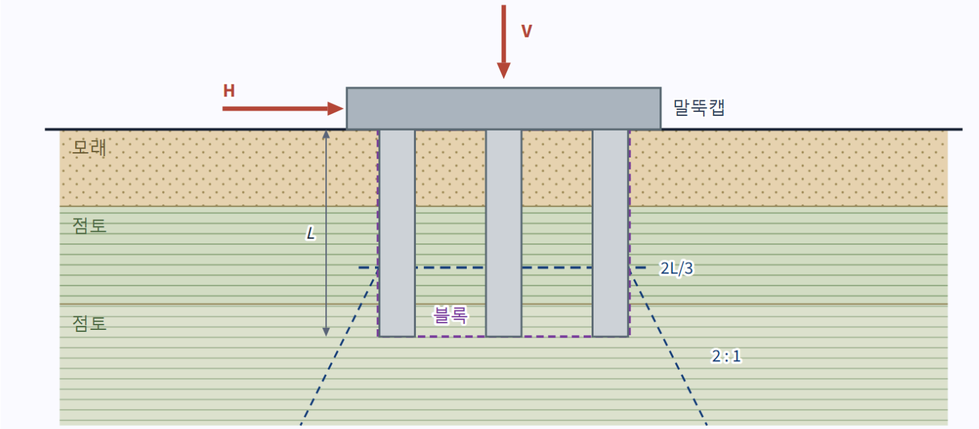
지반공학 강의 자료 · 말뚝

무리말뚝 해석

강의: 말뚝캡 아래 무리말뚝의 각 말뚝에 걸리는 하중, 지지력, 침하, 수평하중 하의 거동; 각 주제별 계산 예제.

강성 말뚝캡 | 무리말뚝 효율 · 블록 | 침하 | 수평하중: p-승수 | 계산 예제



개요

이 강의에서 다루는 내용

- 강성 말뚝캡 아래에서 **각 말뚝에 작용하는 하중**을 구하고, 인장을 받는 말뚝을 식별하기
- **단일 말뚝**의 지지력을 무리말뚝 지지력의 바탕으로 지층별로 구성하기
- **무리말뚝 효율**(Converse–Labarre, Los Angeles, Seiler–Keeney; 모래에서의 타입 및 현장타설 규칙)을 지층별로 적용하는 방법
- 무리말뚝의 **블록 파괴**를 검토하여 **더 작은 값**을 선택하기
- 탄성(Vesic) 침하와 **압밀침하**(2:1 분산)를 계산하는 방법
- **수평하중** 하에서 p-승수와 열별 불균등 하중 분담의 해석

강의 흐름

각 주제는 **세 단계**로 다룬다:

1 · **이론**: 규칙은 무엇이며 왜 그러한가?

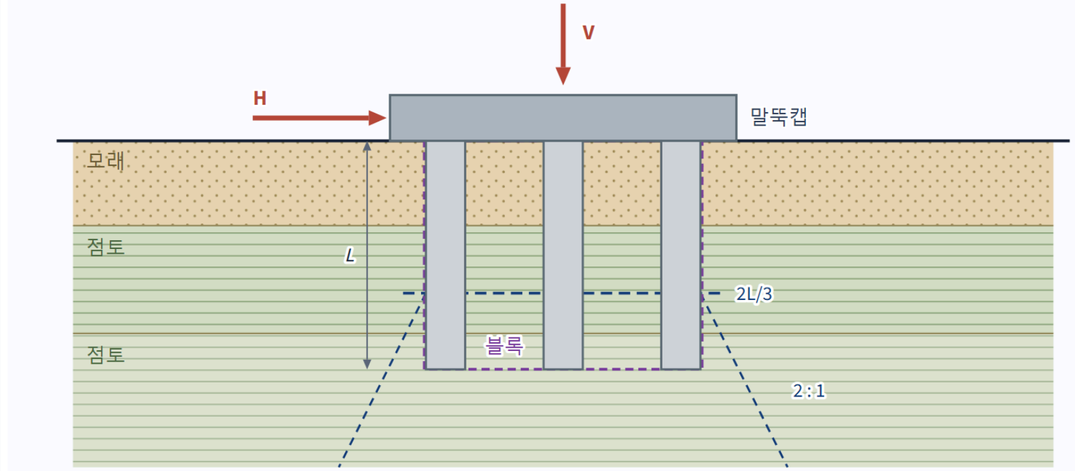
2 · **문제**: 조건과 구하는 값

3 · **풀이**: 단계별 수치 계산

이 발표 자료는 **층상 지반의 말뚝** 발표 자료를 기반으로 한다: 단일 말뚝의 지층별 계산은 그곳에서 다루었으며, 여기서는 그 말뚝이 무리말뚝 안에서 차지하는 위치를 살펴본다.

말뚝이 함께 작용하면 무엇이 달라지는가?

이론



말뚝은 **말뚝캡** 아래에 열을 이루어 배치되며, 말뚝 간격이 가까우면 말뚝 사이와 주변의 지반이 모든 말뚝을 동시에 지지해야 한다. 세 가지가 달라지며, 모듈은 이를 각각 별도의 검토 항목으로 다룬다:

지지력: 말뚝 사이의 지반은 각 말뚝의 몸체에서 전달되는 응력을 받으며, 각 말뚝은 단독으로 있을 때보다 적게 지지한다(효율 $\eta < 1$). 지반이 약하고 말뚝이 가까우면 무리말뚝과 그 사이의 지반이 하나의 **블록**으로 파괴될 수도 있다.

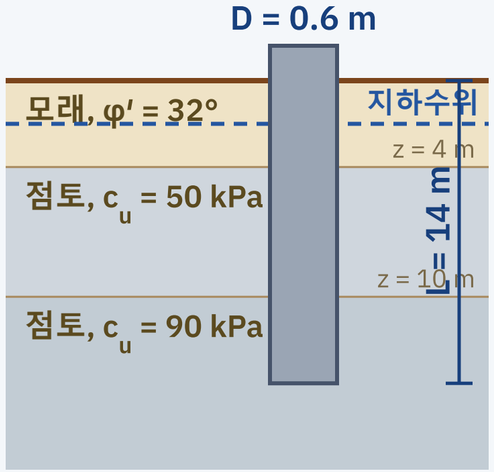
침하: 무리말뚝의 하중은 단일 말뚝이 아니라 **무리말뚝 전체의 면적**에 걸쳐 퍼지며 선단보다 훨씬 아래의 점토층까지 영향을 미친다. 무리말뚝은 단일 말뚝보다 훨씬 더 많이 침하한다.

수평하중: 뒷줄 말뚝은 앞선 말뚝들이 밀어내고 변형시킨 지반에서 거동하므로, 앞줄은 더 큰 하중을, 나머지 줄은 더 작은 하중을 받는다.

강의 내내 사용할 그룹

예제 무리말뚝 (모듈의 초기 모델)

말뚝	**현장타설말뚝 9개 (직경 D = 0.60 m, 길이 L = 14 m), 3열 × 3개, 말뚝캡 저면은 지반 내**
간격	$s_x = s_y = 1.80\ \text{m}\ (3.0\,D)$
지반	**모래 0–4 m (φ′ = 32°), 점토 4–10 m (c_u = 50), 점토 10–18 m (c_u = 90 kPa); γ = 18, γ_{sat} = 19 kN/m³**
지하수	**깊이 2.0 m에서**
하중	$V = 1\,600\ \text{kN},\ H = 900\ \text{kN},\ M_y = 900\ \text{kN·m}$
재료, 안전	$E_p = 30\,000\ \text{MPa},\ E_s = 30\ \text{MPa},\ \nu_s = 0.30;\ FS = 3$



예제의 대부분은 이 무리말뚝으로 수행하며, 결과는 모듈의 **모델** 탭의 수치와 같다.

강성 말뚝캡: 말뚝은 동일한 스프링이다

이론

말뚝캡은 강체이고 말뚝은 동일한 수직 스프링으로 가정한다. 강체 캡은 하나의 **평면**처럼 거동하므로 침하와 회전이 유일한 미지수이다. 따라서 각 말뚝에 걸리는 하중은 위치의 **선형** 함수이다(볼트군 규칙):

$$P_i = \frac{V}{n} + B\,x_i + C\,y_i$$

$$B = \frac{M_y}{\sum x^2} \qquad C = \frac{M_x}{\sum y^2} \qquad \left(\sum xy = 0\right)$$

$$\sum x^2 = n_y s_x^2 \,\frac{n_x(n_x^2-1)}{12}$$

M_y가 양(+)이면 **+x** 쪽(수평하중이 미는 쪽, 앞쪽)에 압력을 추가한다. 모멘트는 **캡 저면에서** 취한다: 저면에서 높이 h에 작용하는 하중 H에 의한 모멘트는 $M_y = H\,h$이다.

말뚝이 지그재그(삼각형) 배열로 배치되면 Σxy는 0이 아니며, 모듈은 합계를 말뚝 위치로부터 가져와 두 방정식을 함께 푼다.

가장 큰 하중은 앞쪽 말뚝에, 가장 작은 하중은 뒤쪽 말뚝에 걸리며, **모멘트가 크면** 뒤쪽 말뚝에 인장이 발생할 수 있다.

문제

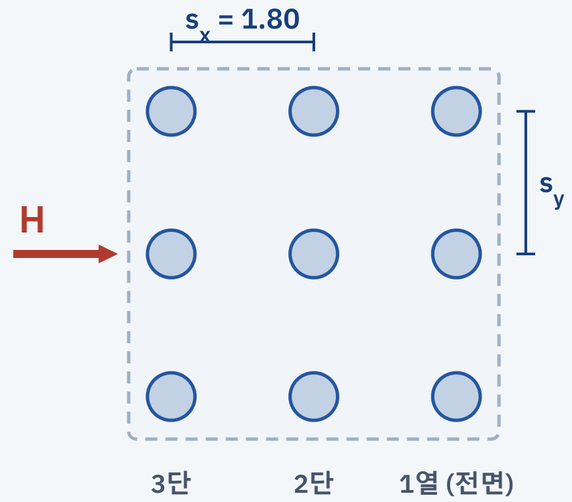
예제

조건

그룹	**현장타설말뚝 9개, 3열 × 3개, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
지반	**모래 0–4 m (φ′ = 32°) · 점토 4–10 m (c_u = 50) · 점토 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
하중	$V = 1\,600$ kN, $M_y = 900$ kN·m **(말뚝캡 저면)**
제목	**강체; 말뚝 동일**

구하는 값

각 말뚝에 작용하는 하중을 구하라. 열은 **앞쪽부터** 번호를 매긴다(앞 = 수평하중이 미는 쪽, +x).



풀이 (1/2)

풀이

1 균등 분배

$$\frac{V}{n} = \frac{1\,600}{9} = \mathbf{177.8}\ \text{kN}$$

2 Σx² (대칭 무리말뚝, 닫힌 형태)

$$\sum x^2 = n_y s_x^2\,\frac{n_x(n_x^2-1)}{12} = 3(1.8)^2\,\frac{3(9-1)}{12} = \mathbf{19.44}\ \text{m}^2$$

3 모멘트 계수 ($M_x = 0$이므로 C = 0)

$$B = \frac{M_y}{\sum x^2} = \frac{900}{19.44} = \mathbf{46.30}\ \text{kN/m}$$

풀이 (2/2)

풀이

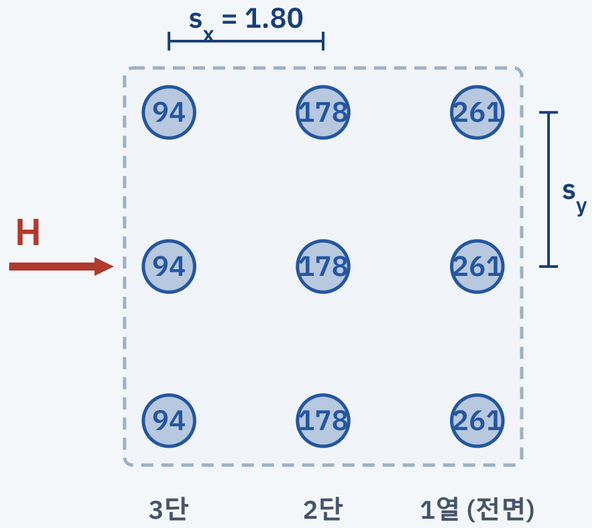
4 열별 하중: P = V/n + B x (x = +1.8; 0; −1.8 m)

$$P_1 = 177.8 + 46.30(1.8) = \mathbf{261.1}\ \text{kN (전면)}$$

$$P_2 = \mathbf{177.8}\ \text{kN}$$

$$P_3 = 177.8 - 46.30(1.8) = \mathbf{94.4}\ \text{kN (뒤)}$$

합계: 3(261.1 + 177.8 + 94.4) = **1,600 kN** = V. 가장 큰 하중은 앞열 말뚝(261.1 kN), 가장 작은 하중은 뒷열 말뚝(94.4 kN)에 작용하며, **인장을 받는 말뚝은 없다**.



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

모멘트가 크면 뒤쪽 말뚝이 인장을 받는다

이론

모멘트가 연직하중에 비해 크면 모멘트 반대편의 말뚝은 **하중이 해제되어** 인발력을 받을 수 있다. 말뚝은 인발력을 **몸체의 주면마찰력만으로** 저항한다: 점토층은 전체 값으로, 모래층은 압축 시 저항력의 **사분의 삼**으로 저항하며, 선단은 아무 기여도 하지 않는다.

$$T_u = \sum_i \chi_i \, Q_{s,i} \qquad \chi = 1 \text{ (점토)},\ \chi = 0.75 \text{ (모래)}$$

$$T_g = \min(T_{ind},\, T_{block}) \quad T_{ind} = n_T \sum_i \eta_i \chi_i Q_{s,i}$$

인장을 받는 **단일 말뚝**: $T_{max} \le T_u/FS$. 인장을 받는 말뚝을 **함께** 보면: $\Sigma T \le T_g/FS$; 블록은 자중과 측면의 전단으로 지지된다.

압축에 대한 검토

$$P_{max} \le \frac{Q_u}{FS}$$

최대 말뚝 하중은 **단독 말뚝**의 허용하중과 비교하며, 여기서는 무리말뚝 효과를 고려하지 않는다. 모멘트가 작용하면 가장 큰 하중을 받는 말뚝은 V/n보다 큰 하중을 받으며, **무리말뚝 전체가 자체 지지력 범위 안에 있어도** 이 말뚝은 자기 몫을 초과할 수 있다.

문제

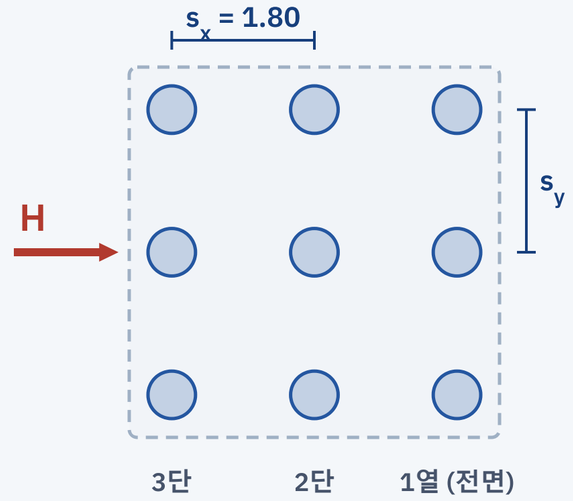
예제

조건

그룹	**현장타설말뚝 9개, 3열 × 3개, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
지반	**모래 0–4 m (φ′ = 32°) · 점토 4–10 m (c_u = 50) · 점토 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
하중	$V = 1\,600$ kN, **모멘트 증대:** $M_y = 2\,400$ kN·m
단일 말뚝	**Q_s 기여분 (예제 3): 모래 49.8, 점토 311.0, 점토 317.2 kN**
효율	**모래 0.767, 점토 0.727 (예제 5–6)**

구하는 값

하중을 구하고, 인장을 받는 말뚝의 인발저항력과 인장을 받는 말뚝들의 **합산** 인발저항력을 FS = 3으로 검토하라.



풀이 (1/2)

풀이

1 하중 ($B = M_y/\Sigma x^2$)

$$B = \frac{2\,400}{19.44} = 123.46 \text{ kN/m}$$

$$P_{front} = 177.8 + 123.46(1.8) = \mathbf{400.0} \text{ kN}$$

$$P_{rear} = 177.8 - 123.46(1.8) = \mathbf{-44.4} \text{ kN (인장)}$$

2 인장을 받는 단일 말뚝의 지지력 (모래 × 0.75, 점토 × 1)

$$T_u = 0.75(49.8) + 311.0 + 317.2 = \mathbf{665.6} \text{ kN} \quad \Rightarrow \quad \frac{T_u}{FS} = 221.9 \text{ kN}$$

인장을 받는 말뚝: T_{max} = **44.4 kN** ≤ T_u/FS = 221.9 kN → **충분**. 인장을 받는 말뚝은 3개(후열)이며 총 인장력은 ΣT = 133.3 kN이다. 무리말뚝 검토는 다음 단계에서 수행한다.

풀이 (2/2)

풀이

3 인장을 받는 말뚝 3개의 합산 저항력: 유효 몸체 합 × 3

$$T_{ind} = 3\left[\eta_s \chi_s Q_{s1} + \eta_c Q_{s2} + \eta_c Q_{s3}\right] = \mathbf{1{,}456}\ \text{kN}$$

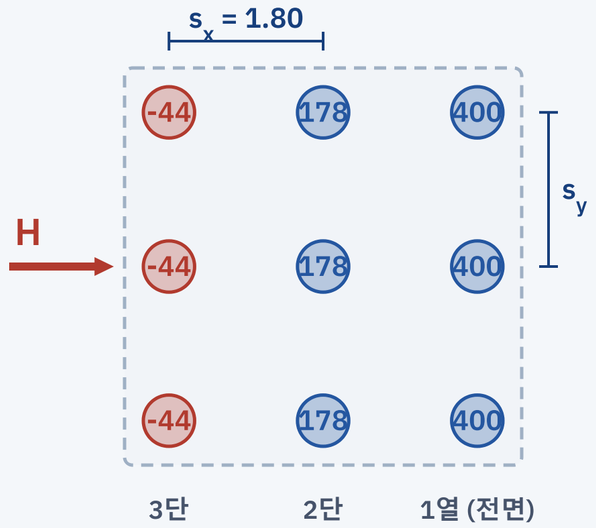
4 인장 블록(말뚝 3본, L_t = D = 0.6 m, B_t = 4.2 m): 측면 전단 + 블록 중량

$$T_{block} = \sum \tau_i P_t \Delta L_i + W = 6{,}692 + 369 = \mathbf{7{,}061}\ \text{kN}$$

5 검토: 최솟값과 FS

$$T_g = \min(1{,}456;\ 7{,}061) = 1{,}456\ \text{kN}$$

$$\sum T = 133.3 \le \frac{T_g}{3} = 485\ \text{kN} \ \Rightarrow\ \text{충분}$$



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

무리말뚝의 지지력은 단일말뚝의 지지력을 바탕으로 산정한다

이론

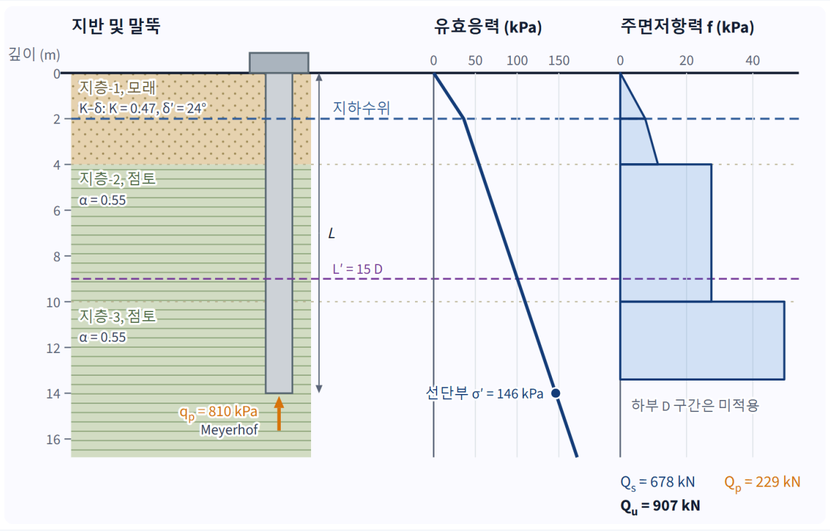
먼저 그룹 내 말뚝 1본의 **단독** 저항력을 계산한다. 각 지층은 해당 재료의 규칙으로 계산하며, **입력한 저항값은 없다**. 규칙은 *층상 지반의 말뚝* 강의 자료에서와 같다:

$$Q_u = Q_s + Q_p \qquad Q_s = p\sum_i f_i\,\Delta L_i \qquad Q_p = A_b\,q_p$$

모래: f = Kσ′tanδ′ (임계 깊이 L′ = 15D). 현장타설말뚝에서는 **K = K₀ = 1 − sinφ′**, δ′ = 0.75φ′이고, 타입말뚝에서는 K = 1.4K₀이다.

점토: α, λ 또는 β. 현장타설말뚝에서는 **α* = 0.55**($c_u/p_a \le 1.5$)를 적용하며, **상부 1.5 m와 하부 1D** 구간에서는 α* = 0으로 둔다.

선단: 선단이 놓인 지층의 규칙을 따른다: 모래에서는 $q'N^*_q \le q_l$, 점토에서는 $9c_u$(현장타설말뚝에서는 Reese–O'Neill을 선택할 수 있다).



문제

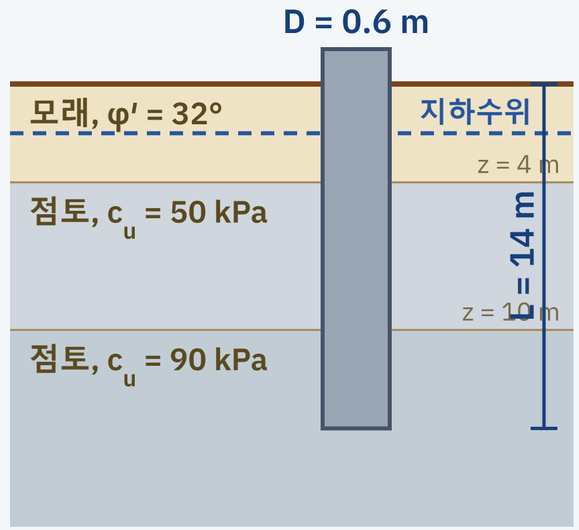
예제

조건

그룹	**현장타설말뚝 9개, 3열 × 3개, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
지반	**모래 0–4 m (φ′ = 32°) · 점토 4–10 m (c_u = 50) · 점토 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
구성	**현장타설말뚝: K = K_0 = 0.47, δ′ = 0.75φ′ = 24°, α* = 0.55; 선단: Meyerhof**
지하수	**2.0 m**
단위중량	$\gamma = 18,\ \gamma_{sat} = 19$ kN/m^3

구하는 값

단일 말뚝의 **주면** 저항력을 지층별로, **선단** 저항력과 **Q_u** 값을 구하라. $P_{max} \le Q_u/FS$ 검토를 수행하라.



풀이 (1/3)

풀이

1 모래(0–4 m): L′ = 15D = 9 m > 4 m, 상한 없음; σ′(2) = 18(2) = 36.0 및 σ′(4) = 36.0 + (19 − 9.81)(2) = 54.4 kPa

$$\bar{\sigma}' = \frac{126.4}{4} = 31.6 \text{ kPa}$$

$$f = K \tan\delta' \, \bar{\sigma}' = 0.47(0.4452)(31.6) = 6.61 \text{ kPa}$$

$$Q_{s1} = p \, f \, H = 1.885(6.61)(4) = \mathbf{49.8} \text{ kN}$$

풀이 (2/3)

풀이

2 점토(4–10 m): α* = 0.55 (c_u/p_a = 0.5 ≤ 1.5); 창 1.5 → L − D = 13.4 m가 지층 전체를 포함한다

$$f = 0.55(50) = 27.5 \text{ kPa} \qquad Q_{s2} = 1.885(27.5)(6) = \mathbf{311.0} \text{ kN}$$

3 점토 (10–14 m): 적용 구간이 13.4 m에서 끝남 → 하단 1D = 0.6 m 제외, 유효 길이 13.4 − 10 = 3.4 m

$$f = 0.55(90) = 49.5 \text{ kPa} \qquad Q_{s3} = 1.885(49.5)(3.4) = \mathbf{317.2} \text{ kN}$$

풀이 (3/3)

풀이

4 주면마찰력 합계와 선단 (선단 지층: 점토, c_u = 90 kPa, Meyerhof N^*_c = 9)

$$Q_s = 49.8 + 311.0 + 317.2 \approx \mathbf{678.1}\ \text{kN}$$

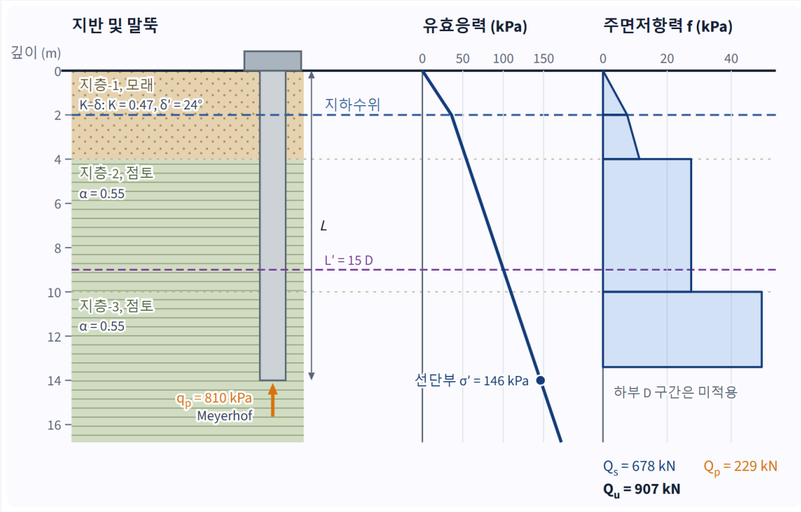
$$q_p = 9(90) = 810\ \text{kPa}$$

$$Q_p = A_b q_p = 0.2827(810) = \mathbf{229.0}\ \text{kN}$$

5 단일 말뚝의 지지력과 검토

$$Q_u = 678.1 + 229.0 = \mathbf{907.1}\ \text{kN}$$

$$\frac{Q_u}{FS} = 302.4\ \text{kN} \geq P_{max} = 261.1\ \text{kN} \Rightarrow \text{충분}$$



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

간격이 좁은 말뚝은 단독으로 있을 때보다 적게 지지한다

이론

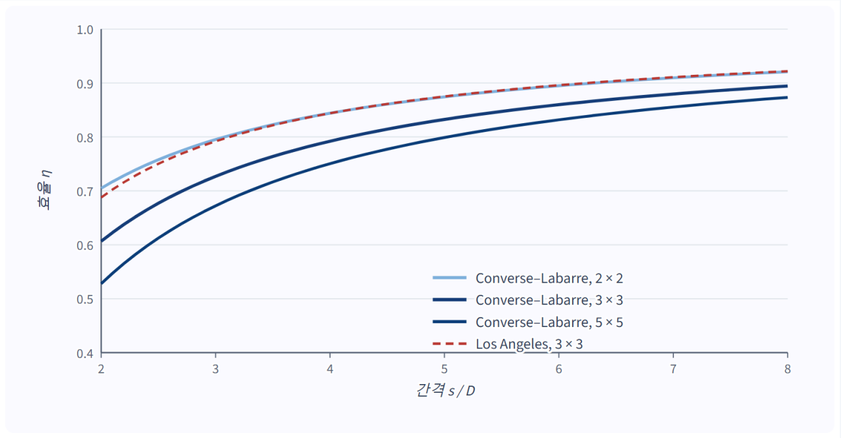
말뚝이 가까워질수록 각 말뚝으로 인해 전단되고 변형되는 지반이 서로 겹친다. **무리말뚝 효율**은 무리말뚝의 지지력을 단독 말뚝 지지력의 합으로 나눈 비이다. 출처 문헌은 $n_1 \times n_2$ 배열의 말뚝(직경 D, 간격 d)으로 구성된 무리말뚝에 대해 세 가지 경험식을 제시한다:

$$\eta = \frac{Q_{g(u)}}{\sum Q_u}$$

$$\eta_{CL} = 1 - \frac{\theta}{90}\,\frac{(n_1-1)n_2 + (n_2-1)n_1}{n_1 n_2}, \quad \theta = \tan^{-1}\frac{D}{d}\ (\text{도})$$

Converse–Labarre는 **인접한 말뚝 쌍**을 센다: 직렬로 $(n_1 - 1)n_2$쌍, 병렬로 $(n_2 - 1)n_1$쌍이며, 각 쌍은 자신의 간격에 해당하는 각 $\theta = \tan^{-1}(D/d)$를 가진다.

모듈은 점토에서 이 방정식을 사용하며, 이를 이용해 점토 지층의 말뚝 몸체와 선단이 점토 내에 있는 말뚝의 밑면을 저감한다.



간격이 커질수록 효율은 1에 가까워지며, 3 × 3 무리말뚝에서 3D일 때 약 0.7 – 0.8이다.

나머지 두 식과 한계

이론

원전의 나머지 두 방정식도 직사각형 무리말뚝에 대한 것이다. **Los Angeles** 방정식과 **Seiler–Keeney** 방정식(d는 **ft** 단위):

$$\eta_{LA} = 1 - \frac{D}{\pi d\, n_1 n_2}\left[n_1(n_2-1) + n_2(n_1-1) + \sqrt{2}(n_1-1)(n_2-1)\right]$$

$$\eta_{SK} = \left[1 - \frac{11d}{7(d^2-1)}\,\frac{n_1+n_2-2}{n_1+n_2-1}\right] + \frac{0.3}{n_1+n_2}$$

Seiler–Keeney는 1 ft에서 극점을 가지며 2 ft 미만에서는 의미가 없다; 모듈은 이를 **2 ft부터** 제시한다.

2.5D보다 작은 간격은 **경고로 표시한다**: 이는 출처 문헌이 마찰말뚝에 대해 제시하는 최소 간격이며, 식은 이보다 넓은 간격을 대상으로 작성되었다.

삼각 배열에서 Converse–Labarre 식은 인접한 말뚝 쌍의 수를 세어 작성하며, 이는 **모듈의 확장 기능**이고 같은 간격의 격자 배열보다 낮은 효율을 나타낸다.

문제

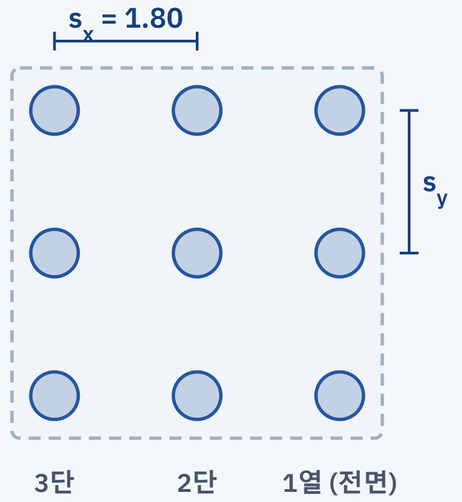
예제

구하는 값

무리말뚝 효율을 **Converse–Labarre**, **Los Angeles** 및 **Seiler–Keeney** 식으로 구하라.

조건

그룹	**3 × 3 말뚝, D = 0.60 m, 간격 d = 1.80 m (양방향)**
Seiler–Keeney	**피트 단위의 d: 1.80 m = 5.906 ft**



풀이

풀이

1 Converse–Labarre: θ = tan⁻¹(D/d); 인접 쌍: (2)(3) + (2)(3) = 12

$$\theta = \tan^{-1}\frac{0.6}{1.8} = 18.43^\circ\ ;\quad \eta_{CL} = 1 - \frac{18.43}{90}\cdot\frac{12}{9} = \mathbf{0.727}$$

2 Los Angeles

$$\eta_{LA} = 1 - \frac{0.6}{\pi(1.8)(9)}\left[3(2) + 3(2) + \sqrt{2}(2)(2)\right] = \mathbf{0.792}$$

3 Seiler–Keeney (d = 5.906 ft)

$$\eta_{SK} = \left[1 - \frac{11(5.906)}{7(5.906^2 - 1)}\cdot\frac{4}{5}\right] + \frac{0.3}{6} = \mathbf{0.831}$$

세 식의 결과는 0.727 – 0.831 범위에 있다. 점토에서 모듈은 **Converse–Labarre**(0.727)를 사용한다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

모래에서의 효율: 식이 아닌 규칙

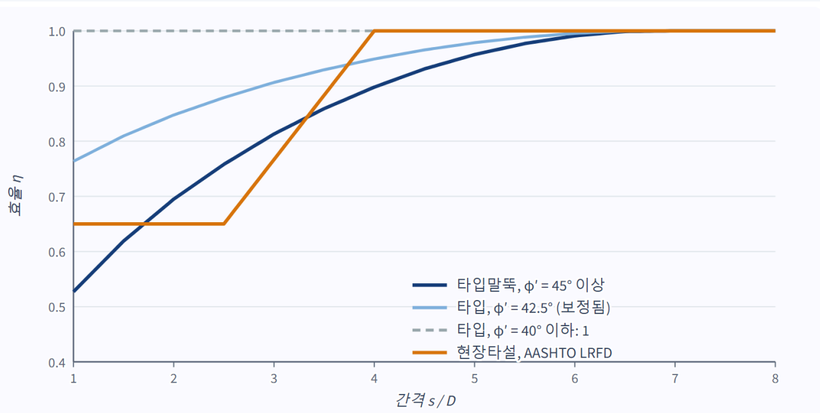
이론

타입말뚝은 느슨하거나 중간 정도로 조밀한 모래를 **다진다**. 이러한 모래에서는 무리말뚝이 개별 말뚝의 합만큼(시험에서는 그보다 더) 지지한다. 조밀한 모래(φ′ > 약 40°)에서만 말뚝 간격이 좁으면 지지력이 저하된다. 타입말뚝의 경우 모듈은 출처의 도표를 사용하며 효율이 **1을 결코 초과하지 않도록** 한다:

- φ′ ≤ 40°: **η = 1**
- 40° < φ′ < 45°: 1과 45° 곡선 사이를 **선형 보간**
- φ′ ≥ 45°: 45° 곡선 (s/D = 7에서 1.0; s/D = 1에서 0.53)

현장타설말뚝은 지반을 다지지 않으며 오히려 이완시킬 수도 있다. AASHTO LRFD는 무리말뚝 내 각 현장타설말뚝의 저항에 s/D = 2.5에서 **0.65**, 4에서 **1.0**을 곱한다:

$$\eta = 0.65 + 0.35\,\frac{s/D - 2.5}{1.5} \qquad 2.5 \le s/D \le 4$$



모래층에 대한 효율은 해당 층의 말뚝 몸체와 선단이 모래층에 위치한 말뚝의 선단지지력에 적용한다. 간격: **두 말뚝 사이의 최소 거리**.

문제

예제

조건

간격	**s = 1.80 m, D = 0.60 m: s/D = 3.0**
현장타설말뚝	**모래에서의 AASHTO 규정**
타입말뚝	**모래, $\varphi' = 42^\circ$ (s/D = 3에서 45° 곡선: $\eta_{45} = 0.813$)**

구하는 값

모래층의 효율을 **현장타설** 말뚝에 대해, 그리고 φ′ = 42°인 모래에서 **타입** 말뚝에 대해 구하라; φ′ = 35°이면 어떻게 되는가?

풀이

풀이

1 현장타설말뚝 (AASHTO): s/D = 3.0

$$\eta = 0.65 + 0.35\,\frac{3.0 - 2.5}{1.5} = \mathbf{0.767}$$

2 타입말뚝, φ′ = 42°: 가중치 w = (φ′ – 40)/5 및 45° 곡선

$$w = \frac{42 - 40}{5} = 0.4 \qquad \eta = 1 - w(1 - \eta_{45}) = 1 - 0.4(1 - 0.813) = \mathbf{0.925}$$

3 타입말뚝, φ′ = 35°

$$\varphi' \le 40^\circ \;\Rightarrow\; \eta = \mathbf{1.000}$$

같은 구간에서 **현장타설**말뚝은 모래에서 0.767, **타입**말뚝은 (느슨한~중간 모래에서) 1.00의 값을 갖는다: 타입은 지반을 다지지만 천공은 다지지 않는다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

각 지층의 탄성계수는 해당 지반의 탄성계수임

이론

말뚝 몸체는 지층 경계에서 분할되며 각 구간은 해당 지층의 방법으로 계산한다. 지반에 따른 무리 효과도 **구간별로** 적용해야 한다. 한 지층의 무리말뚝 효율은 그 지반의 효율이고, **선단**은 놓인 지반의 효율을 따른다:

$$Q_{ind} = n\left(\sum_i \eta_i\, Q_{s,i} + \eta_b\, Q_p\right)$$

$$\eta_{group} = \frac{Q_{ind}}{\sum Q_u}$$

점토층과 선단이 점토에 있는 말뚝의 저면: Converse–Labarre.

모래 지층: 타입말뚝은 도표, 현장타설말뚝은 AASHTO 규정.

무리말뚝의 효율은 **입력값이 아니라** 각 지층 기여분의 **가중평균**이다. 하중의 대부분을 모래에서 받는 말뚝은 그 모래의 무리말뚝 효과를, 점토 중에 매달린 말뚝은 점토의 무리말뚝 효과를 나타낸다.

문제

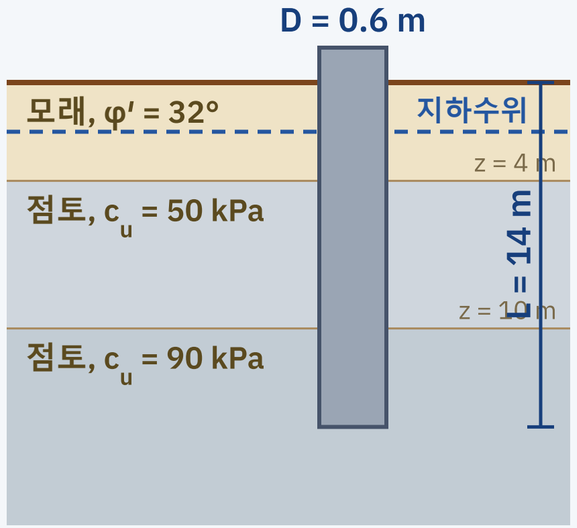
예제

조건

단일 말뚝 (예제 3)	**Q_{s1} = 49.8(모래), Q_{s2} = 311.0, Q_{s3} = 317.2(점토), Q_p = 229.0 kN**
효율	**모래 (현장타설, s/D = 3): 0.767; 점토: 0.727; 선단 (점토): 0.727**
그룹	**말뚝 9개**

구하는 값

Q_{ind}와 **무리말뚝 효율** $\eta = Q_{ind}/\Sigma Q_u$는 무엇인가?



풀이

풀이

1 각 부분의 효율 반영 기여분 (η Q): 모래층 주면, 점토층 주면 1, 점토층 주면 2, 선단

$$0.767(49.8) = 38.2\ ; \quad 0.727(311.0) = 226.1$$
$$0.727(317.2) = 230.6\ ; \quad 0.727(229.0) = 166.5$$

2 말뚝 한 본의 유효 지지력과 무리말뚝

$$\sum \eta Q = 38.2 + 226.1 + 230.6 + 166.5 = \mathbf{661.4}\ \text{kN}$$
$$Q_{ind} = 9(661.4) \approx \mathbf{5{,}952}\ \text{kN}$$

3 무리말뚝 효율

$$\eta = \frac{Q_{ind}}{n\,Q_u} = \frac{5{,}952}{9(907.1)} = \mathbf{0.729}$$

무리말뚝은 말뚝을 각각 단독으로 계산한 합계의 **73%**를 부담한다(모래 η = 0.767, 점토 η = 0.727).

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

무리말뚝은 하나의 깊은기초처럼 파괴될 수 있다

이론

말뚝 간격이 가까우면 무리말뚝과 그 사이의 지반이 **함께** 아래로 이동할 수 있다. 이는 $L_g \times B_g$ 크기에 깊이 L인 하나의 깊은기초와 같다. 이 기초의 저항력은 네 측면의 **전단**과 저면 아래의 **지지력**을 합한 값이다:

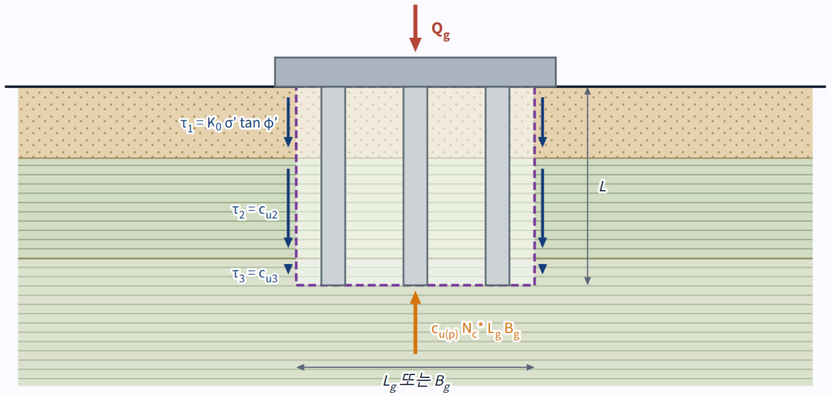
$$Q_{block} = \sum_i \tau_i \, P_b \, \Delta L_i + q_b \, L_g B_g \qquad P_b = 2(L_g + B_g)$$

점토 측면: $\tau = c_u$ (흙과 흙이 서로 미끄러지므로 α로 감소시키지 않는다).

모래 측면 (출처 방법을 모듈이 확장한 부분): $\tau = K_0 \sigma' \tan\varphi'$, $K_0 = 1 - \sin\varphi'$.

점토 저면: $q_b = c_u N^*_c$; N^*_c는 도표에서 L/B_g와 L_g/B_g에 따라 구한다. **모래 저면**: nQ_p.

$$Q_{g(u)} = \min(Q_{ind},\, Q_{block}) \qquad Q_{all} = \frac{Q_{g(u)}}{FS}$$



문제

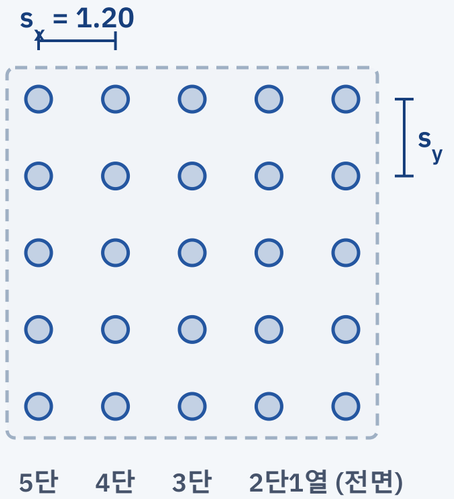
예제

조건

그룹	현장타설말뚝 9개, 3열 × 3개, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m
지반	모래 0–4 m ($\varphi' = 32°$) · 점토 4–10 m (c_u = 50) · 점토 10–18 m (c_u = 90 kPa)
블록	$L_g = B_g = (3 - 1)(1.8) + 0.6$
측면	모래: $\tau = K_0\sigma'_v\tan\varphi'$ (σ'_v = 31.6 kPa); 점토: $\tau = c_u$
저면	점토, c_u = 90 kPa; N^*_c는 도표 값 ($L_g/B_g = 1$)
개별	Q_{ind} = 5,952 kN (예제 6); V = 1,600 kN, FS = 3

구하는 값

Q_{block} 값, 무리말뚝의 지지력 및 허용하중을 구하라.



풀이 (1/2)

풀이

1 블록 치수와 둘레

$$L_g = B_g = 4.2\ \text{m} \qquad P_b = 2(L_g + B_g) = \mathbf{16.8}\ \text{m}$$

2 측면에서의 전단 ($\tau\ P_b\ \Delta L$)

$$\text{모래} : \tau = K_0 \bar{\sigma}' \tan\varphi' = 0.470(31.6)(0.6249) = 9.28 \ \Rightarrow\ 624\ \text{kN}$$

$$\text{점토 1} : \tau = 50 \ \Rightarrow\ 50(16.8)(6) = 5{,}040\ \text{kN}$$

$$\text{점토 2} : \tau = 90 \ \Rightarrow\ 90(16.8)(4) = 6{,}048\ \text{kN}$$

풀이 (2/2)

풀이

3 저면: $L/B_g = 14/4.2 = 3.33$과 $L_g/B_g = 1$에 대한 도표의 N^*_c

$$q_b L_g B_g = c_u N_c^* \, L_g B_g = 90(8.90)(17.64) = \mathbf{14{,}126}\ \text{kN}$$

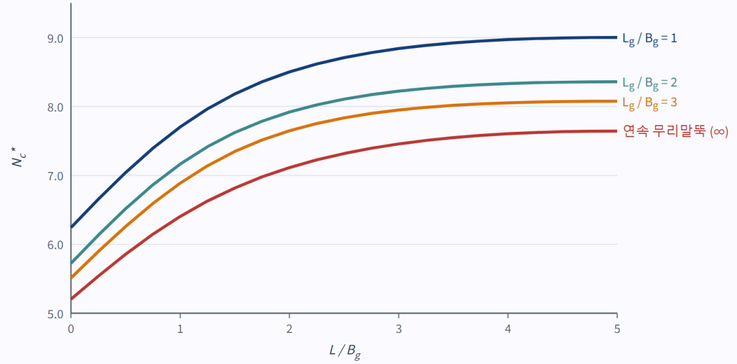
4 블록 지지력, 무리말뚝의 지지력 및 허용하중

$$Q_{block} = 11{,}712 + 14{,}126 = 25{,}838\ \text{kN}$$

$$Q_{g(u)} = \min(5{,}952;\ 25{,}838) = \mathbf{5{,}952}\ \text{kN}$$

$$Q_{all} = \frac{5{,}952}{3} = 1{,}984\ \text{kN} \geq V = 1\,600\ \text{kN}$$

블록 지지력이 개별 지지력 합의 **4배를 초과한다**: 이 무리말뚝에서는 **개별 말뚝이 지배**한다(개별). 블록 파괴는 간격이 좁고 말뚝 수가 많은 무리말뚝에서 고려 대상이 되며, 도표는 옆에 제시하였다.



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

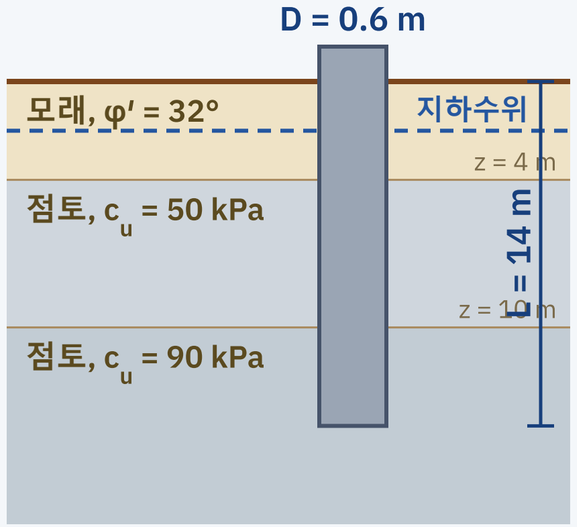
예제

조건

그룹	5 × 5 타입말뚝, D = 0.40 m, s = 1.20 m (3D), L = 12 m
지반	단일 모래층, φ′ = 32°, γ = 18, γ_{sat} = 19 kN/m³, 지하수위 3 m
단일 말뚝	Q_s = 285.7, Q_p = 318.0 kN (타입말뚝, K–δ 및 Meyerhof)
효율	타입말뚝, φ′ < 40°인 모래: η = 1

구하는 값

Q_{ind}와 Q_{block}의 값을 비교하여 무리말뚝의 지지력을 구하라.



풀이 (1/2)

풀이

1 개별 말뚝 (η = 1)

$$Q_{ind} = n\,Q_u = 25(603.7) = \mathbf{15{,}094}\ \text{kN}$$

2 블록: $L_g = B_g = 4(1.2) + 0.4 = 5.2$ m; σ′(3) = 54.0, σ′(12) = 136.7 kPa

$$P_b = 2(5.2 + 5.2) = 20.8\ \text{m} \qquad \bar{\sigma}' = \frac{939.2}{12} = 78.3\ \text{kPa}$$

$$\tau = K_0 \bar{\sigma}' \tan\varphi' = 0.470(78.3)(0.6249) = 22.99\ \text{kPa}$$

$$\text{측방 활동} = 22.99(20.8)(12) = \mathbf{5{,}738}\ \text{kN}$$

풀이 (2/2)

풀이

3 블록 저면이 모래인 경우: 저면 지지력은 말뚝 선단지지력의 합이다

$$\text{저면} = nQ_p = 25(318.0) = \mathbf{7{,}950}\ \text{kN} \qquad Q_{block} = 5{,}738 + 7{,}950 = \mathbf{13{,}689}\ \text{kN}$$

4 무리말뚝의 지지력과 효율

$$Q_{block} = 13{,}689 \ < \ Q_{ind} = 15{,}094$$

$$Q_{g(u)} = \mathbf{13{,}689}\ \text{kN} \qquad \eta_{group} = \frac{13{,}689}{15{,}094} = \mathbf{0.907}$$

여기서는 **블록 거동이 지배한다**: 큰 무리말뚝에서는 말뚝 몸체 주면저항의 합이 무리말뚝 외곽 둘레의 전단 저항을 초과한다. 개별 말뚝은 η = 1.00으로 나타나더라도 무리말뚝의 지지력은 개별 합계의 **91%**이다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

Vesic: 세 부분, 이후 무리말뚝

이론

단독 말뚝은 자체 길이의 단축, 선단 아래 지반의 압축, 그리고 몸체를 통해 하중을 받는 지반의 압축에 의해 침하한다. Vesic(1969)은 이 세 성분을 사용하중 Q_w에 대해 합산한다 (Q_{ws}는 몸체의 분담분, Q_{wp}는 선단의 분담분):

$$s_e = s_{e1} + s_{e2} + s_{e3}$$

$$s_{e1} = \frac{(Q_{wp} + \xi Q_{ws})L}{A_p E_p} \qquad s_{e2} = \frac{q_{wp} D}{E_s}(1-\mu_s^2) I_{wp}$$

$$s_{e3} = \frac{Q_{ws}}{pL}\frac{D}{E_s}(1-\mu_s^2) I_{ws} \qquad I_{ws} = 2 + 0.35\sqrt{L/D}$$

$$S_{g(e)} = \sqrt{\frac{B_g}{D}}\, s_e$$

사용하중 Q_w = V/n; 모듈은 이를 주면과 선단 사이에 **Q_s : Q_p** 비율로 분배한다.

무리말뚝은 같은 말뚝 하중에서 단독말뚝보다 **√(B_g/D)**배 더 침하한다(모래 지반 말뚝에 대한 Vesic의 경험식).

ξ: 주면저항력의 분포, 0.5(균등)와 0.67(깊이에 따라 증가) 사이의 값; I_{wp} = 0.85.

문제

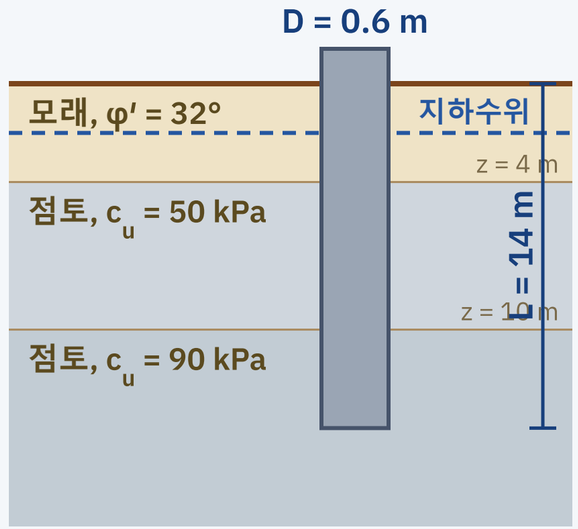
예제

조건

그룹	**현장타설말뚝 9개, 3열 × 3개, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
지반	**모래 0–4 m (φ′ = 32°) · 점토 4–10 m (c_u = 50) · 점토 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
사용하중	**Q_w = V/n = 177.8 kN; Q_s : Q_p = 678.1 : 229.0 (예제 3)**
재료	$E_p = 30\,000$ MPa, $E_s = 30$ MPa, $\nu_s = 0.30$, $\xi = 0.6$, $I_{wp} = 0.85$

구하는 값

단일 말뚝의 탄성침하를 세 성분으로 나누어 구하고, **무리말뚝**의 탄성침하를 구하라.



풀이 (1/2)

풀이

1 사용하중의 분배

$$Q_{ws} = Q_w \frac{Q_s}{Q_u} = 177.8 \frac{678.1}{907.1} = 132.9\ \text{kN} \qquad Q_{wp} = 177.8 - 132.9 = 44.9\ \text{kN}$$

2 말뚝 단축

$$s_{e1} = \frac{(44.9 + 0.6(132.9))(14)}{(0.2827)(30\,000\,000)} = 0.21\ \text{mm}$$

3 저면

$$q_{wp} = \frac{Q_{wp}}{A_b} = 158.7\ \text{kPa} \quad s_{e2} = \frac{158.7(0.6)}{30\,000}(1 - 0.3^2)(0.85) = 2.46\ \text{mm}$$

풀이 (2/2)

풀이

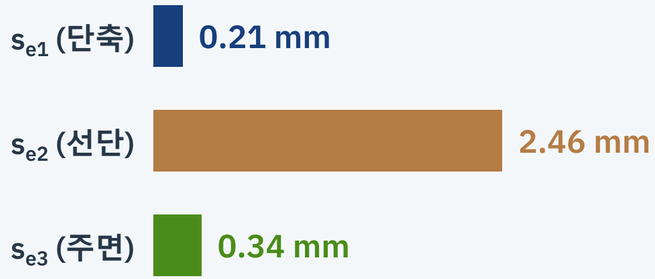
4 주면: $I_{ws} = 2 + 0.35\sqrt{(14/0.6)} = 3.69$

$$s_{e3} = \frac{132.9}{(1.885)(14)} \cdot \frac{0.6}{30\,000}(0.91)(3.69) = 0.34 \text{ mm}$$

5 단일 말뚝과 무리말뚝

$$s_e = 0.21 + 2.46 + 0.34 \approx 3.00 \text{ mm}$$

$$S_{g(e)} = \sqrt{\frac{B_g}{D}}\, s_e = \sqrt{\frac{4.2}{0.6}}(3.00) = \mathbf{7.9} \text{ mm}$$



침하의 **82%**는 저면 성분(s_{e2})에서 발생하며, 총 탄성침하는 **7.9 mm**이다. 점토층의 주된 침하는 다음 단계인 압밀에서 나타난다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

점토층의 느리고 큰 침하

이론

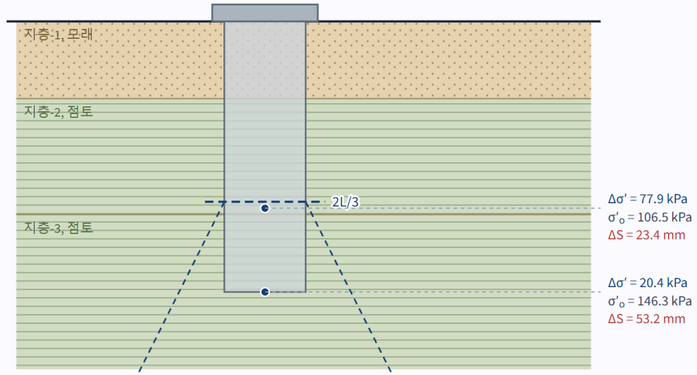
말뚝캡 아래의 점토는 천천히, 대부분 **압밀**에 의해 침하한다. 출처는 무리말뚝의 하중을 말뚝캡 높이에서 **2L/3 아래에** 있는 등가 기초에 작용시키며(말뚝이 하중의 일부를 위쪽 지반에 전달했다), 그 아래에서 **연직 2 : 수평 1**로 분산시킨다.
점토층의 중간, 2L/3 위치보다 z만큼 아래에서 추가되는 응력:

$$\Delta\sigma'_i = \frac{Q_g}{(B_g + z_i)(L_g + z_i)}$$

$$\Delta S_i = \frac{C_c H_i}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'_i}{\sigma'_o} \quad \text{(NC)}$$

과압밀 점토에서는 선행압밀압력까지 C_s(주어지지 않으면 $C_c/5$)를 사용하고, 그 이상에서는 C_c를 사용한다.

점토층의 2L/3 **아래** 부분이 계산에 포함된다; σ'_o는 이 부분의 중간에서 지층과 수위에 따라 취한다. $S_c = \Sigma \Delta S_i$.



문제

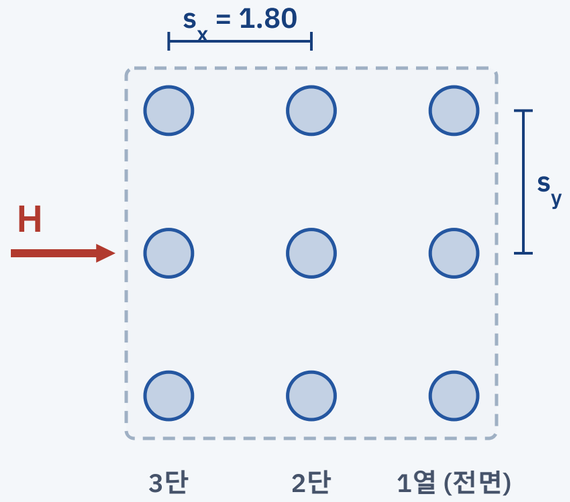
예제

조건

그룹	**현장타설말뚝 9개, 3열 × 3개, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
지반	**모래 0–4 m (φ′ = 32°) · 점토 4–10 m (c_u = 50) · 점토 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
하중	$Q_g = V = 1\,600$ kN; **블록** $L_g = B_g = 4.2$ m
점토 1 (4–10 m)	$e_0 = 0.90,\ C_c = 0.28$ **(NC)**
점토 2 (10–18 m)	$e_0 = 0.70,\ C_c = 0.20$ **(NC)**

구하는 값

2L/3 위치를 구하고 **각 점토층**(2L/3 아래 부분)의 침하와 전체 압밀침하를 계산하라.



풀이 (1/2)

풀이

1 2L/3 위치 (말뚝캡 저면 기준)

$$z_0 = \frac{2L}{3} = \frac{2(14)}{3} = \mathbf{9.33}\ \text{m} \ \Rightarrow\ \text{점토 1의 9.33–10 m 구간과 점토 2 전체가 계산에 포함된다}$$

2 점토 1 (4–10 m): 9.33–10 m, H = 0.67 m; 중간점 9.67 m, z = 0.33 m

$$\Delta\sigma' = \frac{1\,600}{(4.2+0.33)(4.2+0.33)} = 77.9\ \text{kPa} \qquad \sigma'_o = 106.5\ \text{kPa}$$

$$\Delta S = \frac{0.28(0.67)}{1+0.90}\log\frac{106.5+77.9}{106.5} = \mathbf{23.4}\ \text{mm}$$

풀이 (2/2)

풀이

3 점토 2 (10–18 m): 10.00–18 m, H = 8.00 m; 중점 14.00 m, z = 4.67 m

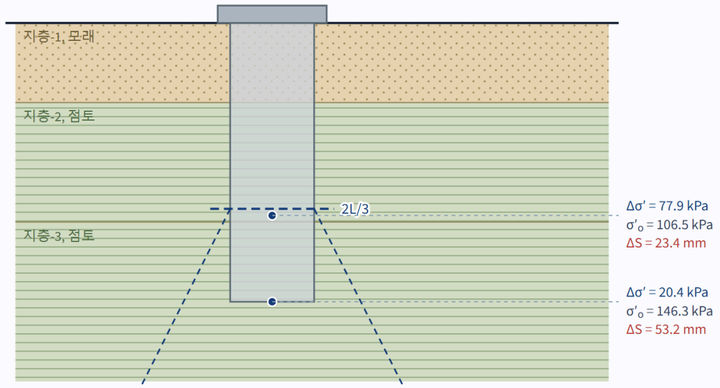
$$\Delta\sigma' = \frac{1\,600}{(4.2+4.67)(4.2+4.67)} = 20.4 \text{ kPa} \qquad \sigma'_o = 146.3 \text{ kPa}$$

$$\Delta S = \frac{0.20(8.00)}{1+0.70}\log\frac{146.3+20.4}{146.3} = \mathbf{53.2} \text{ mm}$$

4 총 압밀침하와 탄성 성분과의 합산

$$S_c = 23.4 + 53.2 = \mathbf{76.7} \text{ mm}$$

$$S = S_{g(e)} + S_c = 7.9 + 76.7 = \mathbf{84.6} \text{ mm}$$



침하의 **91%**는 압밀에서 비롯되며, 그중 69%는 10–18 m 구간의 점토에서 발생한다: 무리말뚝의 침하는 선단보다 **훨씬 아래**의 두꺼운 점토가 좌우하며, 단일 말뚝의 침하로는 이를 알 수 없다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

뒷열은 앞열의 그림자 영역에 있다

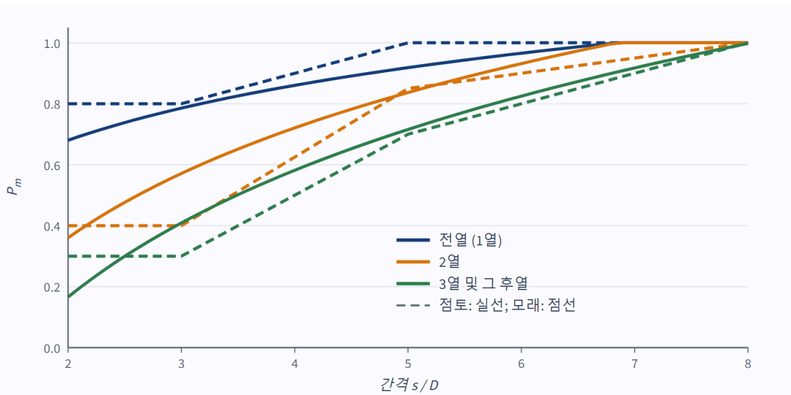
이론

수평하중이 작용하면 말뚝은 지반을 밀고 지반은 말뚝 길이를 따라 반력을 낸다 (수평하중 모듈의 p–y 곡선). 말뚝이 하중 방향으로 **앞뒤로 일렬로** 놓이면 각 말뚝은 앞쪽 말뚝이 변형시키고 밀어낸 지반에서 거동한다. 실험(Brown 등 1988; McVay 등 1995; Rollins 등 2006)에 따르면 무리말뚝 내 p–y 곡선은 형상을 유지하지만 **p-승수 P_m**만큼 감소하며, 이 승수는 열 위치와 간격에 따라 달라진다:

$$p_{group}(y) = P_m \; p_{single}(y)$$

점토 (Rollins):

$$P_{m1} = 0.26 \ln \frac{s}{D} + 0.5$$
$$P_{m2} = 0.52 \ln \frac{s}{D}$$
$$P_{m3} = 0.60 \ln \frac{s}{D} - 0.25$$



모래: AASHTO LRFD 배율(3D에서 0.8·0.4·0.3, 5D에서 1.0·0.85·0.7; 그 사이는 선형).

층상 지반에서는 **각 층**의 p–y 곡선을 해당 층의 지반 종류에 따른 배율로 조정한다. 하중이 **역전되면** 각 열은 무리말뚝의 열 배율의 평균을 취한다.

문제

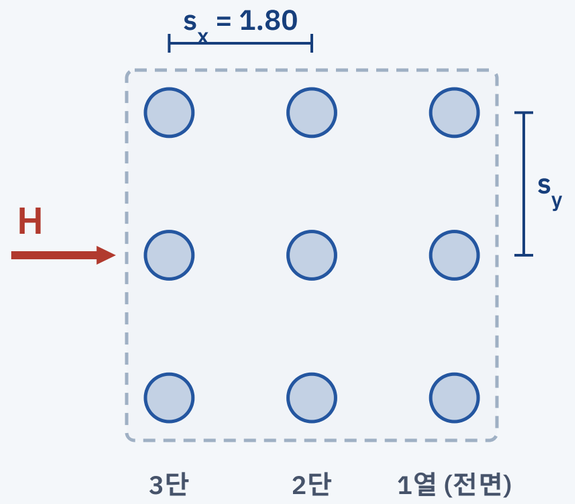
예제

구하는 값

점토층에 대한 세 줄의 **p-승수**를 구하라; 하중이 **반전되면** 점토와 모래에 대한 줄별 평균 승수는 얼마인가?

조건

간격 (하중 방향)	**s_x = 1.80 m, D = 0.60 m: s/D = 3**
점토	**Rollins 외 (2006)의 식**
모래	**AASHTO LRFD: 3D에서 P_m = 0.8 · 0.4 · 0.3**



풀이

풀이

1 점토: ln(s/D) = ln 3 = 1.099

$$P_{m1} = 0.26(1.099) + 0.5 = \mathbf{0.786}$$

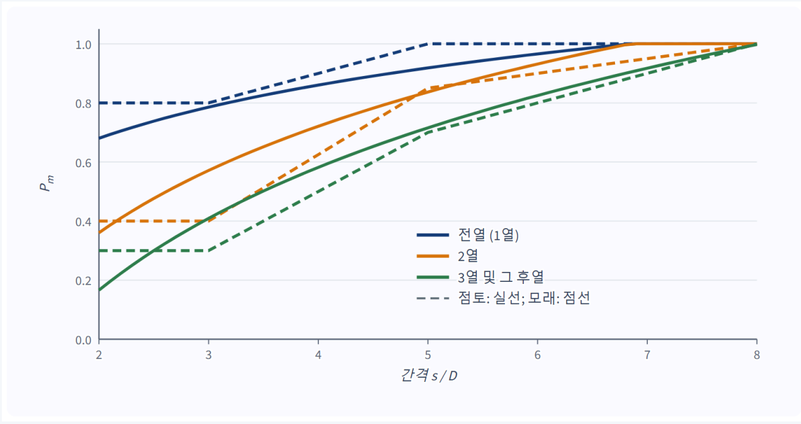
$$P_{m2} = 0.52(1.099) = \mathbf{0.571}$$

$$P_{m3} = 0.60(1.099) - 0.25 = \mathbf{0.409}$$

2 가역 하중: 각 열의 평균

$$\bar{P}_{m,clay} = \frac{0.786 + 0.571 + 0.409}{3} = \mathbf{0.589}$$

$$\bar{P}_{m,sand} = \frac{0.8 + 0.4 + 0.3}{3} = \mathbf{0.500}$$



선두 열은 곡선의 약 79%를 유지하고, 세 번째 이후의 열은 41%만 유지한다(점토); 모래에서는 80%와 30%이다. 간격이 넓어질수록 배율은 1에 가까워진다(5D에서 모래는 1.0 · 0.85 · 0.7).

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

말뚝캡은 단일 변위를 일으킨다

이론

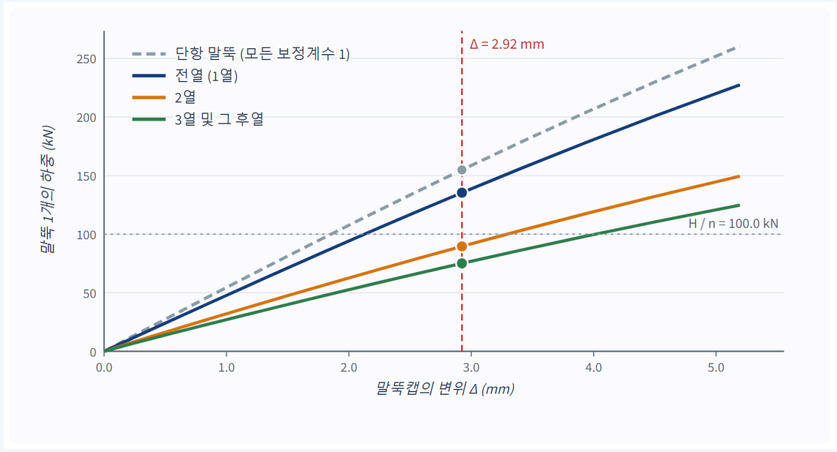
말뚝캡은 강성이며 회전이 구속되어 있다: **모든 말뚝 머리가 동일한 Δ만큼** 변위한다. 그러나 p–y 곡선의 스케일이 서로 다르므로 각 열은 서로 다른 하중을 부담한다. 모듈은 각 열 하중의 합이 말뚝캡에 작용하는 하중과 같아지는 Δ를 구한다:

$$\sum_{k=1}^{n_x} n_y \, H_k(\Delta) = H$$

k번째 줄의 말뚝은 **수평하중 말뚝 모듈**의 단일 말뚝이며(유한요소 + Newton), 그 곡선은 해당 줄의 승수로 배율 조정된다.

변위가 **제어된다**: 말뚝 머리를 Δ에 고정하고 그 반력을 읽으므로, 연화하는 (반복하중 점토) 곡선의 정점도 추적할 수 있다.

무리말뚝이 지지할 수 있는 최대 하중은 행 합계의 **첫 번째 정점**이며, 요구 하중이 이보다 크면 모듈이 이를 알려 준다.



문제

예제

조건

풀이 (모듈)	**Δ = 2.92 mm; 말뚝당 하중: 1열 135.3, 2열 89.6, 3열 75.1 kN**
단일 말뚝	**Δ에서 154.8 kN을 지지하며, 100 kN에서는 1.85 mm의 변위가 발생한다**
하중	**H = 900 kN, n = 9: 균등 분담 H/n = 100 kN**

구하는 값

평형을 검토하고, 말뚝캡 변위와 단일 말뚝 변위의 비 및 **수평하중에 대한 무리말뚝 효율**을 구하라.

풀이

풀이

1 평형: $\Sigma n_\gamma H_k = H$

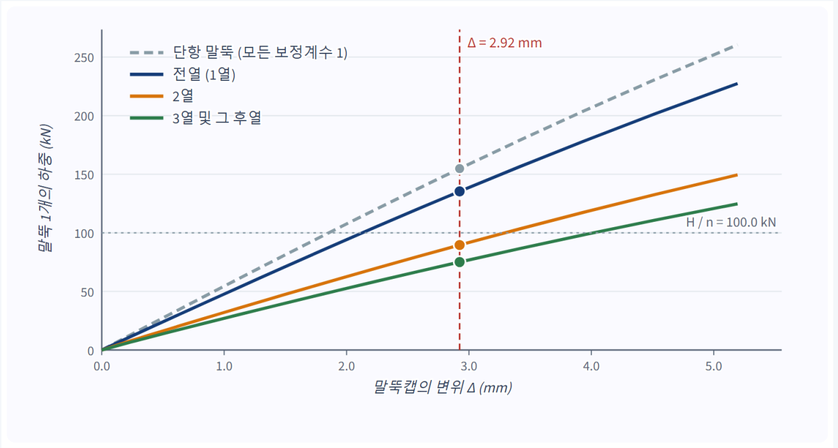
$$3(135.3 + 89.6 + 75.1) = \mathbf{900}\ \text{kN} = H\ \checkmark$$

2 말뚝캡 변위의 단일 말뚝 변위에 대한 비

$$\frac{\Delta}{y_{single}} = \frac{2.92}{1.85} = \mathbf{1.58}$$

3 수평하중을 받는 무리말뚝 효율: 말뚝 평균 하중 / 동일한 Δ에서 단일 말뚝의 하중

$$\eta_{lateral} = \frac{H/n}{H_{single}(\Delta)} = \frac{100.0}{154.8} = \mathbf{0.65}$$



선두 열은 균등 분담분의 **1.35배**, 세 번째 열은 0.75배를 부담한다. 말뚝캡은 단일 말뚝에 비해 **1.58배** 더 많이 변위한다. 최대 휨모멘트는 말뚝머리에서 207 kN·m이다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

각 값이 적용되는 검토 항목

이론

말뚝 하중: $P_{max} \le Q_u/FS$(단일 말뚝, 무리말뚝 효과 없음); 인장 말뚝은 $T_{max} \le T_u/FS$, 인장 말뚝을 함께 보면 $\Sigma T \le T_g/FS$

무리말뚝 지지력: $V \le Q_{all} = Q_{g(u)}/FS$; 개별 파괴와 블록 파괴 중 어느 것이 지배하는지

침하: 탄성 + 압밀, 입력한 허용값과 비교한다

수평 방향: 말뚝캡 변위, 앞줄 하중, 최대 휨모멘트, 수평 효율; 허용 변위와 비교한다

말뚝당 하중과 휨모멘트는 말뚝 단면의 **구조 설계**에 사용되는 하중이다

예제 그룹: 검토

검토	결과
$P_{max} \le Q_u/FS$	261 ≤ 302 kN ✓
$V \le Q_{all}$	1 600 ≤ 1,984 kN ✓
침하	84.6 mm
Δ (수평)	2.92 mm

문제

예제

조건

그룹	**현장타설말뚝 9개, 3열 × 3개, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
지반	**모래 0–4 m (φ′ = 32°) · 점토 4–10 m (c_u = 50) · 점토 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
변화	**말뚝 간격 s = 2.5D · 3D · 4D · 5D · 6D (양방향)**
하중	**V = 1 600, H = 900 kN, M_y = 900 kN·m**

구하는 값

간격이 커지면 무리말뚝의 지지력, 효율 및 말뚝캡 변위는 어떻게 변하는가?

풀이 (1/2)

풀이

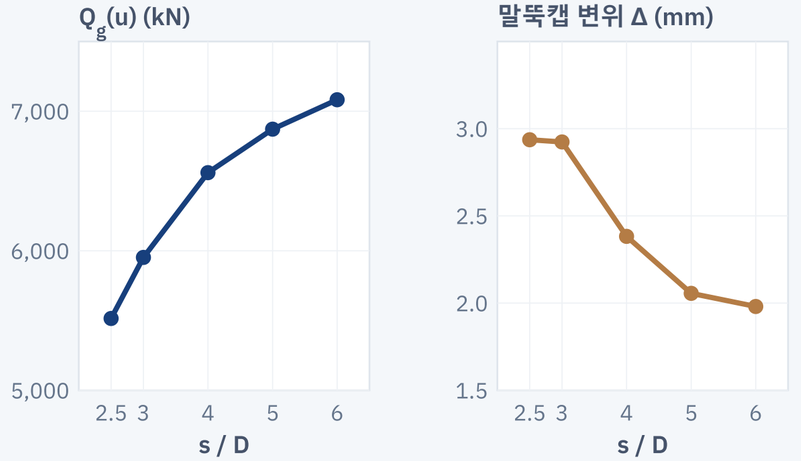
s / D	s (m)	η 모래	η 점토	$Q_{g(u)}$ (kN)	η 그룹	Δ (mm)
2.5	1.50	0.65	0.677	5,515	**0.676**	2.94
3.0	1.80	0.77	0.727	5,952	**0.729**	2.92
4.0	2.40	1.00	0.792	6,560	**0.803**	2.38
5.0	3.00	1.00	0.832	6,871	**0.842**	2.06
6.0	3.60	1.00	0.860	7,083	**0.868**	1.98

s = 2.5D → 6D: 지지력 **5,515 → 7,083 kN**, 무리말뚝 효율 0.68 → 0.87, 말뚝캡 변위 **2.94 → 1.98 mm**. 간격이 넓어질수록 효율과 p-승수 모두 1에 가까워지며, 2.5D는 출처에서 제시한 최소 간격이다.

풀이 (2/2)

풀이

해설. 간격을 2.5D에서 6D로 늘리면 지지력이 28% 증가하고 말뚝캡 변위가 33% 감소하지만, 말뚝캡이 커지고 말뚝이 멀리 분산된다. 실무에서는 3D – 3.5D에서 5D 사이의 값으로 절충한다. 그래프에서 왼쪽은 $Q_{g(u)}$, 오른쪽은 Δ이다.



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

수치 이면의 가정사항

이론

무리말뚝: 직사각형 격자 또는 삼각형 배열로, 단일 단면과 길이를 가지며, 강성 말뚝캡 아래에 설치된 연직 말뚝. 말뚝캡은 하중을 전달하지만 저항을 추가하지 않는다(수동토압, 캡 하부의 마찰과 지지력은 고려하지 않아 안전 측에 둔다).

단일 말뚝: 층상 지반 규칙을 적용하며 저항값은 입력하지 않는다.

효율: 점토에서는 타입말뚝에 대한 경험식, 모래에서는 단일 간격(최소 거리). 삼각 배열에서 Converse–Labarre 식은 하나의 **확장 기능**이다.

블록: 점토에 놓인 출처의 기초이며, 모래에서의 활동과 모래 저면은 **모듈이 확장한 부분**이다.

하중: V는 말뚝캡의 중량을 포함하며, 수평하중과 모멘트는 말뚝캡 저면에 작용한다. 인발 시에는 말뚝 몸체만 고려하며, 모래는 ¾.

침하: 선택 사항이며, 탄성 침하분은 단일 E_s와 ν_s로, 압밀 침하분은 2:1 분산법으로 각 지층의 중앙에서 계산한다.

수평: p-승수는 특정 지반과 간격에서 수행한 시험에서 얻은 값이며, 3D 미만 간격은 표시한다.

요약

핵심 정리

강성 말뚝캡: **P = V/n + Bx + Cy**; 가장 큰 하중은 앞쪽 말뚝에, 가장 작은 하중은 뒤쪽 말뚝에 작용하며; 모멘트가 크면 뒤쪽 말뚝은 **인장**을 받는다

단일 말뚝은 지층별로 계산하며, 무리말뚝의 지지력은 그 결과를 토대로 구성한다

효율은 지층별로 적용한다: 점토에서는 Converse–Labarre 식, 모래에 타입하는 경우에는 도표($\eta \le 1$), 현장타설말뚝에서는 AASHTO 규정

지지력 = **min(개별, 블록)**; 블록 파괴는 간격이 좁고 말뚝 수가 많은 무리말뚝에서 지배한다

침하: 탄성침하(Vesic, $\sqrt{(B_g/D)}$ 적용) + 압밀침하(2L/3 지점부터 2:1 분산); 무리말뚝의 침하는 두꺼운 점토층이 좌우한다

수평: p-승수는 앞열에서 뒷열로 갈수록 감소하며, 말뚝캡은 하나의 Δ만 겪고 각 열은 서로 다른 하중을 부담한다

참고문헌

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

Meyerhof, G.G. (1976). Bearing capacity and settlement of pile foundations. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 102(GT3), 197–228.

Vesic, A.S. (1977). Design of Pile Foundations. NCHRP Synthesis of Highway Practice 42, Transportation Research Board, Washington.

Coyle, H.M. and Castello, R.R. (1981). New design correlations for piles in sand. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 107(GT7), 965–986.

Mansur, C.I. and Hunter, A.H. (1970). Pile tests, Arkansas River project. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 96(SM5), 1545–1582.

Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice, 3rd ed. John Wiley & Sons, New York.

Vijayvergiya, V.N. and Focht, J.A. (1972). A new way to predict capacity of piles in clay. Proceedings of the 4th Offshore Technology Conference, Houston, Paper OTC 1718.

Burland, J.B. (1973). Shaft friction of piles in clay — a simple fundamental approach. Ground Engineering, 6(3), 30–42.

O'Neill, M.W. and Reese, L.C. (1999). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-IF-99-025, Federal Highway Administration, Washington.

Reese, L.C. and O'Neill, M.W. (1989). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-HI-88-042, Federal Highway Administration, Washington; the base of a drilled shaft in clay.

Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1967). Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.

Kishida, H. and Meyerhof, G.G. (1965). Bearing capacity of pile groups under eccentric loads in sand. Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, 2, 270–274.

Vesic, A.S. (1969). Experiments with instrumented pile groups in sand. Performance of Deep Foundations, ASTM STP 444, 177–222.

Jaky, J. (1944). The coefficient of earth pressure at rest. Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers, 7, 355–358.

American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th ed.: the p-multipliers of pile groups and the resistance of shaft groups in cohesionless soil.

Washington State Department of Transportation (2010). Bridge Design Memorandum No. 07-2010, Bearing resistance of shaft groups.

Brown, D.A., Morrison, C. and Reese, L.C. (1988). Lateral load behavior of pile group in sand. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 114(11), 1261–1276.

McVay, M., Casper, R. and Shang, T.-I. (1995). Lateral response of three-row groups in loose to dense sands at 3D and 5D pile spacing. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 121(5), 436–441.

Rollins, K.M., Olsen, R.J., Egbert, J.J., Jensen, D.H., Olsen, K.G. and Garrett, B.H. (2006). Pile spacing effects on lateral pile group behavior: analysis. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 132(10), 1272–1283.

Matlock, H. (1970). Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay. Proceedings of the 2nd Offshore Technology Conference, Houston, Paper OTC 1204, 577–594.

Reese, L.C., Cox, W.R. and Koop, F.D. (1974). Analysis of laterally loaded piles in sand. Proceedings of the 6th Offshore Technology Conference, Houston, Paper OTC 2080, 473–485.

American Petroleum Institute (2000). Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms — Working Stress Design, API RP 2A-WSD, 21st ed.

GeoTerva

온라인 지반공학 계산

이론에서 실무로

이 강의자료의 예제 무리말뚝을 GeoTerva에서 단계별로 계산해 보시오: 수치는 동일하다.

모듈 열기 →

이론 페이지 →

스마트폰으로 열기

체험 모듈은 가입 없이 이용할 수 있습니다.

강의에서 사용하려면: info@geoterva.com