

삼축셀에서 해성점토의 등방 및 K_0 압밀소요 시간

Required Time for Isotropic and K_0 Consolidation of Marine Clay in Triaxial Cell

이 경 준¹ Lee, Kyeong-Jun

임 중 철² Im, Jong-Chul

정 두 회³ Jung, Du-Hwoe

Abstract

Isotropic (instant loading) and K_0 (gradual increase loading) consolidation tests were conducted in triaxial test equipment using cylindrical sample (5.0 cm in diameter and 10.0 cm in height) on two marine clay deposits. The duration of primary consolidation was estimated by two curve fitting methods using measured strain. A differential equation of consolidation for drainage in the radial and vertical direction was solved by the implicit finite difference scheme. The results of two curve fitting methods were compared with the numerical solutions to evaluate the appropriate axial loading rate of K_0 consolidation and the primary consolidation periods. In addition, primary consolidation periods of the samples with a diameter of 35 mm and a height of 70 mm were calculated. The relation of radial and vertical consolidation coefficients is also presented.

요 지

부산 신항과 평택항 인근 지역의 해성 퇴적 점토 시료(직경과 높이 : 각각 5.0cm, 10.0cm)를 대상으로 삼축 셀에서 등방 압밀(순간하중 재하) 및 K_0 압밀(점증하중 재하)시험을 수행하였다. 시료의 압밀진행정도를 평가하기 위해 시험 과정에서 측정된 축 압축 및 체적변형률을 이용하여 두 방법으로 회귀분석을 수행하였으며 또한, 등방 및 K_0 압밀 시험 결과를 근사 해석하기 위해 연직과 방사방향 압밀 지배방정식을 음적 유한 차분 기법으로 수치해석 하였다. 시험결과에 대한 회귀분석 결과와 수치해석 결과를 토대로 두 지역 해성퇴적 점토에 대한 등방 및 K_0 압밀 시험의 1차 압밀 소요시간과 K_0 압밀에 대한 적합한 재하율을 산정하였으며, 그리고 직경 3.5cm, 높이 7.0cm 시료에 대해서는 수치해석을 통해서 이러한 평가를 수행하였다. 또한, 시료의 압밀시험결과와 수치해석 결과를 비교하여 연직과 방사방향 압밀계수의 근사적인 관계도 제시하였다.

Keywords : Axial loading rate, Curve fitting method, Implicit finite difference scheme

1. 서 론

삼축 셀에서 비배수 전단시험을 위한 시료의 준비는

포화 및 압밀의 과정으로 이루어진다. 시료의 압밀시 압밀압력에 의해 1차 압밀이 이루어진 후 크리프 변형이 동반되는 2차 압밀은 진행되지 않는 것이 바람직하다.

1 정회원, (주)동아지질 상무 (Member, General Manager, Dong-A Geological Engr. Co., LTD)

2 정회원, 부산대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Pusan National Univ., imjc@pusan.ac.kr, 교신저자)

3 정회원, 부경대학교 건설공학부 부교수 (Member, Associate Prof., Pukyong National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 2월 29일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

2차 압밀이 진행될수록 시료 내 의사과압밀의 영향으로 응력이 증가되고 그 결과 비배수 전단시 점점강도가 크게 나타난다. 점증하중을 가해서 Ko 압밀을 수행할 때 재하시간은 재하율에 의해 결정된다. 만약 압밀계수가 낮은 시료에 높은 재하율을 적용하면 시료 내에서 발생하는 전단응력에 의해 예상치 못한 전단변형이 야기되어 시험이 원활하게 수행되지 않는 일이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점들을 방지하는 측면에서 등방 및 Ko 압밀에 소요되는 시간과 Ko 압밀에 적합한 재하율을 평가하고자 한다.

연약한 해성점토 퇴적층은 퇴적환경 및 지역에 따라 흙의 구성성분이 다르고 압밀특성도 크게 차이가 있다. 부산 산항 인근의 해성 점토 퇴적층에는 고압축성의 점토가 그리고 평택항 인근 퇴적층에는 저압축성 점토가 많이 분포한다. 본 연구에서는 두 지역에서 채취한 점토 시료를 이용하여 삼축 셀에서 Ko 압밀 후 비배수 전단 시험(CAU) 및 등방압밀 후 비배수전단시험(CIU)을 수행하였으며 시험과정의 Ko 또는 등방압밀시험 결과를 이용하여 본 연구를 수행하였다.

시료의 압밀은 배압포화 이후 자연시료에 대한 표준압밀시험으로부터 평가된 선행압밀압력의 1.5배, 2.5배 또는 4배 정도에 해당하는 등방압밀압력(σ'_c) 또는 연직압밀압력(σ'_v , Ko 시험)을 작용시켜 수행하였다. 등방압밀은 일반적으로 소요 셀압을 순간 하중처럼 작용시키며 압밀이 진행되는 과정에서 배압관을 통하여 압밀에 의한 간극수가 배출되며, 시험과정에서 간극수 배출량과 시료의 축 방향 변위 및 셀압을 측정하게 된다. 등방압밀이 진행되는 정도는 축 방향 변위 및 간극수의 배출량의 시간 기록을 이용하여 곡선 근사법(curve fitting method)으로 예측하는 기법이 일반적으로 이용되고 있으며 점토의 압밀특성에 따라 압밀소요시간에 차이가 있다.

Ko 압밀을 수행하는 경우에는 점증하중을 재하하며 점토의 압밀특성 및 점증하중의 크기에 따라 압밀 소요 시간에 상당한 차이가 발생한다. Ko 압밀 진행정도는 일반적으로 등방압밀의 경우와 같이 축 방향 변위 및 간극수의 배출량의 측정 자료를 이용하여 평가하게 된다.

본 연구에서는 시료의 압밀 진행정도를 평가하기 위해 일반적인 곡선 근사법 이외에 연직과 방사 방향의 과잉 간극수압 소산에 관한 압밀 지배방정식을 이용하여 음적(implicit) 유한차분해법으로 근사계산하였다. 압밀 지배방정식은 순간 또는 점증하중이 재하되는 경우를 고려하였으며 수치해석에 사용된 압밀계수는 표준압밀시험 결

과에서 산정된 압밀압력별 연직 압밀계수와 기존의 연구 결과를 참조하여 방사방향 압밀계수를 가정하였다.

삼축 셀에서 수행한 등방 및 Ko 압밀시험과 압밀해석 결과로부터, 순간하중에 의한 등방압밀과 점증하중에 의한 Ko 압밀시 목표하는 압밀압력에 대해 정규압밀에 소요되는 시간을 평가하였으며 Ko 압밀 시에는 가능한 Ko 응력경로와 근접하여 압밀이 진행되는 점증하중의 크기(재하율)를 평가하였다. 또한, 간극수압 소산에 관한 수치해석 결과로부터 자연 퇴적점토의 연직 및 방사 방향 압밀계수의 적합한 상관관계를 제시하였다.

2. 점증하중 재하시 압밀 지배방정식의 유한 차분 해석

2.1 절점망 구성, 초기 및 경계조건

본 연구에 사용된 시료는 직경 5cm, 높이 10cm의 원주형이며 계산을 위한 절점망의 구성은 원주형 시료의 대칭성을 감안하여 시료 중심으로 절단한 평면의 1/4 면적에 대해 반경 방향으로 6개, 길이방향으로 11개의 절점을 부여하였다.

점증하중의 재하시 초기 과잉간극수압은 시료가 포화되었다고 간주하고 삼축 조건의 탄성거동에 대한 $A=1/3$ 을 적용하여 식 (1)로서 산정하였다.

$$\Delta u = \Delta \sigma_3 + A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \quad (1)$$

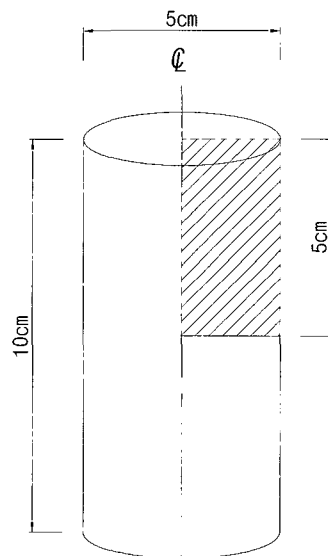


그림 1. 시험 시료의 해석 구간

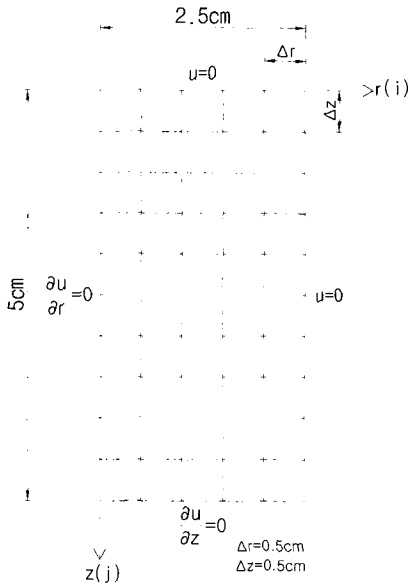


그림 2. 절점 분할 및 배수 경계조건

계산을 위한 경계조건은 압밀시 시료가 여과지와 다공체에 접촉하는 구간은 자유배수 경계조건을 그리고 시료 중앙부는 도함수 경계조건을 적용하였다.

2.2 압밀지배 방정식의 유한차분근사

점중하중이 재하되는 경우의 간극수압 소산에 관한 압밀 지배방정식은 압밀압력 작용시 동수경사에 의한 압밀 시료의 배수가 여과지와 다공석을 향하여 이루어 지므로 연직과 방사방향에 관한 식 (2)로 나타내었다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + C_r \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) + R \quad (2)$$

여기서, $R = \frac{q_0}{t_0}$, q_0 : 압밀압력, t_0 : 재하시간

압밀 지배방정식의 근사해석을 위해 식 (3)의 차분연산자를 이용한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{-u_{i,j,k} + u_{i,j,k+1}}{\Delta t}, \quad \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{-u_{i-1,j,k} + u_{i+1,j,k}}{\Delta r} \\ \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} &= \frac{u_{i-1,j,k} - 2u_{i,j,k} + u_{i+1,j,k}}{(\Delta r)^2}, \\ \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} &= \frac{u_{i,j-1,k} - 2u_{i,j,k} + u_{i,j+1,k}}{(\Delta z)^2} \end{aligned} \quad (3)$$

동등한 2차의 오차 항을 갖는 차분연산자를 이용하여 수치해의 안정성이 확보되는 음적 기법의 차분 방정식을 전개하면 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{-u_{i,j,k} + u_{i,j,k+1}}{\Delta t} &= \frac{C_v}{(\Delta z)^2} \{ (u_{i,j-1,k} - 2u_{i,j,k} + u_{i,j+1,k})(1-\theta) \\ &+ (u_{i,j-1,k+1} - 2u_{i,j,k+1} + u_{i,j+1,k+1}) \cdot \theta \} \\ &+ \frac{C_r}{2(r)(\Delta r)} \{ (-u_{i-1,j,k} + u_{i+1,j,k})(1-\theta) \\ &+ (-u_{i-1,j,k+1} + u_{i+1,j,k+1}) \cdot \theta \} \\ &+ \frac{C_r}{(\Delta r)^2} \{ (u_{i-1,j,k} - 2u_{i,j,k} + u_{i+1,j,k})(1-\theta) \\ &+ (u_{i-1,j,k+1} - 2u_{i,j,k+1} + u_{i+1,j,k+1}) \cdot \theta \} + R \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서 R은 재하시간 동안의 점중하중으로 수치 해석시 전체 절점에 일정 값을 부여하고, θ 는 가중치인데 1/2로 두고 편의상 식 (5)의 상수를 도입하여 정리하면 식 (6)과 같이 된다.

$$A = \frac{C_v \cdot \Delta t}{2(\Delta z)^2}, \quad B = \frac{C_r \cdot \Delta t}{4(r)(\Delta r)}, \quad C = \frac{C_r \cdot \Delta t}{2(\Delta r)^2} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} &u_{i-1,j,k}(-B+C) + u_{i,j,k}(-2A-2C+1) + u_{i+1,j,k}(B+C) \\ &+ u_{i,j-1,k}(A) + u_{i,j+1,k}(A) + u_{i-1,j,k+1}(-B+C) \\ &+ u_{i,j,k+1}(-2A-2C-1) + u_{i+1,j,k+1}(B+C) \\ &+ u_{i,j-1,k+1}(A) + u_{i,j+1,k+1}(A) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

식 (7)~식 (9) 와 같이 도함수 경계조건을 적용한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial r} = 0 \text{ 경계절점에서} \\ \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{2(\Delta r)}(-u_{i-1,j,k} + u_{i+1,j,k}) = 0, \quad u_{i-1,j,k} = u_{i+1,j,k} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \text{ 경계절점에서} \\ \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{2(\Delta z)}(-u_{i,j-1,k} + u_{i,j+1,k}) = 0, \quad u_{i,j-1,k} = u_{i,j+1,k} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \text{ 및 } \frac{\partial u}{\partial r} = 0 \text{ 경계절점에서} \\ u_{i,j-1,k} = u_{i,j+1,k} \text{ 및 } u_{i-1,j,k} = u_{i+1,j,k} \end{aligned} \quad (9)$$

임의 시간의 과잉간극수압(u)는 식 (10)의 행렬식으로부터 산정된다.

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \dots & A & \dots & \dots & \dots \\ \beta_2 & \alpha_1 & \beta_1 & \dots & A & \dots & \dots \\ \dots & \beta_2 & \alpha_1 & \beta_1 & \dots & A & \dots \\ \dots & \dots & \beta_2 & \alpha_1 & \beta_1 & \dots & A \\ \dots & \dots & \dots & \beta_2 & \alpha_1 & \beta_1 & \dots \\ A & \dots & \dots & \beta_2 & \alpha_1 & \beta_1 & \dots & A \\ \dots & A & \dots & \dots & \beta_2 & \alpha_1 & \beta_1 & \dots \\ \dots & \dots & A & \dots & \dots & \beta_2 & \alpha_1 & \beta_1 \\ \dots & \dots & \dots & A & \dots & \dots & \beta_2 & \alpha_1 & \beta_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & A & \dots & \dots & \beta_2 & \alpha_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11} \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ u_{n1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Tu_{10} \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ Tu_{n0} \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서, $\alpha_1 = -2A - 2C - 1$, $\alpha_2 = -2A - 2C + 1$, $\beta_1 = B + C$, $\beta_2 = -B + C$

임의 시간에 계산된 과잉간극수압을 이용하여 시료 전체에 대해 적분하고 초기과잉간극수압과 대비하여 임의시간의 평균 압밀도를 산정한다.

3. 등방 및 Ko 압밀시험

3.1 시험 절차 및 시험시료의 토질특성

등방 및 Ko 압밀 시험은 미국의 Geocomp 회사에서 제작한 완전 자동 삼축 시험 장비를 이용하여 배압포화, 압밀, 전단의 일련의 시험 과정 중에서 수행되었다. 배압포화는 50~350kPa 범위에서 다단계로 시료에 작용하는 배압을 증가시켜 B값이 가능한 0.96 이상이 되도록 수행하였다. 등방압밀은 순간 재하 그리고 Ko 압밀은 임의로 1~20kPa/min.의 1 단계 점증하중을 재하하

표준압밀시험의 압축곡선

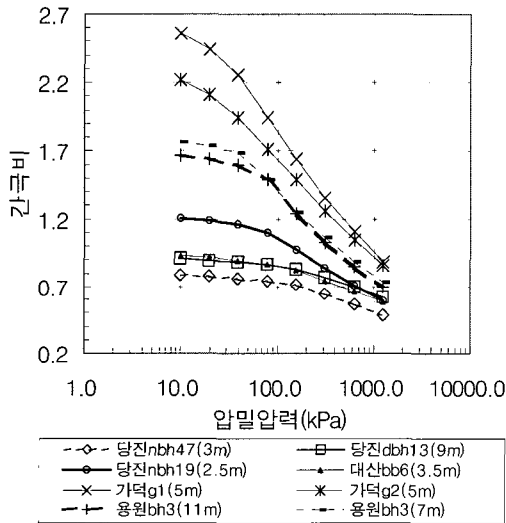


그림 3. 표준 압밀시험 결과에 의한 압축곡선

여 수행하였다(임종철, 2005).

시험에 이용된 해성 퇴적점토는 부산 신항 및 평택항 인근의 해안 지역에서 채취하였으며 주요 물성은 표 1 과 같다. 시험결과 중 압밀항복응력은 표준압밀시험 결과를 Casagrande 방법으로 평가한 값이다.

표준압밀시험에 의한 압축곡선, 압밀단계별 평균압밀압력에 대해 \sqrt{t} 법으로 평가한 연직압밀계수를 각각 그림 3, 그림 4에 나타내었다.

3.2 등방 및 Ko 압밀 실험 결과

Ko 압밀시험은 압밀과정에서 반경방향의 변형률이 발생되지 않는 조건 즉, 축변형률과 체적변형률이 동일하게 되도록 시험과정에서 측정되는 두 변형률을 이용하여 셀압과 축력이 조정된다. Ko 압밀시 하중 재하는 선행압밀압력의 1.5, 2.5 또는 4.0배로 설정된 연직압밀압력을 적정한 재하율로 1 단계에 걸쳐 점증재하 하였다. 등방 및 Ko 압밀시 배수조건은 시료의 상·하부 다공석판과 시료 주변의 여과지에서 간극수가 자유 배수된다.

등방 및 Ko 압밀 시험결과를 이용하여 1차 압밀 종료

표준압밀시험의 수직압밀계수(\sqrt{t} 법)

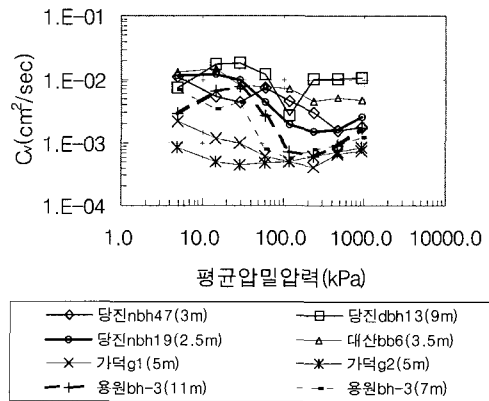


그림 4. \sqrt{t} 법으로 산정한 연직 압밀계수

표 1. 두 지역 해성 점토시료의 주요 토질특성

구분	자연함수비(%)	단위중량(kN/m ³)	액성한계(%)	소성지수	압밀항복응력(kPa)
당진nbh-47(3.0m)	39.04	17.657	42.8	22.0	94.1
당진nbh-19(2.5m)	47.86	16.946	52.5	31.9	78.5
당진dbh-13(9.0m)	34.36	18.398	50.5	29.9	191.2
대산bb-6(3.5m)	34.91	18.290	43.8	26.4	155.0
용원bh-3(7.0m)	65.93	15.681	75.8	44.0	47.1
용원bh-3(11.0m)	62.63	15.730	83.2	53.6	63.7
가덕도g-1(5.0m)	99.42	14.171	109.4	71.5	32.4
가덕도g-2(5.0m)	89.12	14.740	103.0	66.5	32.4

시간은 두 방법의 곡선 근사법으로 평가하였다. 첫 번째, 측정된 체적변형률과 대수누금에 의한 압밀시간의 관계(log t 방법)를 이용하고 두 번째, 1~10분 범위의 일정한 시간증분(Δt) 차이에 대한 체적 변형률 ($\varepsilon_{v(t-1)}, \varepsilon_{v(t)}$) 점을 축 $\varepsilon_{v(t-1)}$ 와 $\varepsilon_{v(t)}$ 에 대해 작도한 후 $\varepsilon_{v(t-1)} = \varepsilon_{v(t)}$ 인 45° 선과의 교점(직선회귀)을 구하여 평가하였다(Asaoka, 1978; Jamiolkowski 등, 1985).

그림 5, 그림 6에는 부산 신항 인근 지역(가덕도) 점토 시료의 1차 압밀 종료시간의 평가를 위한 시험결과 분석 예를 나타내었고, Ko 및 등방 압밀의 시험조건 및 1차 압밀 종료시간을 평가하여 표 2와 표 3에 나타내었다.

평택항 인근 점토시료의 Ko 압밀 시험의 주요 결과는 그림 7~그림 10에 그리고 등방압밀 시험의 주요 결과는 그림 11, 그림 12에 나타내었다. 그림 7에는 Ko 압밀 시험시 점증 재하율(2, 10, 20kPa/min.)로 재하 후 일정 시간의 압밀을 수행한 시험의 연직 재하하중과 압밀시간의 관계를, 그림 8에는 압밀 시험동안의 유효 최소 주응력의 변화를 그리고 그림 9에는 압밀동안의 체적변형률(또는 축변형률)의 변화 관계를 나타내었다. 그림 8에 나타낸 바와 같이 Ko 압밀시 큰 점증 재하율로 재하 중

로 후 압밀이 진행되는 동안 유효 최소 주응력이 감소한다. 이것은 삼축 장비가 Ko 압밀동안 측정된 체적변형

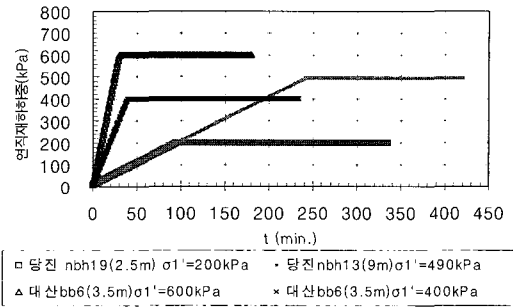


그림 7. Ko 압밀시 점증재하

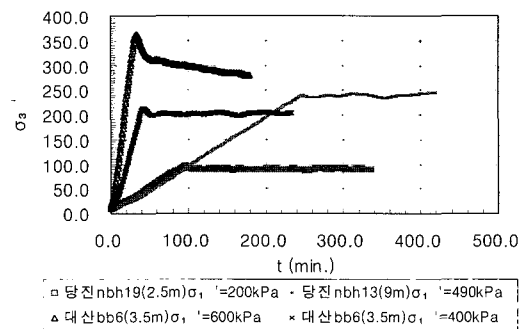


그림 8. Ko 압밀시험 동안의 유효 최소(σ'_3) 주응력 변화

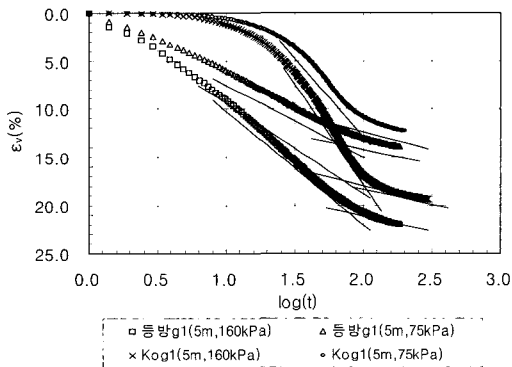


그림 5. log t법에 의한 1차 압밀 체적변형률 산정 예

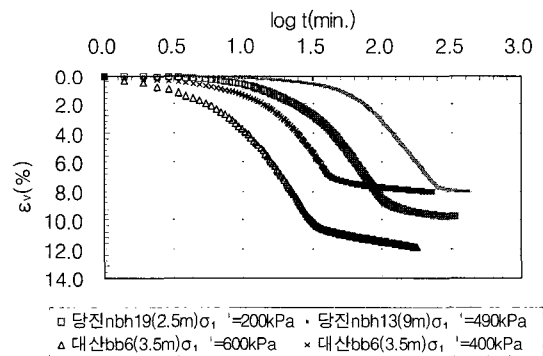


그림 9. Ko 압밀시험 동안의 체적변형률의 변화

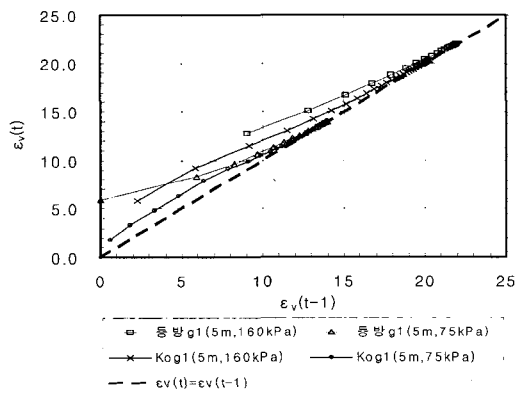


그림 6. 직선회귀에 의한 1차 압밀 체적변형률 산정 예

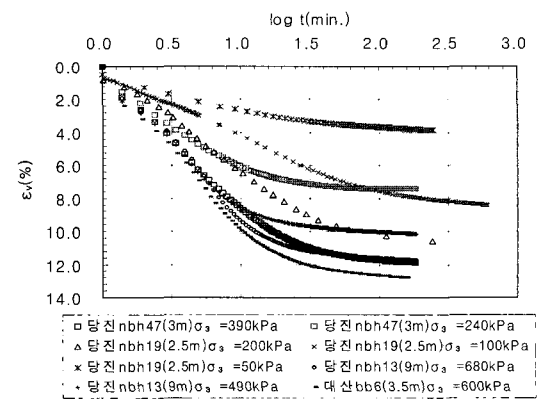


그림 10. 등방 압밀시험의 축변형률

표 2. 평택항 인근의 액성한계 40~50% 해성점토의 등방 및 Ko 압밀시험 결과

구분	시험시료의 액성한계(%) / 소성지수	압밀 압력 (kPa)	압밀 방식	재하율 및 재하시간 (분)	log t법		직선회귀법	
					1차압밀 종료시간 (분)	대응하는 축/체적 변형률(%)	극한체적변형률 (%)	대응하는 압밀시간(분)
당진nbh -47(3.0m)	42.8/ 22.0	390	등방	순간재하	35.5	3.16/11.15	10.8	27.0
		240	등방	순간재하	31.6	2.13/7.16	7.0	24.0
당진nbh -19(2.5m)	52.5/ 31.9	200	등방	순간재하	41.7	2.3/9.34	9.8	90.0
		100	등방	순간재하	89.1	1.49/7.5	7.7	120.0
		50	등방	순간재하	31.6	0.57/3.33	3.7	107.0
		200	Ko	2kPa/min. 95분	131.8	9.18	9.3	146.0
당진nbh -13(9.0m)	50.5/ 29.9	680	등방	순간재하	24.0	2.89/11.0	11.0	24.0
		490	등방	순간재하	15.8	2.38/9.25	9.65	28.0
		490	Ko	2kPa/min. 240분	275.4	7.83	8.0	266.0
대산bb-6 (3.5m)	43.8/ 26.4	600	등방	순간재하	26.9	3.66/11.95	12.0	28.0
		600	Ko	20kPa/min. 30분	39.8	10.65	11.1	60.0
		400	Ko	10kPa/min. 39분	58.9	7.43	7.5	65.0

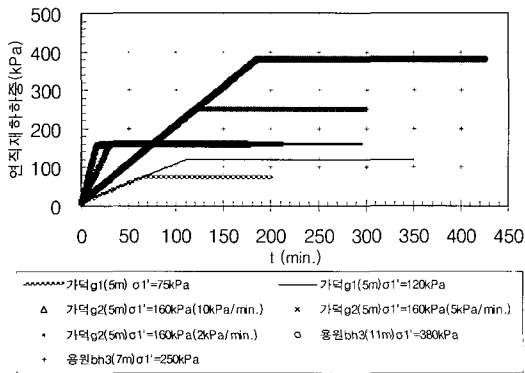


그림 11. Ko 압밀시 점증재하

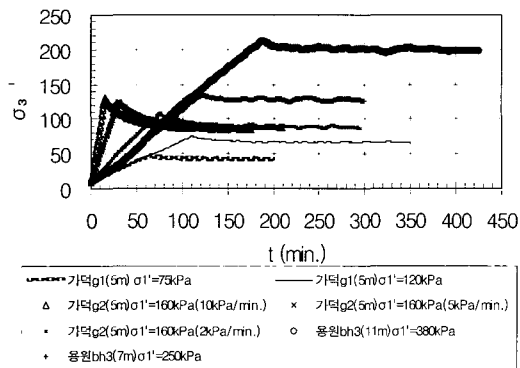


그림 12. Ko 압밀시험 동안의 유효 최소(σ₃') 주응력 변화

물과 축변형률이 동일하도록 조정할 때 삼축 셀 내부의 축압을 제어하면서 나타나는 현상으로 Ko 압밀이 종료 되면 유효 최대 및 최소 주응력이 일정하게 된다. 따라서 그림 8의 점증재하 이후 큰 값에서 작은 값으로 수렴

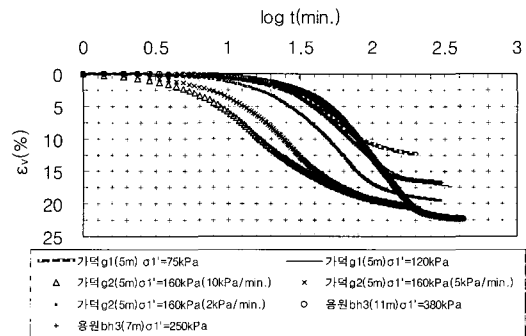


그림 13. Ko 압밀시험 동안의 체적변형률의 변화

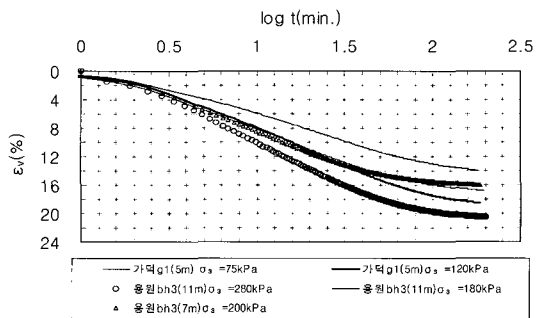


그림 14. 등방 압밀시험의 축변형률

하는 유효 최소 주 응력의 큰 값은 시료 내 실제의 유효 응력은 아니다. 그림 10에는 등방압밀시험동안 측정된 축변형률을 각각 나타내었다.

부산신항 인근 점토시료의 Ko 압밀 시험의 주요 결과는 그림 11~그림 13에 그리고 등방압밀 시험의 주요 결과는 그림 14에 나타내었다. 그림 11에는 Ko 압밀 시험시 점증 재하율(1, 2, 5, 10kPa/min.)로 재하 후 일정

표 3. 부산신항 인근의 액성한계 80~110% 해성점토의 등방 및 Ko 압밀시험 결과

구분	시험시료의 액성한계(%) /소성지수	압밀 압력 (kPa)	압밀 방식	재하를 및 재하시간 (분)	log t 법		직선회귀	
					1차압밀 종료시간 (분)	대응하는 축/체적 변형률(%)	극한체적변형률 (%)	대응하는 압밀시간 (분)
가덕 g1 (5.0m)	109.4/ 71.5	75	등방	순간재하	104.7	5.52/13.14	14.05	182분 이상
		75	Ko	1kPa/min. 65분	109.6	11.16	12.5	200분 이상
		120	등방	순간재하	87.1	6.97/17.14	18.7	184분 이상
		120	Ko	1kPa/min. 110분	177.8	16.12	16.7	230.0
		160	등방	순간재하	112.2	8.9/21.1	22	184.0
가덕 g2 (5.0m)	103.0/ 66.5	160	Ko	10kPa/min. 15분	63.1	17.89	19.8	127.0
		160	Ko	5kPa/min. 30분	89.1	18.94	20.3	158.0
		160	Ko	2kPa/min. 75분	131.8	18.03	19.05	216.0
용원 bh-3 (11.0m)	83.2/ 47.4	280	등방	순간재하	77.6	6.22/19.29	20.1	126.0
		180	등방	순간재하	83.2	5.05/15.64	16.4	136.0
		380	Ko	2kPa/min. 185분	239.9	21.57	21.8	265.0
용원 bh-3 (7.0m)	75.8/ 44.0	200	등방	순간재하	72.4	5.42/15.15	15.5	97.0
		250	Ko	2kPa/min. 120분	144.5	15.86	16.5	223.0

시간 압밀을 수행한 시험의 연직 재하하중과 압밀시간의 관계를, 그림 12에는 압밀 시험동안의 유효 최소 주응력의 변화를 그리고 그림 13에는 압밀동안의 체적변형률(또는 축변형률)의 변화 관계를 나타내었다. 그림 12에서 Ko 압밀시 점층 재하율이 큰 경우 압밀이 진행되는 과정에서 유효 최소 주응력이 감소하는 것으로 나타나는데 이는 전술한 평택항 인근 점토 시료의 시험결과와 유사한 경향을 나타낸다. 그림 14에는 등방압밀시험동안 측정된 축변형률을 나타내었다.

4. 압밀 소요 시간의 비교

4.1 과잉간극수압 소산 해석 결과

자연 퇴적 점토층 구조의 치밀 정도 또는 점토층 내부에 투수성 흙의 존재 여부에 따라 Jamiolkowski 등(1983)에 의하면 점토 퇴적층의 수평과 연직 투수계수 비 (k_h/k_v)는 1~15 정도이며 Bergado 등(1992)의 역해석 결과에 의하면 현장과 실내시험에 의한 수평 및 연직 압밀 계수 비는 각각 $c_h(\text{field})/c_h(\text{lab}) \approx 1.5 \sim 4.0$ 및 $c_v(\text{field})/c_v(\text{lab}) \approx 1.3 \sim 12.0$ 인 것으로 보고되고 있다. 또한, 1차원 압밀 중 하중방향과 배수방향이 직각을 이루는 경우에 대해서는 $c_h/c_v = k_h/k_v$ 의 관계를 나타내며

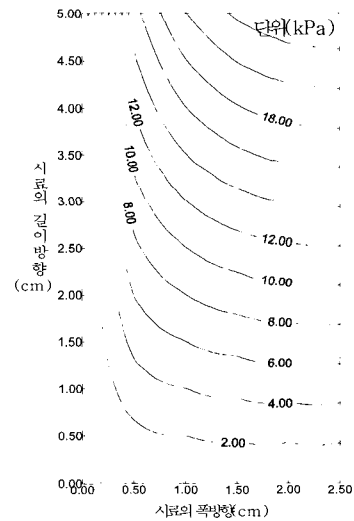


그림 15. 시료내 잔류간극수압 분포 계산 예

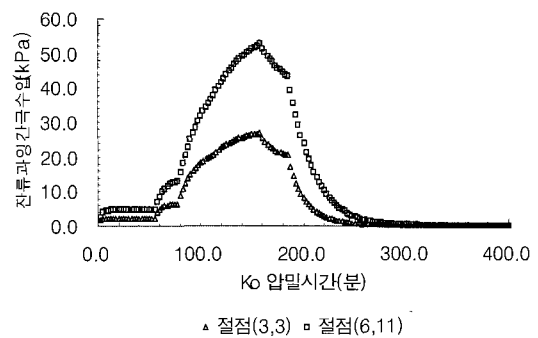


그림 16. 시료내 임의 점점의 잔류 과잉간극수압 변화

로 음적 유한 차분법으로 수행한 과잉간극수압의 소산 해석에 적용한 방사 및 연직 방향의 압밀계수비는 이러한 연구 자료를 참조하여 적용하였다.

과잉간극수압 소산해석 결과 중 부산 신항 인근 해성점토(BH-3, 심도 11m)의 Ko 압밀시 임의 시간의 잔류 과잉간극수압 분포 해석결과를 그림 15, 그림 16에 나타내었다.

4.2 등방 및 Ko 압밀 소요시간

직경 5cm, 높이 10cm의 원주형으로 제작된 해성점토 시료의 등방 및 Ko 압밀시험 결과에 log t법과 직선회귀 분석법을 적용해서 압밀중인 시료의 평균 압밀도를 산

정하였으며, 이를 과잉간극수압 소산해석을 통해서 평가한 평균 압밀도와 비교하고자 한다. 그 결과의 일부 내용을 그림 17~그림 24에 나타내었다. 각 그림의 범례에서 “축 변형률”은 log t 법의 해석결과이고 “극한 체적 변형률”은 직선회귀분석결과이며, 그리고 나머지 범례는 수치계산을 이용한 압밀 해석에 적용된 방사방향과 연직 압밀계수의 관계를 나타낸 것이다. 또한 표 4와 표 5에 두 방법의 회귀분석 결과 및 수치해석 결과를 요약하여 나타내었다. 표 4는 액성한계 42%~53% (소성지수 22~32) 범위의 평택항 인근 해성점토 시료 그리고 표 5는 액성한계 76%~110%(소성지수 44~72)

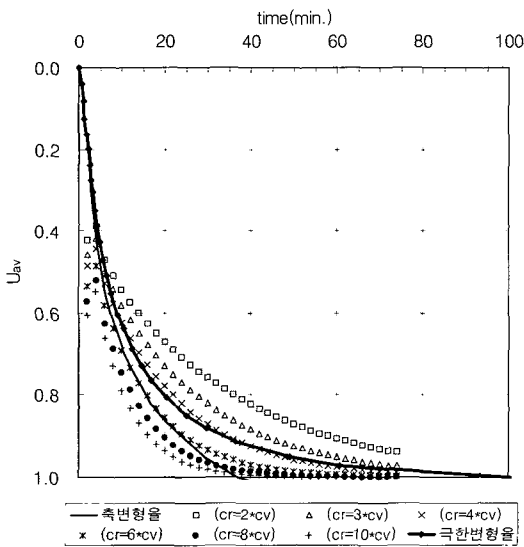


그림 17. 당진 nbh19(2.5m) 점토($\sigma'_c=200\text{kPa}$) 압밀해석결과와의 비교

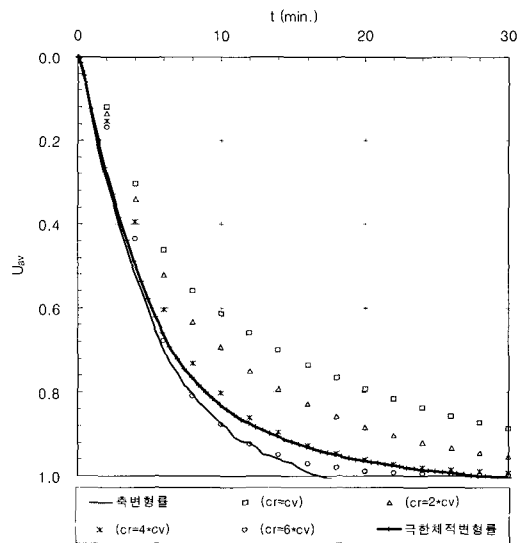


그림 19. 대신 bb6(3.5m) 점토($\sigma'_c=600\text{kPa}$) 압밀해석결과와의 비교

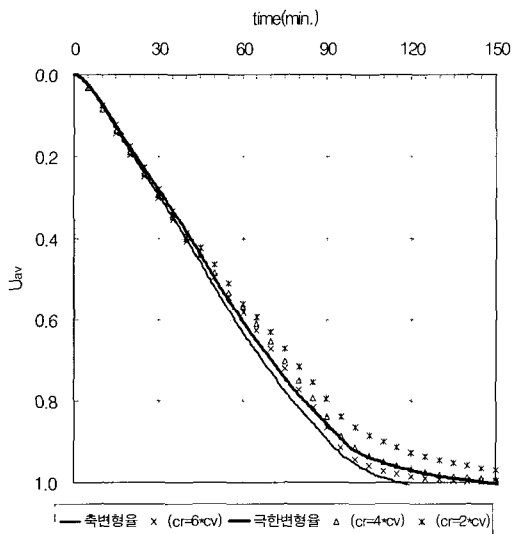


그림 18. 당진 nbh19(2.5m) 점토($\sigma'_c=200\text{kPa}$, 재하율 2kPa/min.) 압밀해석결과와의 비교

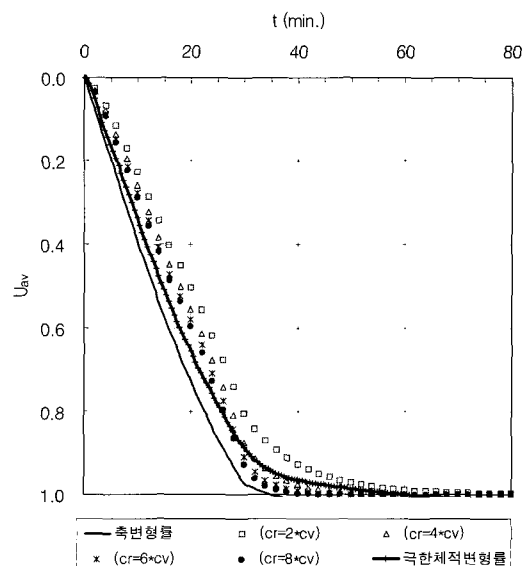


그림 20. 대신 bb6(3.5m) 점토($\sigma'_c=600\text{kPa}$, 재하율 20kPa/min.) 압밀해석결과와의 비교

표 4. 평택항 인근 해상 점토의 등방 및 Ko 압밀 시험결과와 해석결과와의 비교

구분	1차 압밀 예상시간(분)		과잉간극수압 소산해석결과		
	log t법	직선회귀	시료(직경 : 5cm, 높이 : 10cm)의 U=98%에 대응하는 시간(분)	근사적인 방사 및 연직 압밀계수관계	시료(직경 : 3.5cm, 높이 : 7cm)의 U=98%에 대응하는 시간(분)
당진nbh -47(3.0m)	35.5	27.0	30.0	$c_r \approx 6c_v$	14.0
	31.6	24.0	25.0	$c_r \approx 6c_v$	11.0
당진nbh -19(2.5m)	41.7	90.0	64.0	$c_r \approx 4c_v$	30.0
	89.1	120.0	104.0	$c_r \approx 2c_v$	47.0
	31.6	107.0	73.0	$c_r \approx 2c_v$	35.0
	131.8	146.0	128.0	$c_r \approx 4c_v$	106.0
당진nbh -13(9.0m)	24.0	24.0	19.0	$c_r \approx 2c_v$	13.0
	15.8	28.0	16.0	$c_r \approx 3c_v$	9.0
	275.4	266.0	240.0	$c_r \approx 1 \sim 10c_v$	238.0
대산bb-6 (3.5m)	26.9	28.0	24.0	$c_r \approx 4c_v$	14.0
	39.8	60.0	41.0	$c_r \approx 4c_v$	34.0
	58.9	65.0	54.0	$c_r \approx 3c_v$	43.0

범위의 부산신항 인근 해상점토 시료에 대한 자료이다.

직경 5cm, 높이 10cm 시료의 압밀시험에 대한 회귀 분석 결과와 수치해석 결과의 비교를 통해서 구한 연직 과 방사방향 압밀계수의 관계를 이용하여 직경 3.5cm, 높이 7.0cm 시료에 대해서 수치계산에 의한 압밀해석을 수행하였으며 그 결과는 표 4와 표 5에 나타내었다.

액성한계 43%~53%(소성지수 22~32) 범위의 평택항 시료에 대해 등방압밀을 수행하는 과정에서 측정된 축변형률을 이용하여 log t법의 곡선회귀법으로 1차 압밀 예상 시간을 평가하면 약 16~89분 정도 이다. 일정 시간 간격의 체적변형률 측정 자료를 이용하여 직선회귀법으로 1차 압밀 예상 시간을 평가하면 약 24~120분 정도 이다. 직선회귀법을 이용한 결과와 유사한 간극수압 소산에 관한 수치 해석결과는 방사 및 연직방향 압밀계수의 관계가 $c_r \approx (2\sim6) \times c_v$ 범위로 나타난다. 수치해석 결과에서 1차 압밀 소요 시간은 시료 내 잔류 과잉 간극수압이 완전히 소산되는 경우 즉, 평균 압밀도가 100%에 도달하는 시간을 적용하는 대신 임의로 U=98%에 도달하는 소요 시간을 채택하였다. 그 이유는 수치해석에서는 미소한 잔류 과잉간극수압이 상대적으로 긴 시간에 걸쳐 소산될 뿐 아니라 계산오차의 영향 및 미소한 잔류 간극수압이 실질적으로는 공학적 의미가 작은 점을 감안하였다. 수치해석 결과 시료의 평균 압밀도가 U=98%에 도달하는 시간은 약 16분~104분(직경 3.5cm, 높이 7.0cm 시료 : 약 9분~47분) 정도이다.

Ko 압밀을 재하율 2~20kPa/min의 점증재하에 의해 수행하고 점증재하 종료 후 소요되는 1차 압밀 예상 시간을

평가하였다. 측정된 축변형률에서 log t법의 곡선 회귀법을 적용한 결과에 의하면 약 10~36분 정도이며, 일정 시간간격의 체적변형률 측정 자료에 직선 회귀법을 적용한 결과에 의하면 약 26~51분 정도이다. 직선회귀법으로 평가한 결과와 유사한 간극수압 소산에 관한 수치해석 결과는 방사 및 연직방향 압밀계수의 관계가 $c_r \approx (3\sim4) \times c_v$ 범위로 나타난다. 시료의 평균압밀도가 U=98%에 도달하는 시간은 점증 재하하중 종료 후 약 0~33분(직경 35mm, 높이 70mm 시료 : 약 0분~11분)이 소요된다.

액성한계 76%~110%(소성지수 44~72) 범위의 부산신항 시료에 대해 등방 압밀을 수행하고 측정된 축변형률을 이용하여 log t법의 곡선 회귀법으로 1차 압밀 예상 시간을 평가하면 약 72~112분 정도 이다. 일정 시간 간격으로 측정된 체적변형률을 이용하여 직선 회귀법으로 1차 압밀 예상 시간을 평가하면 약 97~184분 정도 이다. 직선회귀법의 평가결과와 유사한 간극수압 소산에 관한 수치 해석결과는 방사 및 연직방향 압밀계수의 관계가 $c_r \approx (5\sim8) \times c_v$ 범위로 나타난다. 수치해석결과 시료의 평균압밀도가 U=98%에 도달하는 소요 시간을 산정하면 약 80분~168분(직경 3.5cm, 높이 7.0cm 시료 : 약 43분~83분) 정도 이다.

Ko 압밀을 재하율 1~10kPa/min의 점증재하에 의해 수행하고 점증재하 종료 후 소요되는 1차 압밀 예상 시간을 평가하였다. 측정된 축변형률에 log t법의 곡선회귀법을 적용한 결과에 의하면 약 25~68분 정도이며, 일정 시간 간격으로 측정된 체적변형률에 직선회귀법을 적용한 결과에 의하면 약 80~141분 정도이다. 직선

회귀법으로 평가한 결과와 유사한 간극수압 소산에 관한 수치 해석결과는 방사 및 연직방향 압밀계수의 관계가 $c_r \approx (6 \sim 10) \times c_v$ 범위(대부분 $c_r \approx 6 \times c_v$)로 나타난다. 수치해석결과 시료의 평균압밀도가 $U=98\%$ 에 도달하는 시간은 점층 재하하중 종료 후 약 33~113분(직경 3.5cm, 높이 7.0cm 시료 : 약 7분~49분)이 소요된다.

두 지역의 해성점토는 표 1에 나타낸 바와 같이 아터버그 한계가 크게 차이가 나며 일반적으로 액성한계가 클수록 고압축성이다. 점토 퇴적층은 형성과정에 의해 층리면의 직각방향으로 투수성이 매우 낮은 반면 층리면 방향으로 물이 쉽게 흐르는 구조로 된다. 두 지역 점토에

대한 과잉간극수압 소산의 근사해석결과와 직선회귀법의 압밀해석결과가 유사하게 되는 경우의 방사 및 연직방향 압밀계수의 관계를 전술한 표 4 및 표 5에 나타내었다. 그 결과 액성한계와 소성지수가 크게 다른 두 지역의 압밀계수 관계를 요약하면 액성한계 43%~53%(소성지수 22~32) 범위의 평택항 인근 점토는 $c_r \approx (2 \sim 4) \times c_v$ 그리고 액성한계 76%~110%(소성지수 44~72) 범위의 부산신항 인근 점토는 $c_r \approx 6 \times c_v$ 관계를 보인다. 이러한 압밀계수의 관계는 Ko 압밀시험에서 더욱 뚜렷하게 나타나며, 실트에 비해서 판형상의 점토광물을 많이 함유한 고압축성 점토가 저압축성 점토에 비해 수평과 연직 투수계수 비(k_{h1}/k_v)가 높다.

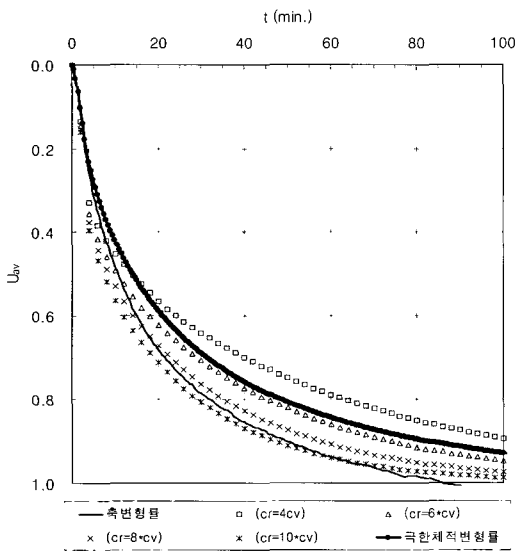


그림 21. 가덕 g1(5m) 점토($\sigma'_c = 75\text{kPa}$) 압밀해석결과와의 비교

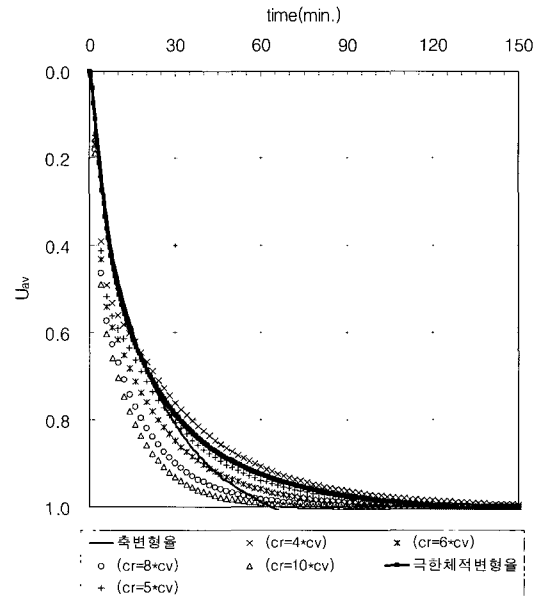


그림 23. 용원 bh3(11m) 점토($\sigma'_c = 280\text{kPa}$) 압밀해석결과와의 비교

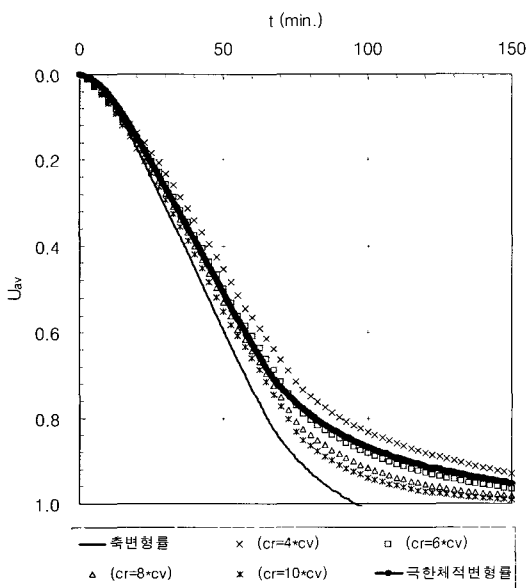


그림 22. 가덕 g1(5m) 점토($K_o \sigma'_c = 75\text{kPa}$, 재하율 1kPa/min.) 압밀 해석결과와의 비교

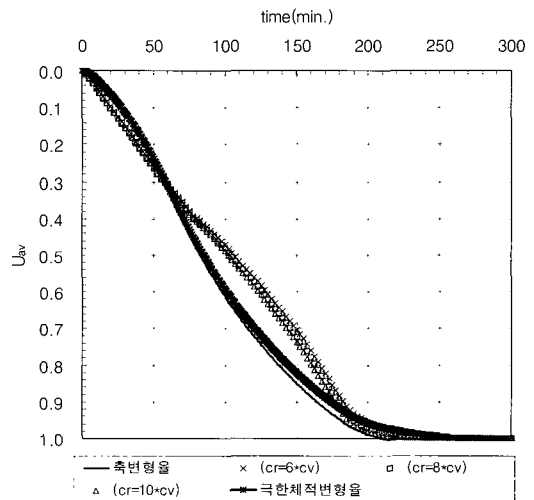


그림 24. 용원 bh3(11m)($K_o \sigma'_c = 380\text{kPa}$) 압밀해석결과와의 비교

표 5. 부산신항 인근 해성점토의 등방 및 Ko 압밀시험 결과와 해석결과의 비교

구분	1차 압밀 예상시간(분)		과잉간극수압 소산해석결과		
	log t법	직선회귀	시료(직경 : 5cm, 높이 : 10cm)의 U=98% 소요 시간(분)	근사적인 방사 및 연직 압밀계수관계	시료(직경 : 3.5cm, 높이 : 7cm)의 U=98% 소요 시간(분)
가덕 g1 (5.0m)	104.7	182분 이상	140.0	$c_r \approx 6c_v$	69.0
	109.6	200분 이상	173.0	$c_r \approx 6c_v$	113.0
	87.1	184분 이상	168.0	$c_r \approx 6c_v$	83.0
	177.8	230.0	204.0	$c_r \approx 6c_v$	144.0
	112.2	184.0	136.0	$c_r \approx 8c_v$	66.0
가덕 g2 (5.0m)	63.1	127.0	112.0	$c_r \approx 10c_v$	58.0
	89.1	158.0	143.0	$c_r \approx 8c_v$	79.0
	131.8	216.0	170.0	$c_r \approx 8c_v$	101.0
용원bh-3 (11.0m)	77.6	126.0	90.0	$c_r \approx 5c_v$	43.0
	83.2	136.0	102.0	$c_r \approx 6c_v$	48.0
	239.9	265.0	218.0	$c_r \approx 6c_v$	192.0
용원bh-3 (7.0m)	72.4	97.0	80.0	$c_r \approx 6c_v$	43.0
	144.5	223.0	170.0	$c_r \approx 6c_v$	136.0

5. 결론

본 연구에서는 삼축 셀에서 등방 및 Ko 압밀을 실시하는 경우 적합한 1차 압밀 소요시간을 적용하여 불필요한 크리프 변형이 발생되지 않게 하고 또한, 점증재하에 의한 Ko 압밀시 적합한 재하율에 의해 시료의 압밀이 원활하게 진행되는 방법을 제안하였다.

연구를 위해 압밀특성이 크게 다른 두 지역의 해성 점토를 대상으로 자연 퇴적지반의 선형압밀압력의 약 1.5, 2.5 또는 4.0배에 해당하는 등방 또는 연직 압밀압력으로 삼축 셀에서 등방 및 Ko 압밀 시험(시료 치수 : 직경 5cm, 높이 10cm)을 수행하였다. 압밀해석을 위해 측정된 축변형률과 체적변형률을 이용한 회귀분석과 압밀지배방정식에 대한 수치해석 기법을 제안하였다. 또한, 직경 3.5cm, 높이 7.0cm의 시료에 대한 수치해석 결과를 별도로 괄호 【】 안에 표기하였으며 압밀진행정도에 크게 영향을 끼치는 방사 및 연직방향 압밀계수의 관계를 연경도가 크게 다른 두 지역의 점토에 대해 규명하였다. 본 연구의 결과를 요약해서 정리하면 다음과 같다.

(1) 액성한계가 43%~53%(소성지수 22~32) 범위인 평택항 인근 지역 해성점토에 순간하중을 적용해서 등방압밀을 수행하면 1차 압밀 소요 시간은 약 16~120분 【약 9분~47분】 정도이고, 10~20kPa/min의 재하율로 Ko 압밀을 수행하면 점증재하 후 약 30분 【약 10분】 정도의 압밀 방치시 1차 압밀이 종

료된다. 점토의 방사 및 연직방향 압밀계수의 관계는 $c_r \approx (2\sim4) \times c_v$ 로 평가되었다.

(2) 액성한계가 76%~110%(소성지수 44~72) 범위인 부산 신항 인근 지역 해성점토에 순간하중을 적용해서 등방압밀을 수행하면 1차 압밀 소요 시간은 약 80분~184분 【약 43분~83분】 정도이고, 1~2kPa/min의 재하율로 Ko 압밀을 수행하면 점증재하 후 약 110분 【약 50분】 정도의 압밀 방치시 1차 압밀이 종료된다. 점토의 방사 및 연직방향 압밀계수의 관계는 $c_r \approx 6 \times c_v$ 로 평가된다.

참고 문헌

1. 임종철 (2005), *토질공학의 길잡이*, 도서출판 세론, pp.296-317.
2. Asaka, A. (1978), "Observational procedure of settlement prediction", *Soils and Foundations*, Vol.18, No.4, pp.87-101.
3. Jamiolkowski, M., Lancellotta, R., and Wolski, W. (1983), "Pre-compression and speeding up consolidation", General Report, Special Session 6, *Proc. 8th Europe Conf. Soil Mech. and Found. Eng'g.* Helsinki, Vol.3, pp.1201-1226.
4. Jamiolkowski, M., Ladd, C.C., Germaine, J.T. and Lancellotta, R. (1985), "New developments in field and laboratory testing of soils", Theme Lecture, *Proc. 11th Intl. Conf. Soil Mech. and Found. Eng'g.*, San Francisco, pp.57-153.
5. Bergado, D.T., Enriquez, A.S., Sampaco, C.L, Alfaro, M.C. and Balasubramaniam, A.S. (1992), "Inverse analysis of geotechnical parameters on improved soft Bangkok clay", *J. Geotech. Eng'g. Div., ASCE*, Vol.118, No.7, pp.1012-1030.

(접수일자 2007. 3. 16, 심사완료일 2007. 7. 10)