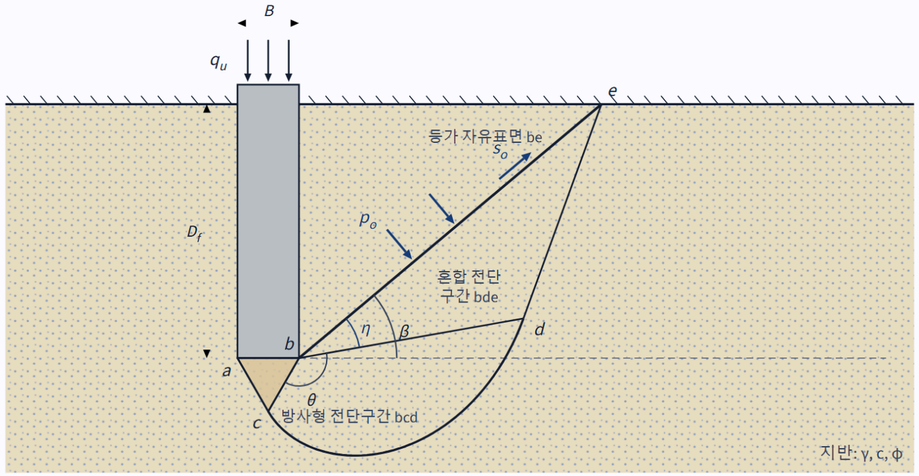
지반공학 강의 자료 · 기초

Meyerhof 지지력: 일반식

강의: Meyerhof의 활동선망에서 지지력계수까지, 형상, 깊이, 경사 보정에서 지하수까지; 각 주제별 계산 예제.

활동선망 · $N_c \cdot N_q \cdot N_\gamma$ · 형상 · 깊이 · 경사 · 지하수 · 계산 예제



개요

이 강의에서 다루는 내용

일반 지지력 방정식의 세 항과 각 항의 형상계수, 깊이계수, 하중경사계수를 파악하기

Meyerhof의 **활동선망**, 등가 자유표면, 그리고 N_c, N_q 계수가 어떻게 도출되는지 따라가는 것

표면기초에 대한 **Reissner (N_q), Prandtl (N_c)** 및 Vesic (N_γ) 계수를 계산하는 방법

De Beer 형상, **Hansen 깊이** 및 **Meyerhof 하중경사**계수의 적용

비배수($\varphi = 0$) 조건과 **지하수**의 세 가지 경우를 다루는 방법

전 허용지지압력과 순 허용지지압력을 구하고 **검토**하는 방법

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, 모듈의 초기 모델: 모래 지반의 1.2 m × 1.2 m 정사각형 기초, $D_f = 1$ m, 지하수위 0.5 m, 하중은 연직에서 10° 기울어져 있다.

세 항과 각 항의 고유 계수

이론

모듈은 **일반 지지력 공식**을 계산한다. Terzaghi 식의 세 항(점착력, 상재하중, 자중)과 각 항에 대한 **기초 형상**, **깊이**, **하중 경사** 계수로 구성된다:

$$q_u = c\,N_c\,F_{cs}F_{cd}F_{ci} + q\,N_q\,F_{qs}F_{qd}F_{qi} + \tfrac{1}{2}\gamma B\,N_\gamma\,F_{\gamma s}F_{\gamma d}F_{\gamma i}$$

N_c, N_q는 Meyerhof(1951)의 이론에서 유래하며, 이 페이지는 이를 **단계별로** 유도한다. N_γ에 대해서는 시행착오법이 설명되며, 모듈은 Vesic의 닫힌 형태 식을 사용한다.

기초 저면은 **거칠다**; 그 아래 지반은 균질하고 매우 깊다; 강도는 $s = c + \sigma'\tan\varphi$이다. 하중은 중심에 작용하며, 경사하중은 하중경사계수로 처리한다.

Terzaghi와의 차이: 얕은기초에만 국한되지 않으며, 기초 저면 위의 지반이 **등가 자유표면**을 통해 메커니즘에 포함된다. 식에서는 이것이 **깊이계수**로 나타나며, 모듈은 D_f/B에 한계를 두지 않는다.

표기

c: 점착력, φ′: 내부마찰각

$q = \gamma D_f$: 기초 저면 위치의 상재하중

γ: 기초 저면 아래 지반의 단위중량

B: 기초의 단변, L: 장변

$F_{\cdot s}$ 형상, $F_{\cdot d}$ 깊이, $F_{\cdot i}$ 경사

쐐기 45° + φ/2, 방사 영역 및 혼합 영역

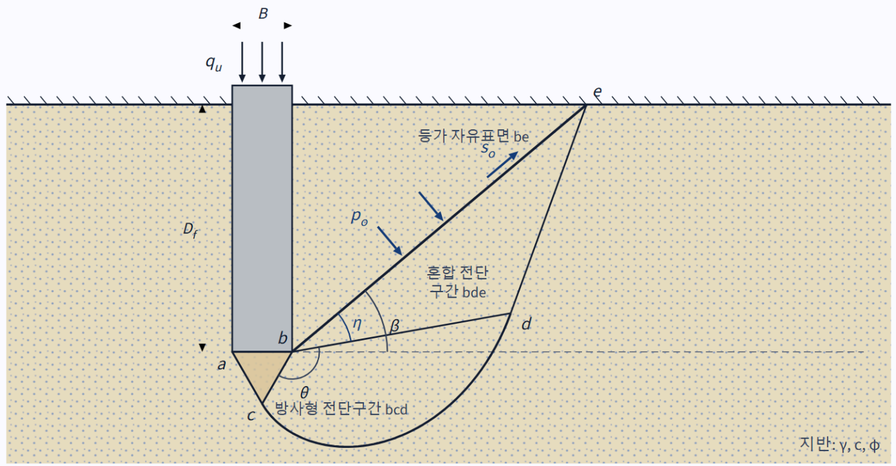
이론

Meyerhof (1951)는 그림에 나타낸 파괴면을 채택하였다. 기초 아래에는 실험으로도 확인되는 **탄성 쐐기 abc**가 있으며, 그 측면은 φ가 아니라 **45° + φ/2**로 기울어져 있다(Terzaghi는 φ를 택하였다). 그 옆에는 대수나선 $r = r_0\, e^{\theta \tan\varphi}$의 호로 경계지어진 **방사 영역 bcd**가 있고, 그 너머에는 Terzaghi의 수동 Rankine 영역 대신 활동이 방사형과 평면형의 중간 형태인 **혼합 영역 bde**가 위치한다.

bde 영역 위의 지반은 무시되지 않는다. 그 영향은 be 평면 위의 **등가 자유 표면** 응력 p_o(수직) 및 s_o(전단)로 나타낸다. 이 평면은 수평면에 대해 β만큼 기울어 있으며, bd는 그 평면으로부터 η만큼 아래에 있다.

지지력은 이번에도 **중첩**으로 구성된다: c와 p_o의 기여분(N_c, N_q) 및 γ의 기여분(N_γ):

$$q_u = c\,N_c + p_o\,N_q + \tfrac{1}{2}\gamma B\,N_\gamma$$



부분 동원 m과 Mohr 원

이론

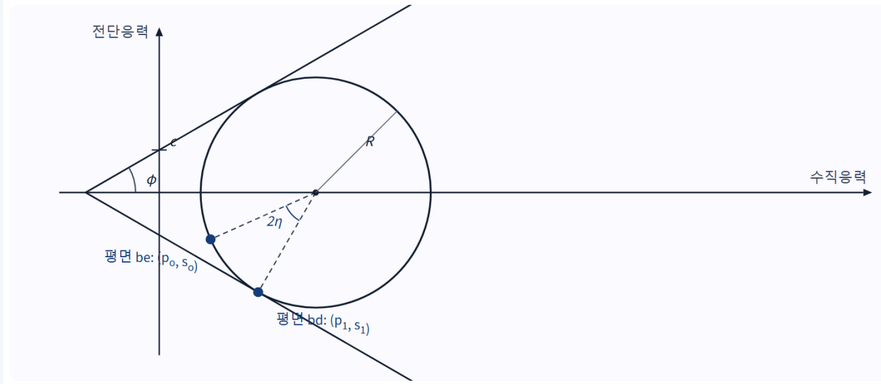
등가 자유표면에서 전단강도는 **부분적으로만** 동원된다: Meyerhof는 전단응력을 강도의 일부로 표현하였다. 반면 선형 bde 영역에서는 지반이 소성 평형 상태에 있다: bd 평면에서는 강도 전체가 동원된다:

$$0 \le m \le 1: \quad s_o = m\,(c + p_o \tan\varphi) \qquad s_1 = c + p_1 \tan\varphi$$

$$R = \frac{c + p_1 \tan\varphi}{\cos\varphi} \qquad \cos(2\eta + \varphi) = \frac{m\,(c + p_o \tan\varphi)\cos\varphi}{c + p_1 \tan\varphi}$$

bde 영역의 응력 상태는 **하나의 Mohr 원**이다(옆 그림): 점 bd는 포락선 위에 있고, 점 be는 원 위에서 2η만큼 앞서 있다. 이는 각 η를 m과 연결한다.

두 가지 극한 경우: **m = 0** ⇒ cos(2η + φ) = 0, **η = 45° − φ/2**; **m = 1** ⇒ cos(2η + φ) = cosφ, **η = 0**.



N_c와 N_q는 어떻게 유도되는가?

이론

bc 면에서는 방사 영역도 파괴 상태에 있다: $s'_p = c + p'_p \tan\varphi$. 극점 b에 관한 모멘트로부터(나선 위의 수직응력과 점착력만 남는다):

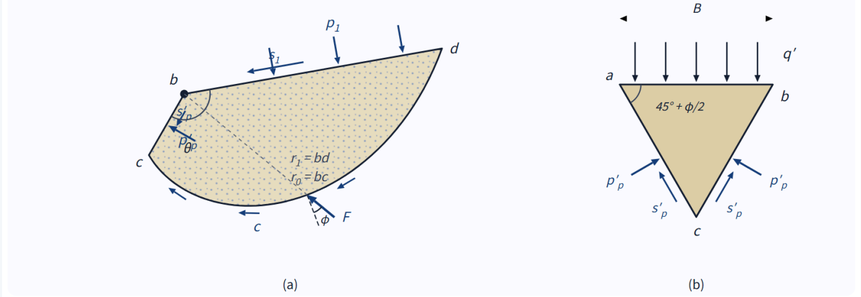
$$p'_p = p_1\, e^{2\theta\tan\varphi} + c\cot\varphi\left(e^{2\theta\tan\varphi} - 1\right)$$
$$s'_p = \left(c + p_1\tan\varphi\right) e^{2\theta\tan\varphi}$$

이어서 쐐기 abc의 연직 평형 (각 면의 길이는 B/2 / cos(45° + φ/2)):

$$q' = p'_p + s'_p\cot\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$$

모두 결합하면 c 항과 p_o 항이 분리된다:

$$q' = c\,N_c + p_o\,N_q$$
$$N_q = \frac{\left(1+\sin\varphi\right)e^{2\theta\tan\varphi}}{1-\sin\varphi\,\sin(2\eta+\varphi)} \qquad N_c = \left(N_q - 1\right)\cot\varphi$$



β와 m 계수가 값을 키우는 방식

이론

계수는 φ′에, m을 통해 η에, 그리고 등가 자유표면의 경사 β를 통해 나선이 휩쓰는 **각 θ**에 의존한다(그림 1의 형상):

$$\theta = 135^\circ + \beta - \eta - \frac{\varphi}{2}$$

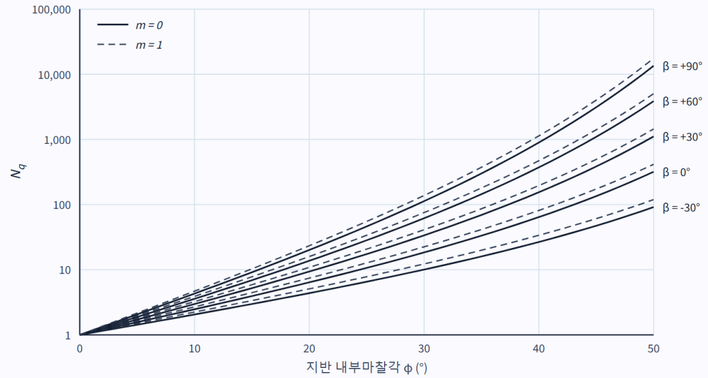
$$m = 0:\ \theta = 90^\circ + \beta \qquad m = 1:\ \theta = 135^\circ + \beta - \tfrac{\varphi}{2}$$

깊은기초의 등가 자유 표면은 더 가파르고 β는 더 크며, 계수는 이에 따라 빠르게 증가한다(옆 그림).

지표면 기초(Terzaghi의 유도에서의 조건): β = 0, m = 0 ⇒ θ = π/2, sin(2η + φ) = 1:

$$N_q = e^{\pi \tan\varphi} \tan^2\left(45^\circ + \tfrac{\varphi}{2}\right) \qquad N_c = (N_q - 1)\cot\varphi$$

이것들은 **Reissner(1924)의 N_q**와 **Prandtl(1921)의 N_c**이며, 모듈은 이를 사용한다. $p_o = \gamma D_f = q$로 두면 c항과 q항은 $cN_c + qN_q$가 되며, 저면 위의 지반은 β와 m 대신 **깊이계수**를 통해 계산에 반영된다. φ → 0일 때 $N_c \to \pi + 2 = 5.14$이다.



문제

예제

조건

지반 $\varphi' = 30^\circ,\ c = 0$

경우 **(a) 지표면 기초: β = 0, m = 0 · (b) β = 15°, m = 0 · (c) β = 15°, m = 1**

공식 $\theta = 135^\circ + \beta - \eta - \varphi/2,\quad N_q = \dfrac{(1+\sin\varphi)e^{2\theta\tan\varphi}}{1-\sin\varphi\sin(2\eta+\varphi)}$

구하는 값

각 경우에 대해 **η, θ, N_q** 및 N_c의 값을 구하라. 지표면에 놓인 기초에서 N_q는 Reissner의 닫힌 형태 해와 일치하는가?

풀이 (1/2)

풀이

1 (a) 지표면 기초: m = 0 ⇒ η = 45° − φ/2 = 30°; θ = 135° + 0 − 30° − 15° = 90° (Reissner의 $e^{\pi \tan\varphi}\tan^2(45° + \varphi/2)$ 값과 같다)

$$N_q = \frac{1.5\, e^{2(\pi/2)(0.5774)}}{1 - 0.5 \sin 90^\circ} = \frac{1.5(6.134)}{0.5} = \mathbf{18.40}$$

2 (b) β = 15°, m = 0: η = 30°; θ = 135° + 15° − 30° − 15° = 105°; sin(2η + φ) = 1

$$N_q = \frac{1.5\, e^{2(1.8326)(0.5774)}}{0.5} = \mathbf{24.90} \qquad N_c = (24.90 - 1)\cot 30^\circ = \mathbf{41.39}$$

3 (c) β = 15°, m = 1: η = 0; θ = 135° + 15° − 0 − 15° = 135°; sin(2η + φ) = sin30° = 0.5

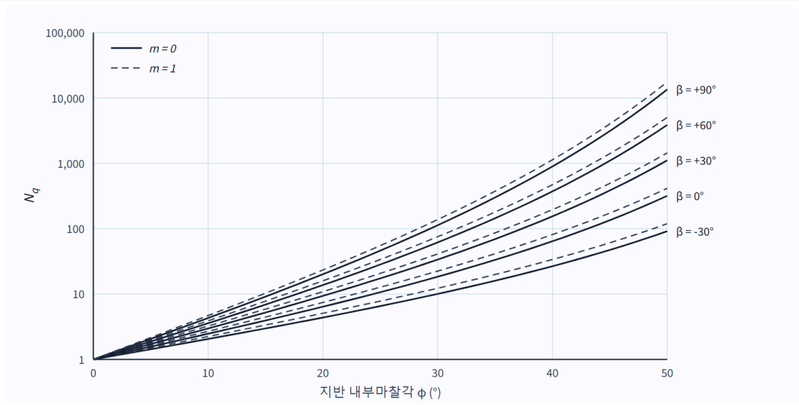
$$N_q = \frac{1.5\, e^{2(2.3562)(0.5774)}}{1 - 0.5(0.5)} = \frac{1.5(15.19)}{0.75} = \mathbf{30.38} \qquad N_c = \mathbf{50.89}$$

풀이 (2/2)

풀이

상태	η (°)	θ (°)	N_q	N_c
(a) β = 0, m = 0 (Reissner/Prandtl)	30	90	18.40	30.14
(b) β = 15°, m = 0	30	105	24.90	41.39
(c) β = 15°, m = 1	0	135	30.38	50.89

지표면 기초는 닫힌 형태 해(18.40)와 **동일하다**. β가 커지고 동원이 증가할수록 계수가 **급격히 증가한다**: (a) → (c)에서 N_q는 1.65배이다. 모듈은 이 증가를 메커니즘이 아니라 **깊이계수**로 반영한다(이후 절).



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

N_γ: 시행법, Meyerhof 1963 및 Vesic

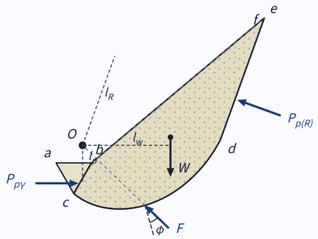
이론

Terzaghi의 경우와 마찬가지로 N_γ의 닫힌 형태 식은 없으며 **시행**으로 구한다. φ, β, m을 선택하고 θ를 구한 뒤, 시행 중심 O에서 대수나선을 그린다. bcdf 부분에 대해 무게 W와 df 위의 Rankine 수동 토압 $P_{p(R)}$을 구하고, O에 대한 모멘트로부터 bc 위의 수동 토압을 구한다:

$$P_{p\gamma} = \frac{W\, l_w + P_{p(R)}\, l_R}{l_p}$$

O를 변화시켜 최소 $P_{p\gamma}$를 구하며, 쐐기 abc의 자중을 함께 고려하면:

$$q'' = \frac{\gamma B}{2}\left[\frac{4P_{p\gamma}\sin(45^\circ+\varphi/2)}{\gamma B^2} - \tfrac{1}{2}\tan\left(45^\circ+\tfrac{\varphi}{2}\right)\right] = \tfrac{1}{2}\gamma B\, N_\gamma$$



$N_\gamma = (N_q - 1)\tan(1.4\varphi)$ (Meyerhof 1963)

$N_\gamma = 2(N_q + 1)\tan\varphi$ (Vesic 1973, **여기서**)

N_c, N_q, N_γ는 φ′에만 의존한다

이론

두 출처는 N_c와 N_q에서는 **동일**하며 N_γ에서는 다르다. N_γ는 쐐기 형상 가정에 가장 크게 의존하는 계수이다. φ = 30°에서 Vesic은 22.40, Meyerhof (1963)는 15.67이다. Meyerhof의 N_γ를 사용하면 자중항이, 따라서 마찰성 지반의 q_u도 더 낮아질 것이다.

$$N_q = e^{\pi \tan\varphi} \tan^2\left(45^\circ + \tfrac{\varphi}{2}\right) \qquad N_c = (N_q - 1)\cot\varphi \qquad N_\gamma = 2(N_q + 1)\tan\varphi$$

계수

φ (°)	N_c	N_q	N_γ	N_γ (M63)
0	5.14	1.00	0.00	0.00
10	8.34	2.47	1.22	0.37
20	14.83	6.40	5.39	2.87
26	22.25	11.85	12.54	8.00
30	30.14	18.40	22.40	15.67
32	35.49	23.18	30.21	22.02
35	46.12	33.30	48.03	37.15
40	75.31	64.20	109.41	93.69

문제

예제

조건

지반	$\varphi' = 32°$ **(tan 32° = 0.6249)**
방법	**Reissner, Prandtl, Vesic; 비교용 Meyerhof (1963)**

구하는 값

N_q, N_c, N_γ 값을 닫힌 형태의 식으로 구하라; Vesic의 N_γ를 Meyerhof(1963)의 값과 비교하라.

풀이

풀이

1 Reissner N_q

$$N_q = e^{\pi \tan 32^\circ} \tan^2(61^\circ) = e^{1.9631}(3.2546) = \mathbf{23.18}$$

2 Prandtl N_c

$$N_c = (N_q - 1)\cot\varphi = \frac{23.18 - 1}{0.6249} = \mathbf{35.49}$$

3 Vesic N_γ (모듈에서 사용) 및 Meyerhof (1963)

$$N_\gamma = 2(N_q + 1)\tan\varphi = 2(23.18 + 1)(0.6249) = \mathbf{30.21}$$

$$N_\gamma^{M63} = (N_q - 1)\tan(1.4\varphi) = (23.18 - 1)\tan 44.8^\circ = 22.02$$

Vesic의 N_γ 값은 Meyerhof의 값보다 **37%** 크다 (φ′ = 32°). 표의 값과 일치한다: N_c = 35.49, N_q = 23.18, N_γ = 30.21.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

De Beer: 연속기초가 아닌 기초

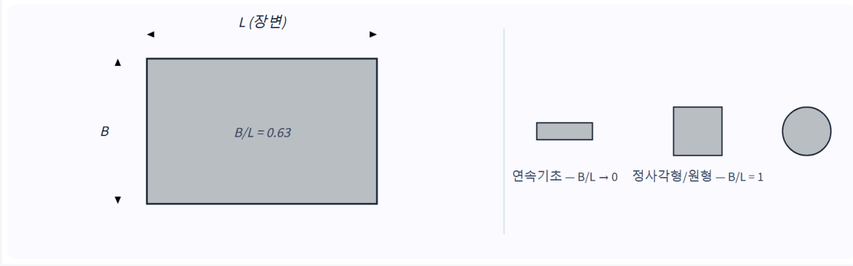
이론

유도는 연속(띠) 기초에 대한 것이다(평면변형률). 직사각형 기초에서는 파괴가 3차원이다: 지반은 쐐기의 끝부분과 측면으로도 이동할 수 있다. **De Beer**(1970)는 각 항을 단변과 장변의 비 B/L로 보정한다:

$$F_{cs} = 1 + \frac{B}{L}\frac{N_q}{N_c} \qquad F_{qs} = 1 + \frac{B}{L}\tan\varphi \qquad F_{\gamma s} = 1 - 0.4\,\frac{B}{L}$$

연속기초(B/L → 0)에서는 세 계수가 모두 1이며, 식은 평면변형률 형태로 환원된다.

정사각형기초(B/L = 1)에서 N_γ 항은 40% 감소하고($F_{\gamma s}$ = 0.6), q 항과 c 항은 증가한다.



문제

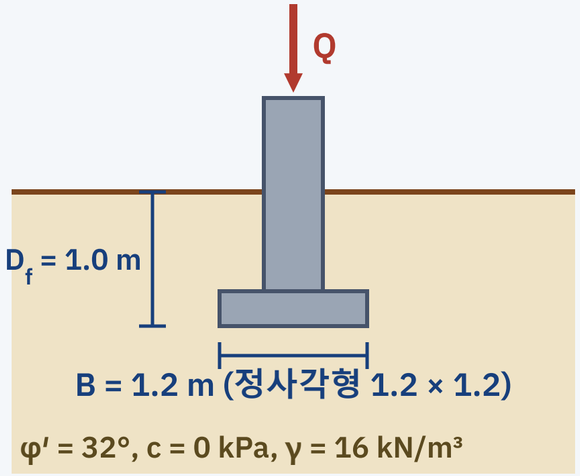
예제

조건

지반	$\varphi' = 32^\circ$: $N_c = 35.49,\ N_q = 23.18$ **(예제 2)**
기초	**정사각형 B = L = 1.2 m; 비교: B/L = 0.5 및 연속기초**

구하는 값

정사각형기초에 대한 F_{cs}, F_{qs}, $F_{\gamma s}$ 값을 구하고, B/L = 0.5에 대해서도 같은 계수를 구하라.



풀이

풀이

1 정사각형기초 (B/L = 1)

$$F_{cs} = 1 + (1)\frac{23.18}{35.49} = \mathbf{1.653}$$

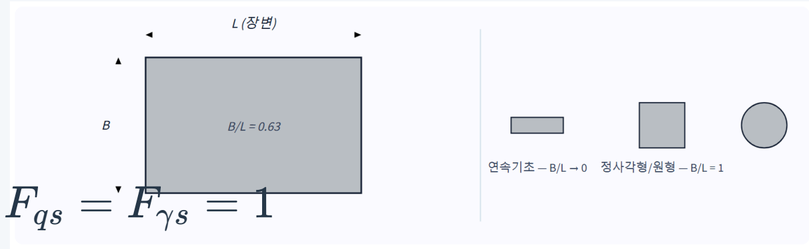
$$F_{qs} = 1 + (1)\tan 32^\circ = \mathbf{1.625}$$

$$F_{\gamma s} = 1 - 0.4(1) = \mathbf{0.600}$$

2 B/L = 0.5 및 연속기초

$$B/L = 0.5: \ F_{cs} = 1.327,\ F_{qs} = 1.312,\ F_{\gamma s} = 0.800$$

따: $F_{cs} = F_{qs} = F_{\gamma s} = 1$



정사각형기초에서는 q 항이 **62%** 증가하고 자중 항은 40% 감소한다. B/L이 작아질수록 계수는 연속기초 값(1)에 가까워진다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

Hansen: 기초 저면 위 지반의 기여

이론

Terzaghi는 기초 저면 위의 지반을 단지 **고정하중**으로만 본다. 반면 Meyerhof 이론에서는 등가 자유표면을 통해 **저항도 발휘한다**; 일반식에서 이는 D_f/B에 따라 커지는 **Hansen (1970) 깊이계수**로 고려된다:

$$D_f/B \le 1:\ F_{qd} = 1 + 2\tan\varphi(1-\sin\varphi)^2\frac{D_f}{B} \qquad D_f/B > 1:\ F_{qd} = 1 + 2\tan\varphi(1-\sin\varphi)^2\tan^{-1}\frac{D_f}{B}$$

$$F_{cd} = F_{qd} - \frac{1-F_{qd}}{N_c\tan\varphi}\ (\varphi>0) \qquad F_{cd} = 1 + 0.4\,k\ (\varphi=0) \qquad F_{\gamma d} = 1$$

k = D_f/B (≤ 1) 또는 $\tan^{-1}(D_f/B)$ (> 1, 라디안). D_f/B = 1을 넘으면 아크탄젠트가 계수를 천천히 계속 증가시킨다: **Terzaghi의 식과 달리 이 식은 깊이 제한이 필요하지 않다.**

문제

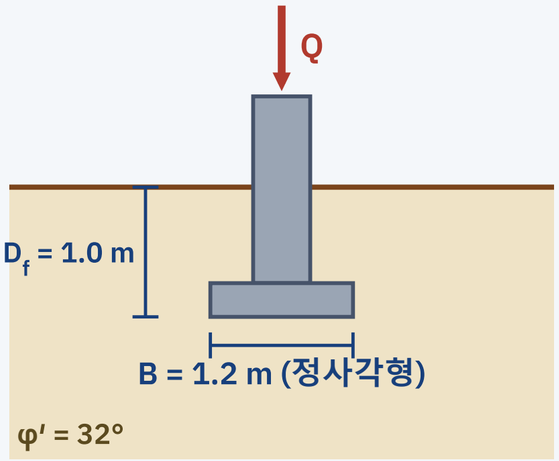
예제

조건

지반	$\varphi' = 32^\circ$: $N_c = 35.49$, $\tan\varphi' = 0.6249$, $(1 - \sin 32^\circ)^2 = 0.2210$
기초	**B = 1.2 m; D_f = 1.0 m (예제) 및 비교용 D_f = 2.4 m**
비배수	**φ = 0: B = 2 m, D_f = 1.5 m**

구하는 값

각 경우에 대해 **F_{qd}, F_{cd}** 및 $F_{\gamma d}$의 값을 구하라.



풀이

풀이

1 $D_f/B = 1.0/1.2 = 0.833 \le 1$ (선형식)

$$F_{qd} = 1 + 2(0.6249)(0.2210)(0.833) = \mathbf{1.230}$$

$$F_{cd} = F_{qd} - \frac{1 - F_{qd}}{N_c \tan\varphi} = 1.230 + \frac{0.230}{(35.49)(0.6249)} = \mathbf{1.241}$$

2 $D_f/B = 2.4/1.2 = 2 > 1$ (아크탄젠트: $\tan^{-1} 2 = 1.1071$ rad)

$$F_{qd} = 1 + 2(0.6249)(0.2210)(1.1071) = \mathbf{1.306} \qquad F_{cd} = 1.306 + \frac{0.306}{22.18} = \mathbf{1.320}$$

3 비배수($\varphi = 0$): $F_{qd} = 1$; $D_f/B = 1.5/2 = 0.75$

$$F_{cd} = 1 + 0.4(0.75) = \mathbf{1.300} \qquad F_{qd} = 1$$

D_f/B가 0.83 → 2일 때 F_{qd}는 1.230 → 1.306; 깊이의 기여는 증가하나 **점차 둔화된다**.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

Meyerhof: 경사하중

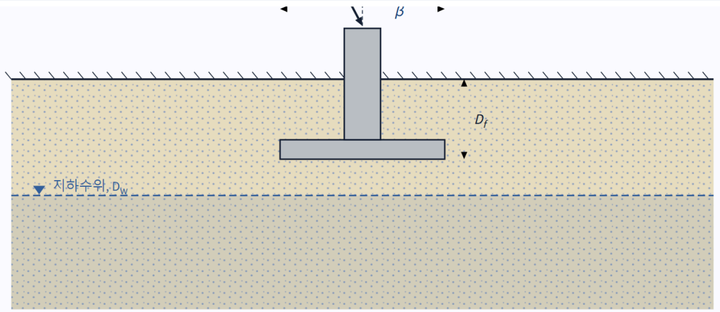
이론

연직과 β의 각을 이루는 하중은 수직하중보다 동원되는 수직 저항이 작다: 하중의 일부가 기초를 옆으로 밀어낸다. 이 식은 하중의 **수직 성분**에 대한 지지력만을 준다. **Meyerhof**(1963)의 하중경사계수는 각 항을 감소시킨다:

$$F_{ci} = F_{qi} = \left(1 - \frac{\beta^\circ}{90^\circ}\right)^2 \qquad F_{\gamma i} = \left(1 - \frac{\beta}{\varphi}\right)^2 \ (\beta < \varphi) \ ; \ F_{\gamma i} = 0 \ (\beta \geq \varphi)$$

β = 0에서 세 계수는 모두 1이다. $F_{\gamma i}$는 β = φ에서 0에 도달하고 그 값에 **머문다**: 모듈은 $(1 - \beta/\varphi)^2$이 다시 커지는 것을 허용하지 않는다. β는 $(1 - \beta/90°)^2$이 다시 커지기 시작하는 점보다 낮은 **89°까지** 허용된다.

경사하중은 특히 자중항을 통해 지지력을 저하시킨다.



본 산정식은 경사하중의 연직 성분에 대한 극한지지력만을 반환한다.

문제

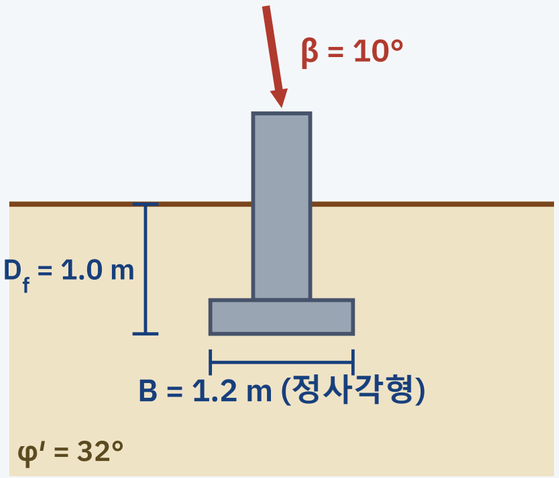
예제

조건

기초	**정사각형, B = L = 1.2 m, 기초 저면 깊이 D_f = 1.0 m**
지반	**모래:** $\varphi' = 32^\circ,\ c = 0$
단위중량	$\gamma = 16$ kN/m^3 **(상부),** $\gamma_{sat} = 19.5$ kN/m^3 **(지하수위 아래)**
하중	**연직 기준 β = 10° (추가: 20°, 30°, 32°)**

구하는 값

β = 10°일 때 F_{ci}, F_{qi}, $F_{\gamma i}$ 값을 구하라; β가 커지면 어떻게 되는가?



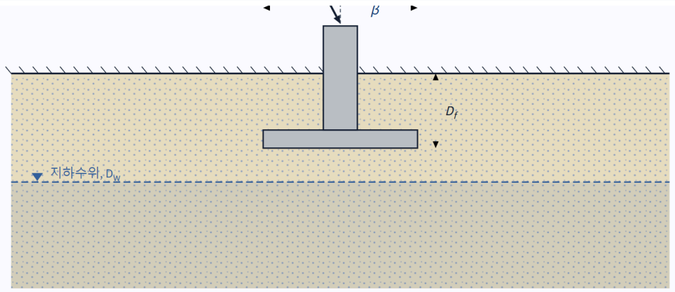
풀이

풀이

1 β = 10°, φ′ = 32° (β < φ)

$$F_{ci} = F_{qi} = \left(1 - \frac{10}{90}\right)^2 = \mathbf{0.790}\ ;\quad F_{\gamma i} = \left(1 - \frac{10}{32}\right)^2 = \mathbf{0.473}$$

β (°)	$F_{ci} = F_{qi}$	$F_{\gamma i}$
0	1.000	1.000
10	0.790	0.473
20	0.605	0.141
30	0.444	0.004



본 산정식은 경사하중의 연직 성분에 대한 극한지지력만을 반환한다.

10° 하중은 q 항과 c 항을 **21%**, 자중 항을 **53%** 감소시키며, β = φ′ = 32°에서는 자중 항이 완전히 사라진다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

일반식과 비배수 조건

이론

§5–10의 계수로 일반 지지력 방정식이 완성된다. 연직하중 작용 시 기초 저면 높이에 놓인 **연속기초**에서는 모든 보정계수가 1이며, 방정식은 Terzaghi의 형태를 취한다. 다만 Terzaghi의 계수 대신 Reissner의 N_q, Prandtl의 N_c, Vesic의 N_γ가 나타난다.

비배수 재하($\varphi = 0$, $c = c_u$): $N_c = 5.14$, $N_q = 1$, $N_\gamma = 0$:

$$q_u = 5.14\, c_u\, F_{cs} F_{cd} F_{ci} + q\, F_{qs} F_{qd} F_{qi}$$

> 지하수는 Terzaghi 방법에서와 같이(§12) 식에 반영되는데, q와 세 번째 항의 단위중량을 통해서일 뿐 **계수를 통해서는 결코 아니다**.

문제

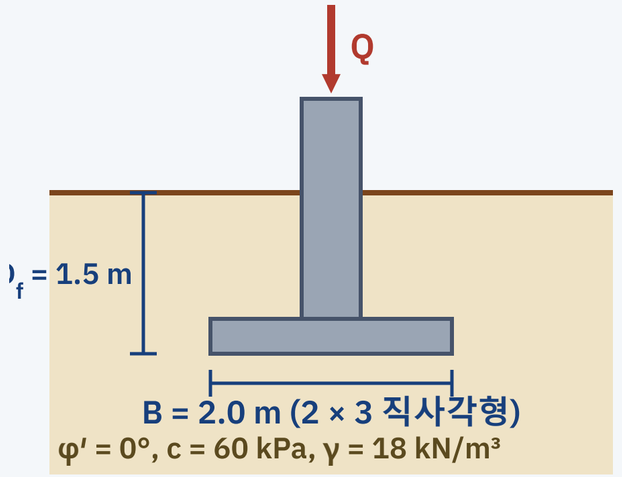
예제

조건

기초	직사각형 2 m × 3 m, D_f = 1.5 m, 중심 연직하중
지반	점토, $\varphi = 0,\ c_u = 60$ kPa, $\gamma = 18$ kN/m^3 ; 지하수 없음
안전	FS = 3

구하는 값

q_u, 전 q_{all} 및 순 지지력을 구하라.



풀이

풀이

1 상재하중과 지지력계수(φ = 0: $N_c = 5.14$, $N_q = 1$, $N_\gamma = 0$)

$$q = \gamma D_f = 18(1.5) = 27 \text{ kPa} \qquad F_{cs} = 1 + \frac{2}{3}\cdot\frac{1}{5.14} = 1.130 \qquad F_{cd} = 1 + 0.4\frac{1.5}{2} = 1.300$$

2 지지력 ($F_{ci} = F_{qi} = 1$; $F_{qs} = F_{qd} = 1$)

$$q_u = 5.14(60)(1.130)(1.300) + 27(1) = 452.9 + 27 = \mathbf{479.9} \text{ kPa}$$

3 전 허용지지압력과 순 허용지지압력

$$q_{all,g} = \frac{479.9}{3} = \mathbf{160.0} \text{ kPa} \qquad q_{all,n} = \frac{q_u - q}{3} = \frac{452.9}{3} = 151.0 \text{ kPa}$$

비배수 점토에서 지지력은 거의 전적으로 **점착력 항**에서 나온다(453 / 480 kPa). 형상계수(1.13)와 깊이계수(1.30)가 이를 약 47% 증가시키며, φ = 0에서는 $N_\gamma = 0$이므로 자중 항이 없다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

계수는 변하지 않고 q와 γ가 변한다

이론

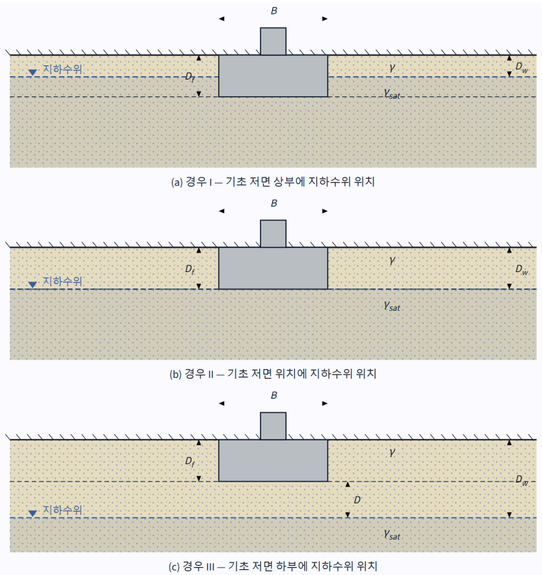
지하수위 아래에서는 유효단위중량 γ′ = γ_{sat} − γ_w를 적용한다 (γ_w = 9.81). 모듈은 세 가지 경우를 구분하며, D_w는 지표면에서 지하수위까지의 깊이이다:

$$\text{I } (D_w \le D_f):\ q = \gamma D_w + \gamma'(D_f - D_w),\ \ \gamma \to \gamma' \text{ (세 번째 항)}$$

$$\text{III } (D_f < D_w \le D_f + B):\ q = \gamma D_f,\ \ \bar{\gamma} = \frac{1}{B}\left[\gamma D + \gamma'(B - D)\right],\ D = D_w - D_f$$

경우 II($D_w = D_f$)는 경우 I의 특수한 경우이다: q = γ D_f, 세 번째 항에는 γ′.

저면에서 B보다 더 깊은 곳의 물은 **영향을 주지 않는다**.



문제

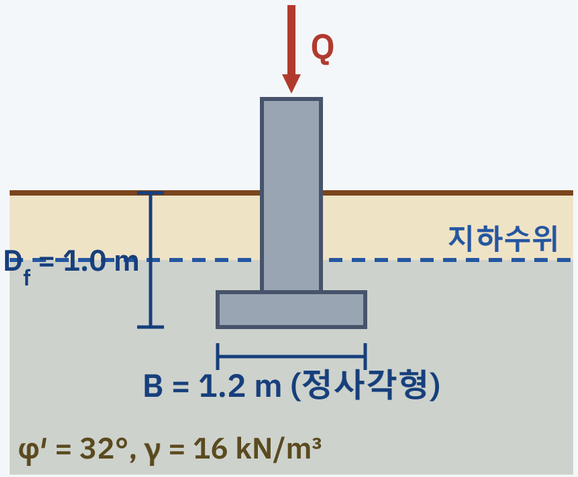
예제

조건

기초	**정사각형, B = L = 1.2 m, 기초 저면 깊이 D_f = 1.0 m**
지반	**모래:** $\varphi' = 32^\circ,\ c = 0$
단위중량	$\gamma = 16$ kN/m^3 **(상부),** $\gamma_{sat} = 19.5$ kN/m^3 **(지하수위 아래)**
하중	**연직, 중심; ε 없음**

구하는 값

지하수위 D_w = 0.5; 1.0; 1.5 및 2.6 m에 대해 **q**, 세 번째 항의 단위중량, **q_u** 값을 구하라. (F_{qs} = 1.625; F_{qd} = 1.230; $F_{\gamma s}$ = 0.6; N_q = 23.18; N_γ = 30.21; 경사 없음)



풀이 (1/2)

풀이

1 경우 I ($D_w = 0.5 < D_f$) 및 $D_w = D_f$

$$D_w = 0.5: \ q = 16(0.5) + 9.69(0.5) = 12.845 \text{ kPa}, \ \gamma' = 9.69$$

$$D_w = 1.0: \ q = 16(1.0) = 16.0 \text{ kPa}, \ \gamma' = 9.69$$

2 경우 III($D_w = 1.5 \Rightarrow D = 0.5$ m ≤ B)와 물의 영향 없음($D_w = 2.6 \Rightarrow D = 1.6 > B$)

$$\bar{\gamma} = \frac{1}{1.2}\left[16(0.5) + 9.69(0.7)\right] = 12.319 \text{ kN/m}^3; \ \ q = 16 \text{ kPa}$$

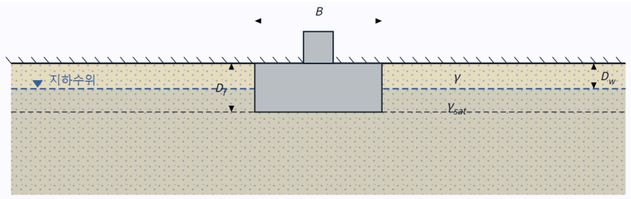
$$D_w = 2.6: \ q = 16, \ \gamma = 16$$

풀이 (2/2)

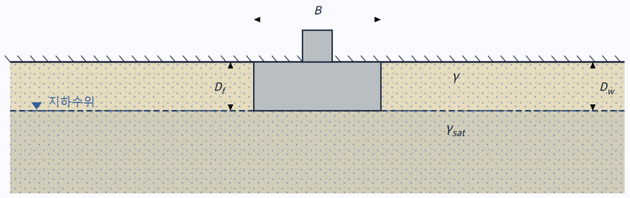
풀이

D_w (m)	상태	q (kPa)	γ 세 번째 항	q_u (kPa)
0.5	I	12.84	9.69	**520.0**
1.0	I	16.00	9.69	**635.5**
1.5	III	16.00	12.32	**649.0**
2.6	영향 없음	16.00	16.00	**667.9**

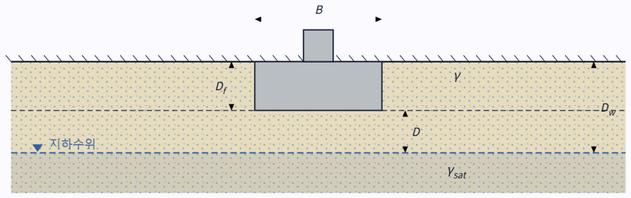
지하수는 지지력을 두 가지 경로로 낮춘다: 상재하중 q가 감소하고 자중 항이 γ′로 계산된다. 지하수위가 0.5 m일 때 q_u = 520, 깊을 때 668 kPa이다(22% 차이). 계수는 전혀 변하지 않는다: **물은 q와 γ를 통해서만 작용한다.**



(a) 경우 I — 기초 저면 상부에 지하수위 위치



(b) 경우 II — 기초 저면 위치에 지하수위 위치



(c) 경우 III — 기초 저면 하부에 지하수위 위치

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

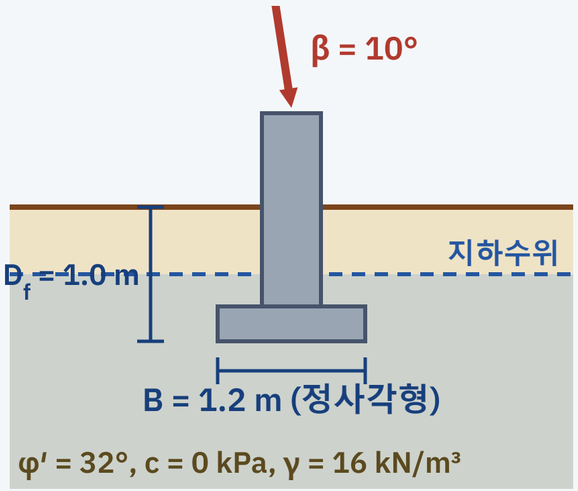
예제

조건

기초	**정사각형, B = L = 1.2 m, 기초 저면 깊이 D_f = 1.0 m**
지반	**모래:** $\varphi' = 32°,\ c = 0$
단위중량	$\gamma = 16$ kN/m^3 **(상부),** $\gamma_{sat} = 19.5$ kN/m^3 **(지하수위 아래)**
지하수	**D_W = 0.5 m (경우 I)**
하중	**연직에 대해 β = 10° 경사**
안전	**FS = 3**

구하는 값

q_u, 전 허용지지력 q_{all}, 허용 연직하중 및 **허용 합력** 하중; 이어서 c = 5 kPa일 때의 q_u.



풀이 (1/2)

풀이

1 계수 ($\varphi' = 32°$; $B/L = 1$; $D_f/B = 0.833$; $\beta = 10° < \varphi'$)

$$N_c = 35.49,\ N_q = 23.18,\ N_\gamma = 30.21$$

$$F_{qs} = 1.625,\ F_{\gamma s} = 0.600,\ F_{qd} = 1.230,\ F_{qi} = 0.790,\ F_{\gamma i} = 0.473$$

2 경우 I: $q = 16(0.5) + (19.5 - 9.81)(0.5)$; $\gamma' = 9.69$ kN/m³ (세 번째 항에서)

$$q = \mathbf{12.845}\ \text{kPa} \qquad \gamma' = \mathbf{9.69}\ \text{kN/m}^3$$

풀이 (2/2)

풀이

3 지지력 (c = 0: 점착력 항 없음)

$$q_u = (12.845)(23.18)(1.625)(1.230)(0.790) + \tfrac{1}{2}(9.69)(1.2)(30.21)(0.600)(1)(0.473)$$
$$= 470.17 + 49.82 = \mathbf{519.99}\ \text{kPa}$$

4 허용지지압력과 하중 (A = 1.2² = 1.44 m²)

$$q_{all,g} = \frac{519.99}{3} = 173.33\ \text{kPa}$$

$$Q_{all} = 173.33(1.44) = \mathbf{249.59}\ \text{kN} \qquad \frac{Q_{all}}{\cos 10^\circ} = \mathbf{253.44}\ \text{kN}$$

5 c = 5 kPa: 점착력 항(F_{cd} = 1.241, F_{cs} = 1.653, F_{ci} = 0.790)

$$c\,N_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} = 5(35.49)(1.653)(1.241)(0.790) = 287.51 \Rightarrow q_u = \mathbf{807.50}\ \text{kPa}$$

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

전 값과 순 값, 연직 성분과 합력

이론

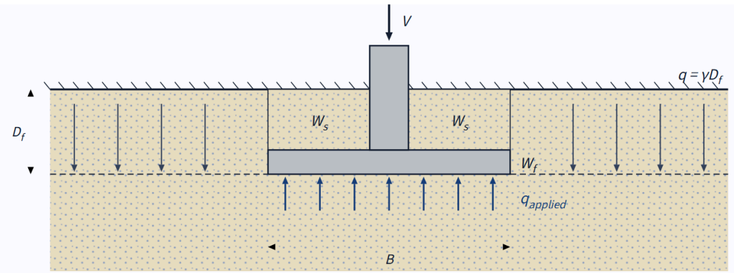
q_u는 파괴 시점의 수직 압력이다. 모듈은 **전압력**과 **순압력**을 구분하여 다룬다:

$$q_{u,net} = q_u - q \qquad q_{all,g} = \frac{q_u}{FS} \qquad q_{all,n} = \frac{q_{u,net}}{FS}$$

적용 압력 q_{app}는 사용하중 하에서 저면의 **연직 전압력** V/A이다; 경사 하중에서는 합력이 아니라 연직 성분을 면적으로 나누어 구한다. 기초는 다음 조건에서 적합하다:

$$q_{apply} \le q_{all,g} \qquad FS_{actual} = \frac{q_u}{q_{apply}} \qquad q_{apply} - q \le q_{all,n}$$

> 허용 연직하중 $Q_{all} = q_{all,g} A$; 경사각 β에서의 허용 합력은 $Q_{all}/\cos\beta$이다. q_{app} 값을 입력하지 않으면 모듈은 지지력만 제시한다.



문제

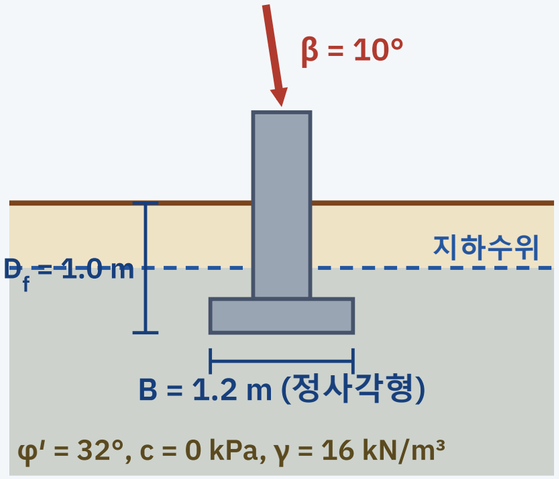
예제

조건

기초	**정사각형, B = L = 1.2 m, 기초 저면 깊이 D_f = 1.0 m**
지반	**모래:** $\varphi' = 32^\circ,\ c = 0$
단위중량	$\gamma = 16$ kN/m^3 **(상부),** $\gamma_{sat} = 19.5$ kN/m^3 **(지하수위 아래)**
지하수, 경사	**D_w = 0.5 m, β = 10° (예제 8)**
적용	**$q_{applied}$ = 150 kPa (연직, 전)**
결과 (예제 8)	**q_u = 519.99 kPa, q = 12.845 kPa, FS = 3**

구하는 값

세 가지 조건 (전 지지압력, FS_{actual}, 순 지지압력)을 검토하시오.



풀이

풀이

1 전 허용지지압력

$$q_{apply} = 150\ \text{kPa} \le q_{all,g} = 173.33\ \text{kPa} \ \Rightarrow\ \text{만족}$$

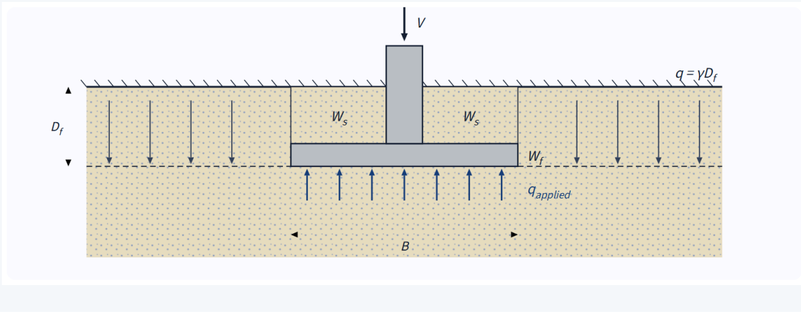
2 실제 안전율

$$FS_{actual} = \frac{q_u}{q_{apply}} = \frac{519.99}{150} = \mathbf{3.47} \ \ge 3$$

3 Net

$$q_{apply} - q = 150 - 12.845 = 137.2\ \text{kPa}$$

$$q_{all,n} = \frac{519.99 - 12.845}{3} = 169.0\ \text{kPa} \ \Rightarrow\ \text{만족}$$



기초는 세 조건 모두에서 적합하다. 수직하중 V = 150 × 1.44 = 216 kN; 합력 216/cos10° = 219.3 kN ≤ 허용 합력 253.4 kN.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

예제

조건

기초	**정사각형, B = L = 1.2 m, 기초 저면 깊이 D_f = 1.0 m**
지반	**모래: $\varphi' = 32°,\ c = 0$**
단위중량	$\gamma = 16$ kN/m^3 **(상부),** $\gamma_{sat} = 19.5$ kN/m^3 **(지하수위 아래)**
지하수, 경사	**D_w = 0.5 m, β = 10°**
비교	**Vesic N_γ = 30.21 및 Meyerhof (1963) N_γ = 22.02**

구하는 값

예제 8에서 q_u와 전 허용지지력 q_{all}은 Meyerhof의 N_γ를 적용하면 얼마가 되는가?

풀이

풀이

1 세 번째 항만 달라진다

$$\tfrac{1}{2}(9.69)(1.2)(22.02)(0.600)(0.473) = \mathbf{36.31}\ \text{kPa} \quad (\text{Vesic: } 49.82)$$

2 q_u와 q_{all}

$$q_u = 470.17 + 36.31 = \mathbf{506.48}\ \text{kPa} \qquad q_{all,g} = 168.83\ \text{kPa}$$

이 기초에서 차이는 **2.6%**에 불과하다(520 → 506 kPa). 자중 항은 q_u의 약 10%이다. **폭이 넓은 기초**이고 상재하중이 작으면 자중 항이 지배적이 되어 N_γ 선택이 결과를 뚜렷하게 바꾼다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

요약

핵심 정리

일반식: $q_u = cN_cF_{c.} + qN_qF_{q.} + ½\gamma BN_\gamma F_{\gamma.}$; 형상(s), 깊이(d), 경사(i) 계수 포함

Meyerhof 이론: 쐐기 45° + φ/2, 방사 영역, 혼합 영역; 기초 저면 위는 등가 자유표면(p_o, s_o, m, η, β)로 나타낸다

지표면 기초: $N_q = e^{\pi \tan\varphi}\tan^2(45° + \varphi/2)$ (Reissner), $N_c = (N_q - 1)\cot\varphi$ (Prandtl); $N_\gamma = 2(N_q + 1)\tan\varphi$ (Vesic)

De Beer 형상계수, **Hansen** 깊이계수, **Meyerhof** 경사계수; φ = 0일 때 $N_c = 5.14$, $N_q = 1$, $N_\gamma = 0$

지하수는 q와 γ만 변화시키며 (3가지 경우), 계수는 바꾸지 않는다

검토: $q_{applied} \le q_{all,g}$, FS_{actual} 및 순 값; 경사하중에서 허용 합력은 $Q_{all}/\cos\beta$

참고문헌

Meyerhof, G.G. (1951). The ultimate bearing capacity of foundations. Géotechnique, 2(4), 301–332.

Meyerhof, G.G. (1963). Some recent research on the bearing capacity of foundations. Canadian Geotechnical Journal, 1(1), 16–26.

Das, B.M. (2017). Shallow Foundations: Bearing Capacity and Settlement, 3rd ed. CRC Press — Sections 2.4–2.5; 본 페이지는 이 문헌의 유도 순서를 따른다 (본문 내 “주 출처”).

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage — 일반 지지력 공식 및 그 계수 (본문 내 “보조 출처”).

Reissner, H. (1924). Zum Erddruckproblem. Proc. 1st Int. Congress of Applied Mechanics, Delft, 295–311.

Prandtl, L. (1921). Über die Eindringungsfestigkeit (Härte) plastischer Baustoffe und die Festigkeit von Schneiden. ZAMM, 1(1), 15–20.

Vesic, A.S. (1973). Analysis of ultimate loads of shallow foundations. JSMFD, ASCE, 99(SM1), 45–73.

De Beer, E.E. (1970). Experimental determination of the shape factors and the bearing capacity factors of sand. Géotechnique, 20(4), 387–411.

Hansen, J.B. (1970). A revised and extended formula for bearing capacity. Danish Geotechnical Institute Bulletin 28.

그림은 파괴 파괴 메커니즘 자체에서 작도되었으며, Nq 도표는 본 페이지의 수식으로 산정되었다.

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 강의의 예제 기초를 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