

제 7 장 흙의 압밀

7.1 개설

(1) 침하(settlement): 흙이 하중을 받아 압축력에 의한 지표면에 발생하는 연직방향의 변형으로서 기초 설계 시 침하량과 침하속도를 예측하는데 매우 중요

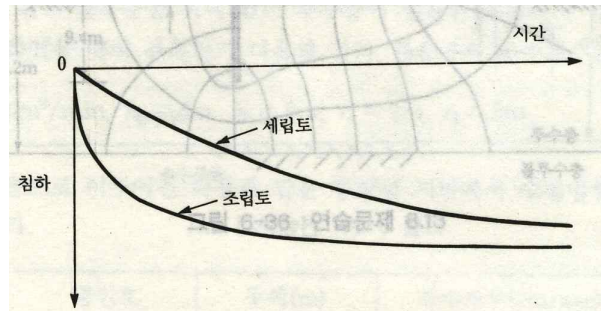


그림 7-1 조립토와 세립토의 침하

(2) 흙의 압축(compression) 발생원인

- 가. 토립자의 변형
- 나. 토립자의 재배열
- 다. 간극중 물이나 공기가 빠져 나감

(3) 지반 침하의 종류

가. 즉시침하(immediate settlement) 또는 탄성침하(elastic settlement): 건조토, 불포화토, 포화도가 함수비의 변화 없이 탄성변형 때문에 일어나는 하중을 가한 즉시 발생하는 침하(사질토)

나. 1차 압밀침하(primary consolidation settlement): 포화점토에서 간극을 채우고 있는 물이 빠져나감으로서 발생하는 체적의 변화로 인하여 발생하는 시간의존적 침하(점성토)

다. 2차 압밀침하(secondary consolidation settlement): 과잉간극수압이 모두 소산된 후에도 하중이 지속적으로 작용하는 경우에 발행하는 시간의존적 침하로 흙구조의 소성적 조정(plastic adjustment)이 주원인(유기질 성분이 많은 흙)

라. 침하량

$$S_t(\text{전체침하량}) = S_i(\text{즉시침하량}) + S_c(\text{1차압밀침하량}) + S_s(\text{2차압밀침하량})$$

마. 사질토: 투수계수가 커서 간극수압 증가와 함께 배수가 일어나 지반의 부피감소의 해 지반침하 발생. 사질토는 즉시침하와 압밀침하가 동시에 일어남

바. 점성토: 투수계수가 매우 작아 하중에 의한 과잉간극수압의 소실 시간이 오래 걸림. 즉시침하가 발생한 후 오랫동안 압밀침하 발생, 압밀침하량 >> 즉시침하량

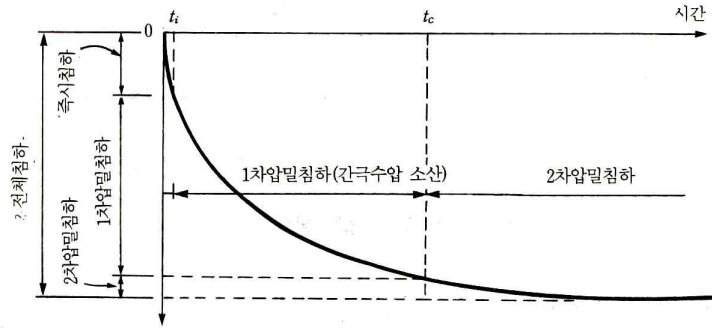


그림 7-2 점토의 침하

7.2 압밀의 원리

7.2.1 Terzaghi 모델

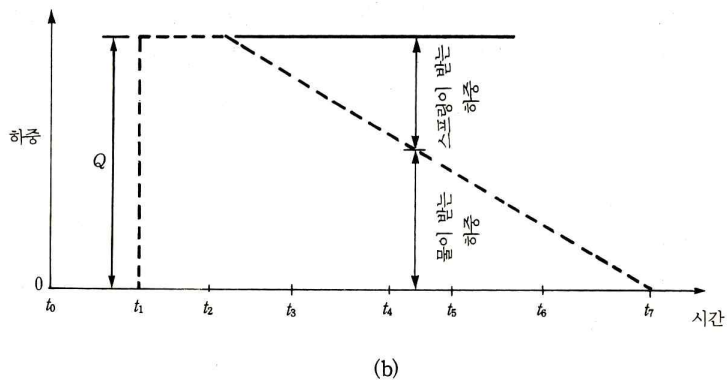
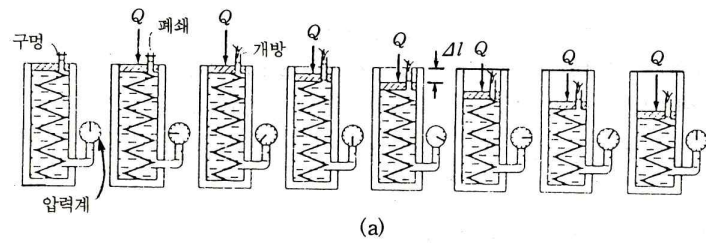


그림 7-3 Terzaghi 모델

(1) 점토지반에 하중을 가할 때,

가. 초기: 모든 하중이 간극수에 작용 --> 과잉간극수압 발생

나. 점차적으로 물이 빠져나감 --> 간극수에 의한 하중 감소만큼 흙입자에 하중 작용 --> 압축 발생 시작 --> 과잉간극수압 = 0 상태까지 압축 발생 지속

7.2.2 Kelvin 모델

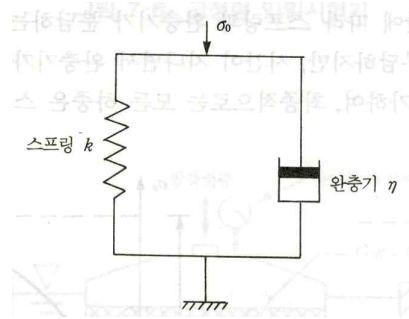


그림 7-4 Kelvin 모델

(1) 포화 점성토의 시간에 따른 변형을 나타내기 위하여 선형 탄성 스프링(흙입자)과 완충기(dashpot, 물)를 병렬로 연결한 유동학적 모델

(2) 스프링과 완충기의 응력-변형률 관계

가. 스프링: $\sigma_s = k\epsilon$; σ : 응력, ϵ : 변형률, k : 스프링 상수

나. 완충기: $\sigma_d = \eta \frac{d\epsilon}{dt}$; η : 완충기 상수, t : 시간

(3) 모델에 가해진 σ_0 에 대한 점탄성 거동

$$\sigma_0 = \sigma_s + \sigma_d = k\epsilon + \eta \frac{d\epsilon}{dt}$$

$$\epsilon_0: t=0 \text{ 일 때, } \epsilon = \frac{\sigma_0}{k}(1 - e^{-(k/\eta)t}) + \epsilon_0 e^{-(k/\eta)t}$$

$$\epsilon_0 = 0 \text{ 일 때, } \epsilon = \frac{\sigma_0}{k}(1 - e^{-(k/\eta)t})$$

(4) 임의의 시간 t 에서 스프링과 완충기의 응력 값

가. 스프링: $\sigma_s = k\epsilon = \sigma_0 k(1 - e^{-(k/\eta)t})$

나. 완충기: $\sigma_d = \eta \frac{d\epsilon}{dt} = \sigma_0 e^{-(k/\eta)t}$

(5) Kelvin 모델에서 시간이 “0” 에서는 완충기가 전응력을 나타내지만, 시간이 지남에 따라 완충기에 미치는 영향은 적어지고 최종적으로는 스프링이 전응력 값을 나타냄

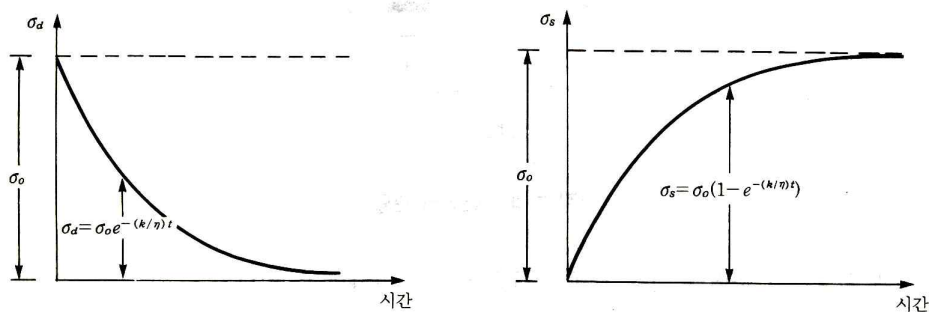


그림 7-5 Kelvin 모델의 응력-시간 관계

7.3 압밀 시험

7.3.1 1차원 압밀시험

(1) 압밀시험기(oedometer, consolidometer) 사용: 고정형, 부동형

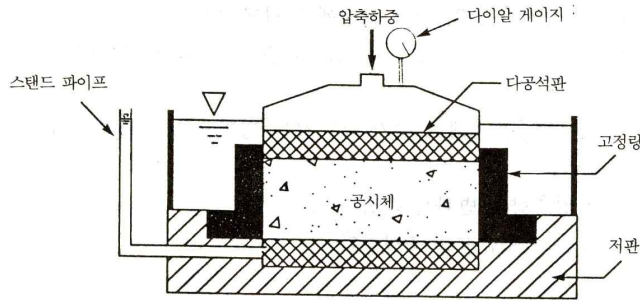


그림 7-6 고정형 압밀시험기

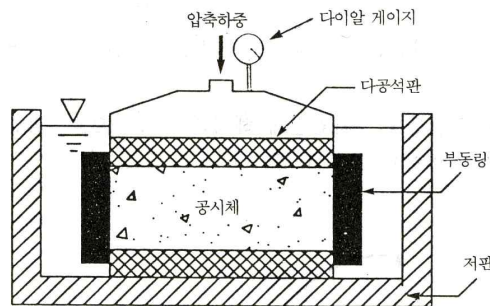


그림 7-7 부동형 압밀시험기

7.3.2 간극비-압력 곡선

(1) 3단계 시간-변형량 곡선

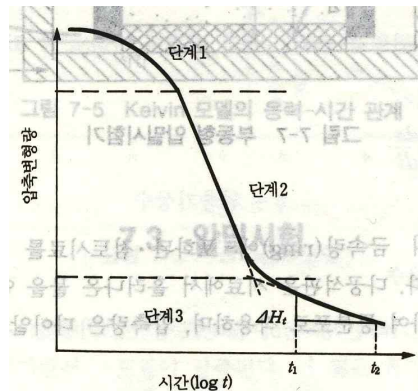


그림 7-8 시간-침하량 곡선

- 가. 1단계: 상부의 곡선 부분, 재하시 발생하는 탄성적인 압축변형
- 나. 2단계: 직선부분, 1차압밀에 해당, 간극수가 빠져나가 과잉간극수압이 소산되면서 발생
- 다. 3단계: 하부의 직선부분, 2차압밀에 해당, 과잉간극수압이 소산된 후 흙의 소성적 재배열로 인해 발생

(2) 압력에 따른 간극비의 변화(간극비-압력 곡선)

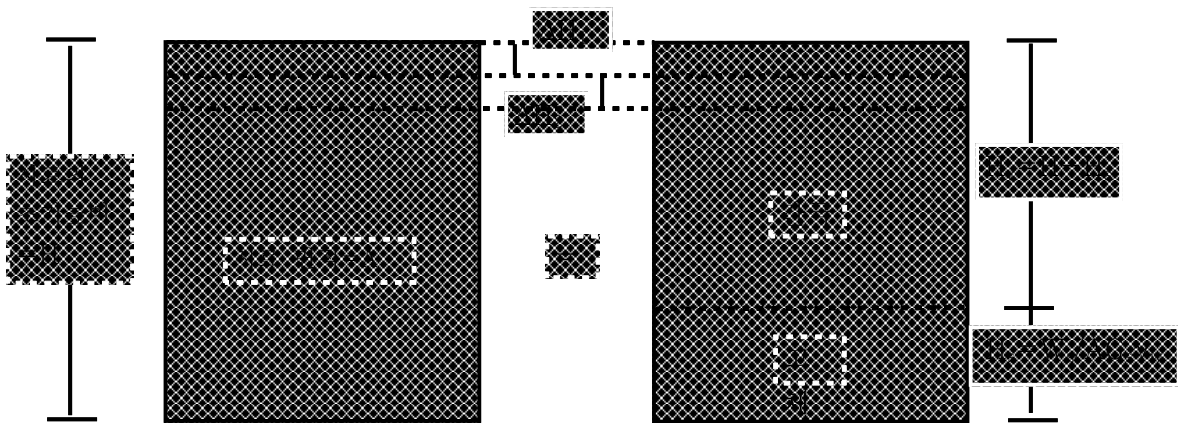


그림 7-9 압력과 간극비

가. 흙 시료에서 고체부분의 높이(H_s)

$$H_s = \frac{W_s}{AG_{s\gamma_w}}$$

여기서, W_s : 건조단위중량, A : 단면적, G_s : 비중

나. 간극의 초기 높이(H_v)

$$H_v = H - H_s$$

다. 시료의 초기 간극비(e_0)

$$e_0 = \frac{V_v}{V_s} = \frac{H_v \cdot A}{H_s \cdot A} = \frac{H_v}{H_s}$$

라. 1차압밀에 의한 최초의 하중 증가분 p_1 에 대한 간극비의 변화(Δe_1)

$$\Delta e_1 = \frac{\Delta H_1}{H_s}$$

마. p_1 으로 인한 새로운 간극비(e_1)

$$e_1 = e_0 - \Delta e_1$$

바. 2차압밀을 일으키는 압력 p_2 에 대한 압밀 완료시 간극비(e_2)

$$e_2 = e_1 - \frac{\Delta H_2}{H_s}$$

7.4 선행압밀압력

7.4.1 선행압밀압력

- (1) 선행압밀압력(preconsolidation pressure, p_c): 시료가 과거에 받고 있던 최대압력으로서 자연적 지질작용 또는 인위적 작용에 의하여 일어남, 시료 채취로 존재하던 상재압력이 제거되어 부피팽창이 일어남
- (2) 선행압밀압력을 받은 시료에 대해 실험을 할 경우 가해진 압력이 선행압밀압력보다 작으면 소량의 압축이 발생(간극비의 작은 변화, 완만한 곡선)하고, 크면 간극비의 변화가 커져 급한 곡선을 보임(cd: 하중제거 과정, dfgh: 재하중작용 과정)

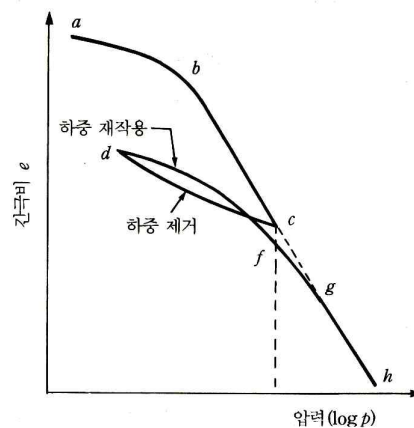


그림 7-10 하중작용과 하중제거 시험의 압력-간극비 곡선

7.4.2 정규압밀점토와 과압밀점토

- (1) 과압밀비(overconsolidation ration): $OCR = \frac{\text{선행압밀압력 } p_c}{\text{현재의 유효연직압력 } p}$
- (2) 정규압밀점토(normally consolidation clay): 점토가 현재 받고 있는 유효연직압력 (p)이 지금까지 받아온 선행압밀압력(p_c)보다 클 때(과압밀비 $OCR \leq 1$)
- (3) 과압밀점토(overconsolidation clay): 점토가 현재 받고 있는 유효연직압력보다 과거에 받았던 선행압밀압력이 클 때(과압밀비 $OCR > 1$)

7.4.3 선행압밀압력의 결정

- (1) Casagrande가 $e-\log p$ 곡선으로부터 선행압밀압력을 구하는 작도법 제안
 - 가. 육안으로 곡률이 가장 큰 점 P를 찾음
 - 나. 수평선 PQ를 그리고, P점에서 접선 PR를 그림
 - 다. 각 QRP를 이등분하는 선 PS를 그림
 - 라. $e-\log p$ 곡선의 직선부를 연장하여 PS선과 만나는 점 T를 그림
 - 마. 점 T에 해당하는 압력이 선행압밀압력 p_c 임

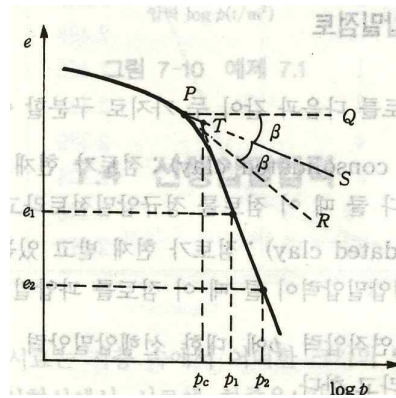


그림 7-11 선형압밀압력 작도법

7.5 압축지수

7.5.1 압축지수(compression index, C_c)

(1) e - $\log p$ 곡선에서 직선부의 기울기

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log p_2 - \log p_1} = \frac{\Delta e}{\log(p_2/p_1)}$$

(2) Terzaghi and Peck이 제안한 경험식

가. 비교란 점토: $C_c = 0.009(LL-10)$

나. 재성형 점토: $C_c = 0.007(LL-10)$

(3) 압축지수를 구하는 여러 가지 경험식

공식	적용 범위
$C_c = 0.007(LL - 7)$	재성형 점토
$C_c = 0.0046(LL - 9)$	브라질 점토
$C_c = 0.01w_N$ (w_N : 현장 함수비)	시카고 점토
$C_c = 0.0115w_N$	유기질 흙, 이탄, 유기질 점토
$C_c = 1.15(e_0 - 0.27)$	모든 점토
$C_c = 0.30(e_0 - 0.27)$	무기질 점성토(실트, 실트질 점토, 점토)
$C_c = 0.75(e_0 - 0.5)$	소성이 작은 흙
$C_c = 0.208e_0 + 0.0083$	시카고 점토
$C_c = 0.156e_0 + 0.0107$	모든 점토

7.5.2 시료교란의 영향

(1) 정규압밀점토: 원시압축곡선(처녀압밀곡선, virgin compression curve), 실내 압밀 시험곡선, 재성형 압밀시험곡선은 $e=0.4e_0$ 의 간극비에서 만남

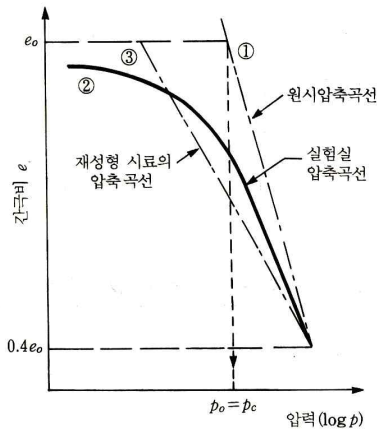


그림 7-12 정규압밀점토의 압밀특성

(2) 과압밀점토: 재압축지수(C_r , 또는 팽창지수 C_s)= $1/5 \sim 1/10 \cdot C_c$

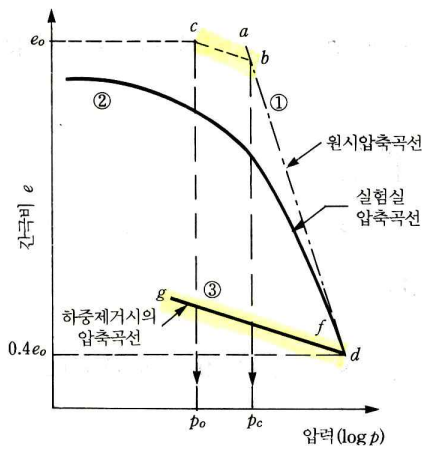


그림 7-13 과압밀점토의 압밀특성

7.6 1차 압밀침하량의 계산

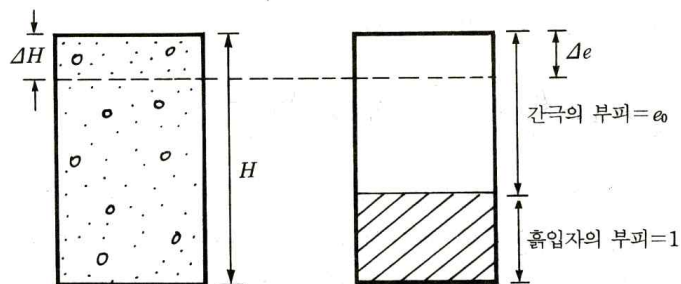


그림 7-14 1차 압밀침하량의 계산

(1) 변형률

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta e}{1 + e_0}$$

(2) 압밀침하량, S_c

$$S_c = \Delta H = \varepsilon H = \frac{\Delta e H}{1 + e_0}$$

$$\text{간극비 감소량: } \Delta e = C_c \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0}, \quad \left(\because \text{압축지수 } C_c = \frac{\Delta e}{\log(p_2/p_1)} \right)$$

(3) 정규압밀점토의 1차 압밀침하량, S_c

$$S_c = \frac{C_c}{1 + e_0} H \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0}$$

C_c : 압축지수, H : 점토층 두께, e_0 : 점토층 초기 간극비, p_0 : 점토층 중앙의 초기 유효연직압력, Δp : 유효연직압력의 증가량

가. $p_0 + \Delta p < p_c$ 일 때,

$$S_c = \frac{C_s}{1 + e_0} H \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0}$$

압축지수 C_c 대신 팽창지수 C_s 사용

나. $p_0 < p_c < p_0 + \Delta p$ 일 때,

$$S_c = \frac{C_s}{1 + e_0} H \log \frac{p_c}{p_0} + \frac{C_c}{1 + e_0} H \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0}$$

유효연직압력 < 선행압밀압력 (p_c): 팽창지수 (C_s) 사용

유효연직압력 > 선행압밀압력 (p_c): 압축지수 (C_c) 사용