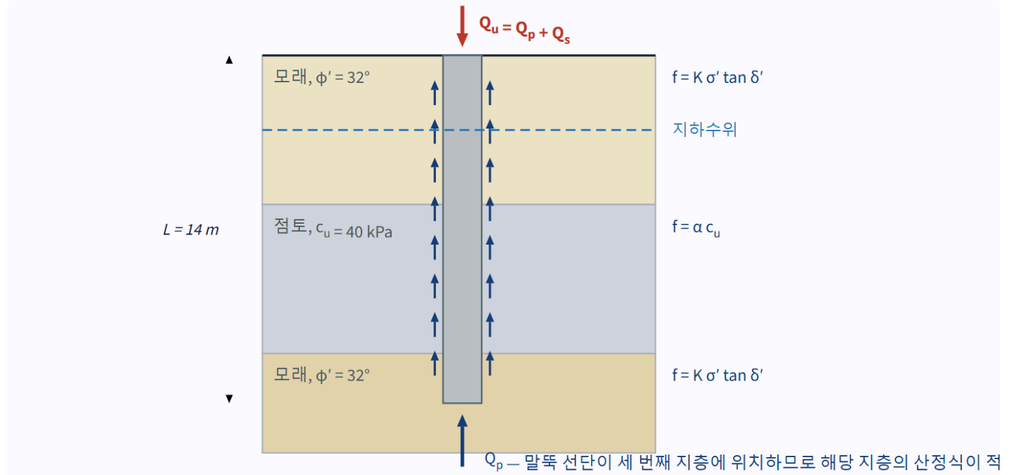
GeoTerva

지반공학 강의 자료 · 말뚝

# 층상 지반에서의 말뚝 지지력

강의: 모래층과 점토층을 관통하는 말뚝의 지지력. 어떤 규칙이 어디에서 적용되는지, 유효응력이 지층을 따라 어떻게 누적되는지; 주제별 계산 예제.

지층별 계산 | 선단: 선단 위치의 지층 | 모래 + 점토 규칙 | 현장타설말뚝 | 계산 예제



개요

# 이 강의에서 다루는 내용

유효응력을 **지층별로 누적하는 것**, 점토층 자체의 강도가 모래층으로 이어지지 않더라도 점토층이 자중으로 그 아래의 모래에 어떻게 영향을 미치는지 확인하는 것

**선단지지력**이 선단이 위치한 지층에만 좌우되며 그 지층의 규칙으로 계산된다는 점을 알기

**모래층**에는 K–δ 규칙(임계깊이 $L' = 15D$는 말뚝 전체에 적용된다)을, **점토층**에는 α, λ, β 규칙을 적용하는 방법

주면저항력을 **지층에 걸쳐 합산**하고, 경계에서 마찰이 급변하는 현상과 말뚝 길이의 영향을 해석하는 방법

**현장타설말뚝**에서 $\alpha^*$ 적용 구간과, $c_{ub}$가 여러 지층에서 기인할 수 있음을 이해하기

### 강의 흐름

각 주제는 **세 단계**로 다룬다:

1 · **이론**: 규칙은 무엇이며 왜 그러한가?

2 · **문제**: 조건과 구하는 값

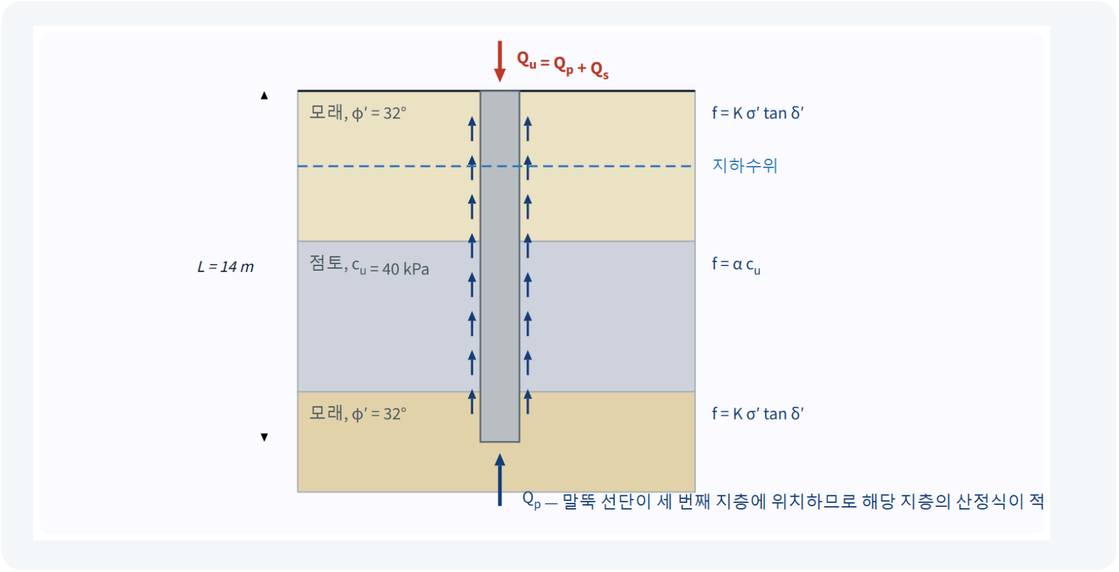
3 · **풀이**: 단계별 수치 계산

대부분의 예제는 같은 말뚝을 사용한다: 길이 14 m이고 모래–점토–모래 지층을 관통하는 지름 0.4 m의 말뚝.

이 강의는 **모래 지반의 말뚝** 및 **점토 지반의 말뚝** 강의를 토대로 한다: 그곳에서 규칙을 배웠고, 여기서는 어떤 규칙이 어디에 적용되는지를 살펴본다.

# 각 지층은 고유한 규칙에 따라 반응한다

이론




말뚝이 단일 지반에만 근입되는 경우는 드물다. 지반 프로필은 **여러 지층**이며, 각 지층은 모래 또는 점토로 정의되고 **해당 지반 재료의 규칙**이 적용된다. 지지력은 여전히 두 부분이지만 더 이상 하나의 식에서 읽어내지 않고 **부분별로 구성**한다:

$$Q_u = Q_p + Q_s \qquad Q_{all} = \frac{Q_u}{FS}$$

**새로운 이론 없음**: 모래 규칙은 모래 모듈에, 점토 규칙은 점토 모듈에 속한다.

새로운 점은 **계산 체계**이다: 어느 규칙이 말뚝 몸체의 어느 구간에서 유효한지, 그리고 유효응력이 위쪽 지층으로부터 어떻게 누적되는지.

선단지지력은 **하나의 지층**에서, 주면저항력은 **모든 지층의 합**에서 얻어진다.

# 응력은 연속이고 마찰은 계단식이다

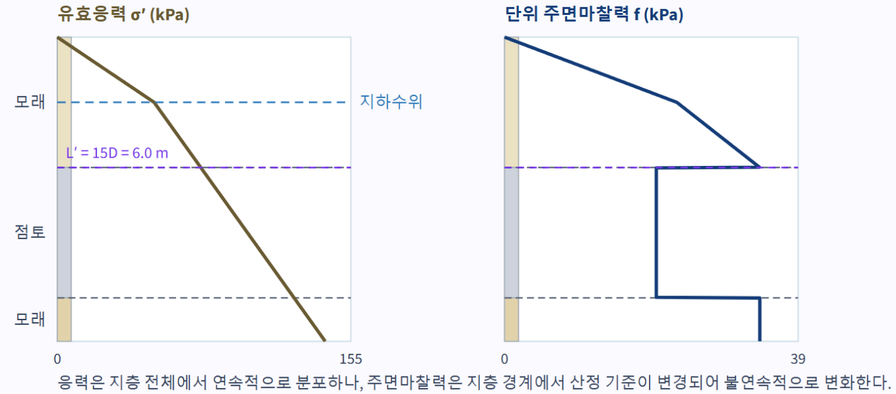
이론

유효연직응력은 지층들을 서로 연결하는 요소이다: **위에 있는 각 지층의 중량**이 누적된다. 지하수위 위에서는 습윤단위중량을, 아래에서는 수중단위중량을 사용한다.

$$\sigma'(z) = \sum \gamma_i h_i \quad \text{(지하수위 위)}$$
$$+ \sum (\gamma_{sat,i} - \gamma_w) h_i \quad \text{(지하수위 아래)}$$

점토 지층은 모래에 자신의 강도를 전달하지 않지만, **자중**으로 그 아래 모래가 제공하는 저항을 변화시킨다.

반면 마찰은 연속적이지 않다. 모래–점토 경계에서는 **적용하는 규칙 자체가 바뀌며** 단위마찰력이 크게 불연속적으로 변할 수 있다. 이 급변은 계산의 오류가 아니라 층상 지반 주상도의 **고유한 특징**이다.



응력은 지층 전체에서 연속적으로 분포하나, 주면마찰력은 지층 경계에서 산정 기준이 변경되어 불연속적으로 변화한다.

# 문제

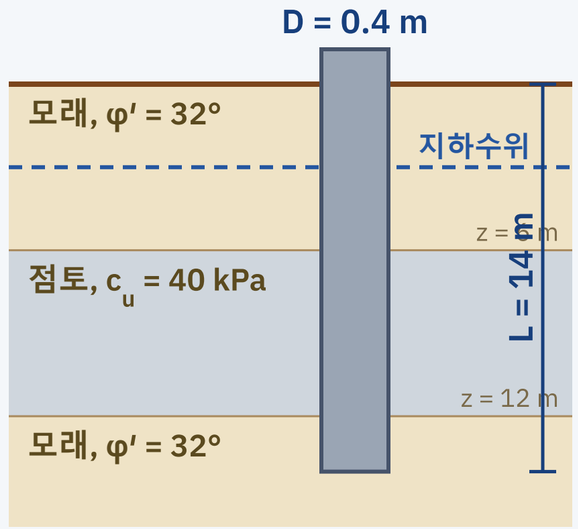
예제

## 조건

| | |
|---|---|
| 모래 1 (0–6 m) | $\varphi' = 32^\circ$ |
| 점토 (6–12 m) | $c_u = 40$ kPa |
| 모래 2 (12–16 m) | $\varphi' = 32^\circ$ |
| 단위중량 | $\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m$^3$ **(3개 지층)** |
| 지하수 | **깊이 3.0 m에서** |
| 말뚝 | **타입, D = 0.4 m, L = 14 m** |
| 물의 단위중량 | $\gamma_w = 9.81$ kN/m$^3$ |

## 구하는 값

깊이 **3, 6, 12, 14 m**에서 유효 수직응력을 구하라(14 m = 말뚝 선단).



# 풀이 (1/2)

풀이

**1** 지하수위까지 (3 m): 전체 지층 습윤, γ = 17

$$\sigma'(3) = 17(3) = \mathbf{51.0}\ \text{kPa}$$

**2** 6 m (모래–점토 경계): 지하수위 아래에서 γ′ = $\gamma_{sat}$ − $\gamma_w$ = 18 − 9.81

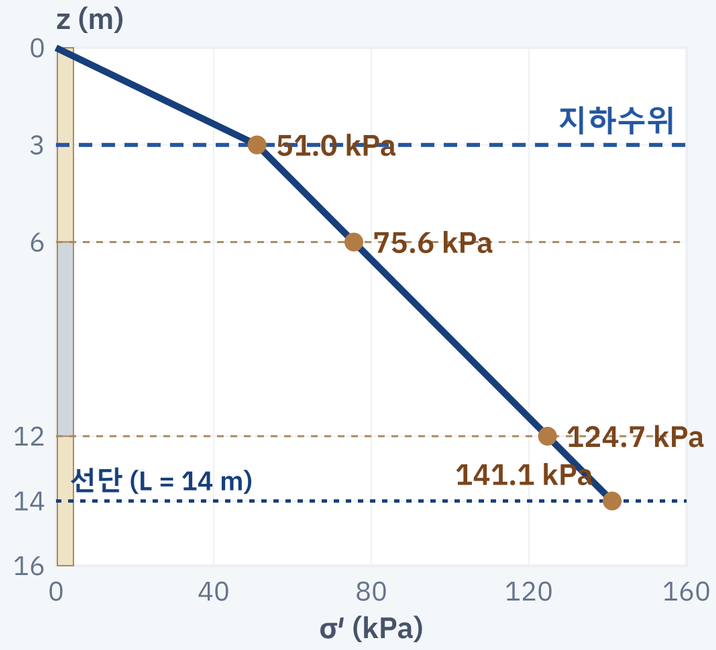
$$\sigma'(6) = 51.0 + (18 - 9.81)(3) = \mathbf{75.6}\ \text{kPa}$$

**3** 12 m (점토–모래 경계): 점토의 $\gamma_{sat}$ 값도 18

$$\sigma'(12) = 75.6 + (18 - 9.81)(6) = \mathbf{124.7}\ \text{kPa}$$

**4** 14 m (말뚝 선단)

$$\sigma'(14) = 124.7 + (18 - 9.81)(2) = \mathbf{141.1}\ \text{kPa}$$



# 풀이 (2/2)

풀이

**5** 각 구간에서 σ′ 선도의 면적(사다리꼴); 이 값으로 주면마찰력 계산에서 평균응력을 구한다

$$A_{0-6} = \tfrac{1}{2}(0 + 51.0)(3) + \tfrac{1}{2}(51.0 + 75.6)(3) = 266.4$$

$$A_{6-12} = \tfrac{1}{2}(75.6 + 124.7)(6) = 600.8$$

$$A_{12-14} = \tfrac{1}{2}(124.7 + 141.1)(2) = 265.8$$

σ′는 **지층 전체에 걸쳐 연속이다**: 모래–점토 경계에서 값의 불연속이 없으며, 기울기는 지하수위에서와 γ′가 변하는 곳에서만 변한다. 이 세 면적은 예제 4와 5에서 평균 σ′로 사용된다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

# 선단은 자신이 위치한 지층만 참조한다

이론

선단지지력은 **단일 지층**에 속한다. 즉 말뚝 선단이 위치한 지층이다. 이 지층의 재료에 따라 계산하며, 위쪽 지층은 σ′ 값을 통해서만(**모래 선단의 경우**) 영향을 미치고 **점토 선단의 경우에는 전혀 영향을 미치지 않는다**.

모래: $Q_p = A_p\, q'\, N_q^* \le A_p\, q_l, \quad q_l = 0.5\, p_a N_q^* \tan\varphi'$

점토: $Q_p = A_p\, c_u\, N_c^*, \quad N_c^* = 9$ (Meyerhof)

선단이 **정확히 경계**에 놓이는 말뚝은 경계 **아래**의 지층에 지지된 것으로 간주한다.

Coyle–Castello는 **모래**에 대한 경험식이다; 점토 선단에서는 의미가 없으며, 선택하더라도 점토 규칙이 그대로 적용된다.




모래 선단에서는 σ′와 $N^*_q$가 지배하고, 점토 선단에서는 해당 지층의 $c_u$ 값만 관여한다.

# 문제

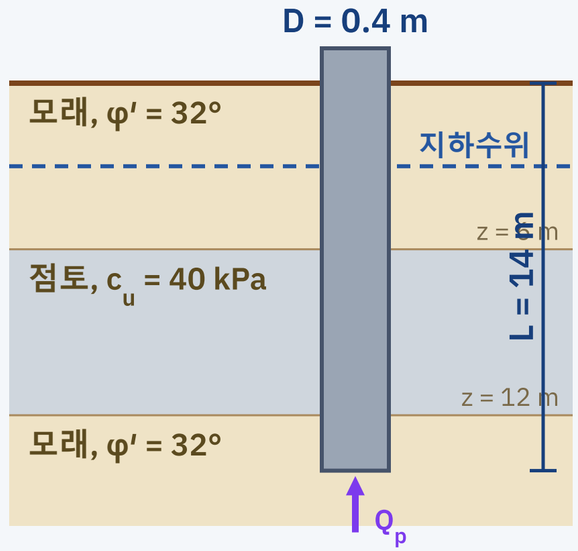
예제

## 조건

| | |
|---|---|
| 모래 1 (0–6 m) | $\varphi' = 32^\circ$ |
| 점토 (6–12 m) | $c_u = 40$ kPa |
| 모래 2 (12–16 m) | $\varphi' = 32^\circ$ |
| 단위중량 | $\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m$^3$ **(3개 지층)** |
| 지하수 | **깊이 3.0 m에서** |
| 말뚝 | **타입, 원형 단면, D = 0.4 m, L = 14 m** |
| 선단 방법 | **Meyerhof** |
| 대기압 | $p_a = 100$ kPa |
| 선단 유효응력 | $q' = \sigma'(14) = 141.1$ kPa **(예제 1)** |

## 구하는 값

선단이 어느 지층에 위치하는지 판별하고 **선단지지력** $Q_p$를 구하라.



# 풀이 (1/2)

풀이

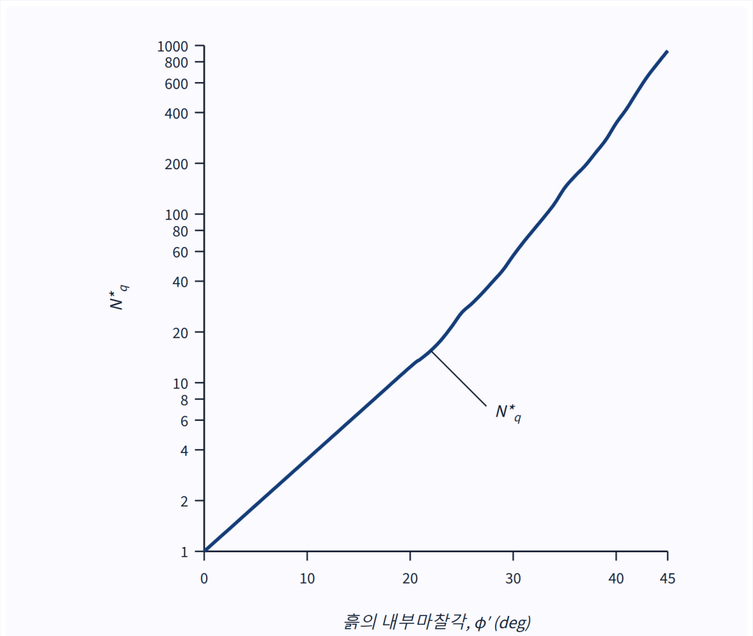
**1** 선단 지층: L = 14 m, 12–16 m 구간의 모래 → 모래 규칙 (위쪽 점토는 선단과 무관)

$$\varphi' = 32^\circ \qquad q' = \sigma'(14) = 141.1 \text{ kPa}$$

**2** $N^*_q$는 Meyerhof 도표에서 $\varphi' = 32°$에 대해 구하고, 이어서 두 값을 나란히 놓는다

$$N_q^* = 81$$
$$q' N_q^* = 141.1(81) = 11{,}428 \text{ kPa}$$
$$q_l = 0.5(100)(81)\tan 32^\circ = 2{,}531 \text{ kPa}$$

도표의 $N^*_q$ 값(옆)은 81이며, $q'N^*_q$ = 11,428 kPa은 한계값 $q_l$ = 2,531 kPa보다 훨씬 크다: **한계값이 지배한다.**



# 풀이 (2/2)

풀이

**3** 단위 선단지지력: 둘 중 작은 값

$$q_p = \min(q' N_q^*;\ q_l) = \min(11{,}428;\ 2{,}531) = \mathbf{2{,}531}\ \text{kPa}$$

**4** 말뚝 선단 면적과 선단지지력

$$A_p = \frac{\pi (0.4)^2}{4} = 0.1257\ \text{m}^2 \qquad Q_p = A_p\, q_p = 0.1257(2{,}531) = \mathbf{318.0}\ \text{kN}$$

선단지지력은 **318.0 kN**이다. 말뚝 선단이 모래에 있으므로 모래 규칙이 적용되며, 한계값이 작용하고 있으므로 이 예제에서는 σ′ 값이 결과를 바꾸지 않는다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

# 문제

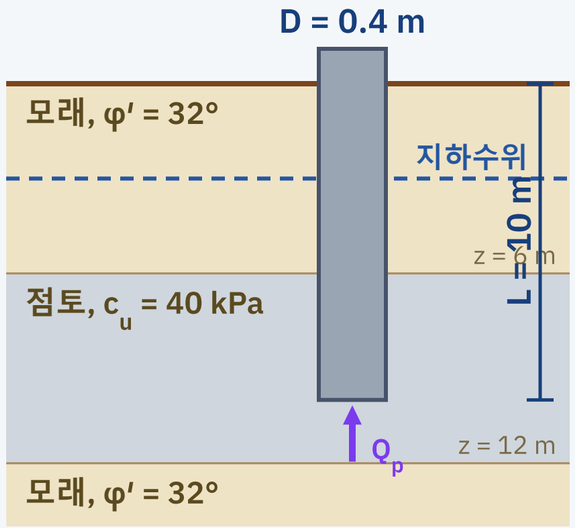
예제

**조건**

| | |
|---|---|
| 모래 1 (0–6 m) | $\varphi' = 32^\circ$ |
| 점토 (6–12 m) | $c_u = 40$ kPa |
| 모래 2 (12–16 m) | $\varphi' = 32^\circ$ |
| 단위중량 | $\gamma = 17$, $\gamma_{sat} = 18$ kN/m$^3$ **(3개 지층)** |
| 지하수 | **깊이 3.0 m에서** |
| 말뚝 | **동일한 말뚝, 단 L = 10 m** |
| 선단지지력 산정법 | **Meyerhof와 Vesic** |
| 대기압 | $p_a = 100$ kPa |

**구하는 값**

말뚝을 10 m로 줄이면 선단이 어느 지층에 놓이는지 판단하고 **선단지지력**을 두 방법으로 구하라.



# 풀이

풀이

**1** 선단 지층: L = 10 m, 6–12 m 구간의 점토 → 점토 규칙 (모래와 σ′는 계산에서 제외)

$$c_u = 40 \text{ kPa} \qquad A_p = 0.1257 \text{ m}^2$$

**2** Meyerhof: $N^*_c = 9$

$$q_p = 9\,c_u = 9(40) = 360 \text{ kPa} \qquad Q_p = 0.1257(360) = \mathbf{45.2} \text{ kN}$$

**3** Vesic: $I_{rr} = I_r = 347(c_u/p_a) - 33$

$$I_{rr} = 347(0.4) - 33 = 105.8$$

$$N_c^* = \tfrac{4}{3}(\ln 105.8 + 1) + \tfrac{\pi}{2} + 1 = 10.12$$

$$q_p = 40(10.12) = 405 \text{ kPa} \;\Rightarrow\; Q_p = 0.1257(405) = \mathbf{50.9} \text{ kN}$$

선단이 모래에 있는 말뚝에서는 $Q_p$ = **318 kN**이었으나, 점토에 있으면 **45 – 51 kN**이다: 약 7분의 1. 같은 말뚝을 2 m 연장하여 선단을 모래에 넣으면 선단지지력이 급격히 증가한다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

# K–δ: 한계깊이는 말뚝 전체에 대한 값이다

이론

모래층에서 말뚝 몸체는 수평 유효응력에 대한 마찰로 저항한다. 각 모래층은 **자신의** K와 δ′ 값을 가진다:

$$f = K_i\,\sigma'\tan\delta_i' \;\; (z \le L') \qquad f = f_{z=L'} \;\; (z > L'),\;\; L' = 15D$$

L′은 지층이 아니라 **말뚝 전체**에 속하는 값이다: L′ 아래에서 σ′ 값은 L′에서의 값으로 유지된다.

깊은 곳의 모래 지층은 경계의 위치와 관계없이 지층 전체에 걸쳐 **일정한** 단위마찰력을 준다.

선택 사항: **Coyle–Castello**. 지층 고유의 K(도표에서), δ′ = 0.8φ′, 지층의 평균 σ′ 값; 임계깊이는 없으며 평균값이 그 역할을 한다.

### COYLE–CASTELLO (지층별)

$$f_i = K_i\,\bar{\sigma}_i'\tan(0.8\varphi_i')$$

$$Q_s = p\sum f_i\,\Delta L_i$$

K–δ 방법에서 δ′는 대개 0.75φ′ – 0.8φ′ 범위로 취하며, 이 강의에서는 **δ′ = 0.8φ′ = 25.6°**와 **K = 1.0**을 사용한다.

# 문제

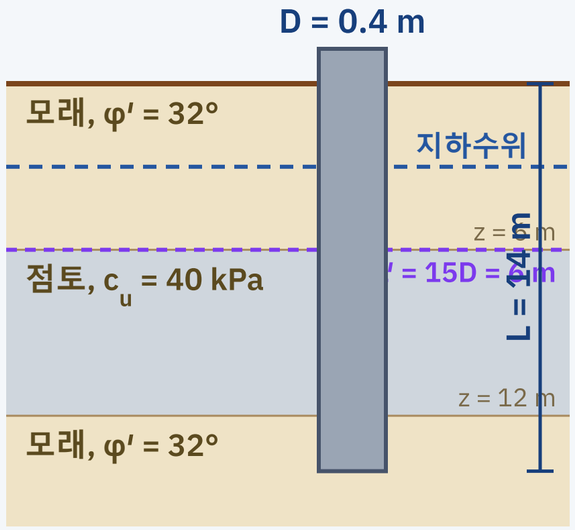
예제

**조건**

| | |
|---|---|
| 모래 1 (0–6 m) | $\varphi' = 32^\circ$ |
| 점토 (6–12 m) | $c_u = 40$ kPa |
| 모래 2 (12–16 m) | $\varphi' = 32^\circ$ |
| 단위중량 | $\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m$^3$ **(3개 지층)** |
| 지하수 | **깊이 3.0 m에서** |
| 말뚝 | **타입, D = 0.4 m, L = 14 m** |
| 둘레 | $p = \pi D = 1.257$ m |
| 모래 지층에서 | $K = 1.0,\ \delta' = 0.8\varphi' = 25.6^\circ$ **(모듈에 이 값들을 입력한다; 모듈은 K = 0.66 및 δ′ = 24°를 초기값으로 하여 열린다)** |

**구하는 값**

**모래 지층**(0–6 m 및 12–14 m)의 주면저항력을 K–δ 방법으로 구하라. 임계깊이는 L′ = 15D이다.



# 풀이 (1/2)

풀이

**1** 임계깊이 (말뚝 전체에 대해 하나)

$$L' = \min(15D;\ L) = \min(15(0.4);\ 14) = \mathbf{6}\ \text{m} \qquad \sigma'(L') = 75.6\ \text{kPa (예제 1)}$$

**2** 모래 1 (0–6 m): 지층 전체가 L′ 안에 있어 상한 없음; 평균 σ′ = 면적 / 두께

$$\bar{\sigma}'_1 = \frac{266.4}{6} = 44.4\ \text{kPa}$$

**3** 단위마찰력과 저항력

$$f_1 = K \tan\delta'\, \bar{\sigma}'_1 = 1.0(0.4791)(44.4) = 21.3\ \text{kPa}$$

$$Q_{s1} = p\, f_1 H = 1.2566(21.3)(6) = \mathbf{160.4}\ \text{kN}$$

# 풀이 (2/2)

풀이

**4** 모래 2 (12–14 m): 전체가 L′ 아래 → σ′ 값은 L′에서의 값으로 유지된다

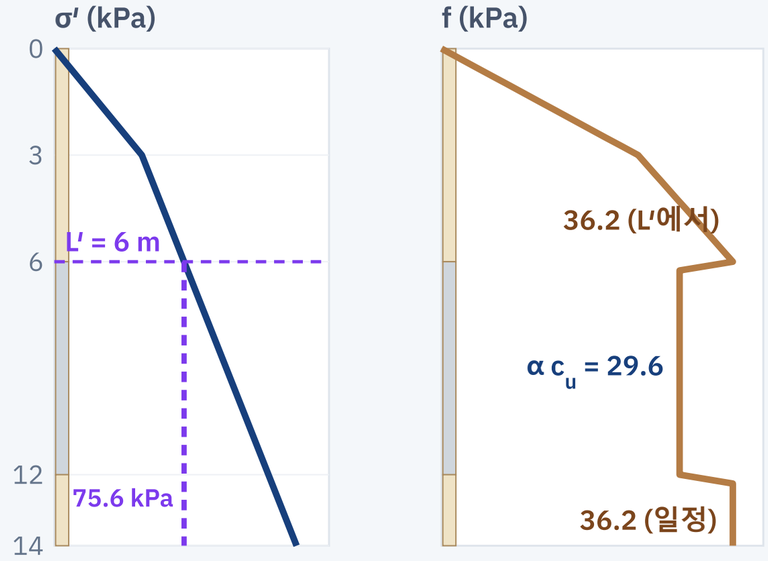
$$\sigma' = \sigma'(L') = 75.6 \text{ kPa}$$

$$f_3 = 1.0(0.4791)(75.6) = \mathbf{36.2} \text{ kPa}$$

**5** 저항력 (두께 14 − 12 = 2 m)

$$Q_{s3} = p\, f_3 H = 1.2566(36.2)(2) = \mathbf{91.0} \text{ kN}$$

임계깊이가 없었다면 이 구간에서 σ′ = 132.9 kPa, f = 63.7 kPa, $Q_{s3}$ = 160 kN이 나왔을 것이다. **L′ 상한**이 모래의 깊은 구간에서 **69 kN**을 감소시킨다.




GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

# 점토에서도 각 지층은 자신의 방법을 선택함

이론

점토층에서 말뚝 몸체는 **부착력** 또는 **유효응력**으로 저항하며, 점토 모듈의 세 가지 방법 모두 지층별로 사용할 수 있다:

$$\alpha:\ f = \alpha_i c_{u,i} \qquad \lambda:\ f_i = \lambda\,(\bar{\sigma}'_i + 2c_{u,i}),\ \lambda = \lambda(L)$$

$$\beta:\ \beta_i = (1-\sin\varphi'_{R,i})\tan\varphi'_{R,i}\sqrt{OCR_i},\quad f_i = \beta_i\bar{\sigma}'_i$$

**α**: 지층 내에서 깊이에 **무관하다**; 마찰력은 지층 전체에 걸쳐 일정하다(균일).

**λ와 β**는 유효응력을 복원하며, 상부 지층에 따라 **계단** 모양의 변화를 만든다.

**솔직한 참고**

Vijayvergiya와 Focht는 λ를 **전체 근입 길이에 대한 하나의 평균값**으로 제시하였다. 다층 지반 단면에서 이를 각 점토층에 따로 적용하는 것(길이 L에 대한 λ, 해당 층의 평균 σ′와 $c_u$ 값)은 방법의 **이 소프트웨어 고유의 확장**이며, 모듈은 이를 모든 곳에 명시한다.

$\varphi'_R$과 OCR은 **입력**하며, 지반 특성에서 상관식으로 읽지 않는다 (초기값 30°와 1).

# 문제

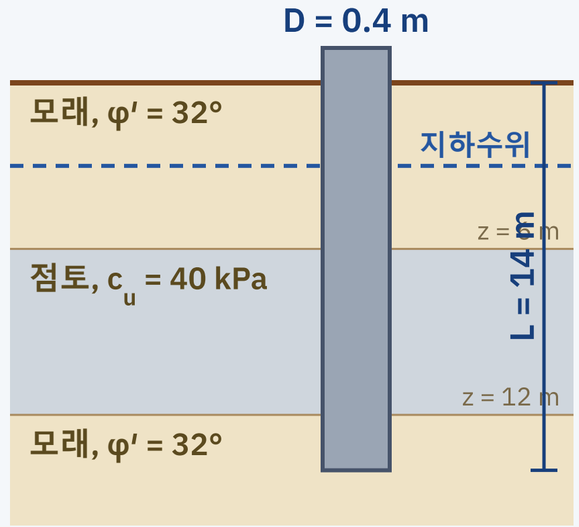
예제

## 조건

| | |
|---|---|
| 모래 1 (0–6 m) | $\varphi' = 32^\circ$ |
| 점토 (6–12 m) | $c_u = 40$ kPa |
| 모래 2 (12–16 m) | $\varphi' = 32^\circ$ |
| 단위중량 | $\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m$^3$ **(3개 지층)** |
| 지하수 | **깊이 3.0 m에서** |
| 말뚝 | **타입, D = 0.4 m, L = 14 m, p = 1.257 m** |
| 점토의 평균 σ′ | $\bar{\sigma}'_2 = A_{6-12}/6 = 100.1$ kPa **(예제 1)** |
| β에 대한 | $\varphi'_R = 30^\circ,\ OCR = 1$ |
| α에 대한 | $p_a = 100$ kPa**, 표에서 구한 α** |

## 구하는 값

점토층(6–12 m)의 주면저항력을 **α, λ 및 β** 방법으로 구하라.



# 풀이 (1/2)

풀이

**1** α 방법: $c_u/p_a = 0.4$일 때 표에서 읽은 α

$$\alpha = 0.74 \quad f = \alpha c_u = 0.74(40) = 29.6 \text{ kPa} \quad Q_s = 1.2566(29.6)(6) = \mathbf{223.2} \text{ kN}$$

**2** λ 방법: λ는 **말뚝 길이**(L = 14 m)에 대해 표에서 구한다($\lambda_{10} = 0.245$; $\lambda_{15} = 0.200$)

$$\lambda = 0.209$$

$$f = \lambda(\bar{\sigma}_2' + 2c_u) = 0.209(100.1 + 2(40)) = 37.6 \text{ kPa}$$

$$Q_s = 1.2566(37.6)(6) = \mathbf{283.9} \text{ kN}$$

# 풀이 (2/2)

풀이

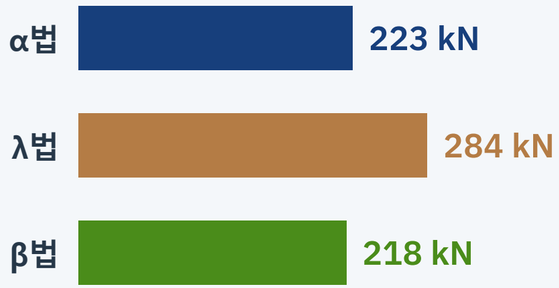
**3** β 방법: $\varphi'_R = 30°$, OCR = 1

$$\beta = (1 - \sin 30^\circ)\tan 30^\circ = 0.289$$

$$f = \beta \bar{\sigma}'_2 = 0.289(100.1) = 28.9 \text{ kPa}$$

$$Q_s = 1.2566(28.9)(6) = \mathbf{218.0} \text{ kN}$$

세 방법은 같은 점토층에 대해 각각 **223**, **284**, **218 kN**을 준다. α와 β는 서로 가깝고 λ는 약 27% 더 높다. 차이는 각 방법의 기본 가정에서 비롯되며, λ를 지층별로 적용하는 것은 별도의 확장이다.




GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

# 단일 적분: 말뚝 길이를 따라

이론

주면저항력은 마찰력을 말뚝 길이 방향으로 적분한 값에 둘레길이를 곱한 것이다. 계산은 수치적으로 수행하며, 경계는 **어느 위치**에 있어도 되므로 지층 중간에서 끝나는 말뚝도 별도의 처리를 요구하지 않는다:

$$Q_s = p \int_0^L f(z)\,dz \;\approx\; p \sum f_i \,\Delta z_i$$

이렇게 보면 층상 구조는 문제가 아니라 **설계상의 질문**이 된다: 지반 주상도의 **어느 구간**이 말뚝을 지지하는가?

말뚝을 다음 경계 너머까지 연장하거나 단축하면 지지력은 어떻게 변하는가?




예제 말뚝 각 구간의 기여분 ($Q_s$ = 475 kN, $Q_p$ = 318 kN).

# 문제

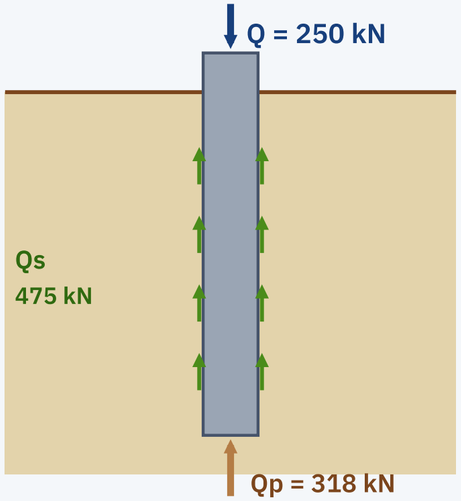
예제

### 조건

| | |
|---|---|
| 선단지지력 | $Q_p$ = 318.0 kN (예제 2) |
| 모래 1 (0–6 m) | $Q_{s1}$ = 160.4 kN (예제 4) |
| 점토 (6–12 m) | $Q_{s2}$ = 223.2 kN (α법, 예제 5) |
| 모래 2 (12–14 m) | $Q_{s3}$ = 91.0 kN (예제 4) |
| 안전율 | FS = 3 |
| 말뚝에 작용하는 사용하중 | Q = 250 kN |

### 구하는 값

말뚝의 **극한** 및 **허용** 지지력을 구하라; 사용하중에 대해 지지력이 충분한가?



# 풀이

풀이

**1** 주면저항력: 구간별 합계

$$Q_s = 160.4 + 223.2 + 91.0 \approx \mathbf{474.5}\ \text{kN}$$

**2** 극한지지력

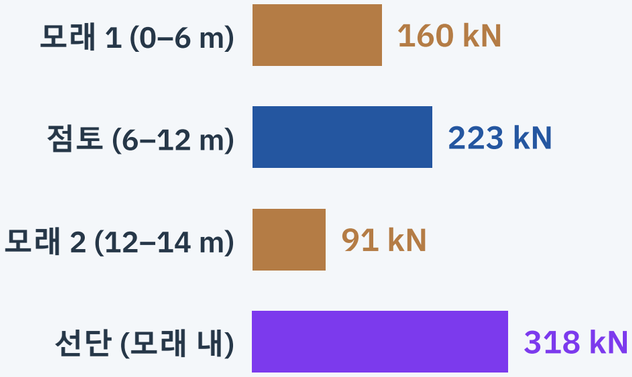
$$Q_u = Q_p + Q_s = 318.0 + 474.5 = \mathbf{792.6}\ \text{kN}$$

**3** 허용지지력과 검토

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{FS} = \frac{792.6}{3} = \mathbf{264.2}\ \text{kN}$$

$$Q = 250 \le 264.2 \ \Rightarrow\ \text{충분}$$

이용률은 0.95이다. 점토층은 말뚝 길이의 43%에 불과하나 몸체 주면마찰력의 47%를 부담한다: 한계깊이 이후에는 모래의 σ′가 더 이상 증가하지 않지만, 점토는 모든 깊이에서 동일한 α $c_u$ 값을 제공한다.




GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

# 문제

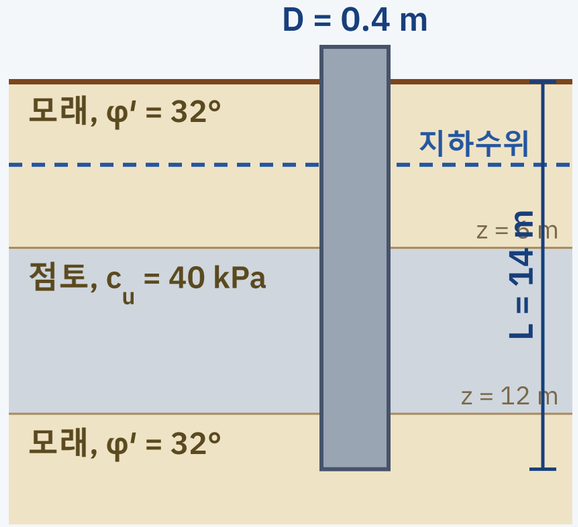
예제

**조건**

| | |
|---|---|
| 모래 1 (0–6 m) | $\varphi' = 32^\circ$ |
| 점토 (6–12 m) | $c_u = 40$ kPa |
| 모래 2 (12–16 m) | $\varphi' = 32^\circ$ |
| 단위중량 | $\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m$^3$ **(3개 지층)** |
| 지하수 | **깊이 3.0 m에서** |
| 방법 | **타입, D = 0.4 m; Meyerhof, α, K–δ** |
| 길이 | **L = 10, 12, 14 및 16 m** |
| 기지값 | **L = 14 m에 대한 예제 2–6** |

**구하는 값**

말뚝 길이가 **10, 12 및 16 m**이면 $Q_u$는 어떻게 변하는가? 변화의 **이유**를 설명하라.



# 풀이 (1/2)

풀이

**1** L = 10 m: 선단이 점토에 위치 (예제 3); 점토 구간은 6–10 m에 한정

$$Q_p = 45.2\ ; \quad Q_s = 160.4 + 148.8 = 309.2\ ; \quad Q_u = \mathbf{354.4}\ \text{kN}$$

**2** L = 12 m: 선단이 정확히 경계에 위치 → **아래쪽 모래에 지지**; 모래 2는 아직 말뚝 몸체에 포함되지 않음

$$Q_p = 318.0\ ; \quad Q_s = 160.4 + 223.2 = 383.5\ ; \quad Q_u = \mathbf{701.6}\ \text{kN}$$

**3** L = 16 m: 모래 2가 4 m 두께로 주면에 포함된다 (σ′ 상한 적용: f 일정)

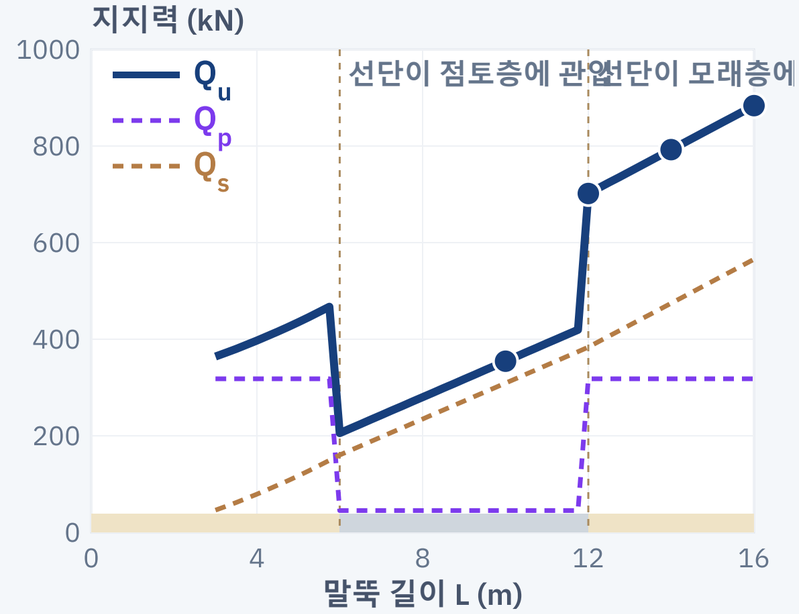
$$Q_p = 318.0\ ; \quad Q_s = 160.4 + 223.2 + 182.0 = 565.5\ ; \quad Q_u = \mathbf{883.6}\ \text{kN}$$

# 풀이 (2/2)

풀이

| L (m) | 선단 지층 | $Q_p$ (kN) | $Q_s$ (kN) | $Q_u$ (kN) | $Q_{all}$ (kN) |
|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 점토 | 45 | 309 | **354** | 118 |
| 12 | 모래 | 318 | 384 | **702** | 234 |
| 14 | 모래 | 318 | 475 | **793** | 264 |
| 16 | 모래 | 318 | 566 | **884** | 295 |

10 m → 12 m: 지지력이 **347 kN** 증가한다(98%). 이 중 273 kN은 **선단이 모래층에 진입하는 데서** 비롯된다. 12 m 이후에는 1 m마다 ≈ 45 kN만 증가한다. 층상 지반에서 말뚝 길이를 결정하는 것은 **선단이 어느 지층에서 끝나는가**이다.




GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

# 현장타설말뚝에 대한 규칙은 혼합 지층에서도 적용된다

이론

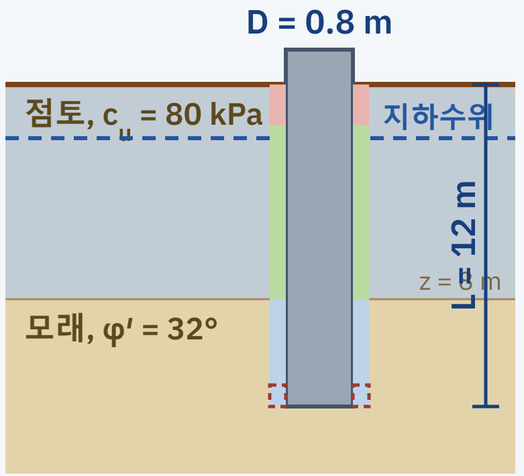
천공하고 콘크리트를 타설한다: 지반이 밀려나지 않으며, 점토는 천공벽에서 연약해지고 천공 바닥 아래에는 슬라임이 쌓일 수 있다. 혼합 지반에서는 절차의 각 절반이 **해당되는 지층에** 적용된다:

**점토층** (α): $\alpha^* = 0.55$ ($c_u/p_a \le 1.5$); **상부 1.5 m와 하부 1D** 구간에서는 $\alpha^* = 0$. 이 구간은 **α에만** 해당하며 λ와 β에는 적용되지 않는다.

**모래층**은 각자의 K–δ 또는 Coyle–Castello 규칙을 유지하며, 천공 시에는 지반이 밀려나지 않으므로 K는 **$K_0 = 1 - \sin\varphi'$** 부근이다.

**선단**이 점토에 있는 경우 Reese–O'Neill: $q_p = \min[6c_{ub}(1 + 0.2L/D_b), 9c_{ub}, 40p_a]$. $c_{ub}$는 선단 아래 **$2D_b$** 구간의 평균 $c_u$이며, 구간이 여러 층에 걸치면 두께로 가중한다.

이 영역은 **전부 점토**여야 한다: 모래까지 이어지면 모듈이 중단되고 Meyerhof 또는 Vesic을 선택하도록 요구한다.




빨강: $\alpha^* = 0$(상부 1.5 m). 초록: $\alpha^* = 0.55$. 파랑: 모래에서 K–δ. 빨간 점선: 하부 1D, 모래에는 구간 제외 없음.

# 문제

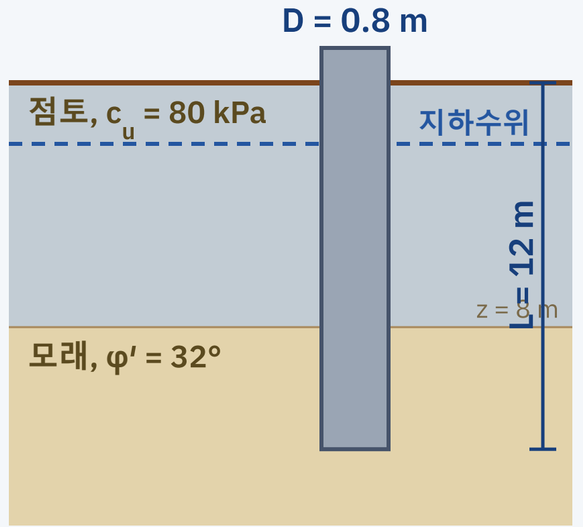
예제

### 조건

| | |
|---|---|
| 말뚝 | **현장타설말뚝, 원형 단면, D = 0.8 m, L = 12 m** |
| 점토 (0–8 m) | $c_u = 80$ kPa, $\gamma = \gamma_{sat} = 18$ kN/m$^3$ |
| 모래 (8–20 m) | $\varphi' = 32^\circ$, $\gamma = 18$, $\gamma_{sat} = 19$ kN/m$^3$ |
| 지하수 | **깊이 2.0 m에서** |
| 모래의 경우 | $K = K_0 = 0.47$, $\delta' = 0.75\varphi' = 24^\circ$ |
| 선단 | **Meyerhof; FS = 3** |

### 구하는 값

현장타설말뚝의 **선단지지력**,
**주면저항력** 및 **허용지지력**을 구하라.



# 풀이 (1/3)

풀이

**1** 점토층: α* 및 적용 구간(상단 1.5 m 및 하단 1D = 0.8 m 제외: 1.5 → 12 − 0.8 = 11.2 m)

$$\alpha^{*} = 0.55 \ (c_u/p_a = 0.8 \le 1.5) \qquad L_{eff} = 8 - 1.5 = \mathbf{6.5}\ \text{m}$$

**2** 단위마찰력과 저항력

$$f = \alpha^{*} c_u = 0.55(80) = 44.0\ \text{kPa} \qquad Q_{s1} = \pi(0.8)(44.0)(6.5) = \mathbf{718.8}\ \text{kN}$$

# 풀이 (2/3)

풀이

**3** 모래 지층(8–12 m): 자체 K–δ 규칙; L′ = min(15D; L) = min(12; 12) = 12 m, 즉 지층 내에 상한이 없다

$$\sigma'(8) = 85.1\ ;\ \sigma'(12) = 121.9\ \text{kPa} \qquad \bar{\sigma}' = \frac{414.1}{4} = 103.5\ \text{kPa}$$

**4** 단위마찰력과 저항력

$$f = K \tan\delta' \, \bar{\sigma}' = 0.47 \tan 24^\circ (103.5) = 21.7\ \text{kPa}$$

$$Q_{s2} = \pi(0.8)(21.7)(4) = \mathbf{217.8}\ \text{kN}$$

α 적용 구간의 **하부 1D** 부분(11.2 – 12 m)이 모래층에 해당한다. 해당 구간이 α에 속하므로 모래는 이 0.8 m 구간에서도 마찰을 유지한다.

# 풀이 (3/3)

풀이

**5** 선단이 모래 속에 있음 → 모래 규정(Meyerhof); 천공에 의한 추가 감소는 없으며 입력한 φ′ 값을 사용한다

$$q' = \sigma'(12) = 121.9 \text{ kPa} \qquad N_q^* = 81$$

$$q' N_q^* = 9{,}874 > q_l = 2{,}531 \text{ kPa} \;\Rightarrow\; q_p = 2{,}531 \text{ kPa}$$

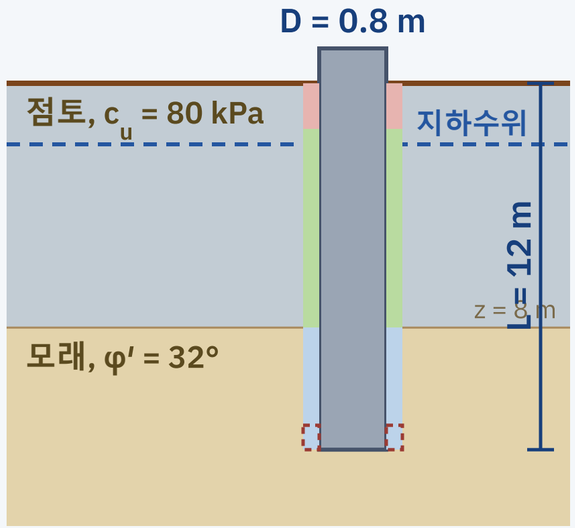
$$Q_p = A_p q_p = 0.5027(2{,}531) = \mathbf{1{,}272} \text{ kN}$$

**6** 총 지지력과 허용지지력

$$Q_s = 718.8 + 217.8 = \mathbf{936.6} \text{ kN}$$

$$Q_u = 1{,}272 + 937 = 2{,}209 \text{ kN}$$

$$Q_{all} = \frac{2{,}209}{3} = \mathbf{736} \text{ kN}$$




GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

# 문제

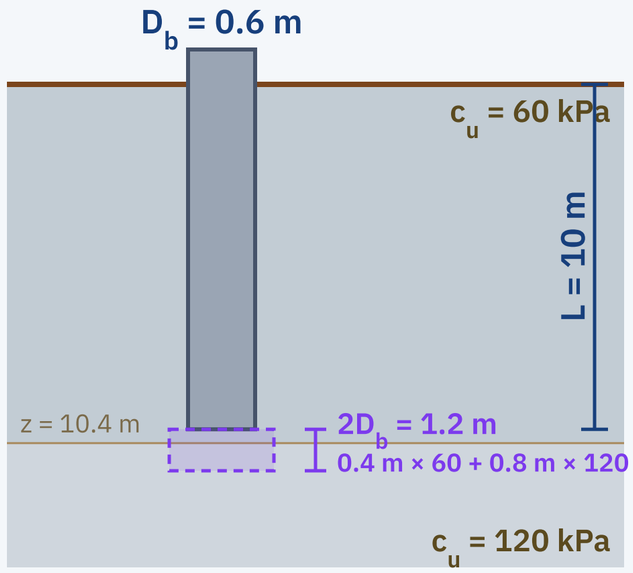
예제

### 조건

| | |
|---|---|
| 말뚝 | **현장타설말뚝, $D_b = D = 0.6$ m, $L = 10$ m** |
| 점토 1 (0–10.4 m) | $c_u = 60$ kPa |
| 점토 2 (10.4–20 m) | $c_u = 120$ kPa |
| 저면 | **Reese–O'Neill; $p_a = 100$ kPa** |

### 구하는 값

말뚝 선단 아래 **$2D_b$** 구간에서 **$c_{ub}$, $q_p$, $Q_p$**의 값을 구하라.



# 풀이

풀이

**1** 구간 10 → 10 + 2D$_b$ = 11.2 m; 경계는 10.4 m에 있음: 두께 가중 평균

$$c_{ub} = \frac{60(0.4) + 120(0.8)}{1.2} = \mathbf{100}\ \text{kPa}$$

**2** 세 값 중 최솟값

$$6c_{ub}\left(1 + 0.2\,\frac{L}{D_b}\right) = 2{,}600\ ; \quad 9c_{ub} = 900\ ; \quad 40p_a = 4\,000 \ \Rightarrow \ q_p = \mathbf{900}\ \text{kPa}$$

**3** 선단 면적과 선단지지력

$$A_b = \frac{\pi(0.6)^2}{4} = 0.2827\ \text{m}^2 \qquad Q_p = 0.2827(900) = \mathbf{254.5}\ \text{kN}$$

선단의 c$_u$ = 60 kPa만 사용했다면 Q$_p$ = 152.7 kN이 되었을 것이다: 아래쪽의 더 단단한 점토가 **67%** 더 많은 값을 준다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

# 단일 안전율이지만 불확실성이 큼

이론

극한지지력은 두 성분의 합이며, 허용지지력은 이 합 **전체에 단일 안전율**을 적용하여 구한다:

$$Q_{all} = \frac{Q_p + Q_s}{FS}$$

단일 말뚝의 통상 **FS = 2.5 – 4**.

상한 쪽: 지반 주상도가 **적은 수의 시추공**으로만 알려진 경우. 층상 지반이 바로 이 경우에 해당한다. 시추공 사이에서는 **경계가 가장 불확실한 위치이며**, 위의 예제는 경계가 1 m만 달라져도 지지력이 얼마나 변하는지를 보여 주었다.

**두 가지 사항은 별도의 계산이 필요하다**

층상 지반에서, 지지력 계산과는 별도로:

연약층이 침하하면서 말뚝에 **부주면마찰력**으로 매달리는 현상

선단 아래 압축성 지층이 지배하는 **침하**

요약 · 어떤 규칙이 어디에 적용되는가?

# 지층과 시공 방법에 따른 규칙

이론

| 지층 | 말뚝 몸체 ($Q_s$) | 선단 ($Q_p$): 선단이 놓인 지층 |
|---|---|---|
| **모래** | K–δ (L′ = 15D, 말뚝 전체에 하나의 값) 또는 Coyle–Castello (K σ′ tan0.8φ′) | $q'N^*_q \le q_l$ (Meyerhof), Vesic, Coyle–Castello |
| **점토** | α · λ (지층별: 확장) · β | $9c_u$ (Meyerhof) · $N^*_c(I_{rr})$ (Vesic) |
| **Fore, 점토** | α* = 0.55; 상부 1.5 m와 하부 1D = 0 | Reese–O'Neill: $c_{ub} = 2D_b$ 평균 |
| **Fore, 모래** | $K \approx K_0 = 1 - \sin\varphi'$; 범위(윈도우)는 적용하지 않는다 | $q'N^*_q$ (입력된 φ′) |

각 행은 해당 지층에 대한 별개의 선택이며, **같은 말뚝**에서 모래 규칙과 점토 규칙을 모두 사용한다.

요약

# 핵심 정리

유효응력은 **지층 전체에 걸쳐 누적되며** 연속이지만, 단위마찰력은 **경계에서 급변한다**

**선단**은 선단이 위치한 지층의 규칙만으로 계산한다; 경계에 위치한 선단은 **아래쪽** 지층에 놓인다

**모래**: $f = K\sigma'\tan\delta'$이며 **$L' = 15D$는 말뚝 전체에 적용된다** · **점토**: α, λ(지층당 하나의 연장), β

**말뚝 몸체**는 지층별 기여의 합이다: $Q_s = p\Sigma f_i \Delta z_i$; 길이를 결정하는 것은 선단이 어느 지층에서 끝나는가이다

**현장타설말뚝**: α* 창은 점토/α 방법에서만 사용한다; 말뚝 선단이 점토에 있으면 $c_{ub}$를 $2D_b$ 구간에 걸쳐 취한다(여러 지층일 수 있다)

$Q_{all} = (Q_p + Q_s)/FS$, FS = 2.5 – 4; 대규모 공사에서는 **재하시험**

# 참고문헌


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.

Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice, 3rd ed. Wiley — 표 2의 α 값 참고 문헌.

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.

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

O’Neill, M.W. and Reese, L.C. (1999). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-IF-99-025 — 현장타설말뚝의 α 계수.

Reese, L.C. and O’Neill, M.W. (1989). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA — 점토층 내 굴착말뚝의 기본 산정식.

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

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.

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning, which brings these methods together in the form this page follows.


**참고**

이 강의 자료의 그림은 GeoTerva 이론 페이지에서 가져왔으며, 수치 예제는 모두 모듈 자체의 계산 규칙과 라이브러리로 산출하였고 모듈도 같은 값을 준다.

GeoTerva

온라인 지반공학 계산

# 이론에서 실무로

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

모듈 열기 →

이론 페이지 →

**스마트폰으로 열기**

체험 모듈은 가입 없이 이용할 수 있습니다.

강의에서 사용하려면: info@geoterva.com