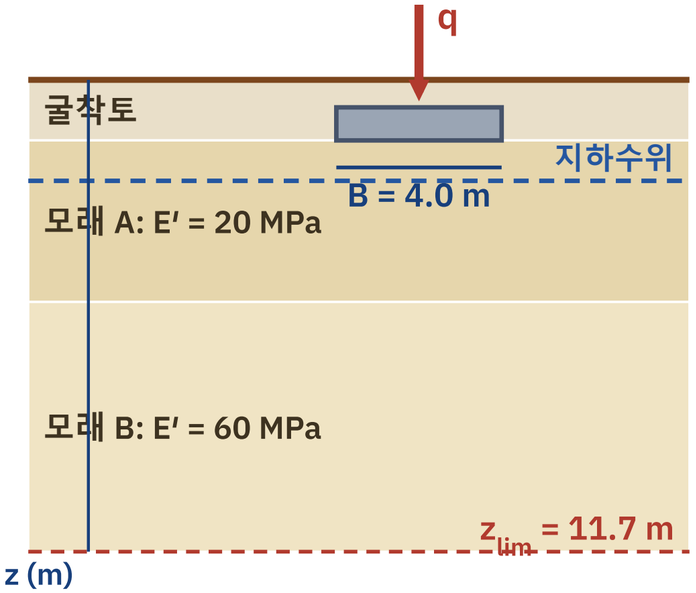
GeoTerva

지반공학 강의 자료 · 침하

탄성침하: 사질토

강의: 탄성론에서 Steinbrenner 계수까지, 층상 지반에서 연성기초와 강성기초까지; 모래와 자갈 층은 배수(E′, ν′) 거동을 한다; 주제별 계산 예제.

Hooke의 법칙 | Steinbrenner 계수 | 다층 지반 | 순압력 | 연성 기초와 강성 기초 | 계산 예제



개요

이 강의에서 다루는 내용

- **Hooke의 법칙**에서 침하 적분까지: $\varepsilon_z = [\Delta\sigma_z - \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)]/E$ 및 $S = \int \varepsilon_z \, dz$
- **Steinbrenner 계수**(F_1, F_2, I_s) 계산 및 직사각형 기초의 **중심**과 **모서리** 침하 산정
- 사질토 지층을 **배수** 조건으로 취급하기: $E'/p_a = \alpha\, N_{60}$, $\nu' \approx 0.25–0.35$
- **다층 지반**을 $I_s(z_{lower}) - I_s(z_{upper})$의 차로 합산하기
- **순압력**(굴착 효과)과 **계산 깊이**(영향 깊이)의 결정
- **연성** 및 **강성** 기초 침하의 구분 (강성 ≈ 0.93 × 연성 중심)

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 기초: 4 m × 6 m 연성 직사각형 기초, q = 180 kPa, 굴착 깊이 1.5 m, 지하수위 2.5 m; 모래층. 침하량의 단위는 mm이다.

이 모듈은 무엇을 계산하는가?

이론

이 모듈은 **사질토**(모래, 자갈) 지층만 다루며 **탄성침하**를 계산한다: 모래는 물을 즉시 배출하므로 침하 전체가 탄성이다.

하중을 받는 지반의 **Boussinesq** 응력으로부터 **Hooke의 법칙**으로 변형률을 구하며, 변형률의 적분이 침하이다.

점토 지층의 즉시침하는 탄성침하: 점성토 모듈에서, 압밀은 압밀 모듈에서, 그 전체 합은 총침하 모듈에서 다룬다.

해는 **해석적**이다: 닫힌 형태의 영향계수와 층별 합산을 사용하며, 유한요소는 사용하지 않는다.

이 범위 밖: Schmertmann 방법, SPT/CPT 도표, 깊이에 따라 증가하는 탄성계수(Mayne–Poulos), 기초 강성 및 지반–구조물 상호작용.

지층 종류

	사질토
거동	배수
E	E' (예: αN_{60})
ν	0.25 – 0.35

Hooke 법칙과 침하 적분

이론

순압력 q_{net}을 받는 **완전 연성** 기초 아래의 지반은 반무한 균질 탄성체이다(Boussinesq 응력). Hooke의 법칙은 연직 변형률을 주고, 그 적분은 침하량을 준다:

$$S = \int \varepsilon_z \, dz = \int \frac{\Delta\sigma_z - \nu\,(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)}{E}\, dz$$

측방 응력은 ν에 따라 정해지므로, 변형과 침하는 **E와 ν 모두**에 따라 변한다.

ν가 커질수록 측방 응력이 연직 변형률을 **감소시킨다**: E가 같을 때 ν = 0.5인 지반은 ν = 0.3인 지반보다 침하가 작다.

침하는 E에 **반비례**한다: 탄성계수를 두 배로 하면 침하가 절반으로 줄어든다.

표기

q_{net}: 순압력(굴착 후 추가되는 하중)

$\Delta\sigma_z$, $\Delta\sigma_x$, $\Delta\sigma_y$: 응력 증가량

E, ν: 지층의 탄성 상수

ε_z: 연직 변형률(압축 +)

문제

예제

조건

응력 증가량	$\Delta\sigma_z = 100$ kPa, $\Delta\sigma_x = \Delta\sigma_y = 40$ kPa
지반	$E' = 20$ MPa, $\nu' = 0.30$
절편	**두께 1.0 m**

구하는 값

연직 변형률과 절편의 압축량을 구하고; ν = 0(1차원) 가정과 비교하라.

풀이

풀이

1 연직 변형률

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta\sigma_z - \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)}{E} = \frac{100 - 0.30(40 + 40)}{20{,}000} = \frac{76.0}{20{,}000} = \mathbf{0.00380}$$

2 분할층의 압축 (H = 1.0 m)

$$\Delta S = \varepsilon_z H = 0.00380(1.0) = \mathbf{3.80}\ \text{mm}$$

3 비교: ν = 0

$$\varepsilon_z = \frac{100}{20{,}000} = 0.00500 \;\Rightarrow\; \Delta S = 5.00\ \text{mm}$$

측방 응력(ν = 0.30)은 변형을 **24%** 감소시킨다: 3.80 mm, 1차원의 경우 5.00 mm.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

모서리에 대한 닫힌 형태의 해

이론

균일하게 재하된 직사각형의 **모서리**에 대해서는 적분의 닫힌 형태 해가 있다(Steinbrenner):

$$S = q_{net}\,\alpha\,B'\,\frac{1-\nu^2}{E}\,I_s \qquad I_s = F_1 + \frac{1-2\nu}{1-\nu}\,F_2$$

$$F_1 = \frac{A_0 + A_1}{\pi} \qquad F_2 = \frac{n'}{2\pi}\tan^{-1} A_2$$

m′ = L′/B′ 및 n′ = z/B′ (B′는 모서리 직사각형의 짧은 변). **중심**은 네 개의 (B/2 × L/2) 직사각형의 모서리이다: α = 4, B′ = B/2. **모서리**는 전체 직사각형의 모서리이다: α = 1, B′ = B. 그 밖의 점은 그 점을 모서리로 하는 네 직사각형의 대수합이다.

> ν = 0.5일 때 (1 − 2ν) = 0: **$I_s = F_1$** 및 (1 − ν²) = 0.75.

표기

α: 모서리 직사각형의 개수(중심 4, 모서리 1)

B′: 모서리 직사각형의 짧은 변

m′ = L′/B′, n′ = z/B′

z: 기초 저면 위치로부터의 깊이

I_s: 형상계수

A_0, A_1, A_2 및 띠 경계

이론

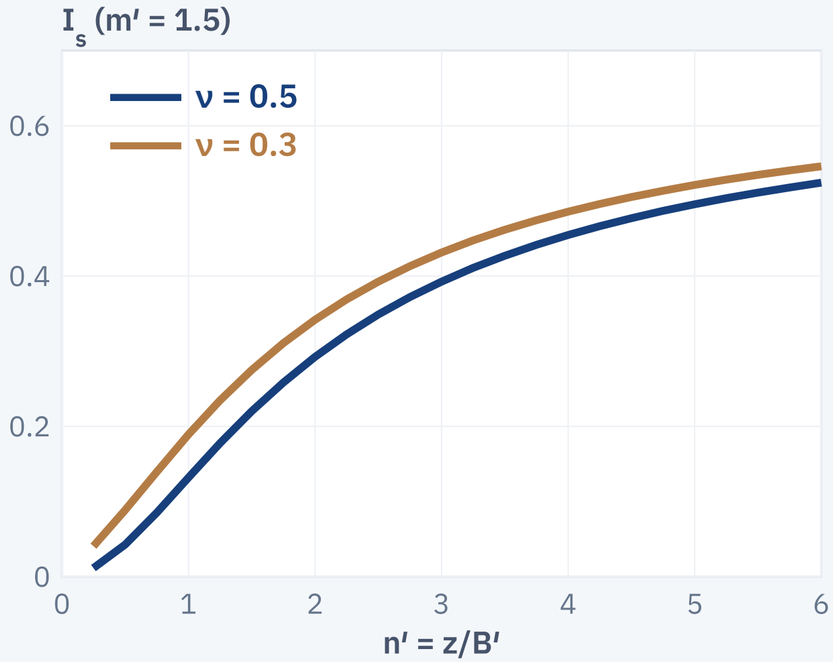
$$A_0 = m' \ln \frac{\left(1+\sqrt{m'^2+1}\right)\sqrt{m'^2+n'^2}}{m'\left(1+\sqrt{m'^2+n'^2+1}\right)}$$

$$A_1 = \ln \frac{\left(m'+\sqrt{m'^2+1}\right)\sqrt{1+n'^2}}{m'+\sqrt{m'^2+n'^2+1}} \qquad A_2 = \frac{m'}{n'\sqrt{m'^2+n'^2+1}}$$

연속기초($m' \to \infty$): $F_1 = \ln(1+n'^2)/2\pi$ 및 $F_2 = (n'/2\pi)\tan^{-1}(1/n')$; 그 가장자리에서 $\alpha = 2$, $B' = B$.

계산 엔진은 공식을 직접 계산하므로 도표나 반올림된 표가 필요하지 않다.

I_s는 깊이에 따라 증가하다가 **서서히 수렴한다**: 깊은 지층의 기여는 제한적이다 (측면에서 $m' = 1.5$).



문제

예제

조건

기초	**B × L = 4 × 6 m, 중심 아래 깊이 z′ = 4 m (기초 저면 기준)**
모서리 직사각형	**B/2 × L/2 = 2 × 3 m ⇒ B′ = 2 m, m′ = 1.5, n′ = z′/B′ = 2.0**
지반	$\nu' = 0.30$

구하는 값

A_0, A_1, A_2, F_1, F_2 및 **I_s** 값을 구하라.

풀이

풀이

1 A_0, A_1, A_2 (제곱근: $\sqrt{m'^2+1} = 1.8028$; $\sqrt{m'^2+n'^2} = 2.5000$; $\sqrt{m'^2+n'^2+1} = 2.6926$)

$$A_0 = 1.5 \ln \frac{(1+1.8028)(2.5000)}{1.5(1+2.6926)} = \mathbf{0.3527} \qquad A_1 = \ln \frac{(1.5+1.8028)\sqrt{5}}{1.5+2.6926} = \mathbf{0.5662}$$

$$A_2 = \frac{1.5}{2(2.6926)} = \mathbf{0.2785}$$

2 F_1, F_2 및 I_s

$$F_1 = \frac{0.3527+0.5662}{\pi} = \mathbf{0.2925} \qquad F_2 = \frac{2}{2\pi}\tan^{-1}(0.2785) = \mathbf{0.0865}$$

$$I_s = F_1 + \frac{1-2(0.30)}{1-0.30}F_2 = \mathbf{0.3419}$$

$I_s = F_1 + 0.5714\,F_2 = \mathbf{0.3419}$; $\nu' = 0.5$였다면 $F_1 = 0.2925$가 되었을 것이다(14% 더 작다).

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

배수 탄성계수 E′ 및 ν′

이론

모래는 물을 즉시 배출하므로 배수 거동을 하며, 침하는 전부 탄성침하이다. 출처(Das)에서는 모래의 탄성계수를 SPT로부터 $E'/p_a = \alpha\, N_{60}$으로 구한다($p_a \approx 100$ kPa):

$$\frac{E'}{p_a} = \alpha\, N_{60} \qquad \alpha = 5 \text{ (세립질 모래) } 10 \text{ (순수 NC) } 15 \text{ (순수 OC)}$$

모래의 탄성계수는 깊이에 따라 **증가한다**: 두꺼운 지층을 E′ 값이 증가하는 여러 지층으로 나눈다.

ν′는 일반적으로 0.25–0.35이며, ν′ < 0.5이어야 한다 (사질토층에는 ν′ ≥ 0.5를 입력할 수 없다).

탄성침하는 ν′에 따라서도 달라진다: ν′ 값이 커질수록 감소한다.

모래용 α

α	E′ (N_{60} = 20)
5	10 MPa
10	20 MPa
15	30 MPa

문제

예제

조건

모래	$N_{60} = 20$, $p_a = 100$ kPa; $\alpha = 5,\ 10,\ 15$
포아송비	$\nu' = 0.25;\ 0.30;\ 0.35$ **(E′ = 20 MPa)**
기준값	**α = 10, ν′ = 0.30일 때 단일 층 침하 S = 29.0 mm (예제 6)**

구하는 값

각 α에 대한 **E′**; ν′ = 0.25, 0.30, 0.35, 0.5일 때의 침하.

풀이

풀이

1 E' = α N_{60} p_a (N_{60} = 20; p_a = 100 kPa)

$$E' = \alpha\, N_{60}\, p_a : \quad 5(20)(0.1) = \mathbf{10}\ \text{MPa},\ \ 10(20)(0.1) = \mathbf{20},\ \ 15(20)(0.1) = \mathbf{30}\ \text{MPa}$$

ν′	0.25	0.30	0.35	0.50
S (mm)	30.1	29.0	27.7	22.8
$S / S_{\nu'=0.30}$	1.038	1.000	0.955	0.786

E′ 값이 10 → 30 MPa로 변하면 침하는 58 → 19 mm로 감소한다(반비례). ν′ 값이 0.25 → 0.35로 바뀌어도 침하는 8%만 변하며, ν′ = 0.5라면 침하가 21% 더 작아진다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

굴착은 먼저 하중을 제거한다

이론

굴착은 저면 높이의 **유효상재응력**을 제거한다(지하수위는 변하지 않음). 하나의 탄성계수를 제하와 재재하에 모두 사용하면 굴착으로 인한 탄성 융기가 재재하 시 회복되며, 즉시침하는 **순압력**에 의해 결정된다:

$$q_{net} = q_{gross} - \sigma'_{v0}(D_{exc})$$

$\sigma'_{v0}(D_{exc})$: 굴착 저면에서의 초기 유효응력(지하수위 위에서는 γ, 아래에서는 $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$).

$q_{net} \le 0$이면 침하가 발생하지 않는다 (음의 값은 탄성 융기이다).

굴착이 없으면 $q_{net} = q_{gross}$이다 (압력은 지표면에 가해진다).

NEDEN NET?

굴착 중에 제거된 흙의 무게만큼의 하중은 기초가 시공되면 **다시 가해진다**. 지반의 침하는 이 하중 **위에 추가되는** 압력에서만 발생한다.

문제

예제

조건

하중	$q_{gross} = 180$ kPa; **굴착깊이** $D_{exc} = 1.5$ m
지반	$\gamma = 18.5$ kN/m^3, $\gamma_{sat} = 19.5$ kN/m^3
지하수위	**(a) 2.5 m (굴착 저면 아래) · (b) 1.0 m (굴착 저면 위)**

구하는 값

각 경우에 $\sigma'_{v0}(D_{exc})$와 q_{net}의 값을 구하라.

풀이

풀이

1 (a) 지하수위 2.5 m > 1.5 m: 굴착저면에 물 없음

$$\sigma'_{v0} = \gamma D_{exc} = 18.5(1.5) = 27.75 \text{ kPa} \;\Rightarrow\; q_{net} = 180 - 27.75 = \mathbf{152.25} \text{ kPa}$$

2 (b) 지하수위 1.0 m: 굴착 저면은 수면 0.5 m 아래 (γ′ = 19.5 − 9.81 = 9.69 kN/m³)

$$\sigma'_{v0} = 18.5(1.0) + 9.69(0.5) = 23.345 \text{ kPa} \;\Rightarrow\; q_{net} = 180 - 23.345 = \mathbf{156.66} \text{ kPa}$$

물이 굴착 저면보다 위에 있으면 제거되는 유효응력이 감소하여 순압력이 152.2 → 156.7 kPa로 **증가한다**: 지하수위가 높으면 즉시침하가 커진다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

영향 깊이: Δσ = p · q

이론

하중에 의한 응력 증가는 깊이에 따라 감소하지만 0이 되지는 않는다; 합산 범위의 하단 한계가 필요하다: **계산 깊이 z_{lim}**. 모듈은 두 가지 규칙을 제공한다:

영향 깊이: 중심 아래에서 Boussinesq 응력 증가량이 작용 압력의 **p** 비율까지 감소하는 깊이 (통상 p = 10%): I(z′) = p, $z_{lim} = D_f + z'$.

주상도의 하단: 계산은 마지막 지층에서 끝난다(암반이나 조밀한 자갈과 같은 단단한 하단; Steinbrenner의 강성 기반 지층).

지층 단면이 z_{lim} 위에서 끝나면 마지막 지층이 같은 물성으로 z_{lim}까지 이어진다.

$$I = \frac{\Delta\sigma_z}{q} = 4\, I_{corner}(m, n) \qquad m = \frac{B}{2z'},\ n = \frac{L}{2z'}$$

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

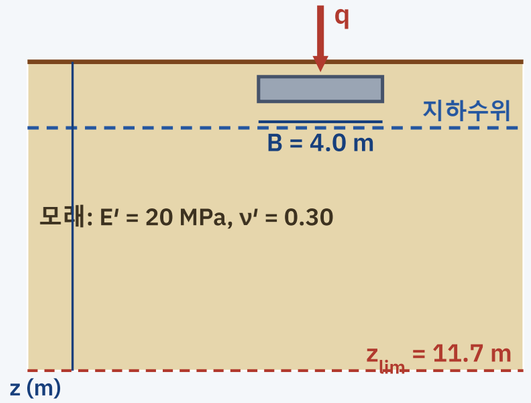
예제

조건

기초	**B × L = 4 × 6 m (L/B = 1.5), 굴착저면에 위치; D_f = 1.5 m**
규칙	**영향 깊이, p = 10% (I = 0.10)**
식	$I = 4\,I_{corner}(m, n),\ m = B/2z',\ n = L/2z'$

구하는 값

z′ 및 **z_{lim}**; z′ = 4 m 및 10.19 m에 대한 I 값.



풀이

풀이

1 z′ = 4 m: m = 2/4 = 0.5; n = 3/4 = 0.75

$$I = 4\,I_{corner}(0.5;\ 0.75) = 4(0.1071) = \mathbf{0.4283}$$

2 조건 I = 0.10: 이분법 이용

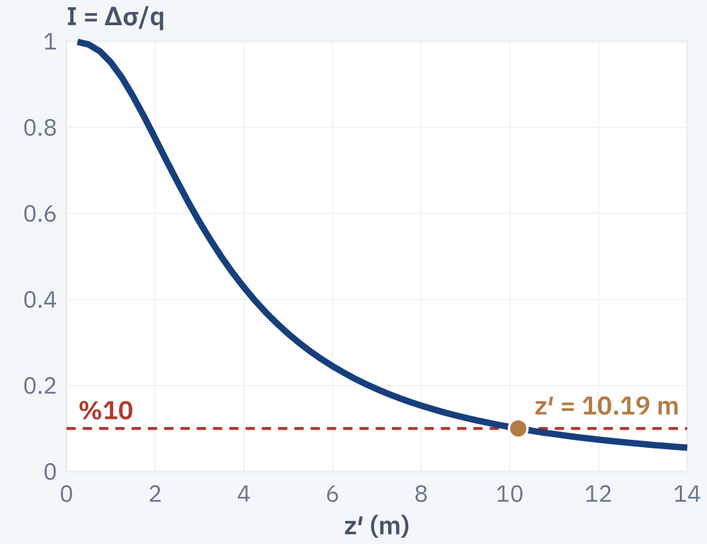
$$z' = \mathbf{10.19}\ \text{m} \quad (= 2.55\,B)$$

$$z_{lim} = D_f + z' = 1.5 + 10.19 = \mathbf{11.69}\ \text{m}$$

3 검토: z′ = 10.19 m ⇒ m = 2/z′, n = 3/z′

$$m = 0.1963,\ n = 0.2945$$

$$I = 4(0.0250) = \mathbf{0.1000}$$



10.19 m(2.55 B) 깊이까지 합산한다; 그 아래는 압력이 10% 미만인 영역이다. 정사각형기초에서는 2.09 B, 연속기초에서는 6.34 B이다: **폭이 넓은 기초일수록 더 깊이** 영향을 준다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

지층 기여: I_s의 차이

이론

z_{top}과 z_{bottom} (기초 저면 높이로부터) 사이의 지층은 자신의 E와 ν를 사용하여, 반무한 매질 해의 **두 깊이 사이의 차**를 더한다:

$$\Delta S = q_{net}\,\alpha\,B'\,\frac{1-\nu^2}{E}\,\left[I_s(z_{bottom}) - I_s(z_{üst})\right]$$

이는 Hooke 변형률을 지층에 대해 적분한 값이다(균질 반무한체의 응력을 사용). 이 가정에서는 **정확하다**. 결과는 분할 두께 Δz에 의존하지 않는다(분할층은 표와 색상 영역에만 사용된다).

단일층 공식의 **가중평균 탄성계수**를 대체한다.

강성이 깊이에 따라 증가하는 지층은 여러 층으로 나누어야 한다.

합계

지반의 침하는 z_{lim}까지 각 지층의 기여분을 **합산한 값**이다: $S = \Sigma\,\Delta S_i$. 각 지층 중 기초 저면과 z_{lim} 사이의 부분만 계산에 포함한다.

문제

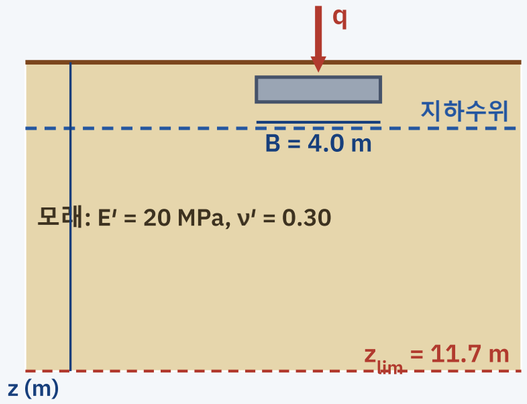
예제

조건

기초	**직사각형, B × L = 4 × 6 m, 저면 깊이 D_f = 1.5 m (굴착저면)**
하중	$q_{gross} = 180$ kPa **(연성기초, 등분포 압력)**
지반	**단일 모래층:** $E' = 20$ MPa, $\nu' = 0.30$, $\gamma = 18.5$ kN/m^3**; 지하수위 2.5 m**
계산 깊이	**영향 깊이, p = 10%(예제 5): z′ = 10.19 m, z_{lim} = 11.69 m; 지층은 이 깊이까지 이어진다**

구하는 값

연성기초의 **중심** 침하 **s**.



풀이 (1/2)

풀이

1 순압력 (예제 4a) 및 계수 $k = q_{net}(1-\nu^2)/E$

$$q_{net} = 152.25 \text{ kPa} \qquad k = \frac{q_{net}(1-\nu^2)}{E} = \frac{152.25(0.91)}{20{,}000} = 0.006927 \text{ (무차원)}$$

2 중심: $\alpha = 4$, $B' = B/2 = 2$ m, $m' = 1.5$; $z' = 10.19$ m $\Rightarrow n' = z'/B' = 5.094$

$$A_0 = 0.6569,\ A_1 = 0.9097,\ A_2 = 0.0545$$

$$F_1 = 0.4986,\ F_2 = 0.0441 \ \Rightarrow\ I_s = \mathbf{0.5239}$$

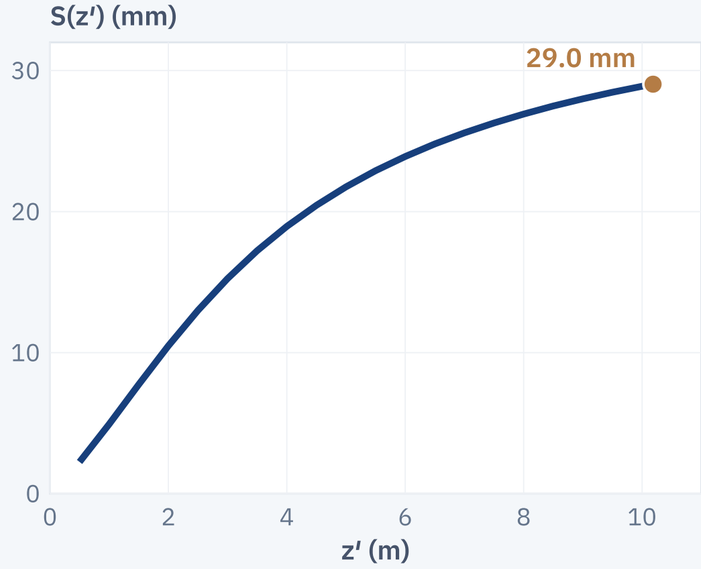
풀이 (2/2)

풀이

3 침하: $S = k \cdot \alpha B' \cdot I_s$

$$S = 0.006927\,(4)(2)(0.5239) = 0.006927(4.1909)$$
$$= 0.02903\ \text{m} = \mathbf{29.0\ mm}$$

중심점 침하 **29.0 mm**. 그래프 S(z′)에서 침하의 대부분은 상부 2B(8 m) 이내에서 발생하며, 깊은 지층의 기여는 작다.



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

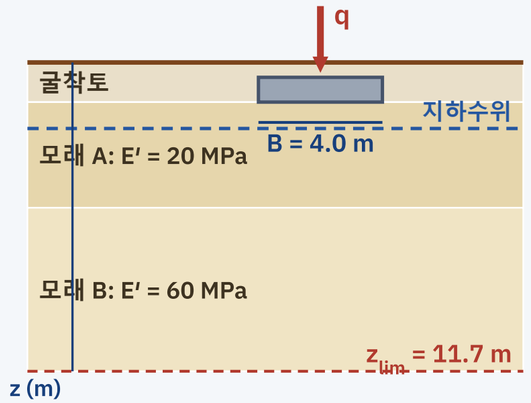
예제

조건

기초, 하중	**B × L = 4 × 6 m, q_{gross} = 180 kPa, D_f = 1.5 m ⇒ q_{net} = 152.25 kPa**
A층	**기초 저면에서 4 m 두께:** $E' = 20$ MPa
B층	**아래쪽, z_{lim}까지:** $E' = 60$ MPa
계산 깊이	**z'_{lim} = 10.19 m**

구하는 값

각 지층의 **중심점** 침하와 합계를 구하고, 단일 지층의 경우와 비교하라.



풀이 (1/2)

풀이

1 지층 계수 k = $q_{net}(1-\nu^2)/E$와 $\alpha B' I_s$ (중심점; 예제 2 및 6)

$$k_A = \frac{152.25(0.91)}{20{,}000} = 0.006927 \qquad k_B = \frac{152.25(0.91)}{60{,}000} = 0.002309$$

$$8\,I_s(z'=4) = 8(0.3419) = 2.7351 \qquad 8\,I_s(z'_{lim}) = 4.1909$$

지반 주상도를 두 지층으로 나누면 각 지층은 **자체 탄성계수**와 해당 구간에서의 I_s 증가분으로 합산된다.

풀이 (2/2)

풀이

2 층별 침하량과 합계

$$\Delta S_A = k_A (8I_s)_4 = 0.006927(2.7351) = 18.9 \text{ mm}$$

$$\Delta S_B = k_B \left[(8I_s)_{lim} - (8I_s)_4\right] = 0.002309(4.1909 - 2.7351) = 3.4 \text{ mm}$$

$$S = \Delta S_A + \Delta S_B = \mathbf{22.3 \text{ mm}}$$

중심부 총침하량은 **22.3 mm**이다(엔진: 22.3 mm). 단일 지층(E = 20 MPa)으로는 29.0 mm였으며, 하부 지층의 강성이 **더 크므로** 침하가 **23%** 감소하였다. A층이 전체의 85%를 차지한다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

중심, 모서리 및 강성기초 침하

이론

이 식들은 **완전 연성** 기초의 침하를 준다. **중심에서 최대**이고 모서리에서 최소이며, 그 차이가 연성 기초의 **부등침하**이다. 강성 기초는 **균등하게** 침하하며, 그 값은 연성 기초 중심 침하의 약 0.93배이다:

$$S_{rigid} \approx 0.93\, S_{center} \qquad S_{diff} = S_{center} - S_{köşe}$$

중심: α = 4, B′ = B/2. 모서리: α = 1, B′ = B (전체 직사각형의 모서리).

근입: Fox 깊이계수 $I_f(D_f/B, B/L$ 및 ν에 따라 결정)는 근입된 기초의 침하를 감소시킨다. 모듈은 $I_f = 1$로 취하며, 보정을 하지 않으므로 **안전 측**이다.

참고

실제 기초는 연성과 강성 사이에 있다. 모듈은 두 극단값을 제시하며, 중간 강성과 지반–구조물 상호작용은 다루지 않는다.

문제

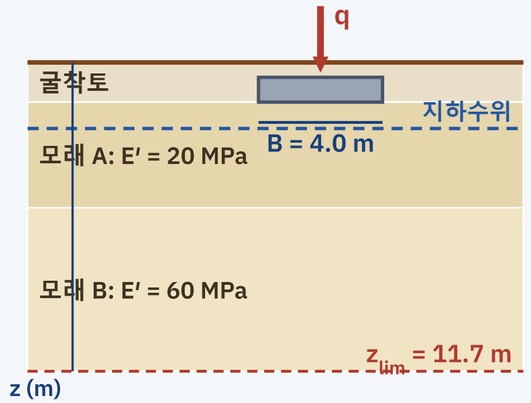
예제

조건

프로필	예제 7: A층 (4 m) 및 B층; z'_{lim} = 10.19 m
기초	연성, 4 × 6 m
모서리	$\alpha = 1$, $B' = B = 4$ m ⇒ $m' = L/B = 1.5$; $n' = z'/4$

구하는 값

모서리 침하, **강성** 기초의 침하, 연성 기초의 **부등** 침하.



풀이

풀이

1 모서리에 대한 $4 \cdot I_s$ 값 ($n' = z'/4$)

$$z' = 4\ (n' = 1):\ 4\,I_s = 0.7565$$

$$z'_{lim} = 10.19\ (n' = 2.547):\ 4\,I_s = 1.5865$$

2 모서리 침하

$$S_{köşe} = k_A(0.7565) + k_B(1.5865 - 0.7565) = 5.2 + 1.9 = \mathbf{7.2\ mm}$$

3 강체와 부등침하

$$S_{rigid} = 0.93(22.3) = \mathbf{20.7\ mm} \qquad S_{diff} = 22.3 - 7.2 = \mathbf{15.2\ mm}$$

중심 22.3, 모서리 7.2, 강성기초 20.7 mm; 연성기초의 부등침하는 **15.2 mm**이다. 모서리는 중심 침하량의 32%만큼만 침하한다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

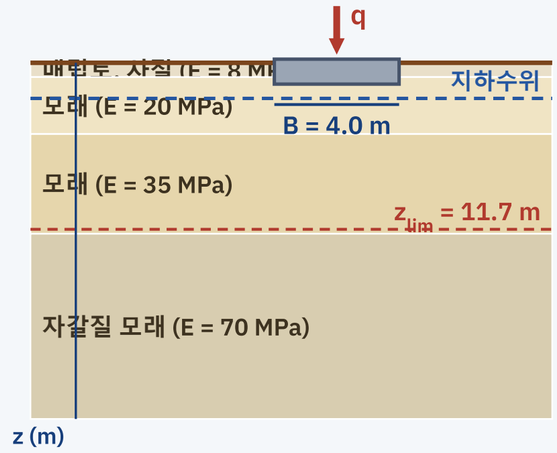
예제

조건

기초	**B × L = 4 × 6 m, q_{gross} = 180 kPa, 굴착 깊이 1.5 m, 지하수위 2.5 m**
프로필	**매립토, 모래질 0–1 m: E′ = 8 MPa; 모래 1–5 m: E′ = 20 MPa; 모래 5–12 m: E′ = 35 MPa; 자갈질 모래 12–25 m: E′ = 70 MPa**
계산 깊이	**영향 깊이, p = 10%**

구하는 값

지층별 **중심** 및 **모서리** 침하; 연성 기초의 중심·모서리 침하, 강성기초 침하 및 부등침하.



풀이 (1/2)

풀이

1 순 압력 (굴착 저면 1.5 m)

$$\sigma'_{v0}(1.5) = 27.25 \text{ kPa} \quad \Rightarrow \quad q_{net} = 180 - 27.25 = \mathbf{152.75} \text{ kPa}$$

2 계산 깊이와 지층

$$z_{lim} = 1.5 + 10.19 = \mathbf{11.69} \text{ m}$$ 굴착 저면 위의 지층 제거

굴착 저면(1.5 m)은 모래층 내부에 있다: 지층 중 1.5 m 아래의 부분만 계산에 포함한다. z_{lim} = 11.69 m가 모래층 안에 있으므로 해당 층은 그 깊이에서 절단된다.

풀이 (2/2)

풀이

지층	z (m)	H (m)	E (MPa)	k (×10⁻³)	ΔS 중앙 (mm)	ΔS 모서리 (mm)
모래 (SM, 느슨~중간 조밀)	1.50 – 5.00	3.50	20	6.950	17.3	4.6
모래 (SM, 중간 조밀)	5.00 – 11.69	6.69	35	3.972	6.8	3.7
합계					**24.1**	**8.3**

중심 **24.1 mm**, 모서리 8.3 mm, 강성기초 22.4 mm, 부등침하 15.8 mm. 모듈은 같은 값을 제공한다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

결과를 볼 때 유의할 사항

이론

가정사항:

- 기초 저면 높이 = 굴착저면; 완전 연성 기초에서는 압력이 등분포이다.
- 각 지층에서 **균질 반무한 공간**의 응력 (해당 지층의 ν 사용).
- 모든 지층은 사질토이며 **배수** 조건에서 침하한다 (E′, ν′).
- 근입깊이 보정 없음; 강성 기초 ≈ 0.93 × 연성 기초 중심.
- 부호 규약: 침하는 **양의 값**이며, 상단의 선택기는 위쪽 침하를 양으로 하는 표기로 전환한다.

적용 범위 제외: 점토층; Schmertmann, SPT/CPT 도표, 깊이에 따라 증가하는 탄성계수, 기초 강성과 지반–구조물 상호작용, 유한요소.

색상 영역

단면 보기는 응력 증가량, 탄성계수, 변형률 및 침하 S(z)를 색 띠로 나타내며; 기초 저면 높이에서의 중심 값이 최종 침하이다.

요약

핵심 정리

Hooke: $\varepsilon_z = [\Delta\sigma_z - \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)]/E$; $\mathbf{S = \int \varepsilon_z\, dz}$; E에 반비례한다

Steinbrenner: $S = q_{net}\,\alpha\,B'\,(1-\nu^2)/E \cdot I_s$; $I_s = F_1 + (1-2\nu)/(1-\nu)\,F_2$; 중심 $\alpha = 4$, $B' = B/2$; 모서리 $\alpha = 1$, $B' = B$

모래: $E'/p_a = \alpha\, N_{60}$ ($\alpha = 5, 10, 15$), $\nu' \approx 0.25$–0.35; ν' 값이 커질수록 침하는 감소한다

층상: $\Delta S = q_{net}\,\alpha\,B'\,(1-\nu^2)/E \cdot [I_s(z_{bottom}) - I_s(z_{top})]$; 분할층 두께와 무관

순압력 $q_{net} = q_{gross} - \sigma'_{v0}(D_{exc})$; **계산 깊이** $I(z') = p$ (정사각형기초 2.09 B, L = 1.5 B일 때 2.55 B, 연속기초 6.34 B)

연성: 중앙 > 모서리 (부등침하); **강성** ≈ 0.93 × 중앙; 근입 보정 없음 ($I_f = 1$)

참고문헌

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage.

Steinbrenner, W. (1934). Tafeln zur Setzungsberechnung. Die Strasse, 1, 121–124.

Fox, E.N. (1948). The mean elastic settlement of a uniformly loaded area at a depth below the ground surface. Proc. 2nd ICSMFE, Rotterdam, 1, 129–132.

Bowles, J.E. (1996). Foundation Analysis and Design, 5th ed. McGraw-Hill.

Duncan, J.M. & Buchignani, A.L. (1976). An engineering manual for settlement studies. University of California, Berkeley.

Kulhawy, F.H. & Mayne, P.W. (1990). Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design. EPRI EL-6800.

참고

모든 수치 예제는 모듈 자체의 계산 엔진으로 생성되었으며, 모듈에서도 같은 값이 나온다.

온라인 지반공학 계산

이론에서 실무로

이 강의의 예제 프로젝트를 GeoTerva에서 단계별로 계산해 보기: 모듈이 이 모델로 열린다.

모듈 열기 →

이론 페이지 →

스마트폰으로 열기

체험 모듈은 가입 없이 이용할 수 있습니다.

강의에서 사용하려면: info@geoterva.com