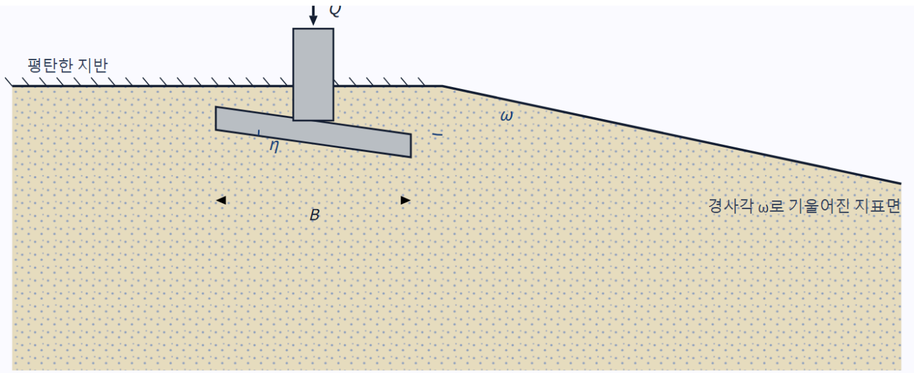
지반공학 강의 자료 · 기초

Hansen 지지력 공식

강의: Hansen 자신의 N_γ 계수에서 형상 및 깊이 보정까지, 실제 하중에 따라 달라지는 경사계수에서 저면 경사와 지표 경사까지; 주제별 계산 예제.

Hansen N_γ | 형상 · 깊이 | 실제 하중에 따른 경사 | 저면 및 지표 경사 | 비배수 가산형 | 계산 예제



개요

이 강의에서 다루는 내용

- **Hansen 식**의 세 항과 각 항의 여섯 가지 보정계수(형상, 깊이, 하중경사, 저면경사, 지표경사)를 알아보는 것
- Hansen의 **고유한 N_γ 계수**를 계산하고 Vesic의 값과 비교하기
- **형상계수**와 **깊이계수**를, $D_f/B = 1$에서의 전이를 포함하여 적용하기
- **하중경사계수**를 실제 하중 h, v로 계산하고 전단 한계를 검토하기
- **저면경사 η** 및 **지표경사 ω** 계수의 적용
- 비배수($\varphi = 0$) **전응력 형태**와 지하수 조건을 다루기
- 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): c = 10 kPa, φ′ = 25°인 지반 위의 2 m × 2 m 정사각형 기초, D_f = 1 m, γ = 18 kN/m³, 지하수 없음.

세 개의 항, 각 항의 여섯 가지 보정

이론

Hansen (1970)은 지지력 방정식을 자신의 파괴 메커니즘으로, Vesic과 독립적으로 유도하였다. 각 항에는 곱해지는 **여섯 가지 보정계수**가 포함된다:

$$
\begin{aligned}
q_u = {} & c\,N_c\,s_c d_c i_c b_c g_c \\
& + q\,N_q\,s_q d_q i_q b_q g_q \\
& + \tfrac{1}{2}\gamma B\,N_\gamma\,s_\gamma d_\gamma i_\gamma b_\gamma g_\gamma
\end{aligned}
$$

N_c와 N_q는 이 절의 모든 방법에서 동일하다(Prandtl과 Reissner의 닫힌 형태 식). **N_γ는 Hansen에 고유한 값**이며 동일한 φ′에서 Vesic의 값보다 작다.

형상(s), **깊이**(d), **하중경사**(i), **저면경사**(b), **지표경사**(g) 계수는 Hansen 고유의 계수 체계이며, 경사하중, 경사진 기초 저면, 경사진 지표면이 하나의 식에서 함께 다루어진다.

저면이 수평이고 지표가 수평이며 하중이 수직이면 **i = b = g = 1**이 된다: 식은 형상계수와 깊이계수를 포함한 일반식으로 환원된다.

표기

c, φ′: 점착력, 내부마찰각

q = γ D_f: 기초 저면 높이의 상재하중

B, L: 짧은 변과 긴 변; B/L이 형상을 결정한다

h, v: 하중 조건의 H/A 및 V/A 압력

η: 기초 저면의 수평면에 대한 경사

ω: 기초 옆 지표면의 경사

Hansen의 N_γ는 Vesic의 값보다 작다

이론

N_c와 N_q는 모든 방법에서 동일하다:

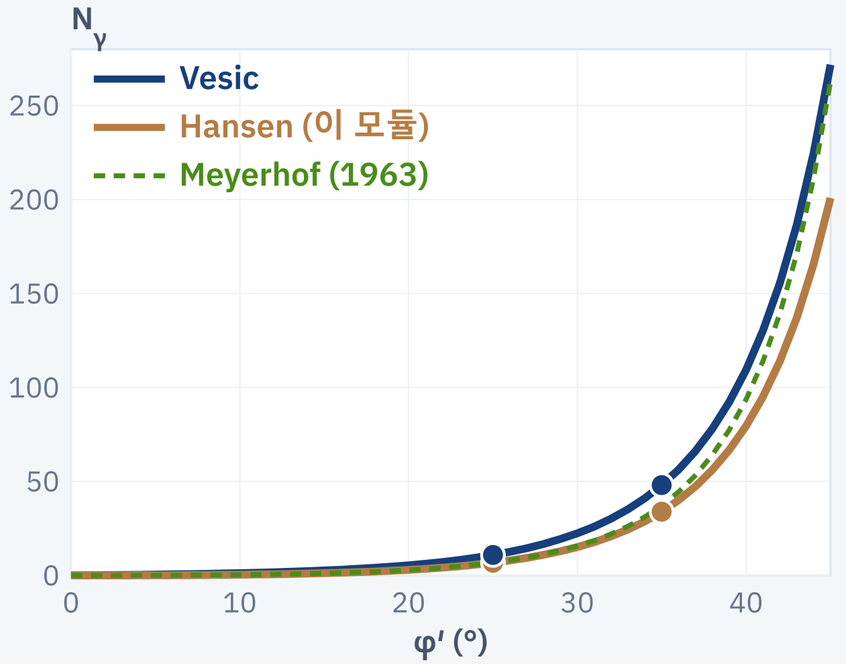
$$N_q = e^{\pi \tan\varphi} \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \qquad N_c = (N_q - 1)\cot\varphi$$

N_γ에 대해서는 닫힌 형태이면서 널리 인정되는 식이 없다. Hansen은 파괴면을 다소 다르게 이상화하여 자신의 식을 얻었다:

$$N_\gamma^{\text{Hansen}} = 1.5\,(N_q - 1)\tan\varphi \qquad N_\gamma^{\text{Vesic}} = 2\,(N_q + 1)\tan\varphi$$

두 방법 모두 신뢰할 만한 유도 결과이며, 어느 것도 절대적인 의미에서 "더 정확한" 것은 아니다. 중요한 것은 **동일한 방법의 계수를 함께 사용하는 것**이다: Hansen의 N_γ는 Hansen의 형상계수 및 경사계수와 함께 사용한다.

φ′가 커질수록 차이는 상대적으로 줄어들지만 사라지지는 않는다; φ′ = 25°에서 Hansen의 값은 Vesic 값의 62%이다.



문제

예제

조건

지반	$\varphi' = 25^\circ$ **(모듈이 열리는 모델); 비교용** $\varphi' = 35^\circ$
방법	**Hansen:** $N_\gamma = 1.5(N_q - 1)\tan\varphi$ **· Vesic:** $N_\gamma = 2(N_q + 1)\tan\varphi$

구하는 값

N_q, N_c와 두 방법에 따른 **N_γ** 값을 구하라; Hansen의 값이 Vesic의 값보다 몇 퍼센트 작은지 계산하라.

풀이 (1/2)

풀이

1 N_q 및 N_c ($\varphi' = 25°$, $\tan 25° = 0.4663$)

$$N_q = e^{\pi \tan 25^\circ} \tan^2(57.5^\circ) = e^{1.4649}(2.4639) = \mathbf{10.66} \qquad N_c = \frac{10.66 - 1}{0.4663} = \mathbf{20.72}$$

2 N_γ: Hansen과 Vesic

$$N_\gamma^{\text{Hansen}} = 1.5(10.66 - 1)(0.4663) = \mathbf{6.76}$$
$$N_\gamma^{\text{Vesic}} = 2(10.66 + 1)(0.4663) = \mathbf{10.88}$$

Hansen의 N_γ는 Vesic의 값의 **62%** 수준이며, 같은 지반에서 자중 항이 약 **38% 더 작게** 나온다.

풀이 (2/2)

풀이

φ′ (°)	N_q	N_c	N_γ Hansen	N_γ Vesic	Hansen / Vesic
10	2.47	8.34	0.39	1.22	%32
15	3.94	10.98	1.18	2.65	%45
20	6.40	14.83	2.95	5.39	%55
25	10.66	20.72	6.76	10.88	%62
30	18.40	30.14	15.07	22.40	%67
32	23.18	35.49	20.79	30.21	%69
35	33.30	46.12	33.92	48.03	%71
40	64.20	75.31	79.54	109.41	%73
45	134.87	133.87	200.81	271.75	%74

φ′ = 35°에서도 마찬가지이다: N_γ = 33.92(Hansen) 및 48.03(Vesic)이며 비는 71%이다. 이 비는 φ′가 커짐에 따라 32%에서 74%로 올라가지만 결코 1이 되지 않는다: **방법을 혼용하지 말 것**.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

B/L 비에 따른 세 계수

이론

연속기초가 아닌 기초에서는 파괴가 3차원이다. Hansen의 형상계수는 De Beer의 것과 유사하며, **N_q/N_c 비**를 포함한다:

$$s_c = 1 + \frac{B}{L}\frac{N_q}{N_c} \qquad s_q = 1 + \frac{B}{L}\sin\varphi \qquad s_\gamma = 1 - 0.4\,\frac{B}{L}$$

비배수 재하(φ = 0)에서는 N_q/N_c 비가 제대로 거동하지 않으며, 점착력 계수는 고유의 단순한 형태를 취한다. 이 계수는 곱셈 인자가 아니라 **가산적**이므로 s'_c로 쓴다:

$$s'_c = 0.2\,\frac{B}{L} \qquad (\varphi = 0)$$

연속기초(B/L → 0): $s_c = s_q = s_\gamma = 1$이고 $s'_c = 0$이다. 정사각형 및 원형 기초에서는 B/L = 1로 취한다.

De Beer와의 비교: s_c와 s_γ는 같고, s_q에서는 De Beer는 tan φ를, Hansen은 sin φ를 사용한다.

φ′ = 25°인 경우

B/L	s_c	s_q	s_γ
0 (띠)	1,000	1,000	1,000
0.5	1.257	1.211	0.800
1 (정사각형)	1.515	1.423	0.600

문제

예제

조건	
지반	$\varphi' = 25°$: $N_c = 20.72,\ N_q = 10.66,\ \sin 25° = 0.4226$ **(예제 1)**
기초	**(a) 정사각형 2 × 2 m · (b) 직사각형 2 × 4 m (B/L = 0.5) · (c) 띠형**
비배수	**φ = 0: 정사각형과 2 × 4 m**

구하는 값

각 기초에 대해 **s_c, s_q, s_γ**(φ = 0일 때 s'_c)의 값을 구하고,
정사각형기초에서는 s_q를 De Beer의 값과 비교하시오.

풀이

풀이

1 (a) 정사각형기초 (B/L = 1)

$$s_c = 1 + (1)\frac{10.66}{20.72} = \mathbf{1.515} \qquad s_q = 1 + \sin 25^\circ = \mathbf{1.423} \qquad s_\gamma = 1 - 0.4 = \mathbf{0.600}$$

2 (b) 직사각형 2 × 4 m (B/L = 0.5)

$$s_c = 1 + 0.5\frac{10.66}{20.72} = \mathbf{1.257} \qquad s_q = 1 + 0.5(0.4226) = \mathbf{1.211} \qquad s_\gamma = 1 - 0.2 = \mathbf{0.800}$$

3 (c) 연속기초와 비배수 조건 (φ = 0)

$$\text{띠}: \; s_c = s_q = s_\gamma = 1 \qquad \varphi = 0: \; s_c' = 0.2\,(\text{정사각형}),\; 0.1\,(2\times 4),\; 0\,(\text{띠})$$

정사각형기초에서 q 항은 **42%** 증가하고 자중항은 40% 감소한다. De Beer의 $s_q = 1 + \tan\varphi = 1.466$, Hansen의 1.423: 차이는 약 3%이다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

선형식과 아크탄젠트식

이론

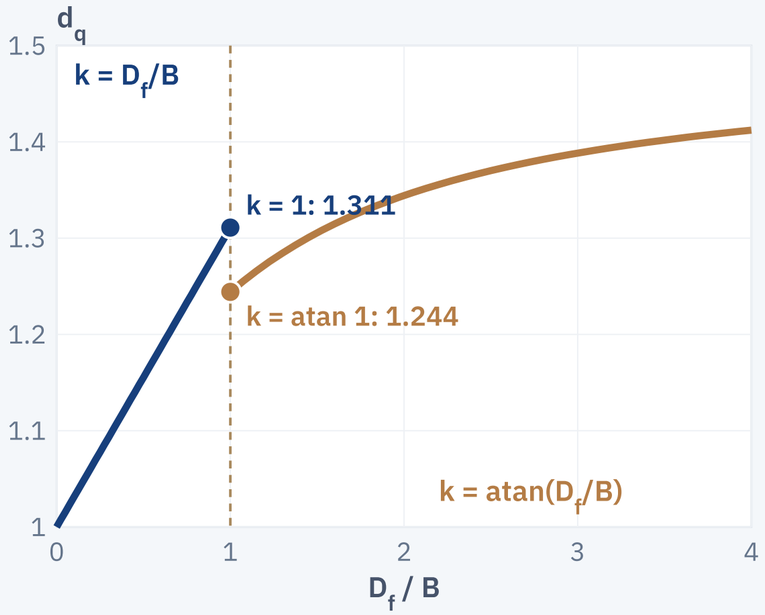
기초 저면 위의 지반은 지지력에 기여한다. Hansen의 깊이계수는 **k = D_f/B** 비에 따라 달라지며, D_f/B가 1을 넘으면 k는 아크탄젠트(라디안)로 취한다:

$$d_c = 1 + 0.4\,k \qquad d_q = 1 + 2\tan\varphi\,(1-\sin\varphi)^2\,k \qquad d_\gamma = 1$$

$$k = \frac{D_f}{B}\ \left(\frac{D_f}{B} \le 1\right) \qquad k = \tan^{-1}\frac{D_f}{B}\ \left(\frac{D_f}{B} > 1\right)$$

φ = 0에서 d_q = 1이며, 비배수 가산 형식에서는 $d'_c = d_c - 1 = 0.4\,k$로 쓴다.

두 식은 D_f/B = 1에서 계단식 불연속으로 만난다: k = 1일 때 d_q = 1.311이고, 그 바로 너머에서는 $k = \tan^{-1}1 = 0.785$, d_q = 1.244이다. 따라서 인접한 D_f 값끼리 비교하는 것이 적절하다.



문제

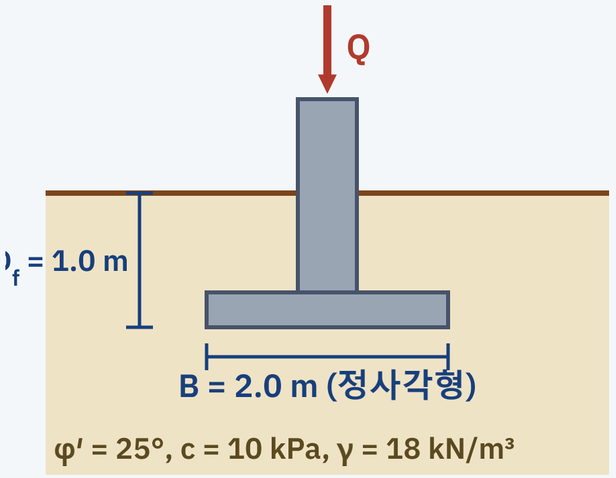
예제

조건

지반	$\varphi' = 25°$: $\tan\varphi = 0.4663$, $(1 - \sin 25°)^2 = 0.3334$
기초	**B = 2 m; D_f = 1 m (예제), 비교용 D_f = 2 m 및 3 m**
비배수	**φ = 0: D_f = 1.5 m**

구하는 값

각 경우에 대해 **d_c, d_q** 및 d_γ의 값을 구하고, D_f가 2 m에서 3 m로 증가할 때 어떤 일이 일어나는지 설명하라.



풀이

풀이

1 D_f = 1 m (D_f/B = 0.5 ≤ 1: k = 0.5)

$$d_q = 1 + 2(0.4663)(0.3334)(0.5) = \mathbf{1.155} \qquad d_c = 1 + 0.4(0.5) = \mathbf{1.200} \qquad d_\gamma = 1$$

2 D_f = 2 m (D_f/B = 1: 선형, k = 1) 및 D_f = 3 m (D_f/B = 1.5: k = $\tan^{-1}1.5$ = 0.9828)

$$D_f = 2: \; d_q = 1 + 2(0.4663)(0.3334)(1) = \mathbf{1.311}, \; d_c = \mathbf{1.400}$$

$$D_f = 3: \; d_q = 1 + 2(0.4663)(0.3334)(0.9828) = \mathbf{1.306}, \; d_c = \mathbf{1.393}$$

3 비배수 (φ = 0): D_f/B = 1.5/2 = 0.75

$$d_c = 1 + 0.4(0.75) = \mathbf{1.300} \quad (d_c' = 0.3) \qquad d_q = 1$$

D_f = 2 m → 3 m: d_q는 1.311 → 1.306으로 **감소한다**. k가 1에서 $\tan^{-1}1.5$ = 0.98로 바뀌기 때문이다 (단계 변화). 반면 D_f = 1 → 2 m에서는 1.155 → 1.311로 증가한다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

각도가 아니라 실제 하중으로

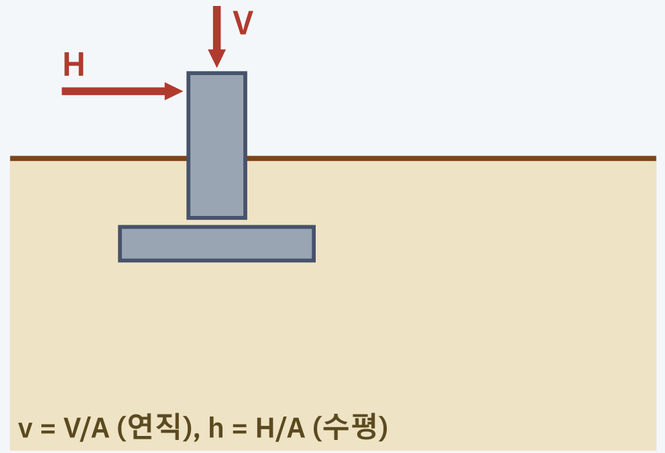
이론

Meyerhof의 경사계수는 하중이 연직선과 이루는 각만 고려한다. Hansen의 경사계수는 **실제 수평응력과 연직응력**을 고려한다. h = H/A와 v = V/A는 동일한 하중 상태의 응력이다(v = q_{app}):

$$i_q = \left(1 - \frac{0.5\,h}{v + c\cot\varphi}\right)^5 \qquad i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_q - 1} \;\; (\geq 0)$$

$$i_\gamma = \left(1 - \frac{0.7\,h}{v + c\cot\varphi}\right)^5$$

$$\eta > 0: \; 0.7 \to 0.7 - \frac{\eta^\circ}{450^\circ} \; (i_\gamma) \qquad \varphi = 0: \; i'_c = 0.5\left(1 - \sqrt{1 - \frac{h}{c}}\right), \; i_q = i_\gamma = 1$$



h > 0이면 $q_{applied}$를 입력해야 한다: 하중경사계수를 사용한 기초 검토에는 **같은 하중**이 사용된다.

h/(v + c cot φ)가 커질수록 세 계수는 모두 0으로 향하며, 하중이 활동 상태에 가까워지는 기초는 지지력이 남지 않는다.

기초 저면은 활동이 일어나기 전에 지지력에 도달하지 않음

이론

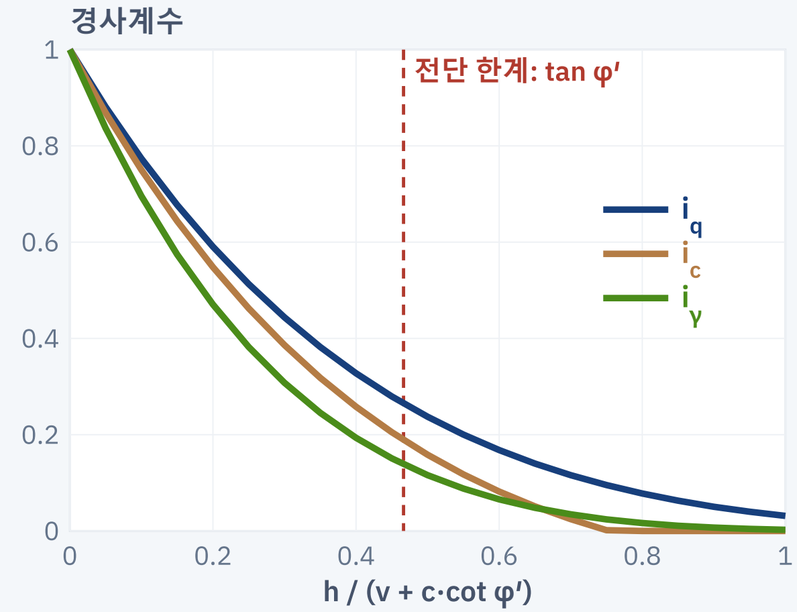
기초는 수평하중이 저면의 마찰 및 부착 저항을 초과하면 **활동한다**. 상한 (저면 마찰 φ, 부착 c를 취함):

$$h_{shear} = v\tan\varphi + c = \tan\varphi\,(v + c\cot\varphi)$$

h > v tan φ + c인 경우 모듈이 경고한다: 활동하는 기초는 지지력에 도달할 수 없으므로 실제 저면에 대해서는 활동을 별도로 검토한다. 그래프에서 이 한계는 **h/(v + c cot φ) = tan φ** 직선이다.

h ≥ v + c cot φ(φ = 0일 때 h ≥ c)이면 모듈이 중단된다: 하중경사계수가 의미를 잃는다.

i_c, i_q가 $1/N_q$ 미만으로 내려가면 0으로 유지되며, 점착력 항은 음수가 되지 않는다.



문제

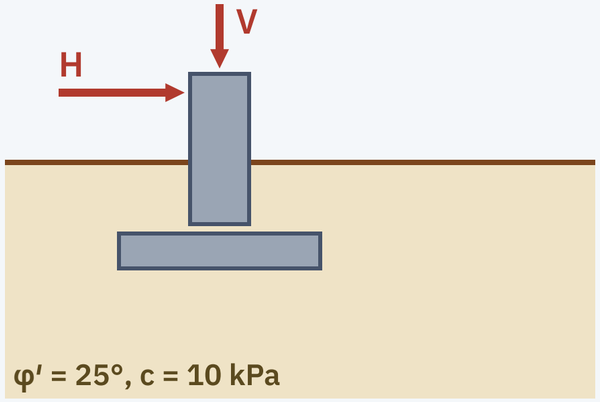
예제

조건

기초, 지반	**모듈 모델:** $c = 10$ kPa, $\varphi' = 25°$, $N_q = 10.66$
하중 조건	$v = q_{apply} = 150$ kPa, $h = 30$ kPa **(ek: 60, 90, 120)**
저면	**수평 (η = 0)**

구하는 값

i_c, i_q, i_γ 계수를 구하고 활동 한계를 검토하라.



풀이 (1/2)

풀이

1 비: v + c cot φ = 150 + 10 (2.1445) = 171.45 kPa

$$x = \frac{h}{v + c\cot\varphi} = \frac{30}{171.45} = \mathbf{0.1750}$$

2 계수

$$i_q = (1 - 0.5 \cdot 0.175)^5 = \mathbf{0.633} \qquad i_\gamma = (1 - 0.7 \cdot 0.175)^5 = \mathbf{0.520}$$

$$i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_q - 1} = 0.633 - \frac{0.367}{9.66} = \mathbf{0.595}$$

3 활동 경계

$$v\tan\varphi + c = 150(0.4663) + 10 = \mathbf{79.9}\ \text{kPa} \geq h = 30 \ \Rightarrow\ \text{활동 없음}$$

$$v + c\cot\varphi = 171.4\ \text{kPa} > h$$

풀이 (2/2)

풀이

h (kPa)	h/(v + c cot φ)	i_c	i_q	i_γ	활동 검토
0	0.000	1.000	1.000	1.000	통과
30	0.175	0.595	0.633	0.520	통과
60	0.350	0.318	0.382	0.245	통과
90	0.525	0.137	0.218	0.101	**경고: h > 79.9**
120	0.700	0.025	0.116	0.035	**경고: h > 79.9**

h = 30 kPa(v의 20%)에서 q항은 **37%**, c항은 **41%**, 자중항은 **48%** 감소한다. 기초 저면이 10° 기울어져 있으면 $i_\gamma = (1 - (0.7 - 10/450)\cdot 0.175)^5 = 0.532$가 된다. 한계를 초과하는 h = 90 및 120 kPa에서는 기초가 활동한다. 계수는 여전히 계산되지만 활동 검토를 별도로 수행해야 한다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

평탄하지 않은 저면과 경사 지반

이론

실제 기초가 항상 수평 저면이나 수평 지반 위에 놓이는 것은 아니다: 저면을 의도적으로 경사지게 만들 수 있으며, 기초가 사면의 상단에 위치할 수도 있다. Hansen의 계수는 두 경우를 모두 포괄한다(η와 ω는 도 단위, 지수식에서는 라디안):

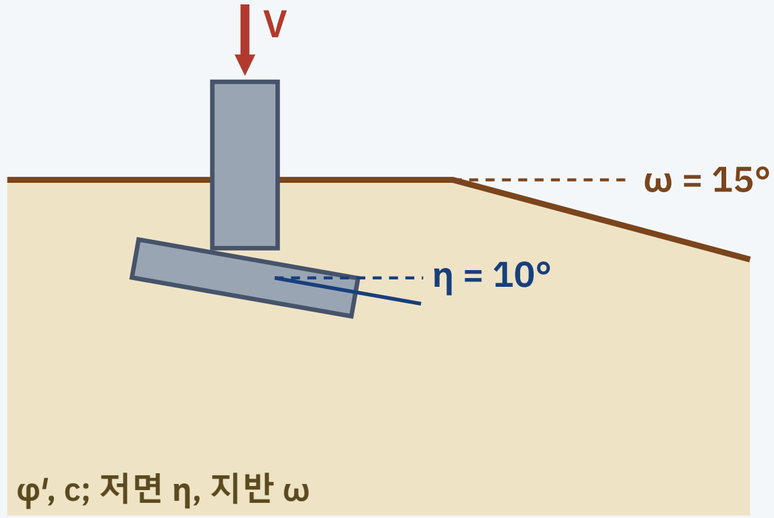
$$b_c = 1 - \frac{\eta^\circ}{147^\circ} \qquad b_q = e^{-2\eta \tan\varphi} \qquad b_\gamma = e^{-2.7\,\eta \tan\varphi}$$

$$g_c = 1 - \frac{\omega^\circ}{147^\circ} \qquad g_q = g_\gamma = (1 - 0.5\tan\omega)^5$$

b_γ의 지수(2.7)가 b_q의 지수(2)보다 크다: 경사진 저면은 자중 항에 상재하중 항보다 더 큰 악영향을 준다.

η와 ω는 최대 45°까지 입력할 수 있으며, ω > φ이면 사면은 스스로 평형을 이루지 못하여 모듈이 중단된다.

$(1 - \tan\omega)^2$은 Hansen의 식이 아니라 **Vesic**의 형태이며 약간 더 크다: ω = 5°에서 0.833, Hansen의 값은 0.800. 이 식을 Hansen의 식과 혼동해서는 안 된다.



문제

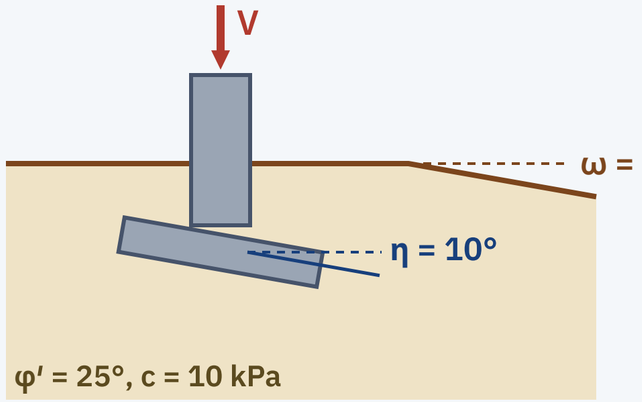
예제

조건

지반	$\varphi' = 25^\circ,\ \tan\varphi = 0.4663$
저면 경사	**η = 10°**
지표 경사	**ω = 10°와 ω = 15°**

구하는 값

b_c, b_q, b_γ와 **g_c, g_q, g_γ**의 값을 구하시오; g_q를 Vesic의 $(1 - \tan\omega)^2$ 형태와 비교하시오.



풀이 (1/2)

풀이

1 저면 경사 η = 10° (0.1745 rad)

$$b_c = 1 - \frac{10}{147} = \mathbf{0.932} \quad b_q = e^{-2(0.1745)(0.4663)} = \mathbf{0.850} \quad b_\gamma = e^{-2.7(0.1745)(0.4663)} = \mathbf{0.803}$$

2 지표 경사 ω = 10° (tan 10° = 0.1763)

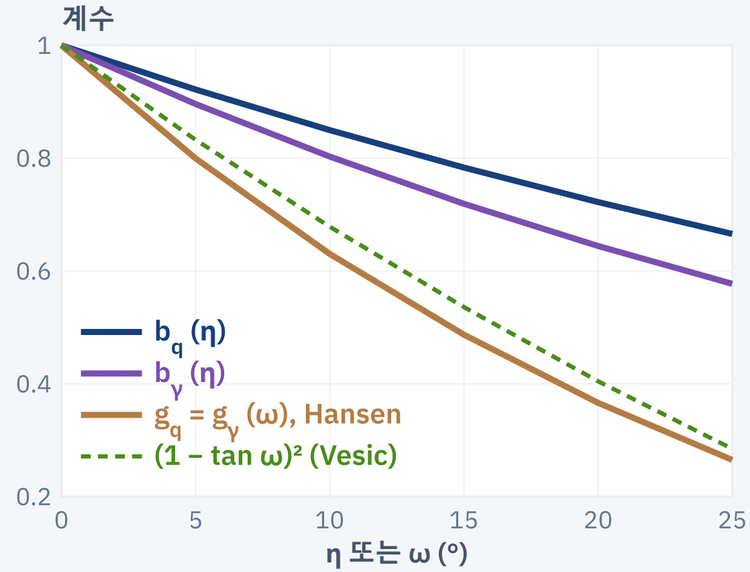
$$g_c = 1 - \frac{10}{147} = \mathbf{0.932} \quad g_q = g_\gamma = (1 - 0.5 \cdot 0.1763)^5 = (0.9118)^5 = \mathbf{0.630}$$

풀이 (2/2)

풀이

ω (°)	g_c	$g_q = g_\gamma$ Hansen	g_q Vesic $(1 - \tan \omega)^2$
10	0.932	0.630	0.678
15	0.898	0.487	0.536

Hansen의 g_q는 Vesic의 값보다 작으며(ω = 10°: 0.630과 0.678), 더 **보수적이다**. 저면 경사 η = 10°는 자중항을 20%, 상재하중항을 15% 감소시킨다.



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

여섯 계수의 조합

이론

여섯 개의 계수가 부담스러워 보이지만 **일반적인 경우에는 모두 1이다**. 전체 식은 가정 하나가 깨질 때에만 적용된다. q_u는 파괴 시점의 연직압력이며, 모듈은 전압력과 순압력을 따로 유지한다:

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

적용 압력 $q_{applied}$는 같은 하중 조건에서 저면의 **수직 총압력**(V/A)이다. 기초는 다음 조건에서 적합하다:

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

허용 연직하중 $Q_{all} = q_{all,g} \cdot A$. $h > 0$일 때 $q_{applied}$ 값을 입력하지 않으면 모듈은 지지력뿐 아니라 경사계수도 계산할 수 없다.

계수는 언제 1이 되는가?

계수	1인 경우
s	연속기초 (B/L = 0)
d	D_f = 0 (저면이 지표에 위치)
i	h = 0 (수직하중)
b	η = 0 (수평 저면)
g	ω = 0 (수평 지반)

계수는 변하지 않고 q와 γ가 변한다

이론

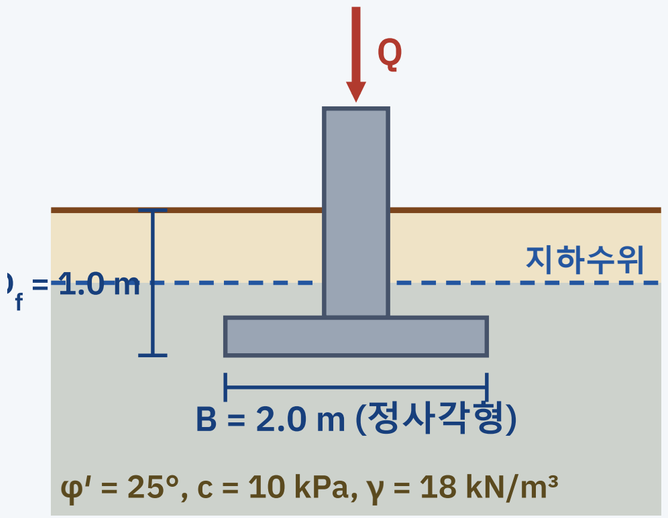
Hansen 모듈은 지하수를 다른 지지력 모듈과 **동일한 세 가지 경우**로 다룬다. 지하수위 아래에서 유효단위중량은 $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ ($\gamma_w = 9.81$)이다. D_w는 지표면에서 지하수까지의 깊이이다:

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

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

$D_w = D_f$인 경우 $q = \gamma D_f$이며, 세 번째 항에는 γ'를 사용한다.

기초 저면 아래 B보다 깊은 곳의 물은 **영향이 없다**. 물은 **q와 γ**를 통해서만 작용하며, s, d, i, b, g는 변하지 않는다.



문제

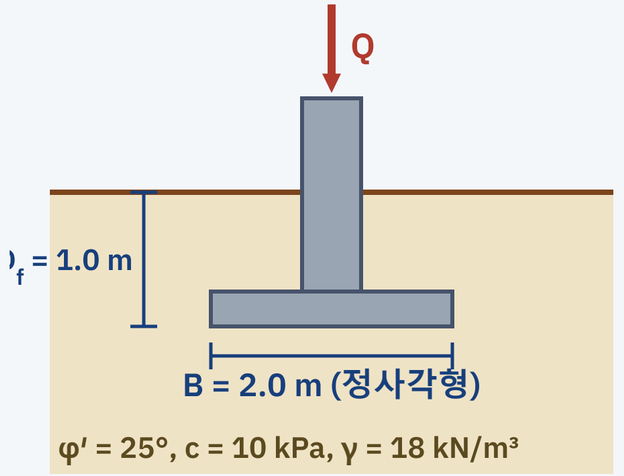
예제

조건

기초	**정사각형, B = L = 2.0 m, 기초 저면 깊이 D_f = 1.0 m**
지반	$c = 10$ kPa, $\varphi' = 25°$
단위중량	$\gamma = 18$ kN/m^3**; 지하수 없음**
하중	**연직, 중심**
안전	**FS = 3**

구하는 값

q_u, 총 및 순 q_{all}, 허용하중 Q_{all}; 각 항의 기여도를 구하라.



풀이 (1/2)

풀이

1 지지력계수 (φ′ = 25°)

$$N_c = \mathbf{20.72}, \quad N_q = \mathbf{10.66}, \quad N_\gamma = 1.5(10.66-1)(0.4663) = \mathbf{6.758}$$

2 보정계수 (B/L = 1; D_f/B = 0.5; h = η = ω = 0)

$$s_c = 1.515,\ s_q = 1.423,\ s_\gamma = 0.6 \qquad d_c = 1.200,\ d_q = 1.155,\ d_\gamma = 1 \qquad i = b = g = 1$$

풀이 (2/2)

풀이

3 지지력 ($q = \gamma D_f = 18$ kPa)

$$q_u = 10(20.72)(1.515)(1.200) + 18(10.66)(1.423)(1.155)$$
$$+ \tfrac{1}{2}(18)(2)(6.758)(0.6) = 376.6 + 315.5 + 73.0 = \mathbf{765.05}\ \text{kPa}$$

4 허용지지압력과 하중 ($A = 2^2 = 4$ m²)

$$q_{all,g} = \frac{765.05}{3} = \mathbf{255.02}\ \text{kPa} \qquad q_{all,n} = \frac{765.05 - 18}{3} = 249.02\ \text{kPa}$$

$$Q_{all} = 255.02(4) = \mathbf{1{,}020}\ \text{kN}$$

지지력의 **49%**는 점착력에서, **41%**는 상재하중에서 나오고, 자중에서 나오는 것은 **10%**뿐이다: 작은 N_γ와 $s_\gamma = 0.6$이 자중항을 약화시킨다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

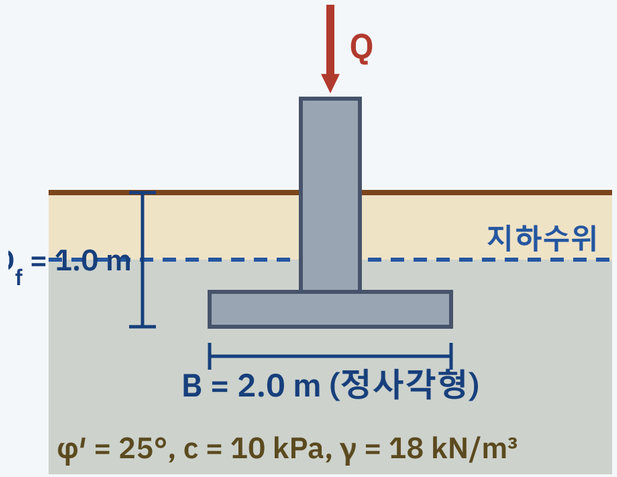
예제

조건

기초	**정사각형, B = L = 2.0 m, D_f = 1.0 m**
지반	$c = 10$ kPa, $\varphi' = 25°$
단위중량	$\gamma = 18$ **(상부),** $\gamma_{sat} = 19$ kN/m^3 **(지하수위 아래)**
지하수	**D_w = 0.5; 1.0; 2.0 및 4.0 m**

구하는 값

각 경우의 **q**, 세 번째 항의 단위중량, **q_u** 값을 구하라. (계수는 예제 6과 같다.)



풀이 (1/2)

풀이

1 경우 I ($D_W \le D_f$): $\gamma' = 19 - 9.81 = 9.19$ kN/m³

$$D_w = 0.5: \ q = 18(0.5) + 9.19(0.5) = \mathbf{13.595}\ \text{kPa}$$

$$D_w = 1.0: \ q = 18(1.0) = \mathbf{18.0}\ \text{kPa}$$

2 경우 III($D_W = 2.0 \Rightarrow D = 1.0 \le B$)와 물의 영향이 없는 경우($D_W = 4.0 \Rightarrow D = 3.0 > B$)

$$D_w = 2.0: \ \bar{\gamma} = \frac{1}{2}\left[18(1) + 9.19(1)\right] = \mathbf{13.595}\ \text{kN/m}^3,\ q = 18\ \text{kPa}$$

$$D_w = 4.0: \ q = 18\ \text{kPa},\ \gamma = 18\ \text{kN/m}^3$$

풀이 (2/2)

풀이

D_w (m)	상태	q (kPa)	γ 세 번째 항	q_u (kPa)
0.5	I	13.59	9.19	**652.1**
1.0	I	18.00	9.19	**729.3**
2.0	III	18.00	13.59	**747.2**
4.0	영향 없음	18.00	18.00	**765.1**

지하수위가 0.5 m일 때 q_u = 652, 지하수위가 깊을 때 765 kPa(15% 차이)이다. 차이의 원인은 **q와 γ뿐**이며, 점착력 항(376.6 kPa)은 전혀 변하지 않는다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

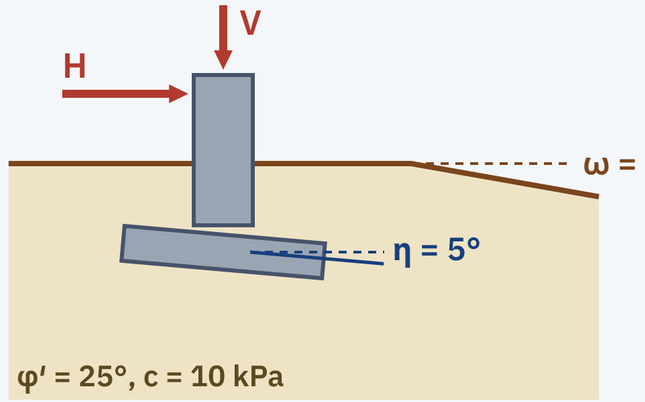
예제

조건

기초	**정사각형, B = L = 2.0 m, 기초 저면 깊이 D_f = 1.0 m**
지반	$c = 10$ kPa, $\varphi' = 25^\circ$
단위중량	$\gamma = 18$ kN/m^3; **지하수 없음**
하중 조건	$v = q_{apply} = 150$ kPa, $h = 30$ kPa
저면, 지반	**η = 5°, ω = 10°**
안전	**FS = 3**

구하는 값

q_u와 **q_{all}** 값을 구하라; 기초가 $q_{applied}$ = 150 kPa에 대해 적합한지 검토하라; 활동을 검토하라.



풀이 (1/3)

풀이

1 경사계수 (v + c cot φ = 171.45 kPa; 저면 경사: 0.7 → 0.7 − 5/450 = 0.6889)

$$x = \frac{30}{171.45} = 0.175 \qquad i_q = (1 - 0.5x)^5 = \mathbf{0.633} \qquad i_c = \mathbf{0.595}$$

$$i_\gamma = (1 - 0.6889x)^5 = \mathbf{0.526}$$

2 저면경사계수 및 지표경사계수 (η = 5°, ω = 10°)

$$b_c = 0.966,\ b_q = 0.922,\ b_\gamma = 0.896$$

$$g_c = 0.932,\ g_q = g_\gamma = (1 - 0.5\tan 10^\circ)^5 = 0.630$$

풀이 (2/3)

풀이

3 세 개의 항 (형상계수와 깊이계수는 예제 6과 동일)

$$c\text{ 항} = 10(20.72)(1.515)(1.20)(0.595)(0.966)(0.932) = 201.6$$

$$q\text{ 항} = 18(10.66)(1.423)(1.155)(0.633)(0.922)(0.630) = 116.0$$

$$\gamma\text{ 항} = \tfrac{1}{2}(18)(2)(6.758)(0.6)(1)(0.526)(0.896)(0.630) = 21.7$$

4 지지력과 허용압력

$$q_u = 201.6 + 116.0 + 21.7 = \mathbf{339.3}\ \text{kPa} \qquad q_{all,g} = \frac{339.3}{3} = \mathbf{113.1}\ \text{kPa}$$

풀이 (3/3)

풀이

5 검토 (q_{app} = 150 kPa)

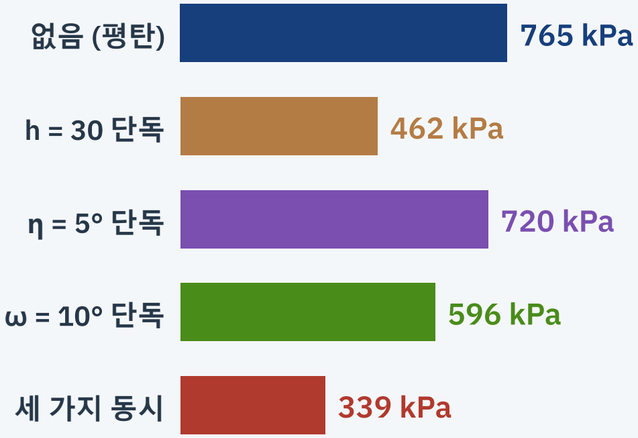
$$q_{apply} = 150 > q_{all,g} = 113.1 \;\Rightarrow\; \textbf{만족하지 않음}$$

$$FS_{실제} = \frac{339.3}{150} = \mathbf{2.26} < 3$$

6 활동 경계

$$h = 30 \le v\tan\varphi + c = 79.9\ \text{kPa} \;\Rightarrow\; \text{활동 경고 없음}$$

수평 지반 모델에서 765 kPa인 q_u가 이 하중 조건에서는 **339 kPa**(56%)로 감소한다. 개별 영향은 수평하중 **–40%**, 지표 경사 –22%, 저면 경사 –6%이다. 기초는 부적합하다 (FS = 2.26 < 3); 대책: B 또는 D_f 증가, h 감소, 저면 수평화.



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

φ = 0: 점착력 항을 가산 형태로 표기

이론

φ = 0에서는 곱셈형 점착력 항을 사용하지 않는다. Hansen은 이를 **가산형**으로 표현한다: 보정값이 1에 가산되거나 감산되므로 h, η, ω가 영일 때에도 점착력 항이 소멸하지 않는다. $N_c = 5.14$, $N_q = 1$, $N_\gamma = 0$:

$$q_u = c\,N_c\,(1 + s'_c + d'_c - i'_c - b'_c - g'_c) + q\,g_q$$

$$s'_c = 0.2\frac{B}{L} \quad d'_c = 0.4k \quad i'_c = 0.5\left(1 - \sqrt{1 - \frac{h}{c}}\right) \quad b'_c = \frac{\eta^\circ}{147^\circ} \quad g'_c = \frac{\omega^\circ}{147^\circ}$$

상재하중 항은 q g_q로 단순화된다: 평탄한 지반에서는 q뿐이다. 자중 항은 없다($N_\gamma = 0$).

h < c이어야 한다; h ≥ c이면 저면이 활동하며 모듈이 중단된다. 괄호 항도 양수로 유지되어야 한다(h, η, ω가 모두 매우 크면 점착력 항이 음수가 된다).

예제: c = 40 kPa, 2 m 정사각형, D_f = 1 m

계수	값
$s'_c = 0.2(B/L)$	0.2
$d'_c = 0.4\,k$ (k = 0.5)	0.2
i'_c, b'_c, g'_c	0
괄호	1.4

$q_u = 40 \times 5.14 \times 1.4 + 18 =$ **305.84 kPa**

문제

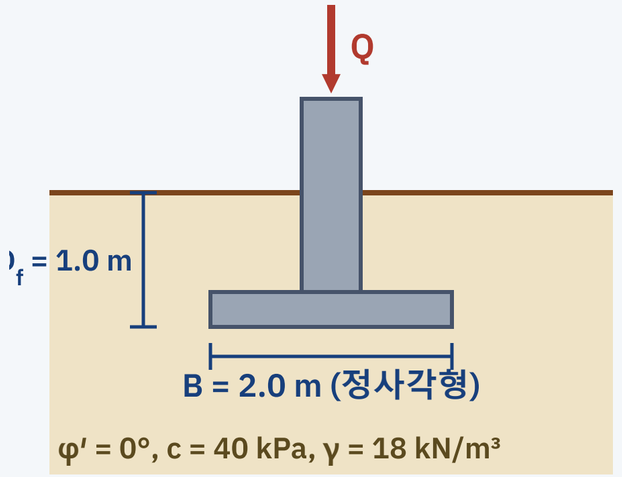
예제

조건

기초	**정사각형기초 B = L = 2 m, D_f = 1 m**
지반	**점토:** $\varphi = 0,\ c_u = 40$ kPa, $\gamma = 18$ kN/m^3 **; 지하수 없음**
경우	**(a) 수직하중 · (b)** $v = 100,\ h = 10$ kPa **·** **(c)** $h = 10$ **및** $\eta = \omega = 10^\circ$

구하는 값

각 경우에 대해 q_u 값을 구하시오.



풀이 (1/2)

풀이

1 (a) 연직하중: 괄호 $1 + s'_c + d'_c = 1 + 0.2 + 0.2$

$$q_u = 40(5.14)(1.4) + 18 = 287.84 + 18 = \mathbf{305.84}\ \text{kPa}$$

2 (b) h = 10 kPa (h/c = 0.25 < 1)

$$i'_c = 0.5\left(1 - \sqrt{0.75}\right) = 0.0670 \;\Rightarrow\; q_u = 40(5.14)(1.4 - 0.0670) + 18 = \mathbf{292.07}\ \text{kPa}$$

풀이 (2/2)

풀이

3 (c) h = 10 kPa, η = ω = 10°: $b'_c = g'_c = 10/147 = 0.068$; $g_q = (1 - 0.5 \tan 10°)^5$

$$1.4 - 0.067 - 0.068 - 0.068 = 1.197$$

$$q_u = 40(5.14)(1.197) + 18(0.630) = 246.1 + 11.3 = \mathbf{257.4}\ \text{kPa}$$

상태	괄호	c N_c(...)	q g_q	q_u (kPa)
(a) 연직	1,400	287.8	18.0	**305.8**
(b) h = 10	1.333	274.1	18.0	**292.1**
(c) h, η, ω	1.197	246.1	11.3	**257.4**

h = 10 kPa만으로도 지지력이 5% 감소하고, h와 함께 저면 경사와 지표 경사를 고려하면 16% 감소한다. 가산 형식 덕분에 평탄하고 연직인 경우에도 점착력 항이 0이 되지 않는다: 305.84 kPa.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

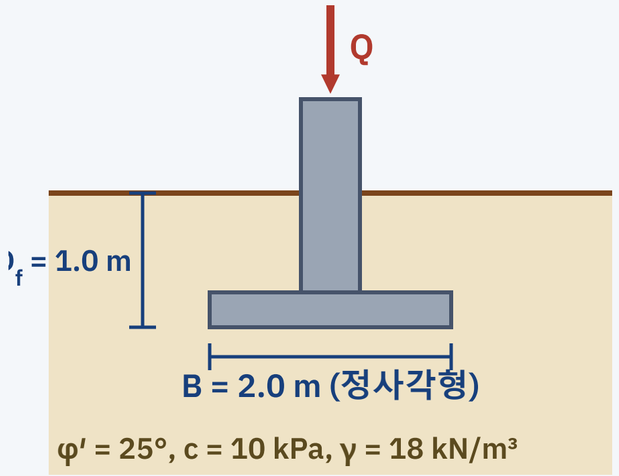
예제

조건

기초	**정사각형, B = L = 2.0 m, 기초 저면 깊이 D_f = 1.0 m**
지반	$c = 10$ kPa, $\varphi' = 25°$
단위중량	$\gamma = 18$ kN/m^3; **지하수 없음**
비교	**Vesic 공식: De Beer 형상계수, Vesic N_γ, $d_c = d_q - (1 - d_q)/(N_c \tan \varphi)$**
하중 조건 (추가)	**예제 8: q_{app} = 150, h = 30 kPa, η = 5°, ω = 10°**

구하는 값

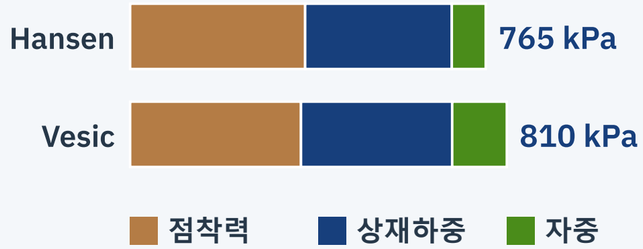
두 방정식의 q_u 값을 항별로 비교하고, 이어서 예제 8의 하중 조건에서도 비교하라.



풀이 (1/2)

풀이

	Hansen	Vesic
N_γ	6.76	10.88
s_q	1.423	1.466
d_c	1.200	1.172
c항	376.6	367.7
q항	315.5	325.2
γ항	73.0	117.5
q_u (kPa)	**765.1**	**810.3**



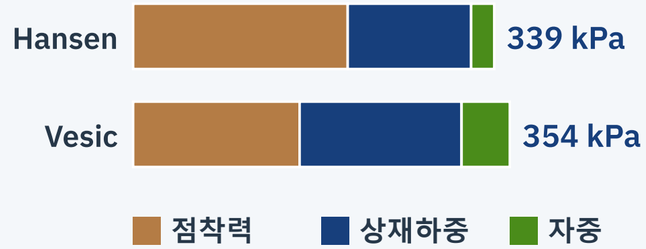
Hansen 값이 **5.6% 더 작다**(765 및 810 kPa). 차이는 거의 전적으로 자중 항에서 발생한다(73 및 117 kPa): N_γ가 작다.

풀이 (2/2)

풀이

계수	Hansen	Vesic
i_c, i_q, i_γ	0.595 · 0.633 · 0.526	0.723 · 0.749 · 0.618
b_c, b_q, b_γ	0.966 · 0.922 · 0.896	0.912 · 0.920 · 0.920
g_c, g_q, g_γ	0.932 · 0.630 · 0.630	0.645 · 0.678 · 0.678
q_u (kPa)	**339.3**	**354.0**

동일한 하중 조건에서 차이는 4.3%이다: Vesic의 경사 지수 $m = 1.5$(정사각형)와 $b = (1 - \eta \tan\varphi)^2$, $g = (1 - \tan\omega)^2$ 형태는 Hansen의 것보다 **감소폭이 다소 작다**. 두 식을 혼용해서는 안 된다; 각 방법의 계수는 자체 N_γ와 일관된다.



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

요약

핵심 정리

Hansen 식: $q_u = cN_c(s\ d\ i\ b\ g) + qN_q(s\ d\ i\ b\ g) + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma(s\ d\ i\ b\ g)$; 일반적인 경우 $i = b = g = 1$

$N_\gamma = 1.5(N_q - 1)\tan\varphi$: Vesic의 값보다 작으며($\varphi' = 25°$: 6.76과 10.88), 한 방법의 계수들은 함께 사용한다

형상: $s_c = 1 + (B/L)(N_q/N_c)$, $s_q = 1 + (B/L)\sin\varphi$, $s_\gamma = 1 - 0.4\ B/L$ · **깊이**: $k = D_f/B$ 또는 $\tan^{-1}(D_f/B)$; $D_f/B = 1$에서 단차

경사: 실제 h와 v 사용; $i_q = (1 - 0.5h/(v + c\cot\varphi))^5$, $i_\gamma = (1 - 0.7h/(\ldots))^5$; $h > v\tan\varphi + c$이면 활동 경고, $h \geq v + c\cot\varphi$이면 중단

저면 경사 $b_q = e^{-2\eta\tan\varphi}$, $b_\gamma = e^{-2.7\eta\tan\varphi}$; **지표 경사** $g_q = g_\gamma = (1 - 0.5\tan\omega)^5$ (Vesic의 $(1 - \tan\omega)^2$과는 다르다)

비배수($\varphi = 0$): $cN_c(1 + s' + d' - i' - b' - g') + qg_q$; $N_c = 5.14$, $N_\gamma = 0$; $h < c$

지하수는 q와 γ만 변화시킨다; **검토**: $q_{applied} \leq q_{all,g}$, FS_{actual} 및 순 값

참고문헌

Hansen의 전체 지지력 공식(Hansen 고유의 Nγ, 형상계수, 하중경사계수, 저면경사계수 및 지표경사계수)은 Hansen, J.B., A Revised and Extended Formula for Bearing Capacity, Danish Geotechnical Institute Bulletin 28, 1970을 따르며, 주요 지반공학 문헌에 일관되게 수록되어 있다. 본 절 전반에 적용된 깊이계수는 Das, B.M., Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed., Cengage Learning, 2018 (Chapter 16)에 제시된 Hansen의 공식을 적용하였다.

참고

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

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