

3. 준설·매립점토의 자중압밀 해석

이 송, 양태선, 황규호

준설매립점토의 자중압밀 해석

이 송 (서울시립대학교 토목공학과 부교수)

양태선 (서울시립대학교 토목공학과 박사과정)

황규호 (서울시립대학교 토목공학과 박사과정)

목 차

1. 서 론
 2. 본 론
 - 2.1 침강이론
 - 2.2 자중압밀이론
 - 2.3 침투압밀
 - 2.4 수치해석
 3. 실험장치및 방법
 - 3.1 실험방법
 - 3.2 실험장치
 4. 실험결과의 고찰
 - 4.1 수치해석 결과
 - 4.2 토성변화
 - 4.3 간극비와 수중단위중량 관계
 - 4.4 간극비와 하중 관계
 5. 결 론
- 참고문헌

1. 서 론

근래에 들어 준설토를 이용한 매립공사가 활발히 진행되고 있다. 군장 공업단지, 울산, 아산 공업단지, 광양 콘테이너 부두, 마산, 포항 등이 그 예이다. 준설토 연약점토는 해안 어디서나 구할 수 있으므로 물량확보가 쉽고 경제적인 재료다. 해성점토의 특징으로는 먼저 액성한계나 소성한계가 높고 함수비가 커서 초연약한 상태에 있어 큰 압축성을 가지며 압축과화가 장기간에 걸쳐 진행되고 투기시 오염확산이 생기기 쉽다. 1), 2), 4), 5), 7), 10) 서구나 일본에선 이미 초연약 해성점토에 관한 연구가 많이 진행되고 있지만 우리나라에서는 이에 대한 연구가 이제 시작단계에 들어선 실정이다.

준설토는 고함수비의 연약한 상태에 있기때문에 운송은 대개 펌프로 이루어진다. 이 때 펌프에서 나온 준설토는 바로 침강되는 것이 아니라 확산되어 퍼져나가 인근 해역을 오염시키므로 이를 방지하기 위해 Pond를 설치해야 하는데 Pond의 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 문제이다. 그러므로, 침강단계와 자중압밀과정에 관한 연구는 준설토 매립공사의 공법 선정이나 공사기간, 준설토의 투입량 등을 결정하는 중요한 이론적 근거가 될 것이다.

자중압밀에 관한 이론적인 연구를 최초로 시행한 Mikasa나 Gibson의 연구는 서로 독자적으로 이루어졌지만 거의 차이가 없다는 것이 여러 사람들에게 의해 밝혀졌다. 점토의 보편적인 압밀해석 이론인 Terzaghi의 이론에서는 투수계수나 압밀계수를 상수로 하고 체적변화 계수를 일정한 비로 증가한다고 가정한다. 그런데, 초연약 점토에서는 투수계수나 압밀계수, 체적변화계수 등이 비선형이므로 이 가정에 모순이 생겨 그대로 적용할 수 없다. 이런 Terzaghi의 압밀이론의 모순을 수정, 보완한 것이 Mikasa와 Gibson의 이론이다. 1), 2), 3), 4), 6), 8), 9)

본 논문의 목적은 이러한 연약점토의 해석을 통하여 기본적인 압밀특성을 규명하는데 있다.

2. 본 론

2.1 침강이론

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

Imai에 의하면 침강의 형태는 4가지로 구분된다. 먼저 분산침강은 흙의 농도가 낮아서 응집이 일어나지 않아 서로 영향을 미치지 않고 자유롭게 침강한다. 초기 함수비가 2000% 이상인 고함수비에서 이와같은 현상을 관찰할 수있다. 응집침강은 흙입자들이 모이고 서로 다른 크기의 floc을 형성하는데 floc의 크기가 큰 것이 먼저 가라앉고 어떤 형태의 계면도 존재하지 않는다. 그리고, 구간침강은 <그림 1>에서와 같이 침강곡선상에서 응집단계와 침강단계, 자중압밀단계가 명확히 구분된다. ^{2), 5)}

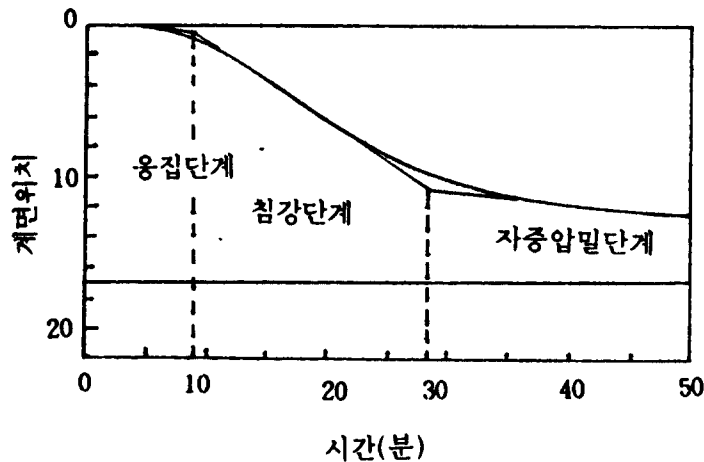


그림 1. 구간침강의 전형적인 침강곡선

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, Monte와 Kriezek, Lin과 Lohnes, Lee와 Sills등)과 침강이 끝난 후에 자중압밀과정을 관찰해서 거동을 밝히려는 방향(Mikasa, Gibson, Monte와 Kriezek, Koppula와 Morgenstern 등)으로 이루어졌다. ^{3), 4), 6), 8), 9), 12)}

고함수비의 초연약점토는 외부에서 하중이 가해지지 않더라도 자중에 의해 압밀이 발생한다. 자중압밀은 변형이 크게 일어나므로 미소변형을 기본 가정으로하는 Terzaghi의 압밀이론은 자중압밀을 해석하기에 적절하지 못하다. 특히, 자중의 영향을 무시하고, 체적변화계수와 투수계수 압밀계수를 일정하다고 가정하는 것은 보통의 연약점토에서는 실용적으로 이용하는데 별다른 문제가 발생하지 않지만 초연약점토에선 흙자체의 무게가 압밀의 원인이 되기때문에 반드시 고려되어야할 사항이다. 이러한 이론의 모순을 보완하여 Mikasa, Gibson의 이론이 연구되었다.

2.2.1 Mikasa의 압밀이론

이 이론은 Terzaghi의 가정중에서 두가지 항목을 추가해서 연약점토를 해석할 때 모순이 되는 가정들을 완화시켰다. 먼저, Terzaghi의 가정은 (1)점토는 균질하다. (2)점토는 완전포화되어 있다. (3)토립자의 압축은 1차원이다. (4)토립자와 물은 비압축성이다. (5)Darcy의 법칙이 성립한다. (6), (8), (9), (12)

그리고, 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 서는 압밀비, z_0 는 원시좌표, C_v 는 압밀계수, m_v 는 체적변화계수, γ' 은 수중단위중량

2.2.2 Gibson의 압밀이론

이 이론은 운동량 보존의 법칙과 연속방정식을 적용하여 다음과 같이 유도된다. ^{5), 8), 9), 12)}

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

여기서

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

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

Lanrangian 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 이론전개도 거의 비슷하지만 Mikasa는 초기함수비가 자중압밀과정에 영향을 미치고 Gibson은 초기 상태에 제한을 두지 않는 차이점이 있다.

그 외의 자중압밀 해석이론으로는 Lin & Lohnes(1984)의 방법을 이용해서 압밀계수(C_r)를 구한다. <그림 2>의 간극비 분포곡선에서 기울기 기를 구하면 0.022이다. 함수비 500%일 때의 농도는 186.4g/l이므로 초기높이 Z_1 은 $H_i \cdot C_i / \gamma G_s$ 의 관계에 의해 8.12cm이다. 그리고, 유효높이 Z_0 은 $Z_0 = Z_1 + (e_1 - e_0) / \gamma$ 에서 16.0cm이다. ⁹⁾

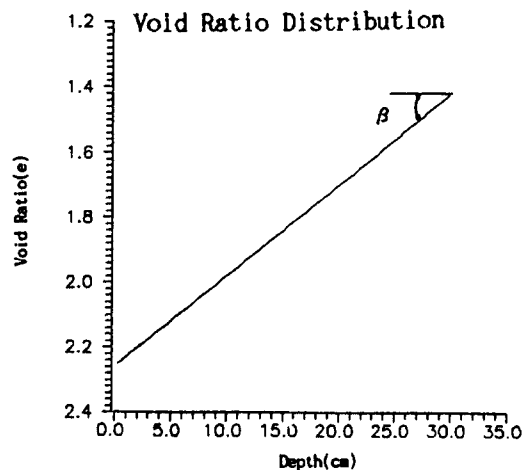


그림2. 깊이에따른 간극비의 분포

또, 이론적인 100% 압밀시의 시료높이 $H_{100} = (1 + e_0)z_1 - (1/2)gz_1^2$ 인 관계에서 23cm을 얻었다. 압밀시험종료 시의 높이가 28cm이므로 현재의 압밀도는 시험결과를 기준으로 94%이다.

$r = z_1/z_0$ 에서 $r = (8.12 / 16.2) = 0.501$ 이고 이 값을 이용해서 <그림 3>의 Lee와 Sills의 해를 이용해서 Slope ratio R을 구하면 $R = 1.236$ 이고 <그림 4>의 시간 침강곡선으로부터 t_{90} 와 압밀도 90%일 때의 침하량, 압밀계수를 구하면 $t_{90} = (65.0 - 1.8)^2 = 3994.24$ min이고, 압밀도 90%일 때의 침하량은 84.1cm, $C_f = T'Z_0^2/t_{90}$ 에서 $C_f = (0.792 \times 16.2^2)/3994.24 = 0.052\text{cm}^2/\text{min}$ 이다.

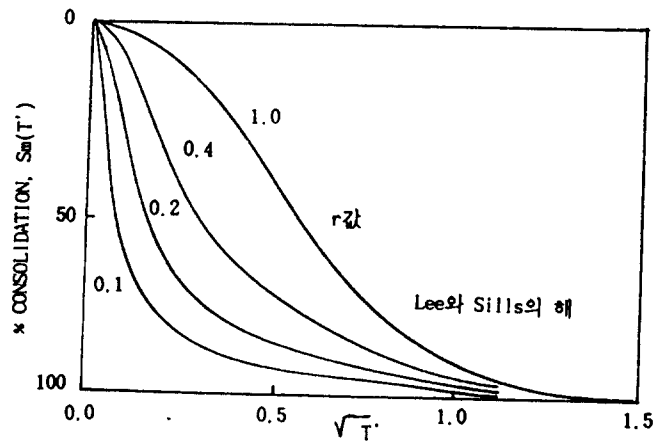


그림 3. 이론적인 해로 구한 S_m 과 $\sqrt{T'}$ 곡선

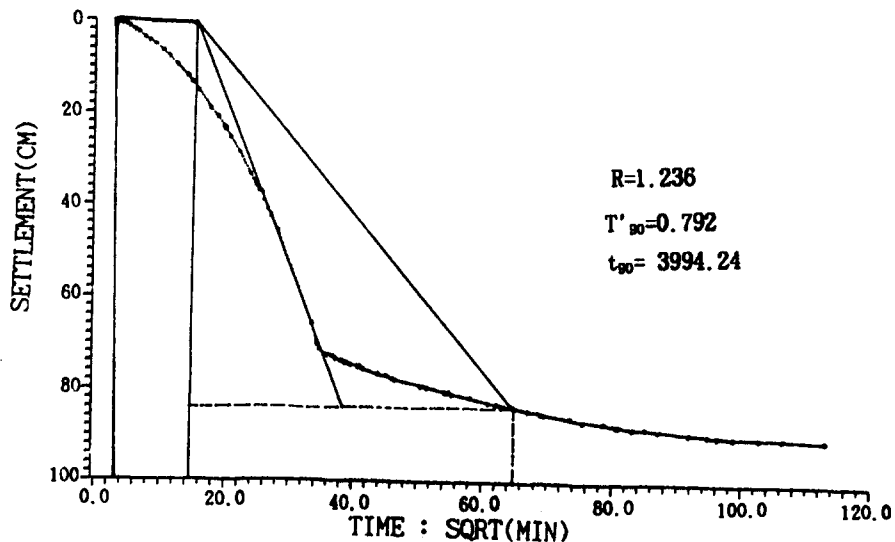


그림 4. 침강곡선에서 구한 t_{90}

2.3 침투 압밀

침투 압밀은 토립자 자체의 체적력 (Body Force)이 압밀응력이 되어 압밀되는데 이를 침투압밀이라 한다. 요소 내에 작용하는 침투 압밀응력은 다음 <그림 5>과 같다.

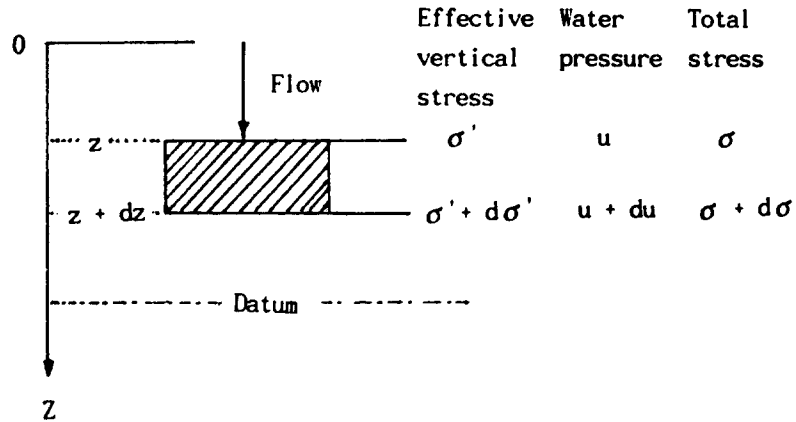


그림 5. 요소에 작용하는 침투압밀

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

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

유효응력의 변화는 다음과 같이 구할 수 있다.

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

Z면에서의 전수두는 <그림 5>에서

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

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

깊이에 따른 유효응력의 변화는 다음과 같다.

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

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

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

따라서 비배수상태에서는 침투력 j 가 0이므로 깊이에 따른 유효응력의 증가는 식 (11)에서 γ_s 를 적분해서 구하고, 하향배수조건에서는 $j + \gamma_s$ 을 깊이에 따라 적분해서 구한다. 이렇게 구한 하중이 압밀을 일으키는 요인이 된다.

2.4 수치해석

2.4.1 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 서는 압밀비, z_0 는 원시좌표, C_v 는 압밀계수, m_v 는 체적변화계수, γ' 는 수증단위중량

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

2.4.2 차분방정식

A. 지배방정식

식(1)을 Explicit로 유도한 식은

$$\begin{aligned} \zeta_{i,j+1} = & \zeta_{i,j} + \zeta_{i,j}^2 \frac{2C_{v,i,j} \Delta t}{\Delta z_0^2} (\zeta_{i+1,j} - 2\zeta_{i,j} + \zeta_{i-1,j}) + 2\zeta_{i,j}^2 \frac{\Delta t}{\Delta z_0^2} \\ & \left(\frac{dC_v}{d\zeta} \zeta \right)_{i,j} (\zeta_{i+1,j} - \zeta_{i,j})^2 - \zeta_{i,j}^2 \left(\frac{\Delta t}{\Delta z_0} \right) \frac{d}{d\zeta} (C_v m_v \gamma')_{i,j} \\ & (\zeta_{i+1,j} - \zeta_{i,j}) \end{aligned} \quad (12)$$

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

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

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

차분방정식 (12)는 시간에 대해서 1차이고 공간에 대해서 2차인 식으로 나타난다. 시간에 대한 차분간격 Δt 는 전체시간 t 를 n 등분해서 t/n 으로 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 1m로하고 간격을 10등분으로 나누어서 $\Delta z_0 = 0.1$ 로 mesh를 구성하였다.

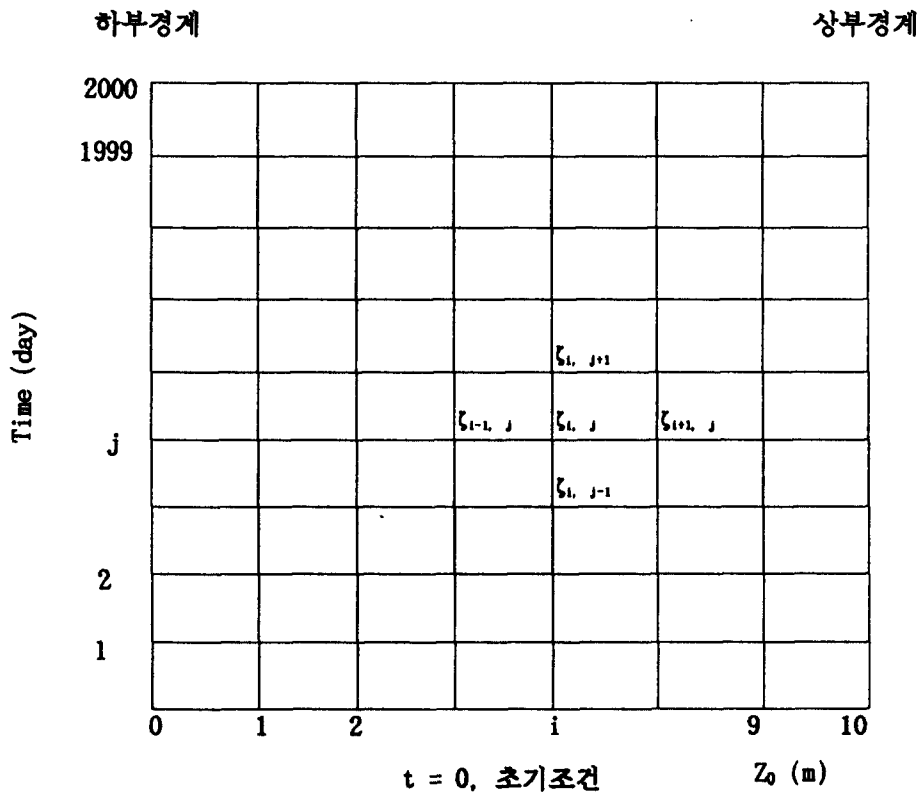


그림 6. 유한차분 격자

그림에서 $\xi_{i,j}$ 는 $t = i\Delta t$, $z_0 = j\Delta z_0$ 에서의 서를 나타낸다.

$$\alpha = \frac{(\Delta t)}{(\Delta z_0)^2}, \quad \beta = \frac{\Delta t}{\Delta z_0} \quad \text{로 각각 놓으면}$$

$\alpha = 0.1, \quad \beta = 0.01$ 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 7>에서 $\frac{dp}{dz_0} = \gamma_0'$ (13)

이고 $\frac{dp}{dz_0}$ 는 Chain rule에 의해서

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

<그림 8>에서 $f - \log p$ 의 관계에서 $f = -7.3 - 3.1 \ln p$ 이므로

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

이다.

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

이고

식 (16)로 부터 $\frac{dp}{d\zeta} = -\frac{f_0}{3.1} \exp\left(-\frac{7.3 + \zeta f_0}{3.1}\right)$ (17)

로 나타낼 수있다.

따라서 식 (14)은 식 (17)에 의해서

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

식 (18)과 (13)을 이용해서 경계조건을 구할 수있다.

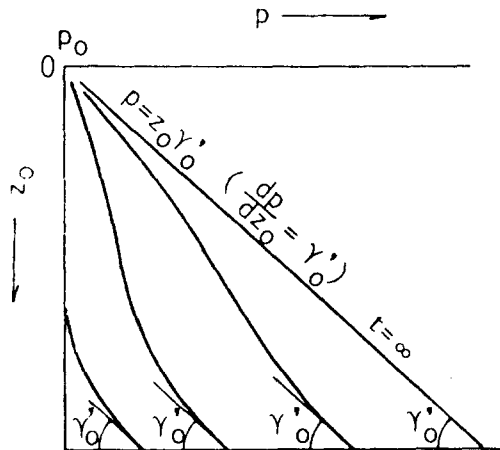


그림 7. 불투수층에서의 경계조건

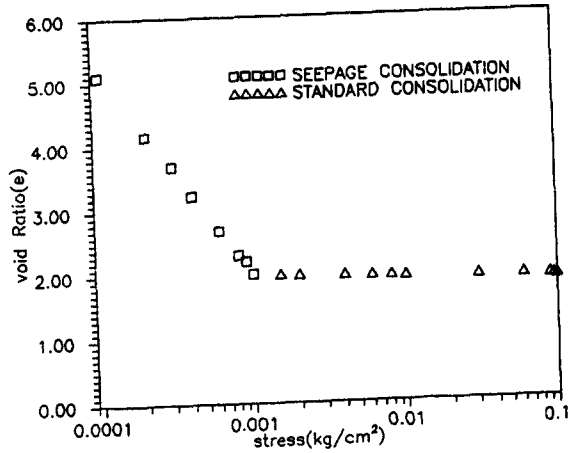


그림 8. 저응력 단계에서의 f-log p 곡선

차분 방정식 (12)는 지배방정식과 경계조건, 초기조건을 이용해서 다음의 flow chart를 이용해서 풀 수있다. flow chart는 다음 <그림 9>와 같이 나타낼 수있다.

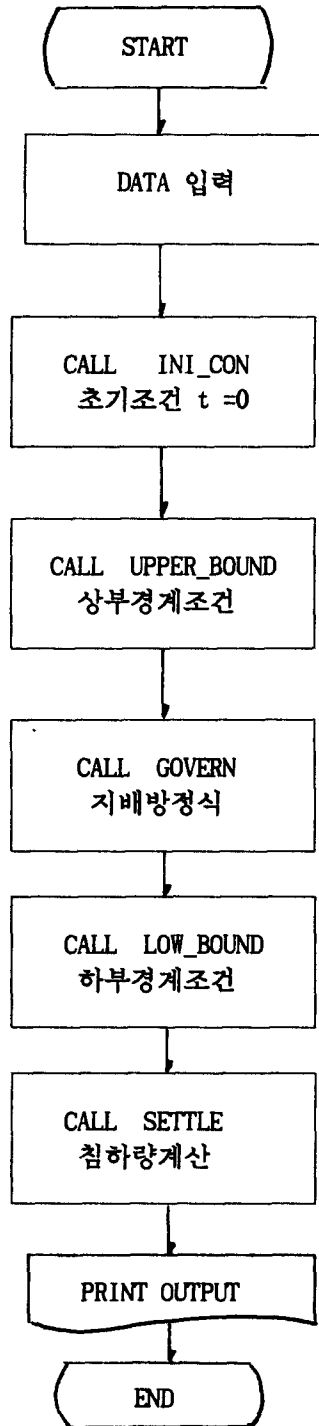


그림 9. FDM 해석 FLOW CHART

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험 방법

시료는 전남 광양 컨테이너 부두 투기장에서 평균해수면 보다 4.0m아래 되는 곳의 준설토와 해수를 채취해서 실험실로 운반했다. 예비실험으로 200% - 1500%의 범위에서 함수비를 변화시켜 침강실험을 하여 침강과 자중압밀의 경계가 가장 잘 나타나는 함수비 500%를 본 실험의 함수비로 이용했다.

시료는 해성점토이므로 염분이 많이 용해되어 있어서 해성점토를 노건조해서 얻은 함수비는 염분이 흙 속에 포함되어있어 실제 값보다 적게 나온다. 그러므로 바닷물 속에 포함되어있는 염분의 농도를 측정해서 진함수비(True water content)로 보정해 주어야한다. 보정정수로 염분비를 쓰는데 진함수비를 구하는 것과 같은 요령으로 구한다. ³⁾ 염분비는 다음 식으로 구하고

$$\beta (\text{염분비}) = \frac{W_c(\text{소금의 무게})}{W_w(\text{증류수의 무게})} \quad (18)$$

기에 의해서 진함수비 W는

$$W = \frac{1 + \beta}{1 - \beta W_n} W_n \quad (19)$$

W : 염분을 보정한 함수비

W_n : 염분을 보정하지 않은 자연 함수비

제조하려고 하는 함수비를 W라면 이것을 만들기 위해 필요한 자연 함수비 W_n은

$$W_n = \frac{W}{\beta W + 1 + \beta} \quad (20)$$

이다.

기의 값은 다음 그림에서 바닷물의 비중을 이용해서도 구할 수있다. 실험결과 기 = 0.043를 얻었다. 염분비를 구하는 또 하나의 방법은 해수의 비중을 구해 아래의 그래프에서 기를 구하는 것이다. G_r(바닷물의 비중) = 1.03이므로 <그림 10>로 부터 기는 0.044로 거의 같은 값을 얻었다.

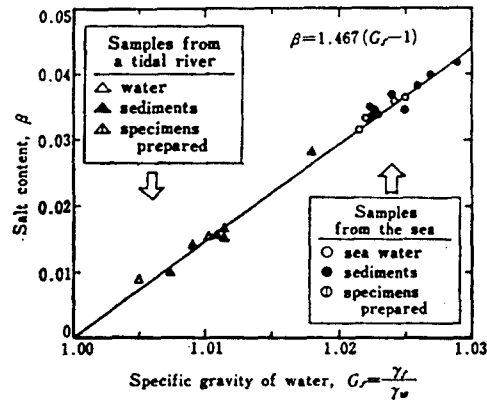


그림 10. 비중과 염분비의 관계 ²⁾

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

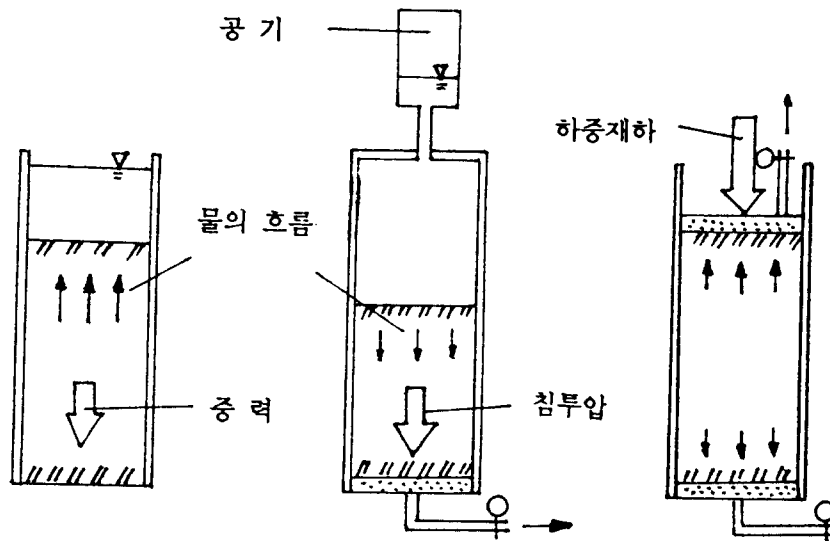
<표 1> 시험방법별 소요기간 및 응력조건

단 계	침강/ 자중	침투 압밀	저응력재하압밀	표준압밀
기 간	11일	7 일	4단계(각 단계 3일)	7 일

먼저 침강은 자연건조시킨 흙을 분쇄하여 #60의 체로 친 시료를 함수비 500%의 혼합액(점토 + 바닷물)으로 만들어 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 0.1kg/cm^2 이하의 범위를 갖는 응력으로 재하하는 것을 가리킨다. 침투압밀로 강도가 증진되면 시료표면에 하중재하판을 얹고 실험하중을 올려 저응력으로 압밀시킨다. 응력은 $0.005, 0.01, 0.02, 0.04, 0.08\text{kg/cm}^2$ 의 순으로 증가시키면서 재하한다. 하중재하 조건을 도시하면 <그림 11>과 같다.



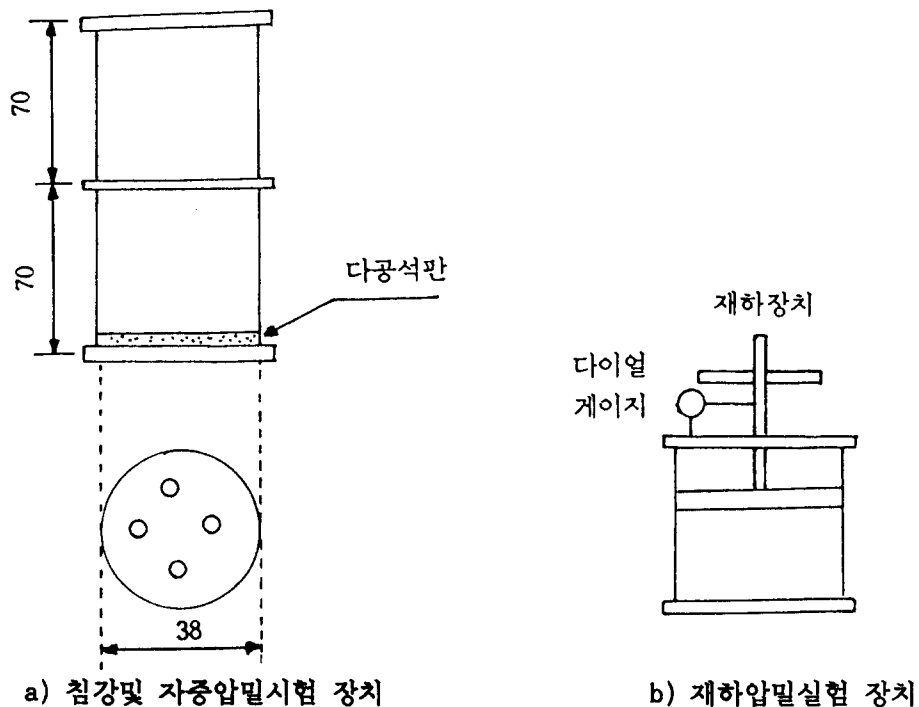
a) 자중에 의한 압밀 b) 침투압에 의한 압밀 c) 저응력 재하에 의한 압밀

그림 11. 하중재하 조건

재하응력의 범위는 저응력 범위와의 연관성을 찾기위해 $0.05\text{kg/cm}^2 - 12.8\text{kg/cm}^2$ 로 하여 전 단계의 실험결과들과 선형성을 갖는지를 알아보고 시료는 저응력재하가 끝난 시료를 심도별로 채취해서 동일한 조건하에서 토성 실험을 한다.

3.2 실험 장치

<그림 12>는 자중압밀실험 장치를 나타낸 것이다.



a) 침강및 자중압밀실험 장치

b) 재하압밀실험 장치

그림 12. 자중압밀 실험 장치

<그림 12>에서 보는 바와 같이 높이 70cm, 직경 38cm인 Cell 2개를 연결(H = 140cm)하였으며, 하부에 배수층과 다공판을 설치하여 배수가 원활하도록 했다. 그리고, (b)는 재하압 밀장치로 침강이 완료된 후에 재하판을 설치하여 $0.005 - 0.08\text{kg/cm}^2$ 으로 표준압밀보다 낮은 응력으로 압밀실험을 할 수 있도록 하였다.

4. 실험결과의 고찰

4.1 수치 해석 결과

초기 함수비 500%이고 단면 배수조건으로 유한차분에의해 수치해석을 하였다. 시간 변화에 따른 압밀비의 변화를 원좌표 Z_0 에 대해 PLOT하면 <그림 13>과 같다. 시간이 경과함에 따라 시간 $t = 0$ 일 때 $\zeta = 1.0$ 에서 증가한다. 최종단계에서 $t = 2$ 일 이고 곡선은 시간이 증가함에 따라 포물선을 나타낸다.

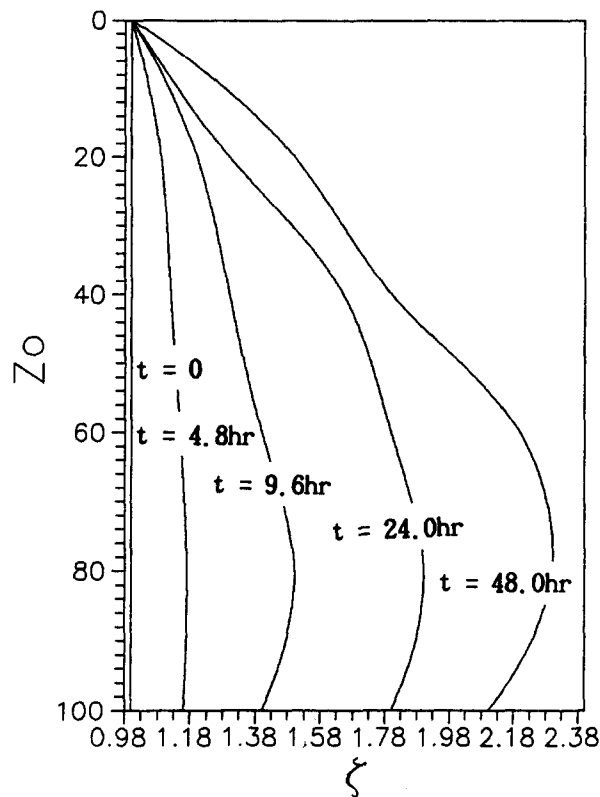


그림 13. $Z_0 - \zeta$ 곡선

침하량을 시간에 따라 PLOT한 결과 <그림 14>와 같이 나왔다. 수치해석 결과와 1000cc, 38cm x 140cm의 셀에서 침강시험한 결과를 혼탁액 높이에 대해 침강거리를 나누어서 시간에 대해 도시한 것이다. 그 결과 침하거동은 1000cc의 메스실린더에서 한 실험결과가 수치해석 결과와 가장 가까운 거동을 나타내었다. 이것에서 Scale가 작을수록 침하비가 수치해석 모델과 잘 맞는다는 것을 알 수있다. <그림 14>에서 38x140의 셀에서는 같은 500%의 함수비라도 침강단계가 나타나지만 1000cc의 메스실린더에서는 바로 자중압밀 단계가 시작되었다. 본 논문에서 제시한 모델은 침강단계를 고려하지 않고 압밀단계만을 해석했기때문에 스케일이 큰 모형실험과는 차이가 나는 것으로 보인다.

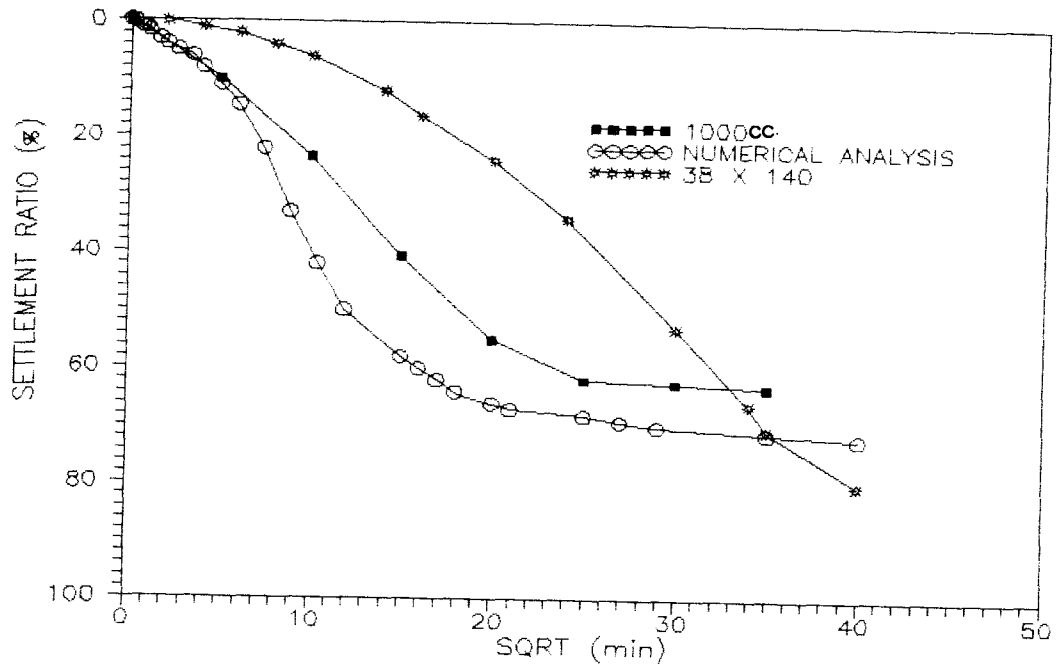


그림 14. 시간에 따른 침하비 곡선

4.2 토성 변화

<표 2>와 <그림 15>에서 시험전후의 토성을 심도별로 나타내었다.

<표2> 시험전후의 토성의 변화

구 분	Wn	LL	PI	Gs	#200	USCS	
시험 전	500	64.30	34.34	2.71	98	CH	
시험 후	3*	81.3	77.24	55.87	2.72	100	CH
	9*	71.7	60.37	32.40	2.72	92	CH
	25*	57.9	31.23	10.54	2.70	89	CL

* 숫자는 시료표면에서 부터의 깊이임 (단위 cm)

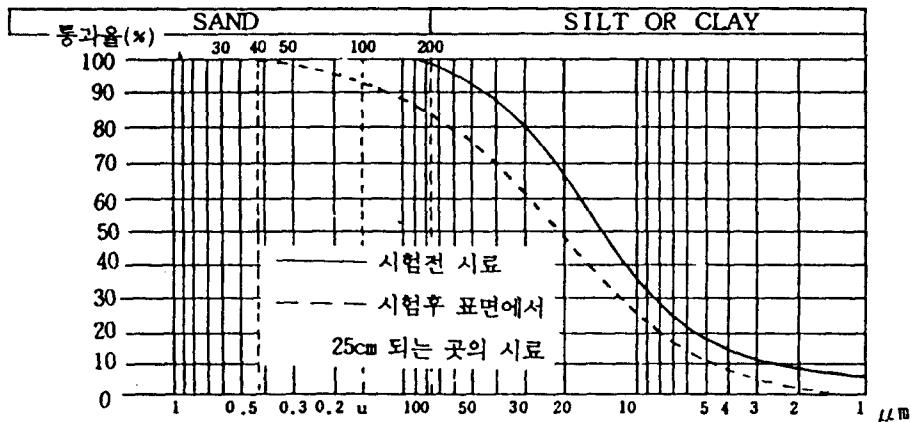


그림 15. 시험전 시료와 시험후 시료의 입도분포

시험 전에는 전체가 균질한 상태에 있던 시료가 시험 후에 <표2>에서와 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 Silt가 Clay보다 $1-1.25 \times 10^8$ 배 정도 크므로 입자의 침강은 입자상 호간의 영향때문에 Stoke의 법칙을 완전히 따르지는 않지만 거시적으로는 직경이 큰 입자가 먼저 가라앉고 작은 입자가 나중에 가라앉는다. 속도는 직경에 비례하므로 Stoke의 공식에 의해서 실트쪽의 직경이 크므로 침강하는 속도가 빠르다. 따라서 바닥에 실트가 먼저 쌓이고 입자의 크기가 적은 clay가 나중에 가라앉아서 층별로 비중이 다른 분포를 관찰할 수 있다. 2), 3), 5)

〈표3〉 흙입자의 크기

종 류	크 기 (mm)	표면적 (mm ²)	체 적 (mm ³)
Silt	0.05 ~ 0.002	$3.1 \times 10^{-2} \sim 5 \times 10^{-5}$	$5.24 \times 10^{-4} \sim 3.35 \times 10^{-8}$
Clay	0.002 ~ 0.0001	$5 \times 10^{-5} \sim 1.26 \times 10^{-7}$	$3.35 \times 10^{-8} \sim 4.19 \times 10^{-12}$

4.3 공극비와 수증단위 증량과의 관계

수증단위 증량 γ_{sub} 의 분포는 아래로 갈수록 커지므로 유효응력의 개념에서 위에서 작용하는 상재하중은 증가한다. 이에따라 압밀하중이 더 커져서 압밀이 더 진행되므로 흙의 압축성이 아래가 더 작아진다. 그런데, 흙의 압축성은 압축지수 C_c 에 비례하므로 아래로 내려 갈수록 작아진다. 〈그림 16〉에서 액성한계 L.L.와 C_c 는 깊이에 반비례함을 알 수 있다.

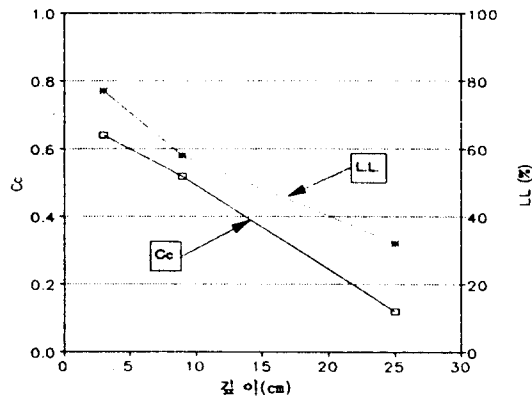


그림 16. 깊이에 따른 C_c 와 L.L.

4.4 간극비와 하중과의 관계

4.4.1 침투압밀과 저응력 재하압밀

〈표 4〉는 자중압밀과 침투압밀, 작은 응력재하압밀이 완료된 후 시료를 3층으로 나누어 각각에 대하여 표준압밀실험을 한 결과이다.

〈표 4〉 층별 압밀시험결과

하 중 단 계		심 도	P_c	C_c
표 준 압 밀	상 층	3	0	0.65
	중 층	9	0	0.52
	하 층	25	0.11	0.32
재하	저응력 재하	전체	0.16	0.16

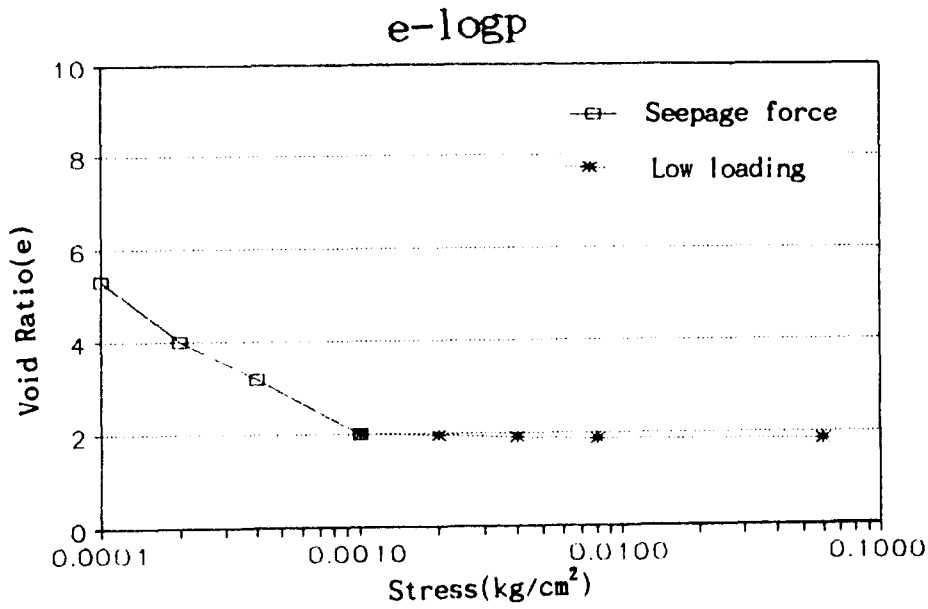


그림 17. 침투압밀과 저응력재하압밀에서의 압밀곡선

<그림 17>의 침투압과 저응력하에서의 e-logP곡선은 하중단계를 침투압으로 조정해서 저응력보다 적은 하중에서부터 연속적으로 변화시켰다. C_c 는 침투압밀에서 0.34, 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.

4.4.2 저응력 재하압밀과 표준압밀

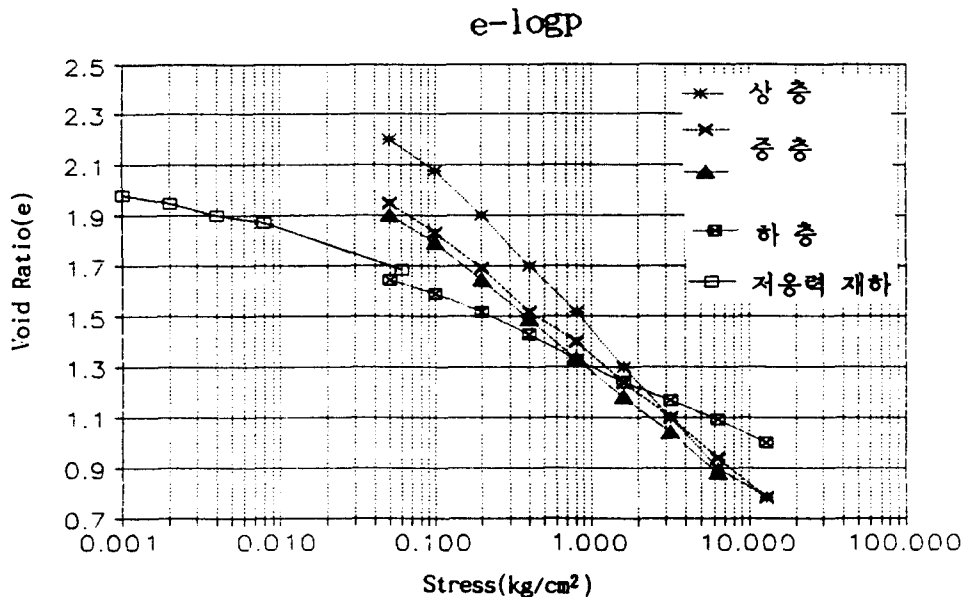


그림 18. 저응력 및 표준압밀에서의 e-logP곡선

<그림 18>은 저응력재하에서 표준압밀로 이어지는 실험이다. 층별로 표준압밀실험을 한 결과 상층으로 갈수록 압밀이 덜 진행된 상태이므로 C_c 가 커진다. 표준압밀실험에서 사용하는 시료는 크기가 직경 6cm, 높이 2cm이고 샘플링하는 과정에서 교란된 상태에 있으므로 <그림 18>에 나타난 바와 같이 정규압밀 곡선을 따르고 있다.

하중범위 $0.05 \sim 0.06\text{kg/cm}^2$ 에서 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 상태여서 큰 압축성을 보인 것이다. 변화는 침투압밀 과정에서 크게 변화하고 저응력과 표준압밀단계에서는 앞 단계에 비해서 작은 변형을 보이고 있다. 이 결과로 부터 침투압밀 과정도 자중압밀의 경우처럼 공극비의 변화가 크게 일어나므로 유한 변형이론을 적용해서 해석할 수 있다. 저응력재하단계에서 부터는 <그림 18>에서 보는 바와 같이 공극비의 변화가 작은 미소변형이므로 표준압밀의 적용이 가능하다는 것을 알 수 있다. 저응력 단계에서 표준압밀로 가는 점에서 불연속이긴 하지만 비슷한 기울기를 가지고 감소하는 경향을 보여주고 있다.

5. 결 론

연약점토가 침강, 자중, 침투, 저응력 재하, 표준압밀시험을 거치는 동안 어떤 압밀특성을 갖는가를 알아본 결과는 다음과 같다.

- (1) 준설점토의 자중압밀해석은 기존의 Terzaghi 압밀방정식을 적용하기에는 무리가 있으며 흙의 자중을 고려한 Mikasa, Gibson의 이론을 적용하는 것이 타당하다.
- (2) 준설점토의 자중, 침투, 재하압밀과정에서 하중이 저응력에서 높은 응력으로 갈 때 시간에 따라 간극비의 변화는 선형성을 나타내고 있다.
- (3) 침강이 완료된 후 시료의 하부로 갈수록 실트의 비율이 커지고 상부로 갈수록 점토가 많이 함유되어 비균질한 층을 형성하므로 토질정수를 심도에 따라 변화시켜 다층토로 해석해야 한다.
- (4) 준설토의 자중압밀은 침강단계에서는 바닥에 먼저 퇴적된 흙에서 부터 시작된다. 상층부는 계속 침강이 일어나는 반면 하층부는 자중에 의한 압밀이 진행되며 압밀이 완료된 후 압축지수 C_c 는 지층하부로 갈수록 작아지는 것을 볼 수 있다.

저응력상태에서 흙의 자중을 비롯한 다른 압밀조건들을 변수로 취급한 수치 해석을 시도하였다. 그러나, 치수효과에 따라 다른 양상을 보여주고 있고 이론과 실험결과에 대한 침하비에 대하여 더 연구가 필요하다 하겠다.

앞으로는 압밀이 진행됨에 따라 강도의 변화가 어떻게 일어나는가를 정확히 예측할 수 있도록 압밀과 강도 증가와의 함수관계를 규명하는 것이 필요하며 시료의 농도에 따른 체적변화율도 연구되어야 한다.

참고문헌

1. E. C. McROBERTS AND J. F. NIXON, "A THEORY OF SOIL SEDIMENTATION", CAN. GEOTECH. J., VOL. 13, 1976., pp. 294-310.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. GORO IMAI, "EXPERIMENTAL STUDIES ON SEDIMENTATION MECHANISM AND SEDIMENT FORMATION OF CLAY MATERIALS", SOIL & FOUNDATIONS, VOL. 21, NO. 1, 1981. 3., pp. 7-20.
6. 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.
7. 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.
8. S. D. KOPPULA AND N. R. MORGENSTERN, "ON THE CONSOLIDATION OF SEDIMENTING CLAYS", CAN. GEOTECH. J., VOL. 19, 1982., pp. 260-268.
9. 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.
10. M. KYAMA, "SETTLEMENT OF THE RECLAIMED LAND AT THE COASTAL AREA", GEO-COAST'91., 3-6, 1991. 9., pp. 207-212.
11. GORO IMAI, "SETTLING BEHAVIOR OF CLAY SUSPENSION", SOIL & FOUNDATIONS, VOL. 20, NO. 2, 1980. 6, pp. 61-77.
12. KUANTSAL 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.