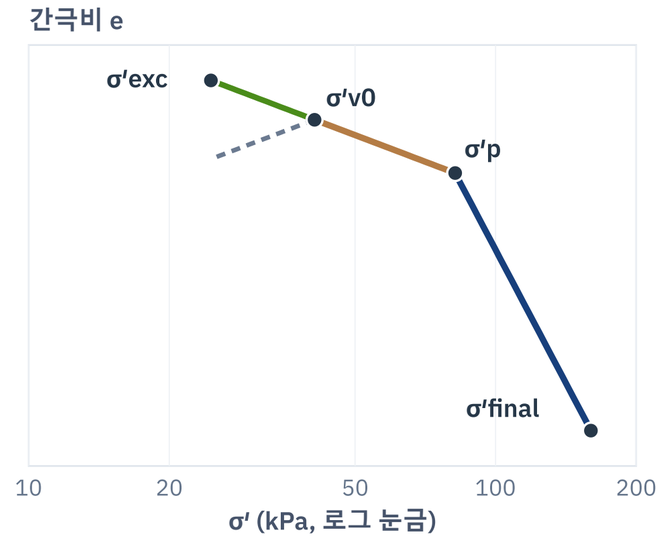
지반공학 강의 자료 · 침하

압밀침하

강의: 점토층의 일차원 압밀침하; 응력경로, 선행압밀, 굴착과 융기, Boussinesq 응력, mv 방법과 시간; 각 주제별 계산 예제.

응력 경로 | $C_c \cdot C_r \cdot C_s$ | 굴착 및 융기 | Boussinesq | m_v 방법 | 시간에 따른 침하



개요

이 강의에서 다루는 내용

- 점토의 **응력경로** 추적: $\sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{exc} \rightarrow \sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{p} \rightarrow \sigma'_{final}$ (C_s, C_r, C_c)
- 초기 응력(σ_{v0}, u_0, σ'_{v0})과 **선행압밀압력**($\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$) 구하기
- **굴착**의 제하 및 팽창 효과와 침하를 **어떤 기준**으로 측정하는지 구분하기
- **Boussinesq** 응력증가량과 **영향 깊이**를 계산하는 방법
- 절편 압축의 **네 가지 거동 구간**(재압축, 처녀압축)을 적용하고 **m_v** 방법과 비교하는 것
- **시간 의존적** 압밀(T_v, U, t_{50}, t_{90})과 층상 지반의 침하–시간 곡선을 작성하는 것

강의 흐름

각 주제는 **세 단계**로 다룬다:

1 · **이론**: 규칙은 무엇이며 왜 그러한가?

2 · **문제**: 조건과 구하는 값

3 · **풀이**: 단계별 수치 계산

예제 지반: 두께 6 m의 점토, 지하수위는 지표면 ($\sigma'_{v0} = 8.19\,z$), $e_0 = 1.0$, $C_c = 0.30$, $C_r = 0.06$; 4 × 6 m 기초, q = 150 kPa. 침하량의 단위는 mm이다.

이 모듈은 무엇을 계산하는가?

이론

지반 주상도의 **모든 지층이 점토**이며, 다른 지반은 입력할 수 없다. 모듈은 점토의 **1차 압밀**을 계산한다: 하중이 가해지면 물이 서서히 빠져나가고 점토는 응력경로를 따라 압축된다.

즉시(탄성)침하는 탄성침하 모듈에서 다루며, 이 둘의 합은 전체침하(2D) 모듈에서 다룬다.

풀이는 **해석적**이다: Boussinesq 응력 증가량, 분할층별 응력경로, Terzaghi 이론; 정수압 간극수압; 유한요소법은 사용하지 않는다.

적용 범위 제외: 사질토층, 2차 압축(C_α), 모래의 SPT/CPT 침하, 암반 침하, 2차원/3차원 압밀, 지지력, 액상화.

부호 규약

침하는 **양수**, 융기는 **음수**로 한다.

순변형량 $S_{net} = S_c + S_{heave}$.

초기 응력에서 최종 응력까지 단일 단계가 아님

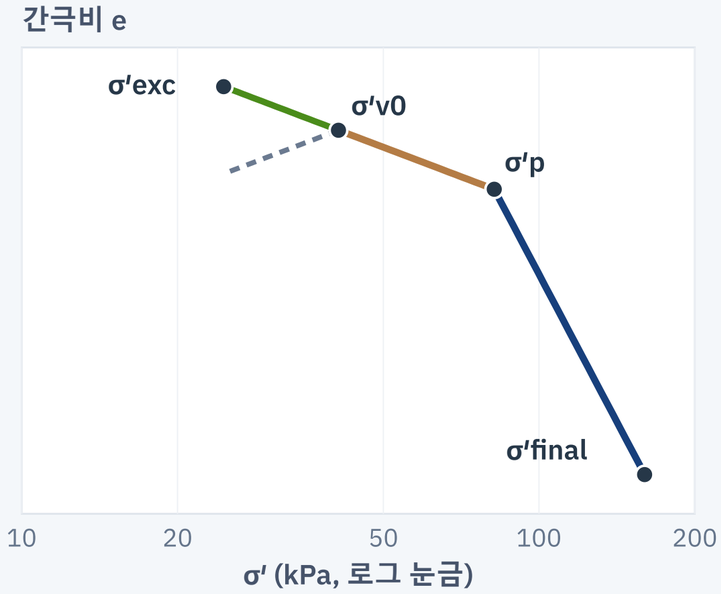
이론

계산은 초기 응력에서 최종 응력으로 결코 **한 단계로** 진행되지 않는다. 굴착은 유효응력을 감소시키고 점토는 제하선(C_s)을 따라 **팽창한다**. 구조물이 이를 다시 재하하면 점토는 먼저 같은 선을 따라 σ'_{v0} 수준으로 되돌아가고(팽창이 복원된다), 이어서 C_r을 따라 σ'_p까지 재압축되며, 최종 응력이 σ'_p를 초과하면 처녀압축선(C_c)을 따라 압축된다:

$$\sigma'_{v0} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{exc} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{v0} \xrightarrow{C_r} \sigma'_p \xrightarrow{C_c} \sigma'_{final}$$

> σ'_p는 과거 최대 응력이며 **굴착으로 감소하지 않는다**.

> 재하–제하 사이클은 σ'_{v0}에서 **닫힌다**: 제거된 상재토를 되돌려 놓는 데 그치는 하중은 C_s와 C_r의 값에 관계없이 초기 상태에 대해 침하를 일으키지 않는다.



개략도: 점선은 제하, 녹색 선은 재재하(C_s), 주황색은 재압축(C_r), 파란색은 처녀압축(C_c)을 나타낸다.

각 절편의 중점에서

이론

기초 저면과 계산 깊이 z_{lim} 사이의 각 지층은 두께가 최대 Δz인 **분할층**으로 나뉘며 (지하수위에서 절단됨), 각 응력은 분할층의 중앙점에서 계산한다:

$$\sigma_{v0} = \sum \gamma_i h_i \qquad u_0 = \gamma_w (z - z_w) \qquad \sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0$$

지하수위 위에서는 γ 값을, 아래에서는 γ_{sat} 값을 사용한다; γ_w = 9.81 kN/m³.

초기 지반응력은 이후의 각 시공단계에 대한 **기준**이다.

절편이 얇을수록 결과는 더 정확해진다; 손계산에서는 단일 절편으로도 근사 결과를 얻을 수 있다.

지하수위가 지표면에 위치

γ_{sat} = 18일 때 γ′ = 18 − 9.81 = 8.19 kN/m³이고 σ'_{v0} = 8.19 z이다. 이후의 모든 예제는 이 지반을 사용한다.

문제

예제

조건

지반	$\gamma = 17$ kN/m^3 **(지하수위 위),** $\gamma_{sat} = 18$ kN/m^3 **(아래)**
지하수위	**지표면으로부터 1.5 m**
깊이	**z = 1.5; 3.0; 4.5; 6.0 m**

구하는 값

각 깊이에서 **σ_{v0}, u_0, σ'_{v0}** 값을 구하라.

풀이

풀이

1 z = 3.0 m (지하수위 1.5 m)

$$\sigma_{v0} = 17(1.5) + 18(1.5) = 52.50 \text{ kPa}$$

$$u_0 = 9.81(3.0 - 1.5) = 14.715 \text{ kPa} \qquad \sigma'_{v0} = 52.50 - 14.715 = \mathbf{37.785} \text{ kPa}$$

z (m)	σ_{v0} (kPa)	u_0 (kPa)	σ'_{v0} (kPa)
1.5	25.50	0.00	**25.50**
3.0	52.50	14.71	**37.78**
4.5	79.50	29.43	**50.07**
6.0	106.50	44.15	**62.35**

지하수위 아래에서는 σ'_{v0} 값이 **더 느리게** 증가한다(기울기 $\gamma' = 8.19$ kN/m³): z = 6 m에서 전응력은 106.5, 유효응력은 62.4 kPa에 불과하다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

$\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$ 또는 실내시험 값

이론

각 모델에는 **하나의 정의**만 사용한다: 과압밀비 OCR 또는 실내시험 σ'_p 값:

$$\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0} \qquad \text{또는} \qquad \sigma'_p = \sigma'_{p,lab} \ (\geq \sigma'_{v0})$$

OCR = 1: 정규압밀 점토; $\sigma'_p = \sigma'_{v0}$이며 초기 응력을 넘는 모든 재하는 처녀압축이다.

실내시험으로 얻은 σ'_p 값이 σ'_{v0}보다 작으면 경고와 함께 σ'_{v0}으로 상향 조정된다: **미압밀 점토는 적용 범위 밖이다**.

σ'_p는 과거의 최대 응력을 나타내며 굴착으로 인해 낮아지지 않는다.

OCR이 말해 주는 것

OCR = σ'_p/σ'_{v0}. OCR 값이 크다는 것은 하중을 받는 점토가 **작은 C_r**로 먼저 압축되는 재압축 구간이 넓다는 뜻이다.

문제

예제

조건

절편

경우

중점 $z = 3$ m: $\sigma'_{v0} = 24.57$ kPa (지하수위는 지표면, $\gamma_{sat} = 18$)

(a) $OCR = 3$ · (b) 실내시험 $\sigma'_p = 60$ kPa · (c) 실내시험 $\sigma'_p = 20$ kPa

구하는 값

각 경우의 **σ′p** 및 **OCR**; 상태를 해석하라.

풀이

풀이

1 (a) 주어진 OCR 값과 (b) 실험실 값

$$\text{(a)}: \ \sigma'_p = 3(24.57) = \mathbf{73.71}\ \text{kPa} \qquad \text{(b)}: \ OCR = \frac{60}{24.57} = \mathbf{2.44}$$

2 (c) 실험실 값이 σ′v0 미만인 경우

$$\sigma'_{p,lab} = 20 < \sigma'_{v0} \ \Rightarrow \ \sigma'_p = \mathbf{24.57}\ \text{kPa},\ OCR = 1$$

(a)와 (b)는 과압밀 점토(σ′p > σ′v0)이며, (c)에 대해서는 모듈이 경고를 표시하고 점토를 **정규압밀** 상태로 간주한다(σ′p = σ′v0 = 24.57 kPa): 미압밀 점토는 적용 범위 밖이다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

제하와 융기

이론

제거되는 하중은 굴착저면의 **초기 유효상재응력**이다(지하수위는 변하지 않으며, 물 아래에서 제거되는 무게는 γ′로 계산한다). 제하는 굴착 평면의 Boussinesq 영향값 I_{exc}에 따라 분포한다(넓은 굴착에서는 $I_{exc} = 1$):

$$q_{lift} = \sigma'_{v0}(D_{exc}) \qquad \Delta\sigma_{exc} = -q_{lift}\, I_{exc}(z') \qquad \sigma'_{exc} = \sigma'_{v0} + \Delta\sigma_{exc}$$

$$\Delta H_{heave} = -\frac{C_s\,\Delta H}{1+e_0}\,\log_{10}\frac{\sigma'_{v0}}{\sigma'_{exc}}$$

팽창은 **음수**이다(침하 +, 팽창 –). C_s가 주어지지 않으면 $C_s = C_r$로 취하고 보고서에 명시한다.

순압력 $q_{net} = q_{gross} - q_{uplift}$는 보고용으로만 제시한다. 계산은 순압력으로 한 번에 수행하지 않고 응력경로를 따라 수행한다.

NEDEN KABARMA?

굴착으로 유효응력이 감소하여 점토가 팽창한다. 구조물이 다시 하중을 가하면 팽창이 회복된다: 이는 팽창한 지반의 **재압축**이다.

기초 중심 아래의 Δσ

이론

$$\Delta\sigma_{load} = q_{gross}\, I_z(z') \qquad z' = z - D_f$$

직사각형 B × L의 중심 아래: Newmark 모서리 영향계수를 이용하여 $I_z = 4 \cdot I_{corner}$(m = B/2z′, n = L/2z′):

$$I_{köşe} = \frac{1}{4\pi}\left[\frac{2mn\sqrt{V}}{V + m^2n^2}\cdot\frac{V+1}{V} + \tan^{-1}\frac{2mn\sqrt{V}}{V - m^2n^2}\right] \qquad V = m^2 + n^2 + 1$$

($V < m^2n^2$인 경우 아크탄젠트 항에 π를 더한다). **띠하중**(폭 B)의 중심선 아래에서: $I_z = (\alpha + \sin\alpha)/\pi$, $\alpha = 2\tan^{-1}(B/2z')$. $z' = 0$에서 $I_z = 1$.

$$\sigma'_{final} = \sigma'_{exc} + \Delta\sigma_{load}$$

참고

응력 증가량은 기초 중심 아래의 연직선을 따라 취하며(절편 및 시간 해석), 색 띠 영역에서 기초 바깥의 점은 모서리 직사각형으로 나누어 계산한다.

문제

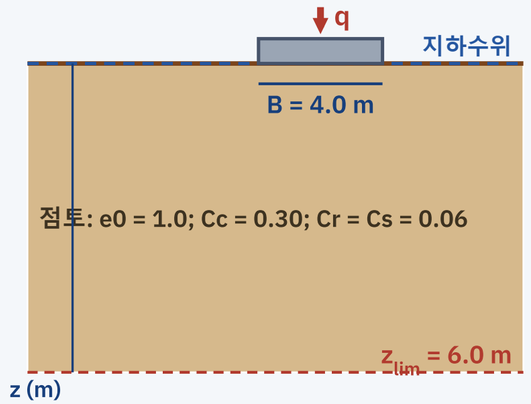
예제

조건

기초	**4 × 6 m 직사각형, $q = 150$ kPa, 지표면에서 ($D_f = 0$)**
점	**분할층 중점 z′ = 3 m, 중심 아래**
비교	**폭 B = 4 m의 띠하중**

구하는 값

$\mathbf{I_z}$ 및 **Δσ**; 띠하중에서도 같은 값이 적용된다.



풀이 (1/2)

풀이

1 직사각형: m = B/2z′ = 2/3 = 0.667; n = L/2z′ = 1.0

$$V = m^2 + n^2 + 1 = 2.4444, \quad m^2 n^2 = 0.4444, \quad \sqrt{V} = 1.5635$$

$$T_1 = \frac{2mn\sqrt{V}}{V + m^2 n^2} \cdot \frac{V+1}{V} = \frac{2.0846}{2.8889} \cdot \frac{3.4444}{2.4444} = 1.0168$$

$$T_2 = \tan^{-1}\frac{2.0846}{2.0000} = 0.8061 \qquad I_{köşe} = \frac{T_1 + T_2}{4\pi} = 0.1451$$

2 직사각형과 띠

$$\text{직사각형} : I;_z = 4(0.1451) = \mathbf{0.5803} \;\Rightarrow\; \Delta\sigma = 150(0.5803) = \mathbf{87.04}\ \text{kPa}$$

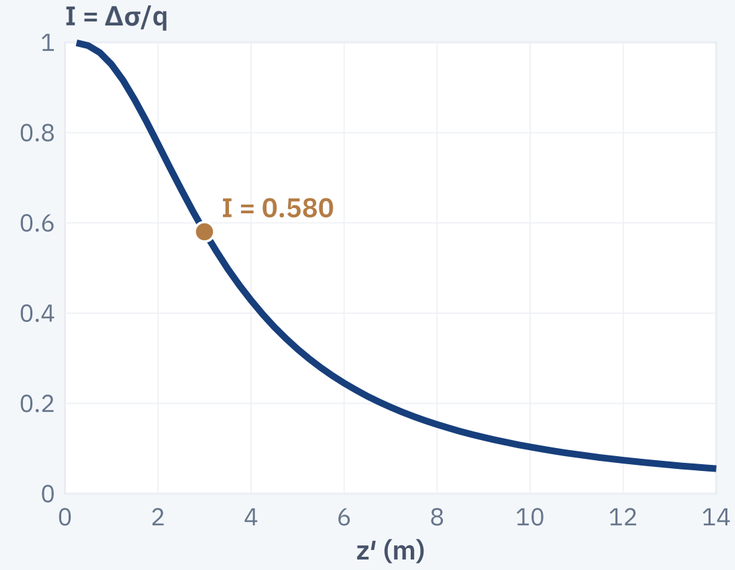
$$\text{띠} : \alpha = 2\tan^{-1}\tfrac{4}{6} = 1.1760 \;\Rightarrow\; I_z = \frac{1.1760 + 0.9231}{\pi} = 0.6682$$

$$\Delta\sigma = 150(0.6682) = \mathbf{100.22}\ \text{kPa}$$

풀이 (2/2)

풀이

z′ (m)	I_z	Δσ (kPa)
0.5	0.9927	148.9
1.0	0.9513	142.7
2.0	0.7746	116.2
3.0	0.5803	87.0
4.0	0.4283	64.2
6.0	0.2449	36.7
8.0	0.1532	23.0
10.0	0.1034	15.5



절편 중앙에서 Δσ = **87.0 kPa** (q의 58%)이며, 폭이 좁은 띠하중(같은 B)은 100.2 kPa을 준다: **긴 기초일수록 더 깊이까지 영향을 준다**. 응력 증가량은 z′ = 10 m에서도 10%이다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

영향 깊이: I(z′) = p

이론

응력 증가량은 깊이에 따라 감소하지만 결코 0이 되지 않는다; 절편 압축량의 합에는 하한이 필요하다: **계산 깊이 z_{lim}**. 영향 깊이 규칙에서는 중심 아래의 Boussinesq 증가량이 작용압력의 **p**배로 내려갈 때까지 점토가 압축된다(통상 p = 10%):

$$I_z(z') = p \;\Rightarrow\; z_{lim} = D_f + z'$$

같은 영향계수가 동일한 평면 형상의 굴착에서의 제하도 지배한다. 따라서 깊이는 q_{gross}로 읽든 q_{net}으로 읽든 같다.

지반 주상도가 z_{lim}보다 위에서 끝나면 마지막 지층이 z_{lim}까지 같은 특성으로 계속된다; 아래에서 끝나면 z_{lim} 아래의 지반은 압축되지 않는다.

대안 규칙은 **지반 주상도의 바닥**이며, 단단한 바닥을 가정한다. (Δσ = 0.2 σ'_{v0} 기준은 깊게 놓인 소형 기초에서 더 깊은 위치를 가리키며, 모듈의 규칙은 기하 조건에만 의존한다.)

z′/B (p = %10 | %20)

L/B	p = %10	p = %20
1.0	2.09 B	1.40 B
1.5	2.55 B	1.70 B
2.0	2.92 B	1.94 B
5.0	4.33 B	2.68 B
띠	6.34 B	3.13 B

문제

예제

조건

기초	**(a) 4 × 6 m, p = 10% 및 20% · (b) 20 × 30 m 전면기초, p = 10% 및 20%**
규칙	**영향 깊이; $D_f = 0$**

구하는 값

각 경우의 **z′** 및 z_{lim}; 4 × 6 m에 대한 I(z′) 검토.

풀이

풀이

1 검토: 4 × 6 m, p = 10% ⇒ z′ = 10.19 m

$$m = \frac{2}{10.19} = 0.1963,\ n = \frac{3}{10.19} = 0.2945 \ \Rightarrow\ I_z = 4(0.0250) = \mathbf{0.1000}$$

기초	p = %10: z′ (m)	p = %20: z′ (m)
4 × 6 m (L/B = 1.5)	10.19 (2.55 B)	6.82 (1.70 B)
20 × 30 m 전면기초	50.9 (2.55 B)	34.1 (1.70 B)

z′는 **기초 크기에 비례한다**: 4 × 6 m 기초에서는 z_{lim} = 10.19 m, 20 × 30 m 전면기초에서는 **50.9 m**이다. 전면기초는 약 51 m 깊이까지 압축되는 점토를 고려한다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

재재하 시 절편 끼임

이론

분할층에 대해 $f = \Delta H/(1 + e_0)$; $\sigma'_{exc} \le \sigma'_{v0} \le \sigma'_p$일 때, 최종 응력의 위치에 따른 분할층의 압축량:

조건	재재하 시 절편 끼임
$\sigma'_{exc} \le \sigma'_{final} \le \sigma'_{v0}$	$S_b = C_s f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_{exc})$: 융기량의 일부가 회복된다
$\sigma'_{v0} < \sigma'_{final} \le \sigma'_p$	$S_b = C_s f \log(\sigma'_{v0}/\sigma'_{exc}) + S_r = C_r f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_{v0})$
$\sigma'_{v0} < \sigma'_p < \sigma'_{final}$	$S_b + S_r = C_r f \log(\sigma'_p/\sigma'_{v0}) + S_v = C_c f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_p)$
$\sigma'_p = \sigma'_{v0} < \sigma'_{final}$ (NC)	$S_b + S_v = C_c f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_{v0})$
$\sigma'_{final} < \sigma'_{exc}$	C_s에 의한 추가 팽창 (음의 값)

$$S_c = \sum (S_b + S_r + S_v) \qquad S_{net} = S_c + S_{heave}$$

굴착이 없는 경우

$\sigma'_{exc} = \sigma'_{v0}$이고 $S_b = 0$인 경우: 고전적인 재압축과 처녀압축이 초기 응력으로부터 진행된다.

문제

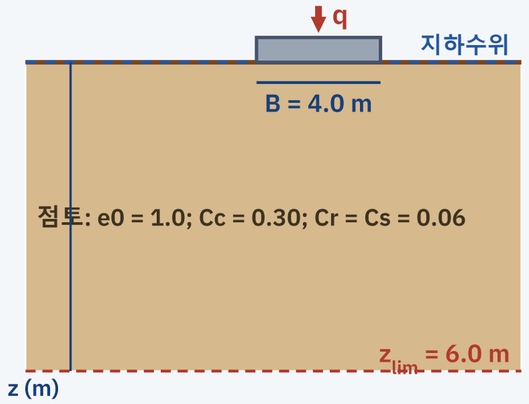
예제

조건

지반	**단일 점토층, 두께 6 m;** $\gamma_{sat} = 18$ kN/m^3**;** **지하수위는 지표면;** $e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_r = C_s = 0.06$
기초	**4 × 6 m 직사각형,** $q = 150$ kPa**, 지표면 위치 (굴착 없음)**
절편	**단일 절편, H = 6 m, 중점** $z = 3$ m**:** $\sigma'_{v0} = 8.19\,z = 24.57$ kPa
과압밀	**(a) OCR = 1 (NC) · (b) OCR = 6 · (c) OCR = 3**
응력 증가량	$\Delta\sigma = 150\,I_z(3) = 87.04$ kPa **(예제 3) ⇒** $\sigma'_{final} = 111.61$ kPa

구하는 값

각 점토에 대한 **압밀 상태**와 압밀침하 s_c.



풀이 (1/2)

풀이

1 공통: f = H/(1 + e_0) = 6/2 = 3 m; log($\sigma'_{final}/\sigma'_{v0}$) = log(111.61/24.57) = 0.6573

$$\text{(a) NC}: \quad S_v = C_c f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.30(3)(0.6573) = \mathbf{591.6\ mm}$$

2 (b) OCR = 6: σ'_p = 6(24.57) = 147.4 kPa > σ'_{final} ⇒ 재압축만 발생

$$S_r = C_r f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.06(3)(0.6573) = \mathbf{118.3\ mm}$$

같은 점토, 같은 하중에서 정규압밀 점토는 **591.6 mm**, OCR = 6인 점토는 **118.3 mm** 침하한다. 이 차이는 C_c/C_r = 5라는 비에서 비롯된다.

풀이 (2/2)

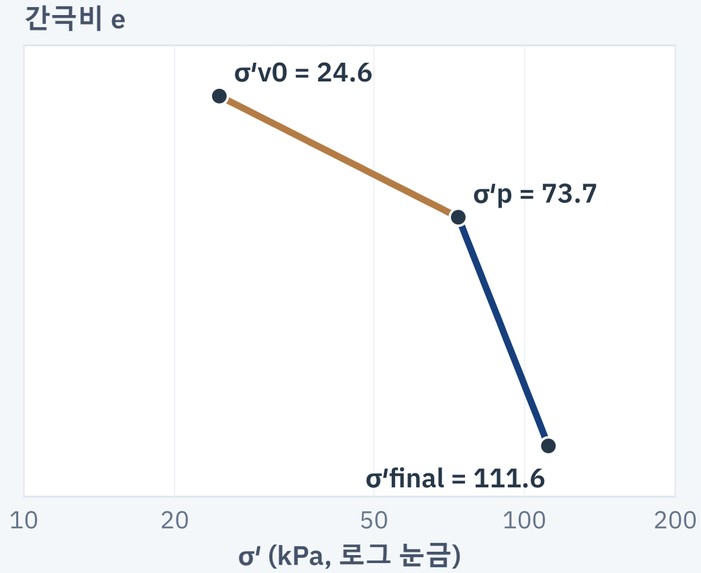
풀이

3 (c) OCR = 3: $\sigma'_p = 3(24.57) = 73.71$ kPa < $\sigma'_{final} = 111.61$ ⇒ 재압축 + 처녀압축

$$S_r = 0.06(3)\log\frac{73.71}{24.57} = 85.9\ \text{mm}$$

$$S_v = 0.30(3)\log\frac{111.61}{73.71} = 162.2\ \text{mm} \qquad S_c = \mathbf{248.0\ mm}$$

OCR	σ'_p (kPa)	영역	S_r (mm)	S_v (mm)	S_c (mm)
1	24.6	미교란	0	591.6	**591.6**
6	147.4	재압축	118.3	0	**118.3**
3	73.7	재압축 + 처녀압축	85.9	162.2	**248.0**



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

원지반에서인가, 융기한 저면에서인가?

이론

굴착 다음에는 기초가 시공된다: 침하는 변위를 **어떤 기준으로부터** 측정하는지에 따라 달라진다 (굴착 단계의 *굴착 후 변위* 선택):

보존 — 원지반 기준(기본값): 융기는 별도로 표시된다. 기초의 침하는 재하 종료 시의 순변형이며 $\mathbf{S = S_c + S_{heave}}$ = σ'_{v0}을 넘는 총 압축량이다. 제거된 상재토보다 크지 않은 하중은 S = 0을 주고, 하중이 더 작으면 지반은 원래 높이 위에 남는다(보고되며 침하는 0이다).

재하 전에 0으로 초기화된다: 굴착 단계의 변위는 0으로 되돌려지고, 침하는 융기된 굴착저면을 기준으로 측정한다: $\mathbf{S = S_c = S_b + S_r + S_v}$. 융기량의 재압축은 침하로 간주한다: 완전 보상된 기초는 저면이 융기한 만큼 침하한다. 구조물이 시공될 때까지 굴착면이 열린 채로 유지되어 융기가 발생했다면 이것이 올바른 해답이다.

두 가지 척도는 항상 출력되며, 선택에 따라 기초의 침하량으로 보고되는 값, 시간 곡선 및 결과가 결정된다.

요약

유지: $S = S_c + S_{heave}$ (작음). 영으로 설정: $S = S_c$ (큼).

문제

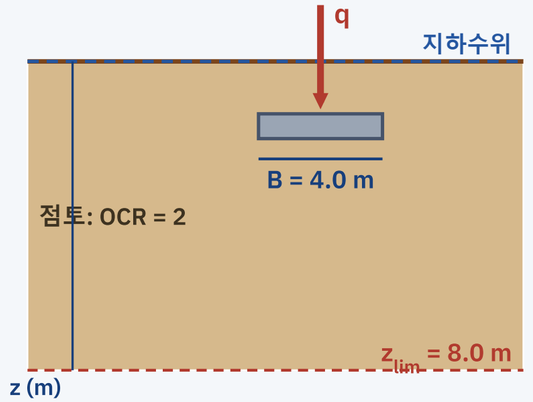
예제

조건

지반	**점토 0–8 m,** $\gamma_{sat} = 18$**, 지하수위는 지표면;** $e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_r = C_s = 0.06$**;** $OCR = 2$
굴착	**넓은 굴착 (**$I_{exc} = 1$**), 깊이 2 m; 기초는 굴착저면에 위치**
기초	**4 × 6 m,** $q_{gross} = 100$ kPa
절편	**단일 분할층 2–8 m,** $H = 6$ **m,** $z = 5$ **m,** $f = 3$ **m:** $\sigma'_{v0} = 8.19(5) = 40.95$ kPa

구하는 값

σ'_{exc}, 융기, S_b, S_r, S_v, S_c; 기초의 침하(원지반 기준 및 초기화 후).



풀이 (1/3)

풀이

1 굴착: 제거된 하중, 제하 및 융기

$$q_{lift} = \sigma'_{v0}(2) = 8.19(2) = 16.38 \text{ kPa} \qquad \sigma'_{exc} = 40.95 - 16.38 = \mathbf{24.57} \text{ kPa}$$

$$\Delta H_{heave} = -0.06(3)\log\frac{40.95}{24.57} = -0.06(3)(0.2218) = \mathbf{-39.9\ mm}$$

2 재하: $I_z(z' = 3) = 0.5803$ (예제 3); $\sigma'_p = 2(40.95) = 81.9$ kPa

$$\Delta\sigma = 100(0.5803) = 58.03 \text{ kPa} \quad \sigma'_{final} = 24.57 + 58.03 = \mathbf{82.60} \text{ kPa}$$

풀이 (2/3)

풀이

3 압밀 상태: $\sigma'_{v0} < \sigma'_p = 81.9 < \sigma'_{final} = 82.60$

$$S_b = 0.06(3)\log\frac{40.95}{24.57} = 39.9\ \text{mm} \qquad S_r = 0.06(3)\log\frac{81.9}{40.95} = 54.2\ \text{mm}$$

$$S_v = 0.30(3)\log\frac{82.60}{81.9} = 3.3\ \text{mm} \qquad S_c = \mathbf{97.4\ mm}$$

재재하 시에는 먼저 팽창량이 회복되고(S_b = 39.9 mm = 팽창량 전체), 이어서 C_r에 의한 54.2 mm의 재압축과 σ'_p를 약간 넘는 3.3 mm의 처녀압축이 발생한다.

풀이 (3/3)

풀이

4 기초의 침하

보존 : $S = S_c + S_{heave} = 97.4 - 39.9 = \mathbf{57.5\ mm}$

영이 된다 : $S = S_c = \mathbf{97.4\ mm}$

원지반에서 측정한 침하는 **57.5 mm**, 융기된 저면에서 측정한 침하는 **97.4 mm**이다. 차이는 융기량과 같다(39.9 mm): 기준의 선택이 결과를 69% 바꾼다.



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

선형 경로: $\Delta H = m_v \, \Delta\sigma' \, H$

이론

별도의 **선형** 계산 경로이다: 같은 m_v를 제하와 재재하 모두에 사용하며, C_c, C_r, C_s 및 e_0는 개입하지 않는다:

$$\Delta H = m_v \, \Delta\sigma' \, H_{slice}$$

$$\text{히빙} = -m_v \left(\sigma'_{v0} - \sigma'_{exc}\right) H \qquad S_c = m_v \left(\sigma'_{final} - \sigma'_{exc}\right) H$$

S_c에서 σ'_{v0}까지에 해당하는 부분은 회복되는 팽창량(S_b)이다.

선형이므로 루프가 저절로 닫힌다.

m_v의 단위는 1/kPa(체적압축계수)이며, 응력 범위에 따라 선택해야 한다.

e – log σ′ 대비 차이

m_v 방법은 응력 수준을 고려하지 않는다 (σ'_p 없음): 모든 응력 증가분은 동일한 압축량을 일으킨다.

문제

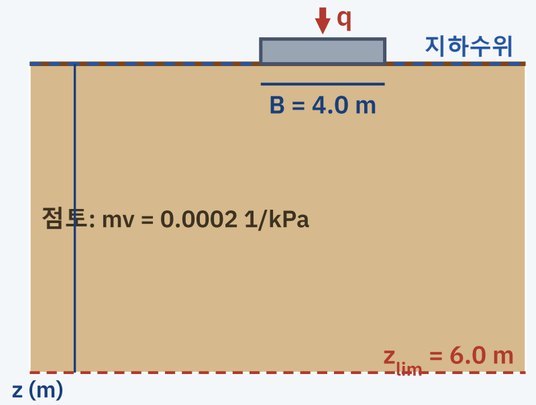
예제

조건

지반	**점토 6 m, $m_v = 0.0002$ 1/kPa, 지하수위 지표면**
경우 (a)	**굴착 없음: 4×6 m, $q = 150$ kPa, $\Delta\sigma = 87.04$ kPa (예제 3)**
경우 (b)	**예제 6의 굴착과 기초 (2 m 굴착, $q = 100$ kPa, 2–8 m 절편)**

구하는 값

각 경우의 $\mathbf{s_c}$; (b)의 경우 융기, s_b 및 순침하.



풀이

풀이

1 (a) 굴착 없음

$$S_c = m_v\,\Delta\sigma'\,H = 0.0002(87.04)(6) = \mathbf{104.4\ mm}$$

2 (b) 굴착 후: σ'_{v0} = 40.95; σ'_{exc} = 24.57; $\Delta\sigma_{load}$ = 58.03; σ'_{final} = 82.60 kPa

$$\text{히빙} = -0.0002(40.95 - 24.57)(6) = -19.7\ \text{mm} = -S_b$$

$$S_r = 0.0002(82.60 - 40.95)(6) = 50.0\ \text{mm} \qquad S_c = S_b + S_r = \mathbf{69.6\ mm}$$

순침하량(원지반 기준) S = S_c + 융기량 = **50.0 mm**; σ'_{v0}을 초과하는 41.65 kPa의 증가분만 침하를 유발한다. 선형 경로에서는 e – log σ′ 방법에 σ'_p의 영향이 없다.

Terzaghi: T_v, U와 t

이론

$$T_v = \frac{C_v\, t}{H_{dr}^2} \qquad U(T_v) = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} \qquad M = \frac{\pi(2m+1)}{2}$$

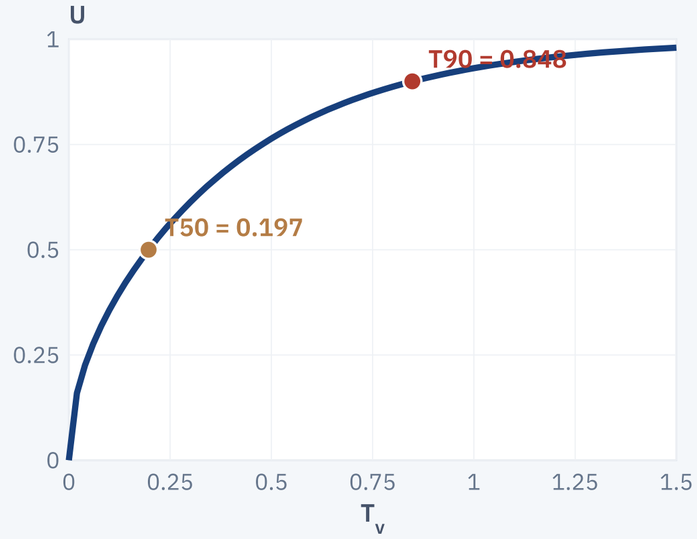
$$S_i(t) = U_i(t)\, S_{c,i} \qquad S(t) = \sum S_i(t) \qquad t = \frac{T_v\, H_{dr}^2}{C_v}$$

H_{dr} = H (일면배수) 또는 H/2 (양면배수); H는 기초 저면 아래의 지층 두께 (지반 주상도 밖으로 이어지는 마지막 지층은 z_{lim}까지).

$T_{v,50}$ = 0.197; $T_{v,90}$ = 0.848. T_v < 0.05에서는 초기 시간 해 $U = 2\sqrt{(T_v/\pi)}$를 사용한다.

C_v 및 H_{dr} 값이 서로 다른 지층은 압밀 속도가 다르다. 지반 전체의 곡선은 **각 지층 곡선의 합**이며, 고유한 t_{50}과 t_{90} 값은 이 합에서 읽는다.

곡선은 재하 침하량 S_c에 대한 것이며, 융기는 재하 전에 완료된 것으로 가정한다.



문제

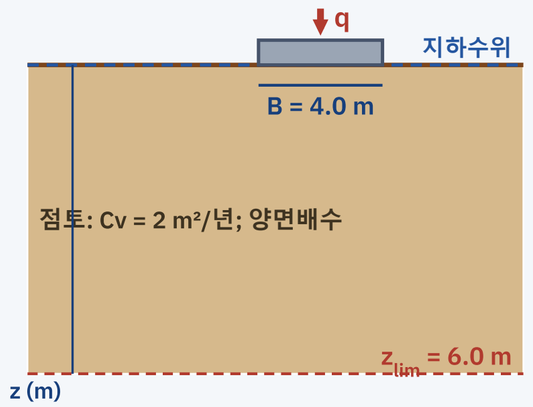
예제

조건

점토	**6 m, 정규압밀 (예제 5a): $S_c = 591.6$ mm**
압밀	**$C_v = 2\ \mathrm{m}^2/$년; 상부와 하부에 배수 (양면 배수)**
시간	**t = 0.25; 0.5; 1; 2; 4; 8년**

구하는 값

H_{dr}, t_{50}, t_{90} 및 S(t); 일면배수 조건의 t_{90}.



풀이 (1/2)

풀이

1 배수거리와 특성 시간

$$H_{dr} = \frac{H}{2} = 3\ \text{m} \qquad t_{50} = \frac{0.197(3^2)}{2} = \mathbf{0.89}\ \text{년} \qquad t_{90} = \frac{0.848(3^2)}{2} = \mathbf{3.82}\ \text{년}$$

2 일방향 배수 (H_{dr} = 6 m)

$$t_{90} = \frac{0.848(6^2)}{2} = \mathbf{15.3}\ \text{년}$$

양면 배수에서는 배수 경로가 절반으로 줄고 시간은 **4분의 1**로 감소한다: t_{90} = 3.82년, 일면 배수는 15.3년.

풀이 (2/2)

풀이

t (년)	$T_v = C_v t/H_{dr}^2$	U	$S(t) = U\,S_c$ (mm)
0.25	0.056	0.266	**157**
0.50	0.111	0.376	**222**
1.00	0.222	0.531	**314**
2.00	0.444	0.729	**431**
4.00	0.889	0.910	**538**
8.00	1.778	0.990	**586**

1년에 침하의 53%만, 4년에 91%가 완료된다(S_c = 592 mm); 8년에는 U = 0.990이다. T_v 값이 작을 때(< 0.05)는 $U = 2\sqrt{(T_v/\pi)}$를 사용한다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

예제

조건	
기초	4 × 6 m, q = 150 kPa, 지표면에 작용; 지하수위는 지표면 (γ_{sat} = 18)
A층 (0–4 m)	연약, NC: $e_0 = 1.10,\ C_c = 0.35,\ C_r = 0.07$; $C_v = 1$; 양면배수
B층 (4–8 m)	견고, $OCR = 2$: $e_0 = 0.80,\ C_c = 0.20,\ C_r = 0.04$; $C_v = 3$; 일방향 배수
계산	주상도 하단 (8 m); 각 지층을 하나의 절편으로 (A: z = 2 m, B: z = 6 m)

구하는 값

각 지층의 s_c 값, t_{50}과 t_{90}; 시스템의 S(t) 곡선.

풀이 (1/3)

풀이

1 A: z = 2 m, σ'_{v0} = 16.38; $I_z(2)$ = 0.7746 ⇒ Δσ = 116.19; σ'_{final} = 132.57; f = 4/2.10 = 1.9048 m; NC

$$S_{c,A} = C_c f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.35(1.9048) \log \frac{132.57}{16.38} = \mathbf{605.4\ mm}$$

2 B: z = 6 m, σ'_{v0} = 49.14; σ'_p = 98.28; $I_z(6)$ = 0.2449 ⇒ Δσ = 36.74; σ'_{final} = 85.88 < σ'_p; f = 4/1.80 = 2.2222 m

$$S_{c,B} = C_r f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.04(2.2222) \log \frac{85.88}{49.14} = \mathbf{21.6\ mm}$$

총 압밀침하는 **627.0 mm**이며, 연약한 NC 상부 지층이 전체의 97%를 차지하고 단단한 과압밀 하부 지층은 21.6 mm에 불과하다.

풀이 (2/3)

풀이

3 배수거리와 소요 시간($t = 0.197\ H_{dr}^2/C_v$; $0.848\ H_{dr}^2/C_v$)

$$A:\ H_{dr} = 2\ \text{m}:\ t_{50} = \frac{0.197(4)}{1} = 0.788,\ t_{90} = \frac{0.848(4)}{1} = 3.39\ \text{년}$$

$$B:\ H_{dr} = 4\ \text{m}:\ t_{50} = \frac{0.197(16)}{3} = 1.051,\ t_{90} = \frac{0.848(16)}{3} = 4.52\ \text{년}$$

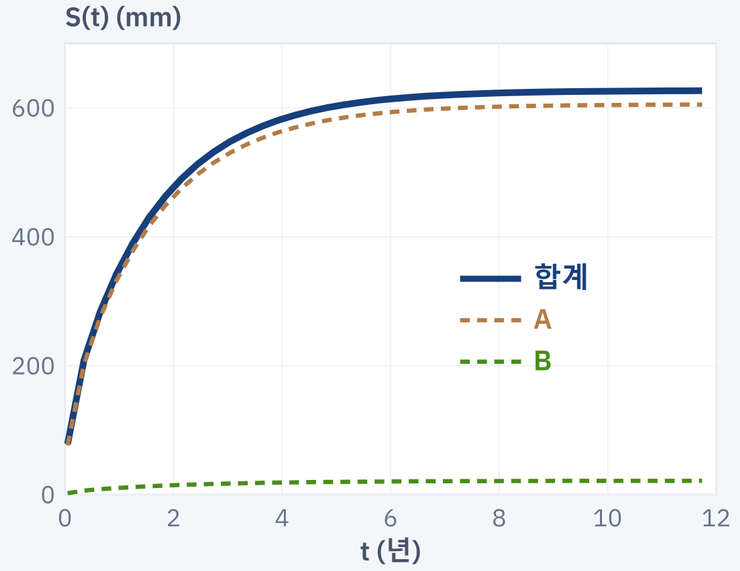
시스템의 곡선은 합산식 $S(t) = U_A(t)\,S_A + U_B(t)\,S_B$로 주어지며, 시스템 고유의 시간은 이 합으로부터 읽는다: **t_{50} = 0.794년, t_{90} = 3.43년**(지배적인 A층에 가깝다).

풀이 (3/3)

풀이

t (년)	S_A (mm)	S_B (mm)	S(t) (mm)	U
0.5	242	7.4	**249**	0.397
1.0	340	10.5	**351**	0.560
2.0	463	14.6	**477**	0.761
5.0	583	19.8	**603**	0.961
10.0	604	21.4	**626**	0.998
20.0	605	21.6	**627**	1.000

침하의 56%는 1년 만에, 96%는 5년 만에 완료되며, 약 10년 후에 종료된다(627 mm). 곡선은 **연약한 A층**에 의해 결정된다.



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

결과를 볼 때 유의할 사항

이론

기초 저면 높이 = 굴착저면(굴착이 없으면 지표면); **정수압** 상태의 간극수압; 지하수위는 굴착의 영향을 받지 않는다.

응력 증가량은 **기초 중심 아래의 연직선상**에서 취하며(층 분할과 시간 해석), 색 영역은 모든 점에서 같은 응력 경로를 따른다.

e_0은 각 단계의 초기 간극비이며, **2차 압축(C_α)은 없다**.

침하는 양(+), 융기는 음(−)이다; 상단 표시줄의 전환 스위치는 부호를 뒤집어 위쪽을 양으로 표시하는 방식으로 바꾼다 (계산 엔진은 기존 방식을 유지한다).

색상 구간: 침하, 팽창, 변형과 같이 깊이에 따라 급격히 감소하는 영역은 $1 \cdot 1.5 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 \times 10^{n}$ 등급으로 채색한다. 등간격 구간을 사용하면 하부 영역이 한 가지 색으로 뭉쳐 버릴 것이다.

요약

핵심 정리

응력 경로: $\sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{exc} \rightarrow \sigma'_{v0}\,(C_s) \rightarrow \sigma'_{p}\,(C_r) \rightarrow \sigma'_{final}\,(C_c)$; $\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$이며 굴착으로 감소하지 않는다

절편 압축 $f = \Delta H/(1 + e_0)$: NC: $C_c\, f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_{v0})$; OC 및 $\sigma'_{final} \le \sigma'_p$: $C_r\, f \log(\ldots)$; $\sigma'_{final} > \sigma'_p$: $C_r + C_c$ 부분

굴착: $q_{unload} = \sigma'_{v0}(D_{exc})$, 융기량 $= -C_s\, f \log(\sigma'_{v0}/\sigma'_{exc})$; $S = S_c + S_{heave}$ (원지반) 또는 S_c (영점 재설정)

Boussinesq: $\Delta\sigma = q\, I_z(z')$; 직사각형 중심 $4\, I_{corner}$, 띠 $(\alpha + \sin\alpha)/\pi$; $\mathbf{z_{lim}}$: $I(z') = p$ (정사각형 2.09 B, L = 1.5 B일 때 2.55 B, 띠 6.34 B)

m_v 방법: $\Delta H = m_v\, \Delta\sigma'\, H$, 선형; 융기 $= -m_v(\sigma'_{v0} - \sigma'_{exc})\, H$

시간: $T_v = C_v\, t/H_{dr}^2$; $T_{v,50} = 0.197$, $T_{v,90} = 0.848$; $H_{dr} = H$ (일면배수) 또는 $H/2$ (양면배수); $S(t) = \Sigma\, U_i\, S_{c,i}$

참고문헌

Terzaghi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics. Wiley.

Newmark, N.M. (1935). Simplified computation of vertical pressures in elastic foundations. Univ. of Illinois Bulletin 429.

Das, B.M. (2016). Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed. Cengage.

Holtz, R.D., Kovacs, W.D., Sheahan, TC. (2011). An Introduction to Geotechnical Engineering, 2nd ed. Pearson.

Craig, R.F., Knappett, J.A. (2012). Craig’s Soil Mechanics, 8th ed. Spon.

참고

수치 예제는 모두 모듈 자체의 계산 엔진으로 산출하였으며, 모듈은 같은 값을 제공한다 (예제 절편: dz = 지층 두께).

GeoTerva

온라인 지반공학 계산

이론에서 실무로

이 강의 자료의 예제를 GeoTerva에서 단계별로 계산해 보라.
모듈에서는 지층 수와 굴착을 자유롭게 입력할 수 있다.

모듈 열기 →

이론 페이지 →

스마트폰으로 열기

체험 모듈은 가입 없이 이용할 수 있습니다.