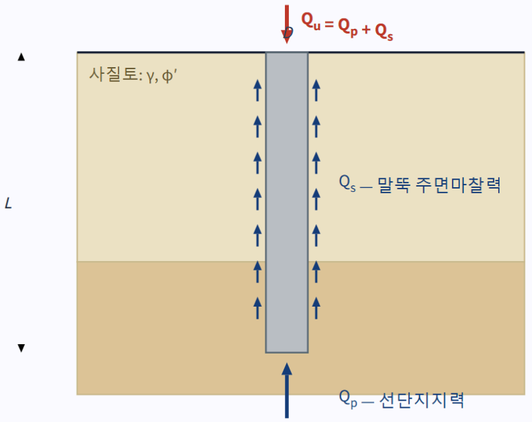
GeoTerva

지반공학 강의 자료 · 말뚝

모래지반의 말뚝 지지력

강의: 선단지지력, 주면마찰력 및 임계깊이. 각 방법의 이론과 이어지는 계산 예제.

Meyerhof (1976) | Vesic (1977) | Coyle과 Castello (1981) | 계산 예제



개요

이 강의에서 다루는 내용

말뚝이 하중을 **선단지지력**과 **주면마찰력**으로 어떻게 부담하는지 설명하기

모래에서 지하수위를 포함한 **유효응력** 분포를 작성할 수 있는 능력

선단지지력을 세 가지 방법으로 계산하기: **Meyerhof, Vesic, Coyle과 Castello**

주면마찰력과 **한계깊이**(L')의 역할을 해석할 수 있는 능력

허용지지력을 구하고 방법별 결과를 함께 평가하기

강의 흐름

각 방법은 **세 단계**로 다룬다:

1 · **이론**: 방법은 어떻게 작동하며, 왜 그러한가?

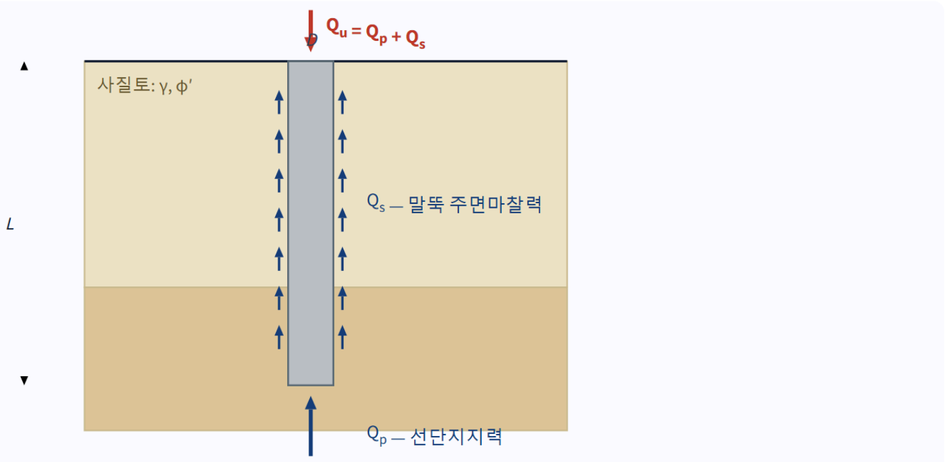
2 · **문제**: 조건과 구하는 값

3 · **풀이**: 단계별 수치 계산

모든 예제는 같은 말뚝으로 계산하므로 방법들을 나란히 비교할 수 있다.

하중은 두 경로로 전달된다

이론



말뚝은 하중을 **동시에 두 경로**로 지반에 전달한다: 선단 아래의 지반은 **선단지지력**(Q_p)으로, 몸체를 따라 모래는 **주면마찰력**(Q_s)으로 저항한다.

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

주면마찰력은 **작은** 변위에서, 선단지지력은 **훨씬 더 큰** 변위에서 최대 값에 도달한다. 두 성분이 동시에 최대가 되지는 않는다.

이 강의에서는 **단일 말뚝**, **모래**($c' = 0$), 타입 또는 현장타설, 일정 단면을 다룬다.

모래에서는 모든 값이 유효응력에 비례함

이론

모래에서는 **선단지지력**과 **단위 주면마찰력**이 모두 유효연직응력에 비례한다. 계산은 지층 구성의 σ'_v 값을 정확히 구하는 것에서 시작한다.

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

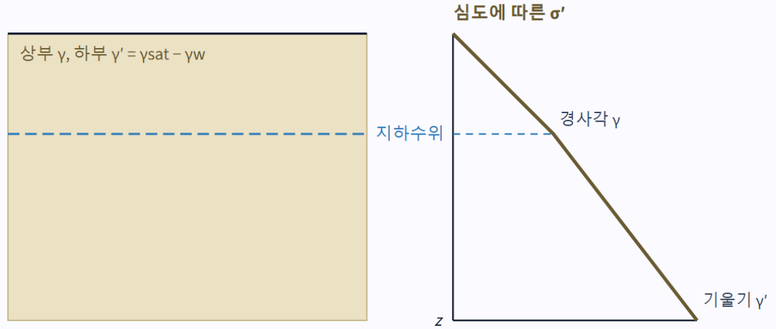
γ : 습윤단위중량 (지하수위 위)

γ_{sat} : 포화단위중량 (지하수위 아래)

$\gamma_w = 9.81\ kN/m^3$: 물의 단위중량

지하수위: 지하수면의 위치

> 지하수위 아래에서는 응력 기울기가 **감소한다**: $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$



문제

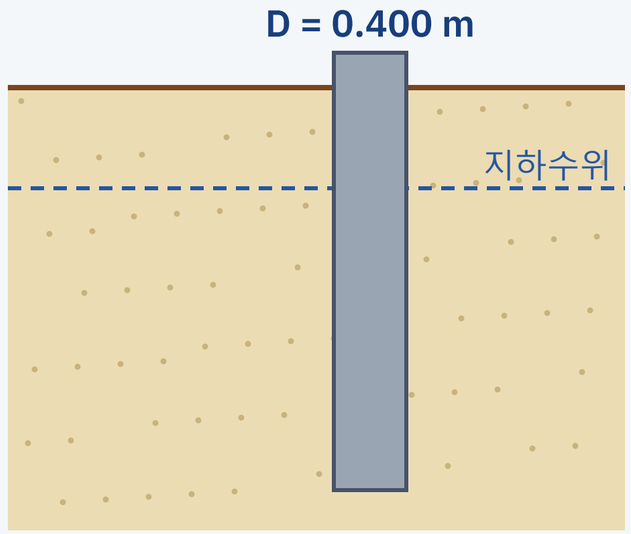
예제

조건

모래, 지하수위 상부	$\gamma = 17\ \text{kN/m}^3$
모래, 지하수위 하부	$\gamma_{sat} = 19.5\ \text{kN/m}^3$
지하수위 깊이	**2.0 m**
물의 단위중량	$\gamma_w = 9.81\ \text{kN/m}^3$

구하는 값

깊이 8 m에서 연직 전응력, 간극수압 및 **연직 유효응력**을 구하라.



풀이

풀이

1 연직전응력 (지하수위 위는 습윤단위중량, 아래는 포화단위중량)

$$\sigma_v = 17(2) + 19.5(6) = 34 + 117 = \mathbf{151.0}\ \text{kPa}$$

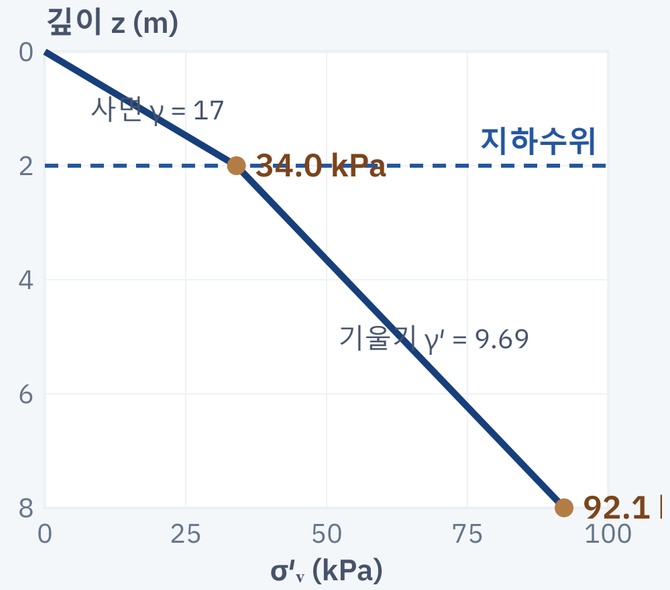
2 간극수압 (지하수위 아래 수두 6 m)

$$u = \gamma_w\, h_w = 9.81\,(6) = \mathbf{58.9}\ \text{kPa}$$

3 유효연직응력

$$\sigma'_v = \sigma_v - u = 151.0 - 58.9 = \mathbf{92.1}\ \text{kPa}$$

같은 결과: $\sigma'_v = 17(2) + (19.5 - 9.81)(6) = \mathbf{92.1\ kPa}$.
지하수위 아래의 유효단위중량은 9.69 kN/m³이다.



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

선단지지력: 일반식

이론

선단 아래의 모래는 기초 아래에서와 같이 **지지력 파괴**로 파괴된다. 그러나 선단 깊이에서의 **상재응력**이 모래를 조밀하게 구속한다.

모래에서는 $c' = 0$이므로 깊이(상재) 항만 남는다. 말뚝 지름이 작으므로 폭 항($0.5\gamma' D N_\gamma$)은 무시한다:

$$q_p = \sigma'_v \, N^*_q \qquad Q_p = A_p \, q_p$$

σ'_v : 선단 위치 깊이에서의 유효연직응력

N^*_q : 말뚝 문제에 해당하는 지지력계수

A_p : 말뚝 선단의 면적

N^*_q는 어디에서 유래하는가? 세 가지 접근법

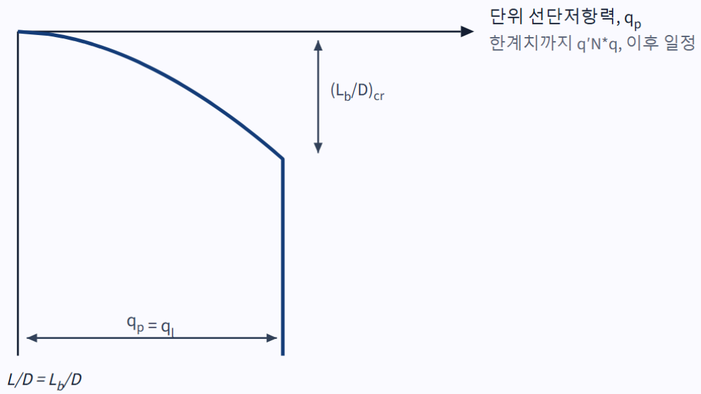
Meyerhof (1976): N^*_q는 φ'에만 의존하며, q_p는 **한계값**으로 상한이 제한된다

Vesic (1977): 공동 확장 이론; 모래의 **강성**도 계산에 반영된다

Coyle과 Castello (1981): 실제 재하시험 24건에 맞추어 보정됨; N^*_q는 L/D에도 의존한다

선단지지력은 무한정 증가하지 않음

이론



균질한 모래에서 단위 선단지지력은 근입비에 따라 증가하다가 **$(L_b/D)_{cr}$**에서 **최댓값**에 도달하며, 그 이후에는 일정하게 유지된다 (q_l).

VESIC (1970) · OGEECHEE 강 말뚝 재하시험 (D = 0.457 m)

L (m)	L/D	q_p (kN/m²)
3.02	6.61	3 304
6.12	13.39	9 365
8.87	19.40	11 472
12.00	26.26	11 587
15.00	32.82	13 971

q_p의 최댓값: 약 **12 000 kN/m²**

$(L/D)_{cr}$ 약 **16 – 18**

평균 $N_{60} \approx 30$에 대하여 $4p_aN_{60} = 4(100)(30) = 12\,000$ kN/m²: **측정된 평탄 구간과 상관식이 일치한다**

Meyerhof: φ′로부터 구한 N*q, 한계값 포함

이론

Meyerhof는 N^*_q를 오직 **내부마찰각**으로부터(자체 도표, 아래) 구한다. 계산된 q_p는 **한계값**을 넘을 수 없다:

$$q_p = \sigma'_v N^*_q \;\le\; q_l \qquad q_l = 0.5\, p_a\, N^*_q \tan\varphi'$$

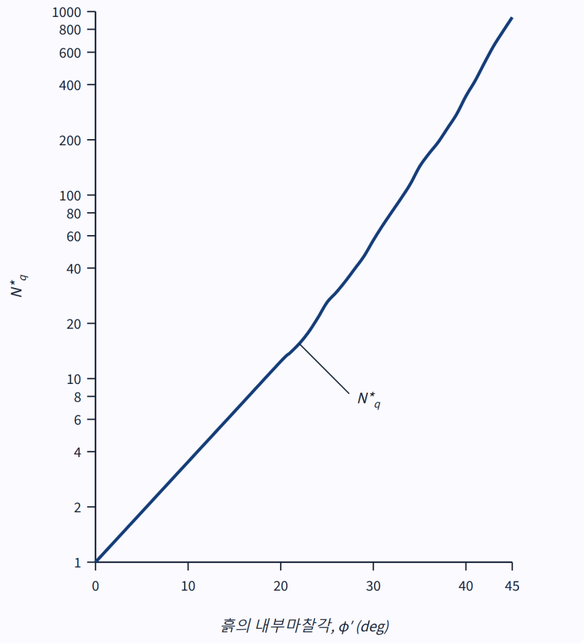
p_a = 100 kN/m² : 대기압

φ′ : 선단 깊이에 있는 모래의 유효 내부마찰각

N^*_q 값 (Meyerhof 도표; 모듈이 읽는 계열)

φ′ (°)	20	25	30	32	34	35	36	38	40	42	45
N^*_q	12.4	26.0	56.7	81.0	115.0	143.0	168.0	231.0	346.0	525.0	930.0

φ′ = 35°일 때 N^*_q = 143.0, q_l = 5,006 kPa이며, γ = 18 kN/m³인 모래에서는 이 한계에 약 **1.9 m** 깊이에서 도달한다

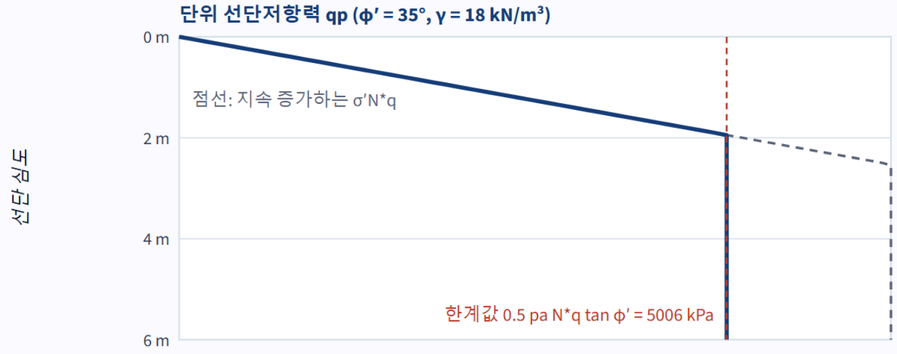


Meyerhof: 단계별 계산과 한계값의 의미

이론

계산 단계

1. 선단 위치에서 σ'_v 계산
2. φ'에 대한 N^*_q 값을 도표/표에서 읽는다
3. $q_p = \sigma'_v N^*_q$
4. $q_l = 0.5\, p_a\, N^*_q \tan\varphi'$
5. q_p = 최솟값($\sigma'_v N^*_q$, q_l) 및 $Q_p = A_p q_p$



곡선은 **한계값이 지배할 때까지** $\sigma' N^*_q$ 직선을 따르고, 그 뒤에는 수평으로 유지된다. 한계값이 없다면 q_p는 깊이에 따라 한없이 커질 것이나, 현장 시험은 그러한 경향을 보이지 않는다.

문제

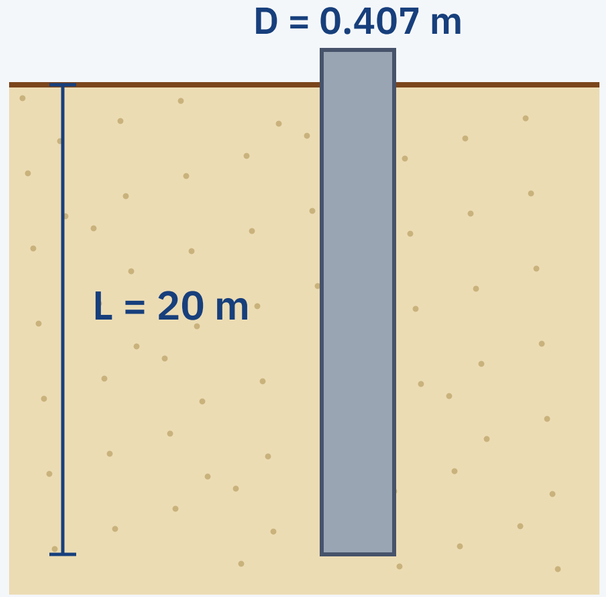
예제

조건

말뚝	**철근콘크리트, 타입, 정사각형 단면**
단면 치수	**D = 0.407 m**
길이	**L = 20 m**
모래 (균질)	$\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 35°$
지하수	**없음**

구하는 값

Meyerhof (1976) 방법으로 말뚝의 **선단지지력** Q_p를 구하라.



풀이

풀이

1 단면적과 선단의 유효응력

$$A_p = 0.407^2 = 0.1656\ \text{m}^2 \qquad \sigma'_v = \gamma L = 18(20) = 360\ \text{kPa}$$

2 N*q 값 (φ′ = 35°, Meyerhof 표)과 σ′N*q

$$N_q^* = 143.0 \qquad \sigma'_v N_q^* = 360(143.0) = 51{,}480\ \text{kPa}$$

3 한계값

$$q_l = 0.5\, p_a N_q^* \tan\varphi' = 0.5(100)(143.0)\tan 35^\circ = 5{,}006\ \text{kPa}$$

4 단위선단지지력: 두 값 중 작은 값, 한계값이 지배

$$q_p = \min(51{,}480;\ 5{,}006) = \mathbf{5{,}006}\ \text{kPa}$$

$Q_p = A_p\, q_p = 0.1656 \times 5{,}006 =$ **829 kN**. 한계값이 없었다면 약 8,528 kN이 되었을 것이다.



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

Vesic: 선단 아래의 모래가 공동처럼 팽창한다

이론

Vesic은 선단지지력을 **공동확장이론**에서 유도한다. 선단은 주변 지반 속의 공동을 확장시키며, 따라서 해에는 모래의 **강도**뿐 아니라 **강성**도 포함된다.

$$Q_p = A_p \, \bar{\sigma}'_o \, N^*_\sigma$$

여기서 $\bar{\sigma}'_o$는 **연직**응력이 아니라 선단 위치의 **평균 유효 수직응력**이다:

$$\bar{\sigma}'_o = \frac{1 + 2K_o}{3} \, q' \qquad K_o = 1 - \sin\varphi'$$

K_o: 정지 측방토압계수

q': 선단 깊이에서의 유효연직응력 (= σ'_v)

MEYERHOF와의 관계

$$N^*_\sigma = \frac{3 \, N^*_q}{1 + 2K_o}$$

형태는 Meyerhof의 것과 같으며, 두 방법은 방정식의 형태가 아니라 **계수가 무엇으로부터 유도되는가**에서 갈린다.

Vesic: 저감 강성지수

이론

N^*_σ는 모래의 **감소 강성지수** I_{rr}과 φ'에 의존하며, I_{rr}은 소성 영역의 체적 변화도 고려한다:

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + I_r\,\Delta} \qquad I_r = \frac{E_s}{2(1+\mu_s)\,q'\tan\varphi'} = \frac{G_s}{q'\tan\varphi'}$$

E_s : 지반의 탄성계수, μ_s : 포아송비, G_s : 전단탄성계수

Δ : 선단 아래 소성 영역의 평균 체적변형률

실용적 접근법 (CHEN 및 KULHAWY, 1994; 25° ≤ φ′ ≤ 45°)

$$\frac{E_s}{p_a} = m \quad \mu_s = 0.1 + 0.3\,\frac{\varphi' - 25}{20} \quad \Delta = 0.005\left(1 - \frac{\varphi' - 25}{20}\right)$$

단일 입력값: $m = E_s / p_a$

모래	m
느슨	100 – 200
중간 조밀	200 – 500
조밀	500 – 1000

강성지수는 일반적으로 **75 – 150** (상대밀도 50 – 80%의 모래)

CPT가 있는 경우: $I_r = 300/F_r(\%)$ (기계식), $170/F_r(\%)$ (전기식 콘)

Vesic: 단계별 풀이

이론

계산 단계

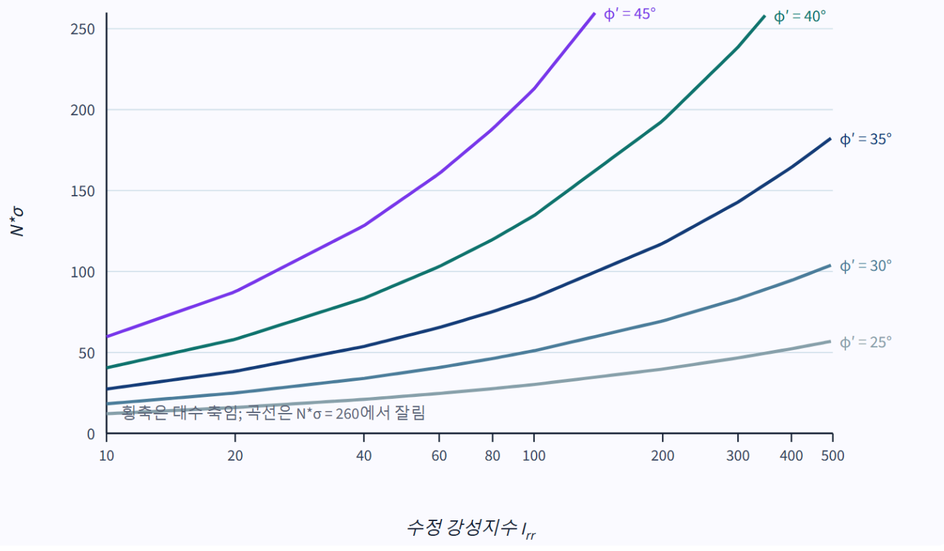
1. $K_o = 1 - \sin\varphi'$ 및 $\sigma'_o = (1 + 2K_o)q'/3$

2. $E_s = m \cdot p_a$, μ_s, I_r

3. Δ 및 $I_{rr} = I_r/(1 + I_r\Delta)$

4. φ' 및 I_{rr}에 따른 N^*_σ (표에서, 로그 보간)

5. $q_p = \sigma'_o N^*_\sigma$ 및 $Q_p = A_p q_p$



각 φ'마다 하나의 곡선: **강성이 커질수록 N^*_σ가 증가한다**; 조밀하고 단단한 모래는 느슨한 모래보다 훨씬 큰 선단지지력을 준다.

문제

예제

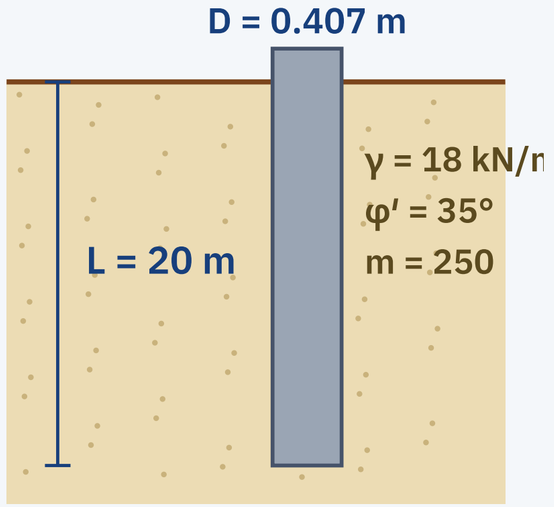
조건

말뚝	**예제 2와 동일: D = 0.407 m, L = 20 m**
모래	$\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 35^\circ$
지하수	**없음**
탄성계수비	$m = E_s/p_a = 250$ **(중간 조밀 – 조밀)**
대기압	$p_a = 100$ kPa

구하는 값

Vesic (1977) 방법으로 말뚝의 **선단지지력** Q_p를 구하라.

선단의 유효응력: q′ = 18(20) = 360 kPa



풀이 (1/3)

풀이

1 정지토압계수와 평균 유효수직응력

$$K_o = 1 - \sin 35^\circ = 0.426 \qquad \bar{\sigma}'_o = \frac{1 + 2(0.426)}{3}(360) = \mathbf{222.3}\ \text{kPa}$$

2 지반 특성

$$E_s = m\,p_a = 250(100) = 25{,}000\ \text{kPa} \quad \mu_s = 0.1 + 0.3\frac{35 - 25}{20} = 0.25$$

3 강성지수와 체적변형률

$$I_r = \frac{25{,}000}{2(1 + 0.25)(360)\tan 35^\circ} = \mathbf{39.7} \qquad \Delta = 0.005\left(1 - \frac{35 - 25}{20}\right)\frac{360}{100} = 0.0090$$

풀이 (2/3)

풀이

4 감소 강성지수

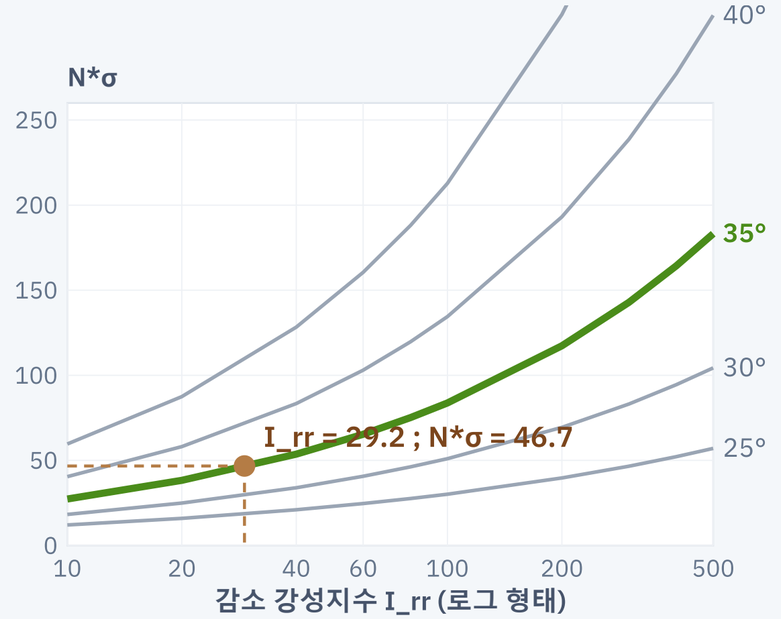
$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + I_r \Delta} = \frac{39.7}{1 + (39.7)(0.0090)} = \mathbf{29.2}$$

5 N*σ: 표의 φ′ = 35° 행에서 I_{rr} = 29.2에 대해 20과 40 사이를 로그 보간

$$N_\sigma^* = 38.32 + \frac{\log 29.2 - \log 20}{\log 40 - \log 20}(53.67 - 38.32)$$

$$= \mathbf{46.7}$$

그래프에서 녹색 곡선은 φ′ = 35°이며, I_{rr} = 29.2의 수직선과 만나는 점에서 **$N^*_\sigma \approx 46.7$**이다.



풀이 (3/3)

풀이

6 단위 선단지지력

$$q_p = \bar{\sigma}'_o N^*_\sigma = 222.3(46.7) = \mathbf{10{,}389}\ \text{kPa}$$

7 선단지지력

$$Q_p = A_p\, q_p = 0.1656(10{,}389) = \mathbf{1{,}721}\ \text{kN}$$

같은 말뚝에 대해 **Meyerhof: 829 kN**, **Vesic: 1,721 kN**이다. Vesic은 모래의 강성(m = 250)을 고려하므로 Meyerhof의 제한된 값의 약 2.1배를 준다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

Coyle과 Castello: 경험적 N*q

이론

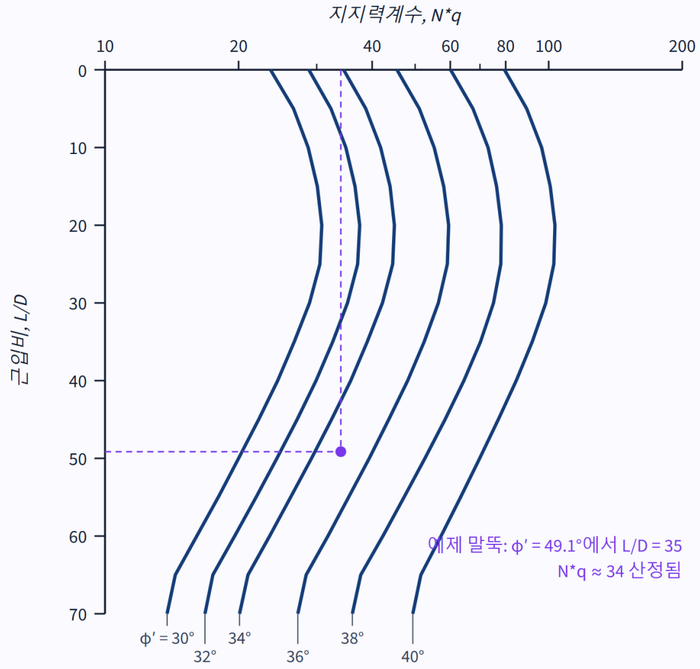
Coyle과 Castello는 **타입말뚝에 대한 24건의 대규모 현장 재하시험**을 검토하고 모래에 대해 다음 관계식을 제안하였다:

$$Q_p = q' \, N_q^* \, A_p$$

q′ 값은 선단의 유효수직응력이며, N^*_q는 φ′ 외에 **근입비 L/D**에도 좌우된다 (옆의 도표 참조).

이 계수는 Meyerhof의 계수보다 **훨씬 작다**: φ′ = 35°이고 깊은 말뚝일 때 약 **34**이며, Meyerhof에서는 **143**이다. 이는 파괴 메커니즘이 아니라 **측정된 지지력**에 맞추어 보정되었기 때문이다.

근입비가 약 20을 넘으면 계수가 **감소한다**: 같은 직경의 더 긴 말뚝은 더 작은 N^*_q를 갖는다.



문제

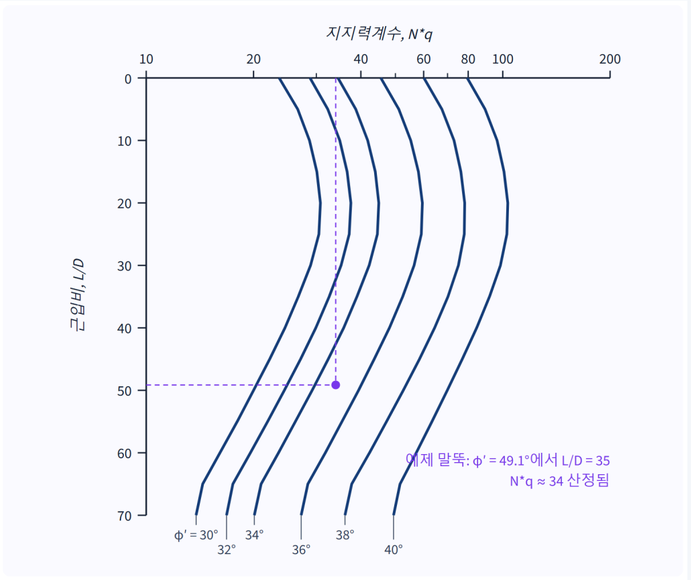
예제

조건

말뚝과 모래	**예제 2와 동일: L = 20 m, D = 0.407 m, φ′ = 35°, γ = 18 kN/m³**
근입비	$L/D = 20/0.407 = 49.1$
도표에서 읽은 계수	$N_q^* \approx 34$ **(그림 7; φ′ = 35°, L/D ≈ 49)**

구하는 값

Coyle과 Castello(1981) 방법에 따라 말뚝의 **선단지지력** Q_p를 구하라.



풀이

풀이

1 선단의 유효응력과 계수 (도표에서 대략 읽은 값)

$$q' = \gamma L = 18(20) = 360 \text{ kPa} \qquad N_q^* \approx 34$$

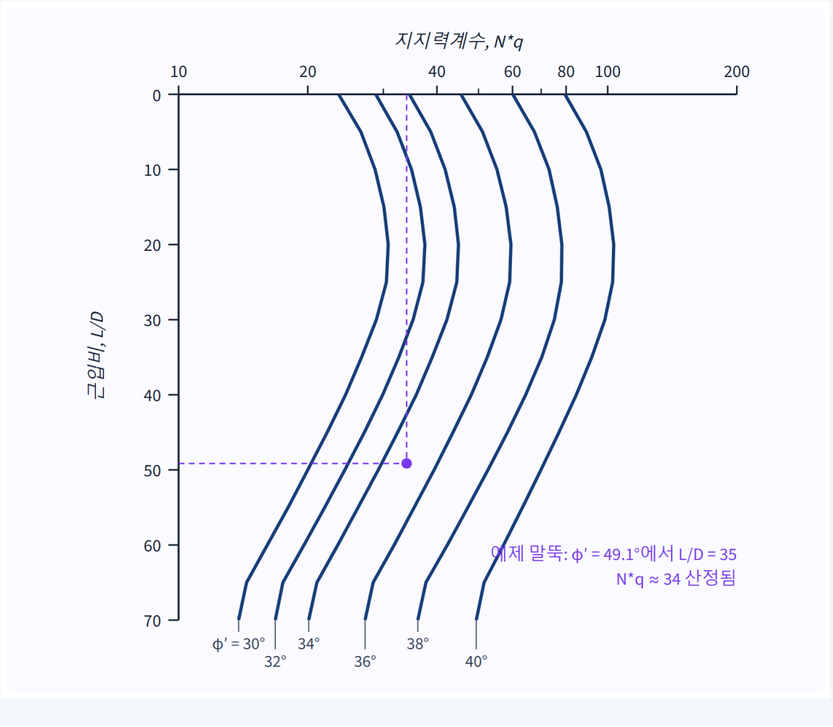
2 단위 선단지지력

$$q_p = q' N_q^* = 360(34) = 12{,}240 \text{ kPa}$$

3 선단지지력

$$Q_p = A_p q_p = 0.1656(12{,}240) = \mathbf{2{,}028} \text{ kN}$$

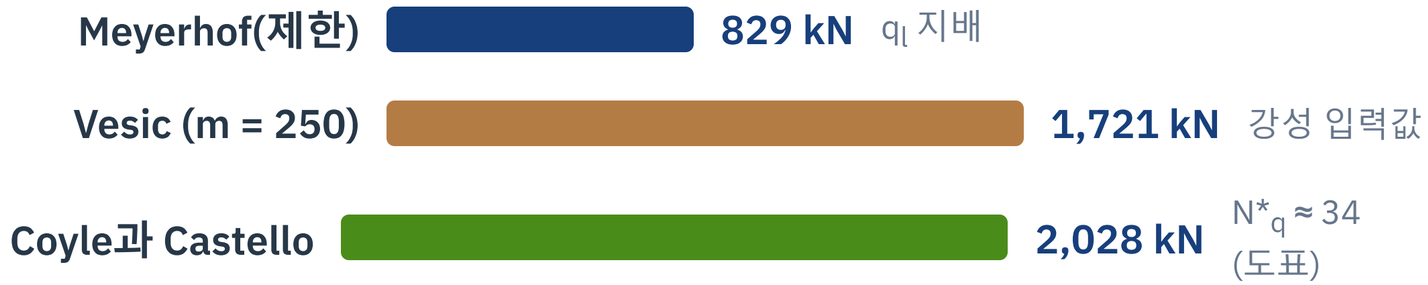
도표에서 읽은 N^*_q는 근삿값이며, φ′ 및 L/D에 따라 ±1 – 2 단위 달라질 수 있다. 결과는 세 방법 중 가장 큰 값인 **2,028 kN**이다.



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

세 가지 방법, 동일한 말뚝

이론



방법들은 서로 **다른 가정**에 근거하므로 결과도 달라진다. 이 범위는 선단지지력을 어느 정도까지 알 수 있는지를 솔직하게 보여 주는 지표이다.

Meyerhof: 한계값 때문에 **보수적**

Vesic: 모래의 조밀도를 **m**으로 명시적으로 입력한다

Coyle–Castello: 실측된 타입말뚝에 기반하며, 도표 판독은 근사적이다

실무에서는: 최소 두 가지 방법으로 계산하고, 결과의 범위를 검토하며, **재하시험**이나 현지 경험이 없는 경우에는 보수적인 쪽에 가까운 값을 선택한다.

주면마찰력: f = K σ′ tanδ′

이론

주면마찰력은 단위마찰력을 말뚝 몸체 표면을 따라 합산한 값이다:

$$Q_s = \sum p\,\Delta L\,f$$

단위마찰력 f는 깊이에 따라 다음과 같이 표현한다 (L′: 임계깊이):

$$f = K\,\sigma'_o \tan\delta' \quad (0 \le z \le L')$$
$$f = f_{z=L'} \quad (L' \le z \le L)$$

p : 말뚝 단면의 둘레, ΔL : p와 f를 일정하게 취한 길이

K : 유효 측방토압계수, σ'_o : 해당 깊이에서의 유효 연직응력

δ′ : 지반–말뚝 마찰각(일반적으로 0.5φ′ – 0.8φ′)

K 값 (말뚝 종류별)

말뚝 종류	K
현장타설 또는 수세식	≈ Ko = 1 – sin φ′
소변위 타입말뚝	≈ Ko ~ 1.4Ko = 1.4(1 – sin φ′)
대변위 타입말뚝	≈ Ko ~ 1.8Ko = 1.8(1 – sin φ′)

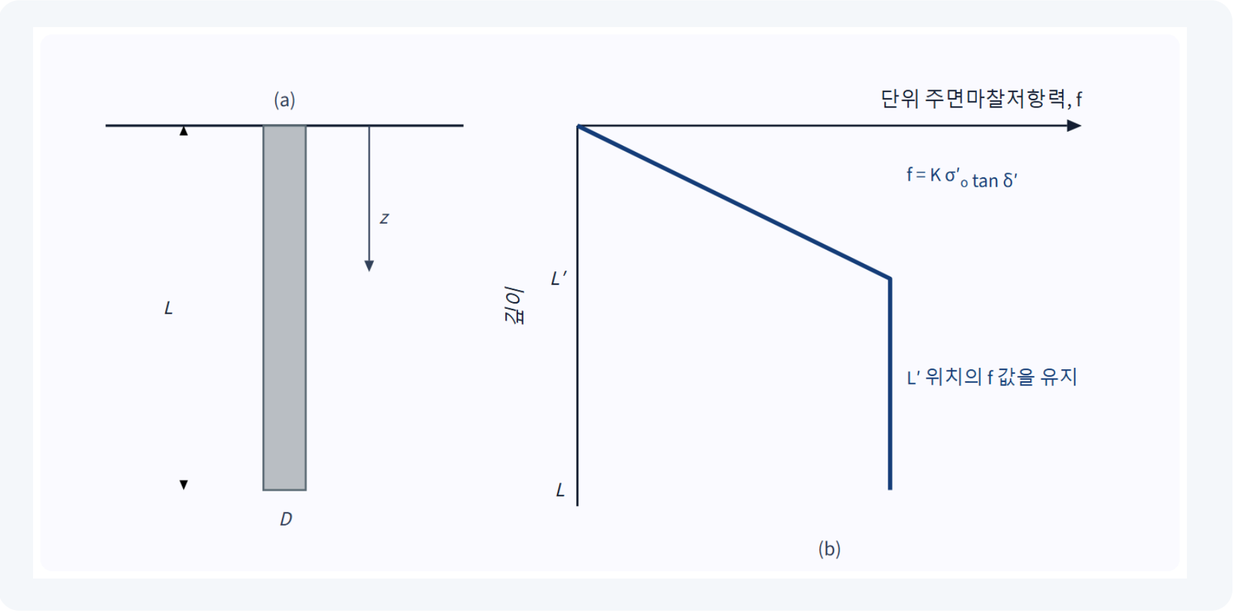
항타는 말뚝 주변의 모래를 다진다 (약 2.5D까지)

대변위 말뚝은 소변위 말뚝보다 큰 마찰력을 받는다

현장타설/제트 말뚝은 타입말뚝보다 마찰력이 작다

한계깊이: 마찰력은 왜 증가하지 않는가?

이론



측정된 마찰은 유효응력처럼 깊이에 따라 **무한히 증가하지 않으며**, 대략 **임계깊이**까지 증가한 뒤 일정하게 유지된다.

$$L' \approx 15\,D$$

일반적인 설명은 **아칭**이다. 모래는 말뚝 몸체 주변의 상재응력 전부를 말뚝에 전달하지 않는다. 모듈은 L′ 아래에서 유효응력을 **L′ 깊이에서의 값으로 유지**하며, 단위마찰력은 선단까지 일정하게 유지된다.

> 출처에서는 L′에 대해 15D – 20D를 제시하며, 보수적인 값은 **15D**이다

문제

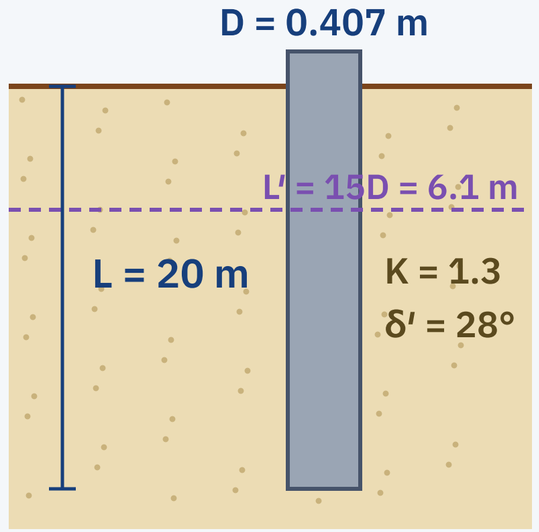
예제

조건

말뚝과 모래	**예제 2와 동일: L = 20 m, D = 0.407 m, γ = 18 kN/m³**
둘레	$p = 4D = 4(0.407) = 1.628$ m
계수	$K = 1.3$ **(고변위 타입),** $\delta' = 28^\circ$ **(**$\approx 0.8\varphi'$**)**

구하는 값

임계깊이(L′ = 15D)를 고려하여 말뚝의 **주면마찰력** Q_s를 구하라.



풀이

풀이

1 임계깊이와 해당 깊이의 응력

$$L' = 15D = 15(0.407) = \mathbf{6.105}\ \text{m} \qquad \sigma'(L') = 18(6.105) = 109.9\ \text{kPa}$$

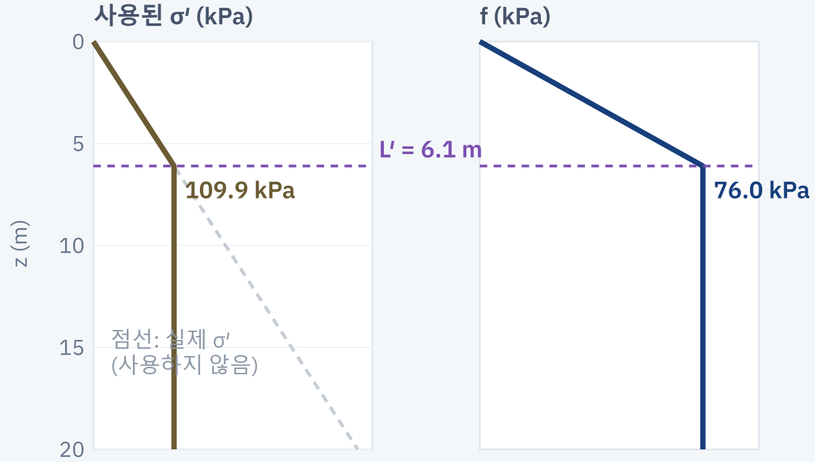
2 L′ 및 선단에서의 단위마찰력 (L′ 아래에서 일정)

$$f_{L'} = K\,\sigma'(L')\tan\delta' = 1.3(109.9)\tan 28^\circ = \mathbf{76.0}\ \text{kPa}$$

3 Q_s: 삼각형 (0 – L′) + 직사각형 (L′ – L)의 면적 × 둘레

$$Q_s = p\left[\tfrac{1}{2} f_{L'} L' + f_{L'}(L - L')\right]$$
$$= 1.628\left[\tfrac{1}{2}(76.0)(6.10) + (76.0)(13.89)\right]$$

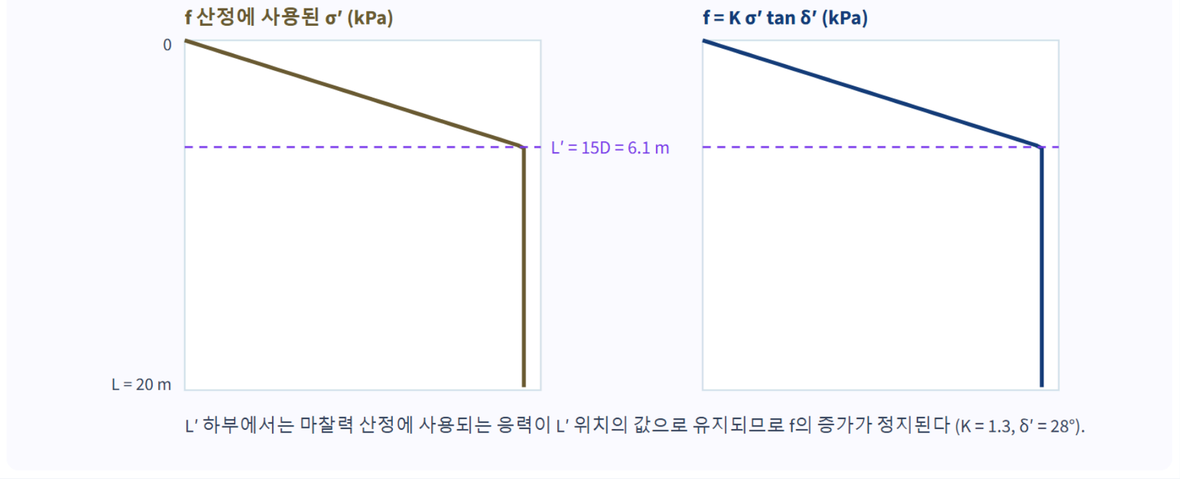
Q_S = 1,628 [231.9 + 1,055.4] = **2,096 kN**.



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

임계깊이를 간과하면 어떻게 되는가?

이론



L′ 하부에서는 마찰력 산정에 사용되는 응력이 L′ 위치의 값으로 유지되므로 f의 증가가 정지된다 (K = 1.3, δ′ = 28°).

같은 말뚝을 **L′을 고려하지 않고**, 응력이 선단까지 선형으로 증가한다고 보고 계산해 보자:

$$f_L = 1.3(360)\tan 28^\circ = 248.8 \text{ kPa}$$
$$Q_s = p\,\tfrac{1}{2} f_L L = 4{,}051 \text{ kN}$$

4,051 kN 대신 **2,096 kN**: 약 **93% 과대** 산정. 긴 말뚝에서 임계깊이를 무시하면 위험측으로 큰 오차가 생긴다.

Coyle과 Castello: 단일 평균응력 적용

이론

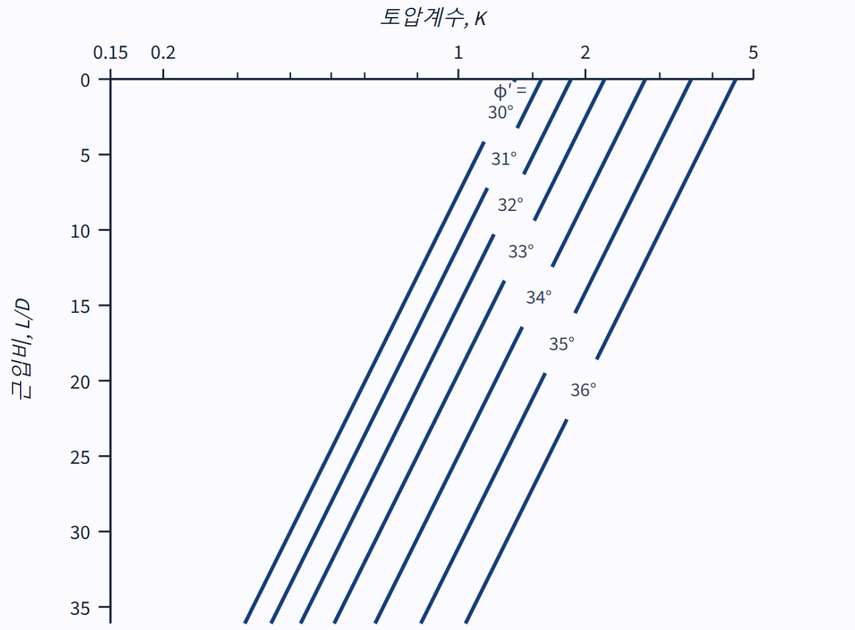
Coyle과 Castello는 주면마찰력을 **근입 길이 전체의 평균 유효응력으로 한 번에** 계산할 것을 제안하였다:

$$Q_s = f_{av}\, p\, L = \left(K\, \bar{\sigma}'_o \tan\delta'\right) p\, L$$
$$\delta' = 0.8\varphi'$$

K는 실험으로 결정되며 **L/D**와 φ′에 따라 도표(옆에 제시)에서 읽는다.

별도의 임계깊이는 존재하지 않는다: 평균화가 그 역할을 한다

따라서 두 가지 둘레 산정 방법은 **긴 말뚝에서 큰 차이**를 낼 수 있다



문제

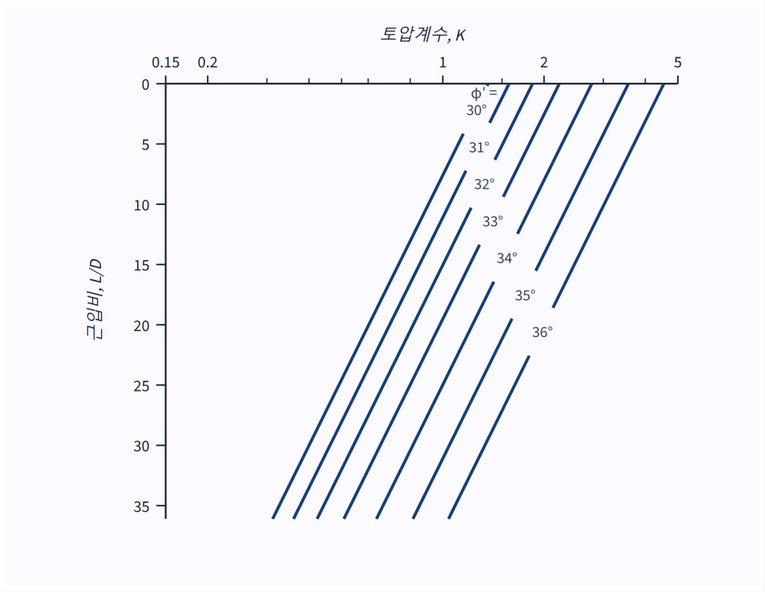
예제

조건

말뚝과 모래	**예제 2와 동일: L = 20 m, D = 0.407 m, φ′ = 35°, γ = 18 kN/m³**
계수	$K \approx 0.41$ **(그림 10; 도표는 L/D = 36까지 그려져 있으며, L/D ≈ 49인 경우에는 곡선을 연장하여 읽는다. 모듈에서는 이 값을 K 입력란에 입력한다. 모듈은 자체 도표 판독으로 0.48을 채운다)**
마찰각	$\delta' = 0.8\varphi' = 0.8(35^\circ) = 28^\circ$

구하는 값

Coyle과 Castello (1981) 방법으로 말뚝의 **주면마찰력** Q_s를 구하라.



풀이

풀이

1 말뚝 몸체를 따른 평균 유효응력 (균질한 모래, 지하수위 없음)

$$\bar{\sigma}'_o = \frac{\gamma L}{2} = \frac{18(20)}{2} = \mathbf{180}\ \text{kPa}$$

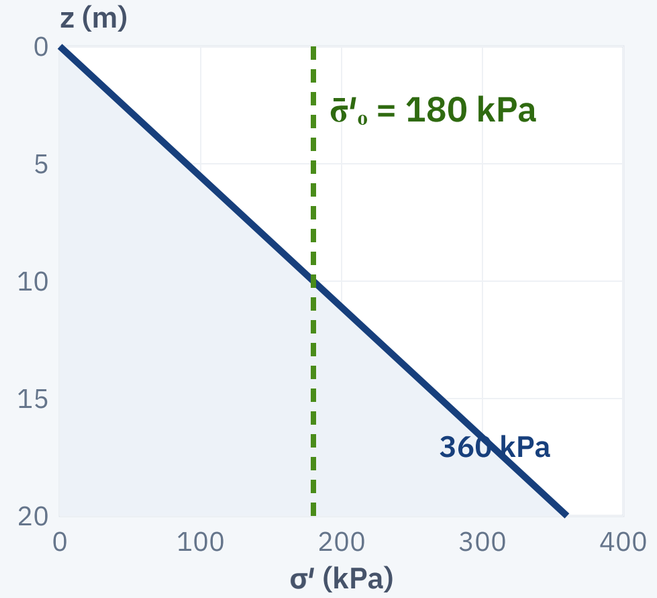
2 평균 단위주면마찰력

$$f_{av} = K\,\bar{\sigma}'_o \tan\delta' = 0.41(180)\tan 28^\circ = \mathbf{39.2}\ \text{kPa}$$

3 주면마찰력

$$Q_s = f_{av}\,p\,L = 39.2(1.628)(20) = \mathbf{1{,}278}\ \text{kN}$$

K–δ′ 방법(L′ 사용)은 **2,096 kN**, Coyle–Castello 방법은 **1,278 kN**을 주며, 이 긴 말뚝에서는 두 값 사이에 약 64%의 차이가 있다.



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

단일 안전율을 적용한 합계

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**

지반이 소수의 시추공으로만 파악되어 있거나 지지력이 주로 **선단**에 의존하는 경우 범위의 상한 쪽 값을 선택한다

선단 방법과 주면 방법은 서로 **독립적으로** 선택할 수 있으며, 결과는 종합하여 해석한다

문제

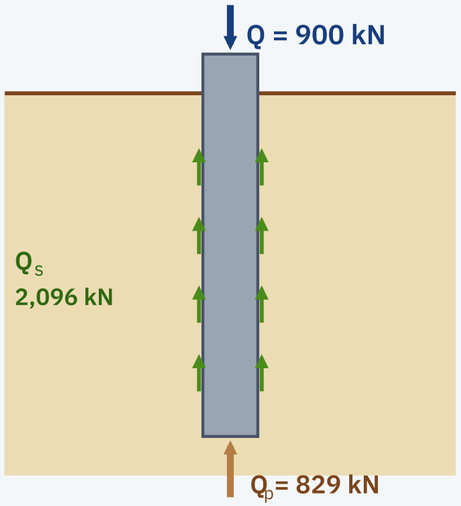
예제

조건

선단지지력	Q_p = 829 kN (Meyerhof, 예제 2)
주면마찰력	Q_s = 2,096 kN (K–δ′, 예제 5)
안전율	FS = 3
말뚝에 작용하는 사용하중	Q = 900 kN

구하는 값

말뚝의 **허용지지력** Q_{all}은 얼마인가? 사용하중은 **충분한가?**



풀이

풀이

1 극한지지력

$$Q_u = Q_p + Q_s = 829 + 2{,}096 = \mathbf{2{,}925}\ \text{kN}$$

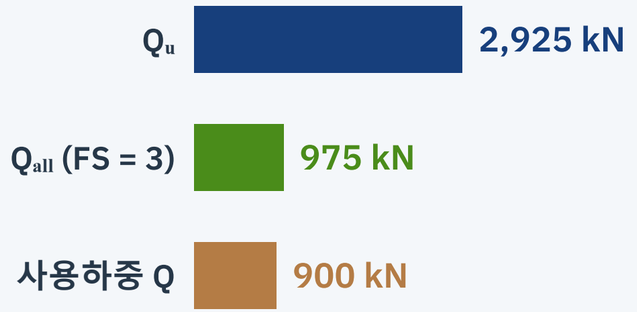
2 허용지지력

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{FS} = \frac{2{,}925}{3} = \mathbf{975}\ \text{kN}$$

3 검토

$$Q = 900\ \text{kN} \ \le\ Q_{all} = 975\ \text{kN} \quad \Rightarrow \quad \text{충분}$$

이용률 Q / Q_{all} = 900 / 975 = **0.92**.



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

동일한 말뚝: Q_u와 Q_{all} (FS = 3)

이론

Q_u · Q_{all} (kN)

	Q_s: K–δ′ (L′ 적용) **2,096 kN**	Q_s: Coyle–Castello **1,278 kN**
Q_p: **Meyerhof** 829 kN	2,925 · **975**	2,107 · **702**
Q_p: **Vesic** 1,721 kN	3,817 · **1,272**	2,999 · **1,000**
Q_p: **Coyle–Castello** 2,028 kN	4,123 · **1,374**	3,305 · **1,102**

길이 20 m 말뚝에 대해 주면마찰력 방법 2가지와 선단지지력 방법 3가지를 조합하면 서로 다른 Q_u 값 6개가 나온다: **2,107 – 4,123 kN**. 어느 조합을 택할지는 **공학적 판단**의 문제이다.

범위를 **판단**하고, 하나의 수치에 의존하지 않는다

주면마찰력이 전체의 대부분을 차지: **한계깊이** 결정이 결정적 요인

가능하면 **말뚝 재하시험**으로 검증

요약

핵심 정리

$Q_u = Q_p + Q_s$; 모래에서는 두 성분 모두 **유효응력**에 의존한다

Meyerhof: N^*_q는 φ'로부터 구하고, q_p는 제한된다($q_l = 0.5 p_a N^*_q \tan\varphi'$)

Vesic: $\sigma'_o N^*_\sigma$; 모래의 강성(m, I_{rr})이 계산에 반영된다

Coyle과 Castello: 실측 지지력에 맞춘 $N^*_q(\varphi', L/D)$ 및 $K(\varphi', L/D)$

주면마찰력: $f = K\sigma'\tan\delta'$, **$L' \approx 15D$** 이하에서는 일정

$Q_{all} = (Q_p + Q_s)/FS$, $FS = 2.5 – 4$

참고문헌

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning; 본 페이지는 이 문헌을 준용합니다.

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.

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.

참고

이 발표 자료의 그림은 GeoTerva 이론 페이지에서 가져온 것이며, 수치 예제는 모두 모듈 자체의 계산 라이브러리로 산출하였고 모듈이 동일한 값을 제공한다.

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