. 점토에는 조개와 모래 입자같은 점토이외의 입자가 섞여있어서 이의 제거를 위해 #60체를 사용하였다. 체의 눈이 너무 작으면 자연상태의 흙보다 실트의 비율이 너무 작아지고 크면 작은 모래 알갱이들이 섞여서 #60체를 사용하여 시료를 제조하였다. 교반기로 충분히 교반시켜 Cell안에 붓고 Cell안으로 압축공기를 불어넣은 후 교반시킨다. 압축공기 투입을 중단시키는 순간부터 침강이 일어난다고 보고 시간을 재면서 계면의 변화치를 기록한다. 그리고, 변위를 plot해서 시간에 대한 침하의 변화가 거의 없을 때를 자중압밀의 종료시점으로 한다.

자중압밀이 종료되면 수두를 일정하게 유지시키면서 아래로 배수시킨다. 이때 수두차를 구해 작용하는 침투력을 구하고 변위를 측정해서 압밀량과 하중을 구한다.

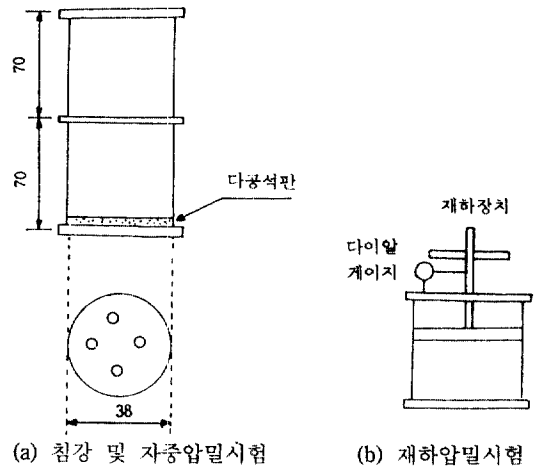
침투압밀 시험에서 더 이상의 간극수압의 변화가 일어나지 않으면 압밀이 끝난 것으로 보고 저응력으로 재하하여 압밀시킨다. 저응력재하란 침투압밀이 완료된 후 응력이 0.005~0.08 kg/cm² 범위의 응력으로 재하하는 것을 가리킨다. 침투압밀로 강도가 증진되면 시료표면에 하중재하판을 얹고 실하중을 올려 저응력으로 압밀시킨다. 응력은 0.005, 0.01, 0.02, 0.04, 0.08 kg/cm²의 순으로 증가시키면서 재하한다. 하중재하 조건을 도시하면 그림 3과 같다.

표준압밀 시험의 재하응력 범위는 저응력 범위와



(a) 자중에 의한 압밀 (b) 침투압에 의한 압밀 (c) 저응력 재하에 의한 압밀

그림 3. 하중재하 조건



(a) 침강 및 자중압밀시험

(b) 재하압밀시험

그림 4. 압밀 시험 장치

의 연관성을 찾기위해 0.05 kg/cm²~12.8 kg/cm²로 하여 전 단계의 실험결과들과 선형성을 갖는지를 알아보고 시료는 저응력재하가 끝난 시료를 심도별로 채취해서 동일한 조건하에서 토성 실험을 한다.

3.2 실험장치

그림 4는 자중압밀실험 장치를 나타낸 것이다.

그림 4에서 보는 바와 같이 높이 70 cm, 직경 38 cm인 Cell 2개를 연결(H=140 cm)하였으며, 하부에 배수층과 다공판을 설치하여 배수가 원활하도록 했다. 그리고, (b)는 재하압밀 시험 장치로 침강이 완료된 후에 재하판을 설치하여 0.005~0.08 kg/cm²로 표준압밀보다 낮은 응력으로 압밀실험을 할 수 있도록 하였다.

4. 수치해석 및 고찰

4.1 기본식

2.2.1절의 식 (1)의 Mikasa의 압밀방정식은

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \zeta^2 \left[C_v \frac{\partial^2 \zeta}{\partial z_0^2} + \frac{dC_v}{d\zeta} \left(\frac{\partial \zeta}{\partial z_0} \right)^2 - \frac{d}{d\zeta} (C_v m_v \gamma') \frac{\partial \zeta}{\partial z_0} \right] \quad (1)$$

여기서 ζ 는 압밀비, z_0 는 원시좌표, C_v 는 압밀계수, m_v 는 체적변화계수, γ' 는 수중단위중량

이 식은 흙의 자중을 고려하였고 압밀 계수와 체적변화 계수 등을 변위에 따라 변하는 변수로 취급했기 때문에 Terzaghi의 압밀이론보다 실제 거동에 더 잘 맞는 이론이라고 생각된다. 그리고, 식 (1)에서 $\zeta = f_0/f$ 이므로 압밀의 거동은 초기 함수비의 영향을 받는다.

4.2 차분방정식

A. 지배방정식

식 (1)을 Explicit로 유도한 식은

$$\begin{aligned} \zeta_{i,j+1} = & \zeta_{i,j} + \zeta_{i,j}^2 \frac{2C_{v,i,j}\Delta t}{\Delta z_0^2} (\zeta_{i+1,j} - 2\zeta_{i,j} + \zeta_{i-1,j}) \\ & + 2\zeta_{i,j}^2 \frac{\Delta t}{\Delta z_0^2} \left(\frac{dC_v}{d\zeta} \right)_{i,j} (\zeta_{i-1,j} - \zeta_{i,j})^2 \\ & - \zeta_{i,j}^2 \left(\frac{\Delta t}{\Delta z_0} \right) \frac{d}{d\zeta} (C_v m_v \gamma')_{i,j} (\zeta_{i-1,j} - \zeta_{i,j}) \quad (14) \end{aligned}$$

여기서 $\gamma' = (Gs - 1) \frac{\gamma_w}{f}$

$$m_v = 1/\zeta \frac{d\zeta}{dp}$$

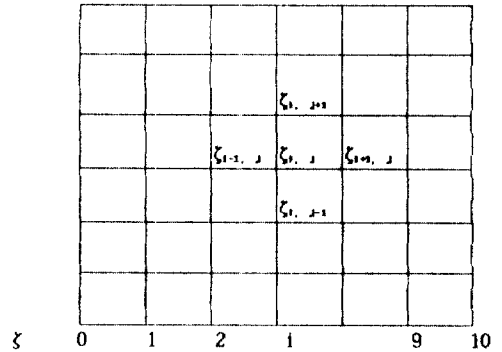
$$C_v = \frac{k}{m_v \gamma_w} = \frac{k}{\gamma_w} \zeta \frac{dp}{d\zeta}$$

차분방정식 (12)는 시간에 대해서 1차이고 공간에 대해서 2차인 식으로 나타난다. 시간에 대한 차분간격 Δt 는 전체시간 t 를 n 등분해서 t/n 로 하고 공간에 대한 차분간격 Δz_0 는 $t=0$ 인 때의 시료높이 z_0 를 m 개로 나누어서 z_0/m 로 해서 계산한다.

전체시간 $t=2$ 일이고 grid를 2000등분으로 나누어서 $\Delta t=0.001$, 전체길이를 1m로 하고 간격을 10등분으로 나누어서 $\Delta z_0=0.1$ 로 mesh를 구성하였

하부경계

상부경계



$t = 0$, 초기조건

그림 5. 유한차분 격자

다.

그림에서 $\zeta_{i,j}$ 는 $t=i\Delta t$, $z_0=j\Delta z_0$ 에서의 ζ 를 나타낸다.

$\alpha = \frac{(\Delta t)}{(\Delta z_0)^2}$, $\beta = \frac{\Delta t}{\Delta z_0}$ 로 각각 놓으면 $\alpha=0.1$, $\beta=0.01$ 가 되고 안정하게 수렴한다.

B. 초기조건

$t=0$ 일 때 압밀 시작 당시에는 시료 전체의 함수비가 균일하게 같으므로 $\zeta(i, 0)=1.0$ 으로 전체 층에 대해서 압밀비를 같게 놓는다.

C. 상부경계조건

상부의 경계면에서는 유효응력이 0인 상태로 압밀이 전 과정을 통해서 전혀 일어나지 않는 것으로 한다.

$$\zeta(i, N)=1.0$$

D. 하부경계조건

하부 불투수층에서의 경계조건은 그림 6에

$$\frac{dp}{dz_0} = \gamma'_0 \quad (13)$$

이고 $\frac{dp}{dz_0}$ 는 연쇄정리에 의해서

$$\frac{dp}{dz_0} = \frac{dp}{d\zeta} \frac{d\zeta}{dz_0} \quad (14)$$

그림 7에서 $f \cdot \log p$ 의 관계에서 $f = -7.3 - 3.1 \ln p$ 이므로

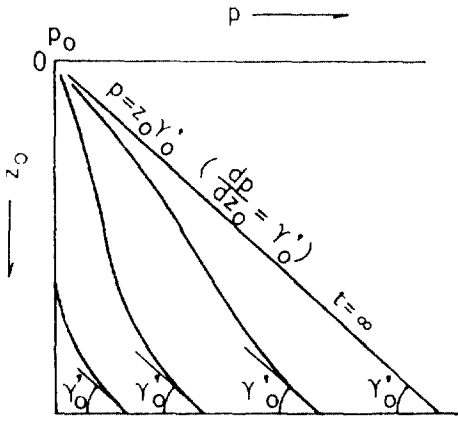


그림 6. 불투수층에서의 경계조건

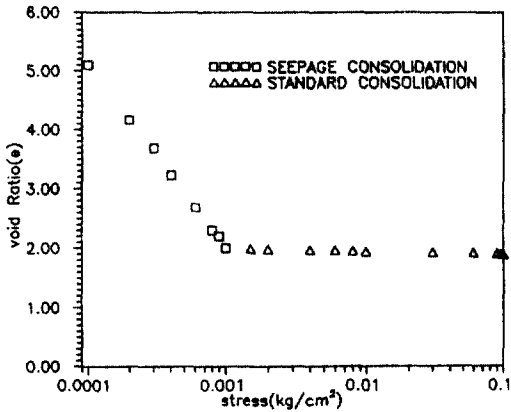


그림 7. 저응력 단계에서의 f-log p 곡선

$$\zeta = \frac{1}{f_0} (-7.3 - 3.1 \log p) \quad (15)$$

이다. 따라서

$$p = \exp \left[- \left(\frac{7.3 + \zeta f_0}{3.1} \right) \right] \quad (16)$$

이고 식 (16)로부터

$$\frac{dp}{d\zeta} = - \frac{f_0}{3.1} \exp \left[- \left(\frac{7.3 + \zeta f_0}{3.1} \right) \right] \quad (17)$$

로 나타낼 수 있다.

따라서 식 (14)은 식 (17)에 의해서

$$\frac{dp}{dz_0} = - \frac{f_0}{3.1} \exp \left[- \left(\frac{7.3 + \zeta f_0}{3.1} \right) \right] \frac{d\zeta}{dz_0} \quad (18)$$

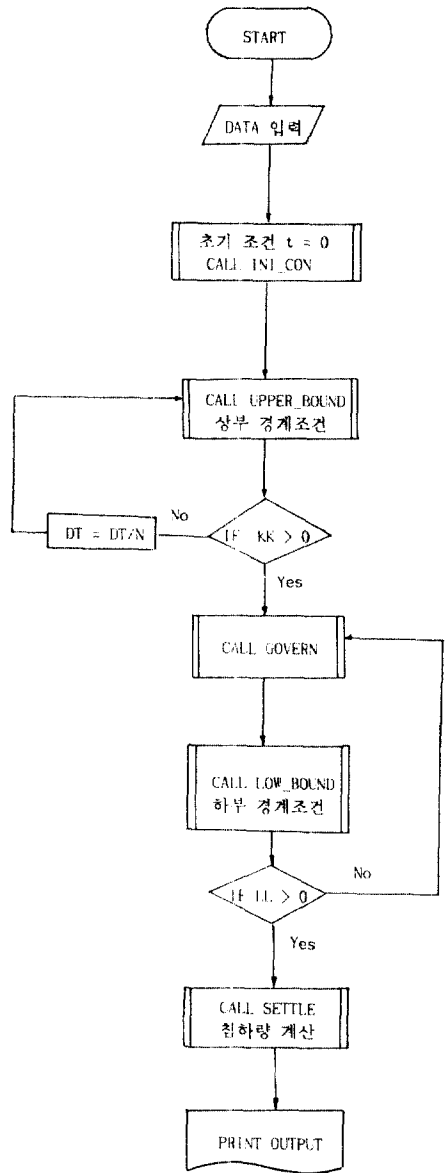


그림 8. FDM 해석 FLOW CHART

식 (18)과 (13)을 이용해서 경계조건을 구할 수 있다.

차분 방정식 (12)는 지배방정식과 경계조건, 초기 조건을 이용해서 다음의 흐름도를 이용해서 풀 수 있다. 흐름도는 다음 그림 8과 같이 나타낼 수 있다.

4.3 수치 해석 결과

초기 함수비 500%이고 단면 배수조건으로 유한

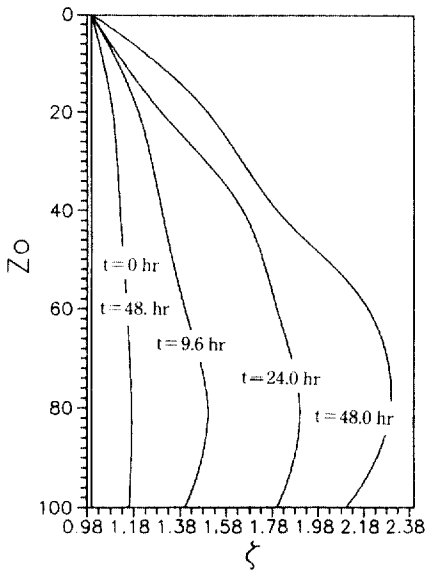


그림 9. Z_0 - ζ 곡선

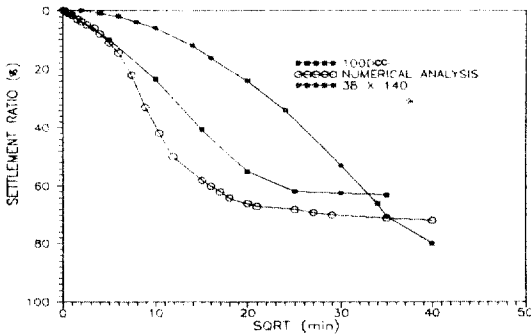


그림 10. 시간-침하비 곡선

차분에 의해 수치해석을 하였다. 시간 변화에 따른 압밀비의 변화를 원좌표 Z_0 에 대해 도시하면 그림 9와 같다. 시간이 경과함에 따라 시간 $t=0$ 일 때 $\zeta=1.0$ 에서 증가한다. 최종단계에서 $t=2$ 일이고 곡선은 시간이 증가함에 따라 포물선을 나타낸다.

시간에 따른 침하량을 나타낸 결과는 그림 10과 같다. 이 그림은 수치해석 결과와 1000 cc 메스실린더, 38 cm×140 cm 셀을 이용하여 침강시험을 실시한 결과에 대하여 최초 현탁액 높이에 대한 침하량을 나눈값을 침하비(Settlement ratio)로 하고 시간에 따라 나타낸 것이다. 결과를 보면 동일 함수비 500%에 대하여 30×140 셀에서는 침강단계가 나타나지만 1000 cc 메스실린더에서는 바로 자중압밀단계가 시작되었다. 이것은 1000 cc 메스실린더에 비해

표 2. 시험전후의 토성의 변화

구 분	Wn	LL	PI	Gs	# 200	USCS
시 험 전	500	64.30	34.34	2.71	98	CH
시 험 후	3*	81.3	77.24	2.72	100	CH
	9*	71.7	60.37	32.40	92	CH
	25*	57.9	31.23	2.70	97	CL

*숫자는 시료표면에서부터의 깊이(단위 cm)

30×140 셀이 높이가 훨씬 높으므로 침강이 일어난 후에 자중압밀이 시작되었지만 1000 cc 메스실린더에서는 바로 500%의 함수비에서 바로 자중압밀이 시작되었다. 수치해석 결과는 침강단계를 해석하지 않고 자중압밀 단계만 해석하였는데 1000 cc 메스실린더의 경우와 비교적 일치하였다.

또한, 층두께가 클수록 자중 압밀이 종료될 때까지 시간이 크게 소요되고 자중압밀의 압밀량이 크며 층두께가 얇을 수록 자중압밀이 빨리 끝나며 자중압밀량이 작다는 것을 알 수 있었다. 이는 압밀계수 C_v 가 압밀층 두께(압밀층압력)에 따라서 일정치 않다는 사실을 나타내는 것이다. 결국, 셀의 크기를 크게 할 경우는 이러한 점을 고려하여 해석해야 된다는 사실을 알 수 있다.

5. 실험 및 분석

5.1 토성 변화

표 2과 그림 11에서 시험전후의 토성을 심도별로 나타내었다.

시험 전에는 전체가 균질한 상태에 있던 시료가 시험 후에 표 5-1과 같이 층별로 다른 토성값을 나타내었다. 토성값은 층별로 균질하지 않고 아래로 갈수록 비중이 작은 입자들이 분포한다. 비중이 큰 점토가 비중이 작은 실트보다 위쪽에 분포한 이유는 입자의 체적이 Clay보다 Silt가 $1 \sim 1.25 \times 10^6$ 배 정도 크므로 입자의 침강은 입자상호간의 영향 때문에 Stoke의 법칙을 완전히 따르지는 않지만 거시적으로는 직경이 큰 입자가 먼저 가라앉고 작은 입자가 나중에 가라앉는다. 따라서 바닥에 실트가 먼저 쌓이고 입자의 크기가 적은 clay가 나중에 가라앉아서 층별로 비중이 다른 분포를 관찰할 수 있다.^[2,3,5]

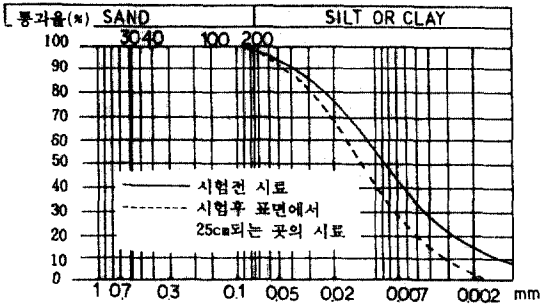


그림 11. 시험전 시료와 시험후 시료의 입도분포

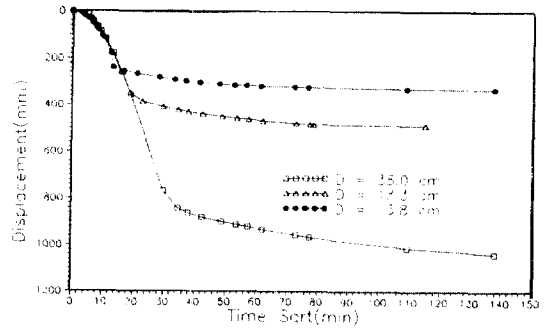


그림 13. 높이/직경 비가 일정할 때 침하의 거동

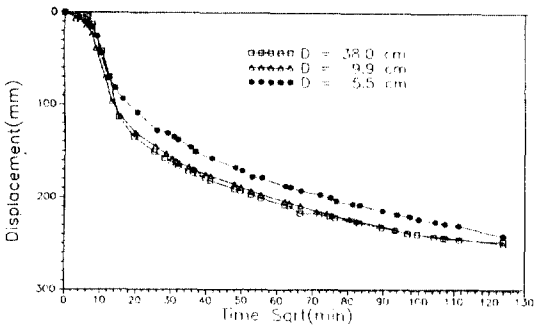


그림 12. 직경의 변화에 따른 자중압밀 거동

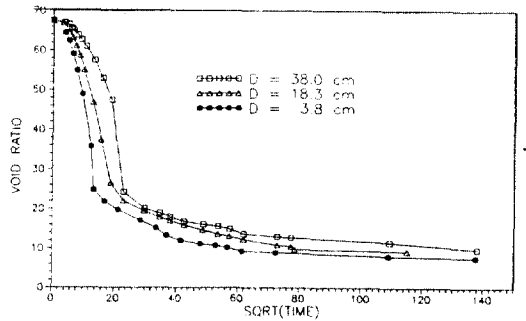


그림 14. 높이/직경 비가 일정할 때 간극비의 변화

5.2 Scale 변화에 따른 자중압밀 거동의 변화

5.2.1 직경을 변화시켰을 때의 압밀거동

직경의 변화에 따른 침강 및 자중압밀 거동을 알아보기 위하여 함수비를 500%, 높이를 44 cm로 일정하게 유지시키고 직경을 38 cm, 9.9 cm, 5.5 cm로 변화시켜 직경의 변화에 따른 자중압밀의 거동 변화를 알아보는 실험을 하였다. 결과는 그림 12와 같이 최종침하량이 각각 24.8 cm, 24.9 cm, 23.7 cm으로 나왔다. 그림에서 보이는 바와 같이 자중압밀이 시작되는 변곡점도 대략 400분으로 일정하게 나왔다. 이 결과에서 자중압밀의 거동은 함수비와 투기된 높이가 같으면 직경의 변화에 영향은 받지않는 것을 알 수있다.

5.2.2 높이 대 직경비를 일정하게 했을 때의 압밀거동

높이/직경의 비($H/D=3.2$)를 일정하게 하였을 때 직경의 변화에 따른 거동을 알아보기 위해 함수비를 2500%로 일정하게 하고 시간에 따른 침하 거동을 관찰하였다. 결과는 그림 13과 같이 나왔다. 직경을 38 cm, 18.3 cm, 12.0 cm으로 변화시켰을 때 최종침하량은 높이가 높을수록 커지는 추세를 보였다. 시

간에 따른 간극비의 변화는 그림 14에 보인 바와 같이 침하량에서 나타나는 것보다 근소한 차이를 나타내고 있다. 자중압밀 시작 시간도 대략 400분으로 거의 일정하다. 간극비의 변화는 높이/직경의 비가 같으면 같은 거동을 보인다는 것을 알 수 있다. 또한 자중압밀 시작시간도 Scale변화에 별 영향을 받지 않는다.

5.3 함수비의 변화에 따른 자중압밀거동의 변화

준설토에 대한 압밀시험을 실시한 유건선²⁾은 압밀 완료시의 함수비가 150~200%였는데, 본 실험 결과에서는 약 185~369%이다. 김수삼¹⁾은 반월지역 점성토에 대하여 함수비 1000% 근처에서 간접침강이 일어난다고 발표하였으나, 본 실험에서는 예비 실험 결과 500% 부근에서 자중압밀이 시작되었고 압밀거동을 관찰하기가 가장 좋은 형태로 나타났으므로 본 연구의 대형 Cell에서는 500% 부근의 함수비를 택했다.

직경 38 cm, 높이 1216 cm의 동일한 체적을 갖는 셀에 함수비를 약 500, 1000, 2500%로 변화시켜

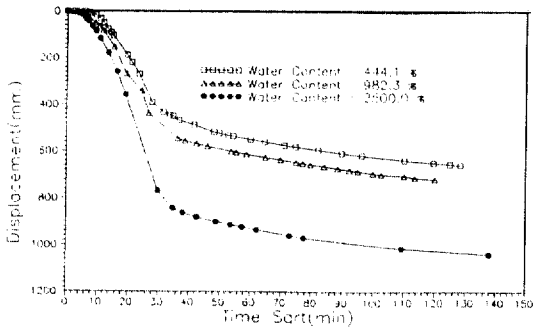


그림 15. 함수비 변화에 따른 침하의 거동

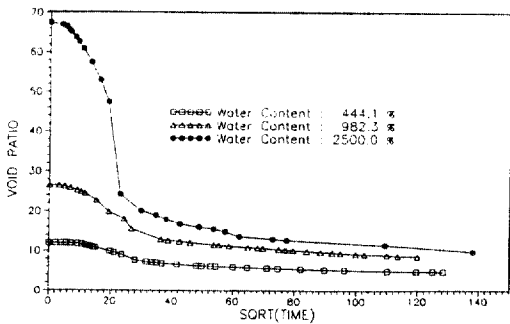


그림 16. 높이/직경 비가 일정할 때 침하의 거동

실험한 결과 침하곡선은 그림 15같이 나왔다. 500%에서는 압밀종료시 총침하량이 65.3 cm, 1000%에서는 74.2 cm, 2500%에서는 106 cm로 함수비가 높을수록 침하량이 커지는 것을 볼 수 있다. 그림 16에서와 같이 함수비에 따른 간극비의 변화는 4.6, 8.5, 10.2로 함수비가 커질수록 최종간극비는 커지지만 침하량에 비해 최종 간극비는 크게 작아지지 않는 것을 알 수 있다.

5.4 간극비와 수중단위중량과의 관계

수중단위중량 γ_{sub} 의 분포는 아래로 갈수록 커지므로 유효응력의 개념에서 위에서 작용하는 상재하중은 증가한다. 이에 따라 압밀하중이 더 커져서 압밀이 더 진행되므로 흙의 압축성이 아래가 더 작아진다. 그런데, 흙의 압축성은 압축지수 C_c 에 비해 하므로 아래로 내려 갈수록 작아진다. 그림 17에서 액성한계 L.L.와 C_c 는 깊이에 반비례함을 알 수 있다.

5.5 간극비와 하중과의 관계

5.5.1 침투압밀과 저응력 재하압밀

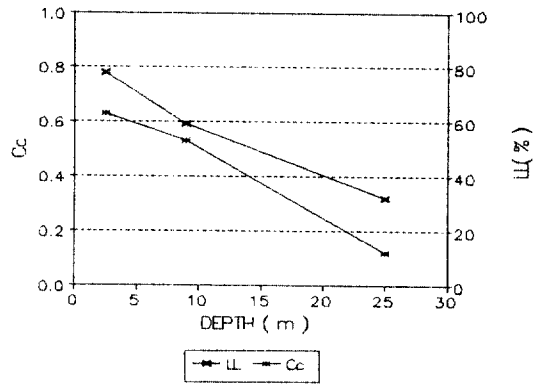


그림 17. 깊이에 따른 C_c , L.L.

표 3. 층별 압밀시험결과

하 중 단 계		심도	P_c	C_c
표준 압밀	상 층	3	0	0.65
	중 층	9	0	0.52
	하 층	25	0.11	0.32
재 하	저응력 재하	전체	0.16	0.16

표 3은 자중압밀과 침투압밀, 작은 응력재하압밀이 완료된 후 시료를 3층으로 나누어 각각에 대하여 표준압밀실험을 한 결과이다.

그림 18의 침투압과 저응력하에서의 $e-\log P$ 곡선은 하중단계를 침투압으로 조정해서 저응력보다 작은 하중에서부터 연속적으로 변화시켰다. C_c 는 침투압밀에서 0.34, 저응력 재하압밀은 0.16으로 하중 증가율이 같을 때 저응력보다 침투압밀 쪽이 간극비 변화량이 더 크게 나왔다. 압축지수 C_c 는 정규압밀에서 하중에 대한 간극비의 변화를 나타내는 값이므로 C_c 가 크면 압밀효과가 더 크다는 것을 알 수 있다.

5.5.2 저응력 재하압밀과 표준압밀

그림 19는 저응력재하에서 표준압밀로 이어지는 실험이다. 층별로 표준압밀실험을 한 결과 상층으로 갈수록 압밀이 덜 진행된 상태이므로 C_c 가 커진다. 표준압밀실험에서 사용하는 시료는 크기가 직경 6 cm, 높이 2 cm이고 샘플링하는 과정에서 교란된 상태에 있으므로 그림 19에 나타난 바와 같이 정규압밀 곡선을 따르고 있다.

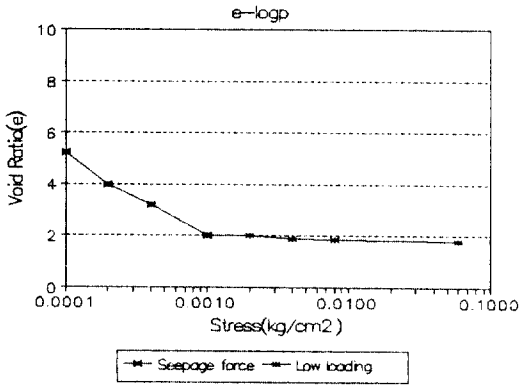


그림 18. 침투압밀과 저응력재하압밀에서의 압밀곡선

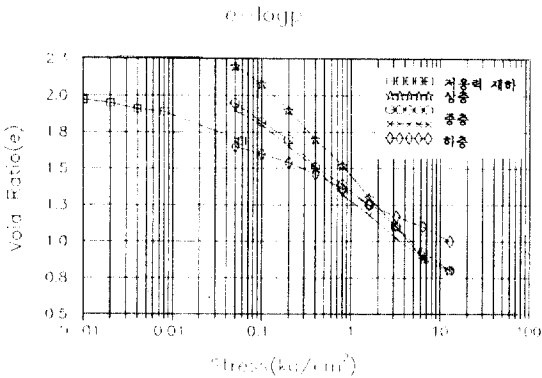


그림 19. 저응력 및 표준압밀에서의 e-log P 곡선

하중범위 0.05~0.06 kg/cm²에서 불연속점이 발생한 것을 알 수 있다. 저응력재하실험은 대형 Cell에서 행해졌으므로 심도에 따라 자중에 의한 유효상재하중이 존재하지만 표준압밀은 구속력으로 작용하는 유효상재하중이 제거된 상태다. 표준압밀실험을 하기 위해 시료를 성형했을 때 상재하중의 제거로 부피가 팽창해서 초기간극비가 커진 상태에서 큰 압축성을 보인 것이다. 침투압밀 과정에서 크게 변화하고 저응력과 표준압밀단계에서는 앞 단계에 비해서 작은 변형을 보이고 있다. 이 결과로부터 침투압밀 과정도 자중압밀의 경우처럼 간극비의 변화가 크게 일어나므로 유한 변형이론을 적용해서 해석할 수 있다. 저응력재하단계에서 부터는 그림 19에서 보는 바와 같이 간극비의 변화가 작은 미소변형이므로 표준압밀의 적용이 가능하다는 것을 알 수 있다. 저응력 단계에서 표준압밀로 가는 점에서 불연속이

긴 하지만 비슷한 기울기를 가지고 감소하는 경향을 보여주고 있다.

6. 결 론

광양만 매립지역의 준설토를 채취하여 연약점토의 압밀특성을 알아보았다. 또한 같은 높이에서 직경을 변화시켰을 때의 압밀거동의 변화, 높이와 직경의 비를 변화시켰을 때의 압밀거동의 변화, 함수비를 달리했을 때의 압밀거동의 변화 등을 알아보고 수치해석을 하여 압밀비의 변화를 예측한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 준설토의 자중, 침투, 재하압밀 과정에서 하중이 저응력에서 높은 응력으로 갈 때 시간에 따라 간극비의 변화는 선형관계를 나타내고 있다.

(2) 침강이 완료된 후 시료의 하부로 갈수록 실트의 비율이 커지고 상부로 갈수록 점토가 많이 함유되어 비균질한 층을 형성하므로 준설토는 다층토로 해석해야 한다. 또한, 압밀이 완료된 후 압축지수 C_c 는 지층하부로 갈수록 작아지는 것을 볼 수 있다.

(3) 동일한 함수비에서 직경비가 같으면 시간의 변화에 따른 간극비 변화의 거동은 높이에 관계없이 일정하다.

(4) 침강거동은 직경의 변화에 따른 영향을 별로 받지않고 높이와 직경의 비에 영향을 많이 받는다.

(5) 수치해석결과 압밀거동은 자중압밀이 바로 시작되는 함수비에서의 시험결과와 같게 나왔다. 수치해석에서는 침강거동이 고려되어 있지 않으므로 저함수비에서의 거동과 더 잘 맞는 것을 알 수 있다.

앞으로의 연구 방향은 압밀이 진행됨에 따라 흙 내부의 강도 변화를 예측하고 압밀과 강도 증가와의 함수관계를 규명하는 것이 필요하며 시료의 농도에 따른 체적변화율도 연구되어 현장에서 활용가능한 준설토의 압밀이론을 제시하는 것이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 1993년도 서울시립대학교 학술연구 지원비에 의하여 수행되었으며 지원해주신 학교 당국에 사의를 표합니다.

참고문헌

1. 김수삼, "한국서해안(반월지구) 해성토의 침강에 관한 실험적 연구", 박사학위 논문, 1983. 12.
2. 정인준, 유건선, "준설토의 기본적 실험연구", *대한토목학회지*, 제 27권, 제 5호, 1979. 10, pp. 55-64.
3. E.C. McRoberts and J.F. Nixon, "A Theory of soil Sedimentation", *Can. Geotech. J.*, Vol. 13, 1976, pp. 294-310.
4. Goro Imai, Kazuo Tsuruya and Kouichiro Yano, "A Treatment of Salinity in Water Content Determination of Very Soft Clays", *Soil & Foundations*, Vol. 19, No. 3, 1979. 9, pp. 84-89.
5. Yasufumi Umehara and Kouki Zen, "Consolidation Characteristics of Dredged Marine Sediments with High Water Content", *Soil & Foundations*, Vol. 22, No. 2, 1982. 6, pp. 40-54.
6. S.L. Lee, G.P. Karunaratne, K.Y. Yong, Y.K. Chow and S.H. Chew, "Consolidation of Dredged Clay in Reclamations", *Soil & Foundations*, Vol. 28, No. 2, 1988. 6, pp. 1-13.
7. Goro Imai, "Experimental Studies on Sedimentation Mechanism and Sediment Formation of Clay Materials", *Soil & Foundations*, Vol. 21, No. 1, 1981. 3, pp. 7-20.
8. Thim-Soon Tan and Ronald F. Scott, "Finite Strain Consolidation-A Study of Convection", *Soils & Foundations*, Vol. 28, No. 3, 1988. 9, pp. 64-74.
9. J.D. Brown and M.A. Rashid, "Geotechnical Properties of Nearshore Sediments of Canso Strait, Nova Scotia", *Can. Geotech. J.*, Vol. 12, 1975, pp. 44-57.
10. S.D. Koppula and N.R. Morgenstern, "On the Consolidation of Sedimenting Clays", *Can. Geotech. J.*, Vol. 19, 1982, pp. 260-268.
11. K. Been and G.C. Sills, "Self-Weight Consolidation of Soft Soils: An Experimental and Theoretical Study", *Geotechnique*, Vol. 31, No. 4, 1981, pp. 519-535.
12. M. Kyama, "Settlement of the Reclaimed Land at the Coastal Area", *Geo-Coast '91*, 3-6, 1991. 9, pp. 207-212.
13. Monte, J.L. and Kriezsek, R.J., "One Dimensional Mathematical Model for Large Strain Consolidation," *Geotechnique*, Vol. 26, No. 3, pp. 495-510, 1976.
14. Goro Imai, "Settling Behavior of Clay Suspension", *Soil & Foundations*, Vol. 20, No. 2, 1980. 6, pp. 61-77.
15. Kuantsai Lee and G.C. Sills, "The Consolidation of a Soil Stratum, Including Self-Weight Effects and Large Strains", *Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 5, 1981, pp. 405-428.
(接受: 1994. 2. 21)