地盤工学の講義資料 ・ 基礎

Meyerhofの支持力：一般式

講義：Meyerhofのすべり線網から支持力係数へ、形状・根入れ深さ・荷重傾斜の補正から地下水へ；各項目に計算例。

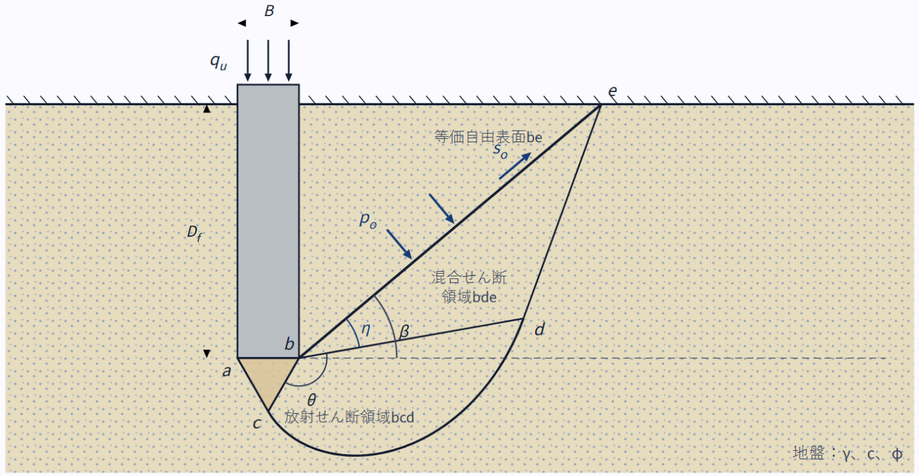
すべり線網

$N_c \cdot N_q \cdot N_\gamma$

形状・根入れ深さ・傾斜

地下水

計算例



はじめに

この講義で学ぶこと

一般支持力式の3項と、各項の形状・根入れ深さ・荷重傾斜係数を理解すること

Meyerhofの**すべり線網**、等価自由表面、およびN_c、N_qの係数がどのように導かれるかを追うこと

地表面基礎に対する**Reissner (N_q)**、**Prandtl (N_c)**およびVesic (N_γ)の各係数の算定法

De Beer形状、**Hansen根入れ深さ**、**Meyerhof荷重傾斜**係数を適用すること

非排水（$\phi = 0$）状態および**地下水**の3つの状態を扱う方法

全許容圧力と純許容圧力を求めて**照査**すること

講義の流れ

各項目は**3つの手順**で扱う：

1 · **理論**：規則は何か、なぜそうなるのか

2 · **問題**：与条件と求めるもの

3 · **解答**：数値を用いて手順ごとに

例題基礎、モジュールで開くモデル：砂中の1.2 m × 1.2 m正方形基礎、D_f = 1 m、地下水位0.5 m、荷重は鉛直から10°傾斜

3つの項、それぞれが独自の係数をもつ

理論

モジュールは**一般的な支持力式**を計算する：Terzaghi式の3つの項（粘着力、上載荷重、自重）と、各項に対する**基礎の形状**、**根入れ深さ**、**荷重傾斜**の係数：

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

N_c、N_qはMeyerhof（1951）の理論に由来する。本ページではそれを**段階的に**導出する。N_γについては試行法を説明し、モジュールではVesicの閉形式を用いる。

基礎底面は**粗**である。その下の地盤は均質で十分に深い。強さは$s = c + \sigma' \tan\phi$。荷重は中心載荷であり、傾斜載荷は荷重傾斜係数で扱う。

Terzaghiとの違い：浅い基礎のみを対象としない点である。基礎底面レベルより上の地盤は**等価自由表面**を通じて機構に取り込まれる。式中ではこれが**根入れ深さ係数**として現れる：本モジュールはD_f/Bに制限を設けない。

記号

c：粘着力、ϕ'：せん断抵抗角

$q = \gamma\ D_f$：基礎底面レベルでの上載荷重

γ：基礎底面下の地盤の単位体積重量

B：基礎の短辺、L：長辺

$F_{.s}$ 形状、$F_{.d}$ 根入れ深さ、$F_{.i}$ 荷重傾斜

くさび 45° + ϕ/2、半径方向領域および混合領域

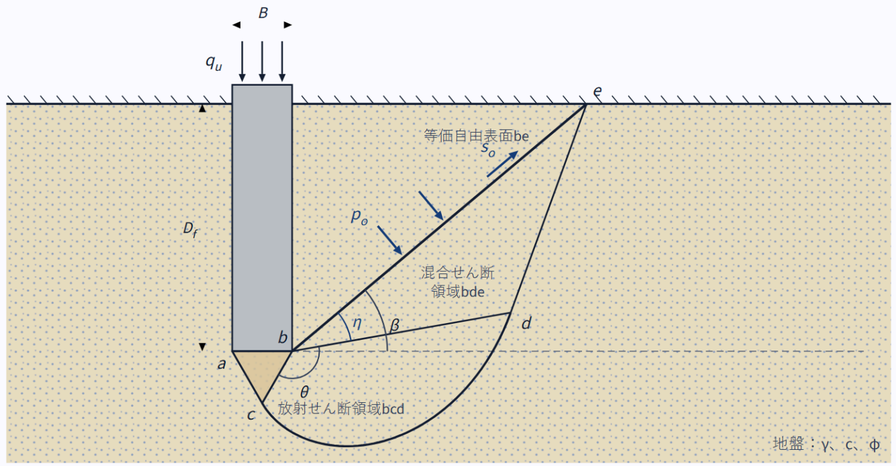
理論

Meyerhof（1951）は図に示す破壊面を採用した。基礎の下には実験でも示される**弾性くさびabc**があり、その辺は ϕ ではなく**45° + ϕ/2**で傾斜する（Terzaghiは ϕ を採用した）。その隣には対数らせん $r = r_0\, e^{\theta \tan\phi}$ で囲まれた**放射状領域bcd**があり、その先にはTerzaghiの受働Rankine領域の代わりに、すべりが放射状と平面的の中間にある**混合領域bde**が位置する。

bde領域の上方の地盤は無視しない：その影響はbe面上の**等価自由表面**応力 p_o（垂直）および s_o（せん断）で表される。面は水平に対して β だけ傾斜しており、bdはその η だけ下方にある。

支持力はやはり**重ね合わせ**で構成する：cおよび p_o' の寄与（N_c、N_q）と γ の寄与（N_γ）：

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



部分発動 m とモールの応力円

理論

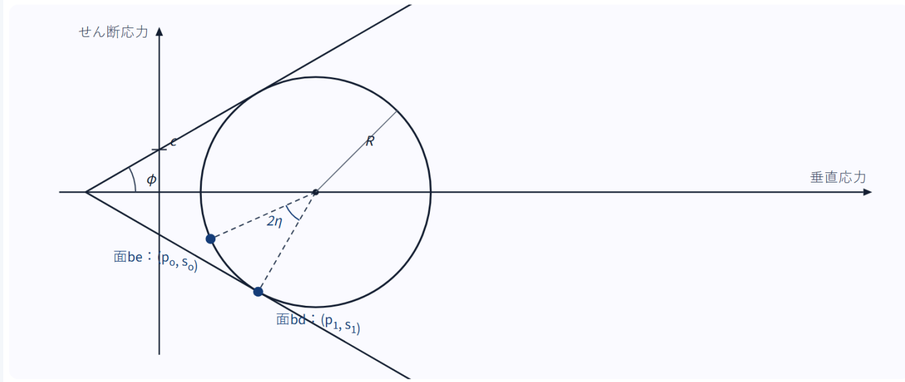
等価自由表面上ではせん断強さは**部分的に**しか発揮されない：Meyerhofはせん断応力を強さの分数として表した。一方、線形bde領域では地盤は塑性平衡状態にある：bd面上では強さのすべてが発揮される：

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

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

bde 領域の応力状態は**単一の Mohr 円**である（右図）：bd 点は包絡線上にあり、be 点は円上を 2η だけ先行している。これにより角 η と m が関係づけられる。

2つの極限：**m = 0** ⇒ $\cos(2\eta + \phi) = 0$、**$\eta = 45° - \phi/2$**；**m = 1** ⇒ $\cos(2\eta + \phi) = \cos\phi$、**$\eta = 0$**。



N_c と N_q はどのように導かれるか。

理論

bc面上では放射領域も破壊状態にある：$s'_p = c + p'_p \tan\phi$。極bに関するモーメントから（対数らせん上の垂直応力と粘着力のみが残る）：

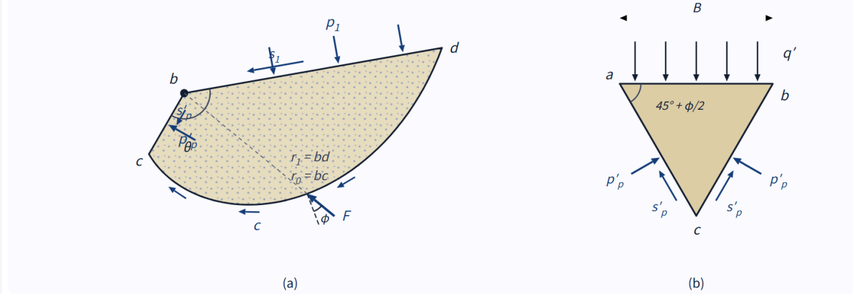
$$p'_p = p_1\, e^{2\theta \tan\varphi} + c \cot\varphi \left(e^{2\theta \tan\varphi} - 1\right)$$
$$s'_p = \left(c + p_1 \tan\varphi\right) e^{2\theta \tan\varphi}$$

次に、くさびabcの鉛直方向のつり合い（各面の長さはB/2 / cos(45° + ϕ/2)）：

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

すべてをまとめるとc項とp_o項が分離される：

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



βとmの係数はそれをどのように大きくするか

理論

係数はϕ'に、mを通じてηに、等価自由表面の傾きβを通じて対数らせんが掃く**角度θ**に依存する（図1の幾何）：

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

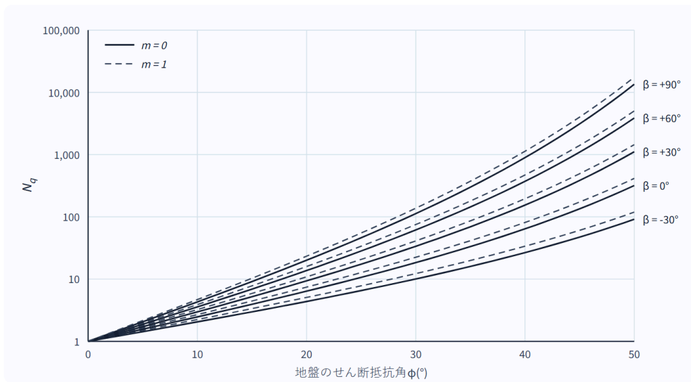
$$m = 0:\ \theta = 90^\circ + \beta \qquad m = 1:\ \theta = 135^\circ + \beta - \tfrac{\varphi}{2}$$

深い基礎の等価自由表面はより急勾配で、β はより大きい；係数はそれとともに急増する（側方）。

浅い基礎（Terzaghiの導出における条件）：β = 0, m = 0 ⇒ θ = π/2 および sin(2η + ϕ) = 1：

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

これらは**Reissner（1924）のN_q**および**Prandtl（1921）のN_c**であり、モジュールはこれらを用いる。$p_o = \gamma D_f = q$とおくと、c項とq項は$cN_c + qN_q$となる。基礎底面より上の土は、βとmの代わりに**根入れ深さ係数**によって計算に取り込まれる。$\phi \to 0$のとき、$N_c \to \pi + 2 = 5.14$となる。



問題

例題

与条件

地盤	$\varphi' = 30^\circ,\ c = 0$
ケース	**(a) 地表基礎：β = 0、m = 0 ・ (b) β = 15°、m = 0 ・ (c) β = 15°、m = 1**
公式	$\theta = 135^\circ + \beta - \eta - \varphi/2,\ \ N_q = \frac{(1+\sin\varphi)e^{2\theta\tan\varphi}}{1-\sin\varphi\sin(2\eta+\varphi)}$

求めるもの

各ケースについてη、θ、N_qおよびN_cの値を求めよ。地表面上のN_qはReissnerの閉形式と一致するか。

解答 (1/2)

解答

1 (a) 地表基礎：m = 0 ⇒ $\eta = 45° - \phi/2 = 30°$、$\theta = 135° + 0 - 30° - 15° = 90°$（Reissnerの$e^{\pi \tan\phi}\tan^2(45° + \phi/2)$の値と同一）

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

2 (b) $\beta = 15°$, m = 0: $\eta = 30°$; $\theta = 135° + 15° - 30° - 15° = 105°$; $\sin(2\eta + \phi) = 1$

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

3 (c) $\beta = 15°$, m = 1: $\eta = 0$; $\theta = 135° + 15° - 0 - 15° = 135°$; $\sin(2\eta + \phi) = \sin 30° = 0.5$

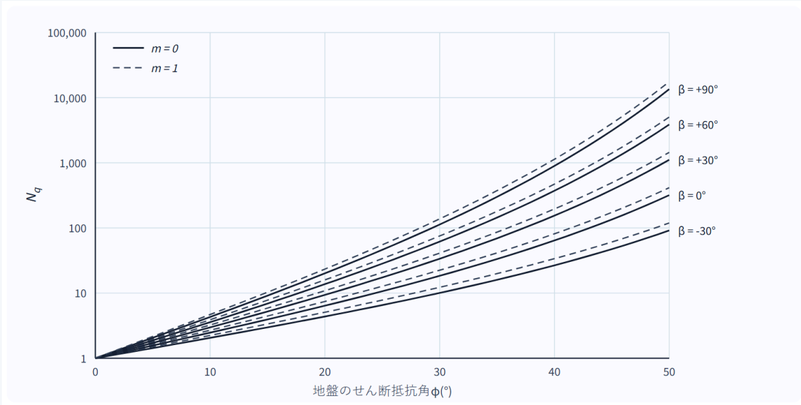
$$N_q = \frac{1.5\, e^{2(2.3562)(0.5774)}}{1 - 0.5(0.5)} = \frac{1.5(15.19)}{0.75} = \mathbf{30.38} \qquad N_c = \mathbf{50.89}$$

解答 (2/2)

解答

条件	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

地表面基礎は閉形式と**同一**である（18.40）。βが大きくなり、発動率が増すと係数は**急激に増加**する：(a) → (c)でN_qは1.65倍。モジュールはこの増加をメカニズムではなく**深さ係数**で考慮する（以降の節）。



GeoTervaで解答を確認する ↗

N_γ：試行法、Meyerhof 1963およびVesic

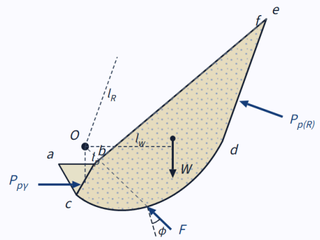
理論

Terzaghiと同様にN_γの閉形式は存在せず、**試行**によって求められる：ϕ、β、mを選び；θを求め；試行中心Oから対数らせんを描き；bcdfの物体について重量Wとdf上のRankine受働力$P_{p(R)}$；Oまわりのモーメントからbc上の受働力：

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

Oを変化させて最小の$P_{p\gamma}$を求める。くさびabcの自重とともに：

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



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

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

N_c、N_q、N_γはϕ'のみに依存する

理論

2つの出典はN_cとN_qについては**同一**であり、N_γについては異なる。N_γはくさび形状の仮定に最も依存する係数である。ϕ = 30°ではVesicが22.40、Meyerhof (1963)が15.67である。MeyerhofのN_γを用いると、自重の項、したがって摩擦性土のq_uはより小さくなる。

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

係数

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

問題

例題

与条件

地盤	$\varphi' = 32°$ **(tan 32° = 0.6249)**
手法	**Reissner、Prandtl、Vesic；比較のためMeyerhof（1963）**

求めるもの

N_q, N_c, N_γ の値を閉形式で求めよ；VesicのN_γをMeyerhof（1963）と比較せよ。

解答

解答

1 ReissnerのN$_q$

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

2 Prandtl の N$_c$

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

3 VesicのN$_\gamma$（モジュールが使用）とMeyerhof (1963)

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

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

Vesic の N$_\gamma$ は Meyerhof のものより**37%** 大きい（$\phi' = 32°$）。表の値と一致する：N$_c$ = 35.49, N$_q$ = 23.18, N$_\gamma$ = 30.21。

GeoTervaで解答を確認する ↗

De Beer：帯状でない基礎

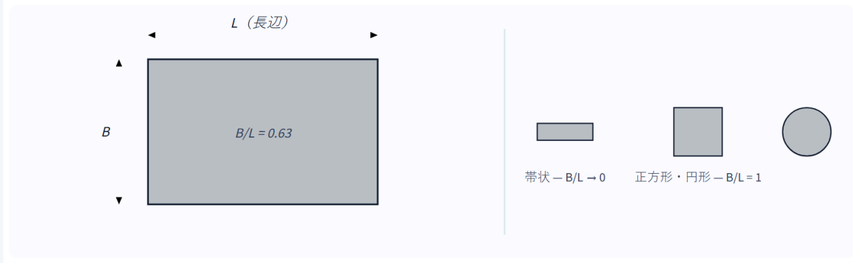
理論

導出は連続（帯状）基礎を対象としている（平面ひずみ状態）。長方形基礎では破壊は三次元的であり、地盤はくさびの端部や側面からも移動しうる。**De Beer**（1970）は各項を短辺と長辺の比B/Lで補正する：

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

帯状基礎（B/L → 0）では3つの係数はいずれも1であり、式は平面ひずみの形に戻る。

正方形基礎ではB/L = 1：N_γ 項は40%減少し（$F_{\gamma s}$ = 0.6）、q項とc項は増加する。



問題

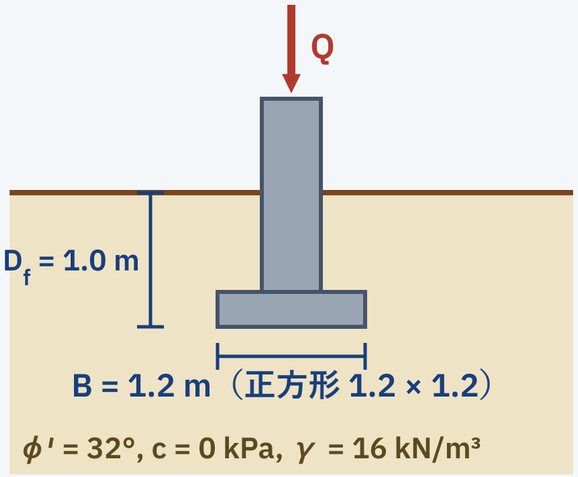
例題

与条件

地盤	$\varphi' = 32^\circ$：$N_c = 35.49,\ N_q = 23.18$（**例題2**）
基礎	**正方形B = L = 1.2 m；比較：B/L = 0.5および帯状**

求めるもの

正方形基礎に対するF_{cs}、F_{qs}、$F_{\gamma s}$の値を求めよ；B/L = 0.5についても同じ係数を求めよ。



解答

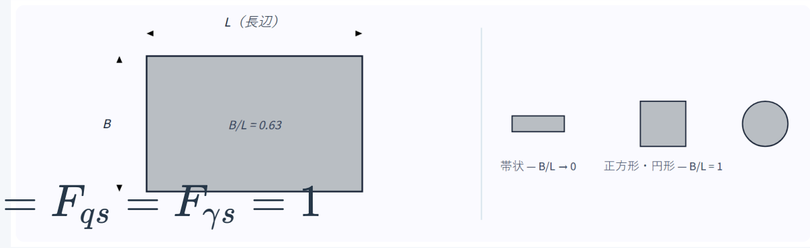
解答

1 正方形基礎（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 および帯状

$B/L = 0.5$: $F_{cs} = 1.327,\ F_{qs} = 1.312,\ F_{\gamma s} = 0.800$　　帯状 : $F_{cs} = F_{qs} = F_{\gamma s} = 1$



正方形基礎ではqの項が**62%**増加し、自重の項は40%減少する。B/Lが小さくなるにつれて係数は帯状基礎の値（1）に近づく。

GeoTervaで解答を確認する ↗

Hansen：基礎底面より上の地盤の寄与

理論

Terzaghiは基礎底面より上の地盤を**死荷重**とのみみなす。一方、Meyerhofの理論では等価自由表面を介して**抵抗も発揮する**。一般式では、これがD_f/Bとともに増大する**Hansen (1970)の根入れ深さ係数**によって考慮される：

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

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

k = D_f/B（≤ 1）または$\tan^{-1}(D_f/B)$（> 1、ラジアン）。D_f/B = 1を超えると、逆正接は係数をゆっくり増加させ続ける：**Terzaghiの式とは異なり、この式は深さの制限を必要としない。**

問題

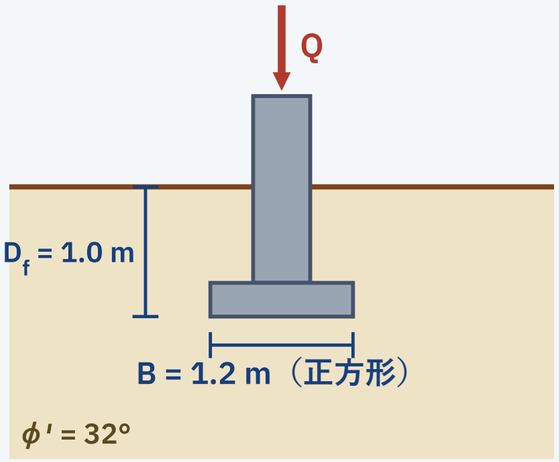
例題

与条件

地盤	$\varphi' = 32^\circ$: $N_c = 35.49$, $\tan\varphi' = 0.6249$, $(1 - \sin 32^\circ)^2 = 0.2210$
基礎	**B = 1.2 m；D_f = 1.0 m（例題）、比較としてD_f = 2.4 m**
非排水	**ϕ = 0: B = 2 m, D_f = 1.5 m**

求めるもの

F_{qd}、F_{cd}および$F_{\gamma d}$の値を各ケースについて求める。



解答

解答

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

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

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

2 $D_f/B = 2.4/1.2 = 2 > 1$（逆正接：$\tan^{-1} 2 = 1.1071$ 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 非排水（$\phi = 0$）：$F_{qd} = 1$；$D_f/B = 1.5/2 = 0.75$

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

D_f/B 0.83 → 2：F_{qd} 1.230 → 1.306；根入れの寄与は増えるが**次第に鈍る**。

GeoTervaで解答を確認する ↗

Meyerhof：傾斜荷重

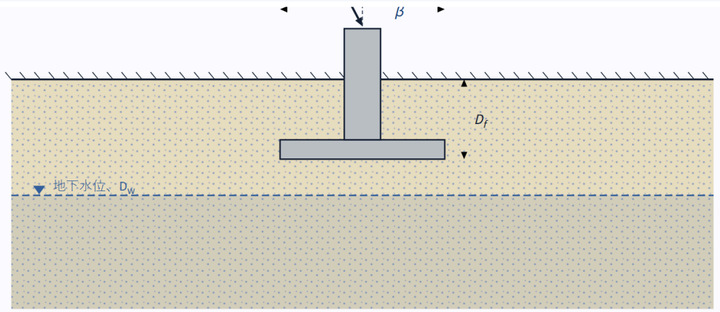
理論

鉛直方向と角 β をなす荷重は、鉛直荷重よりも小さな鉛直抵抗しか発揮しない：荷重の一部が基礎を横方向へ押すためである。式は荷重の**鉛直成分**に対してのみ支持力を与える。**Meyerhof**（1963）の傾斜係数は各項を低減する：

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

β = 0では3つとも1である。$F_{\gamma i}$は $\beta = \phi$ でゼロに達し、そこで**とどまる**：モジュールは$(1 - \beta/\phi)^2$が再び増大することを許さない。β は、$(1 - \beta/90°)^2$が再び増大し始める点より下の**89°まで**受け付けられる。

傾斜荷重は、特に自重項を通じて支持力を低下させる。



この式が与えるのは、傾斜荷重の鉛直成分に対する極限支持力のみである。

問題

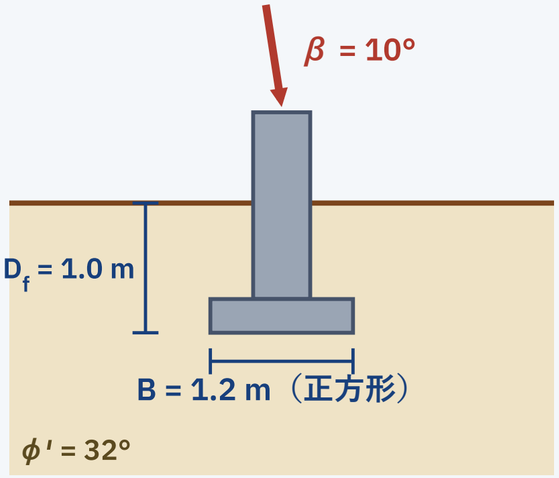
例題

与条件

基礎	**正方形、B = L = 1.2 m、根入れ深さ D_f = 1.0 m**
地盤	**砂：$\varphi' = 32^\circ,\ c = 0$**
単位体積重量	$\gamma = 16$ kN/m^3（上部）、$\gamma_{sat} = 19.5$ kN/m^3（地下水位以深）
荷重	**鉛直からβ = 10°（補足：20°、30°、32°）**

求めるもの

β = 10°に対するF_{ci}、F_{qi}、$F_{\gamma i}$の値を求めよ。βが大きくなるとどうなるか。



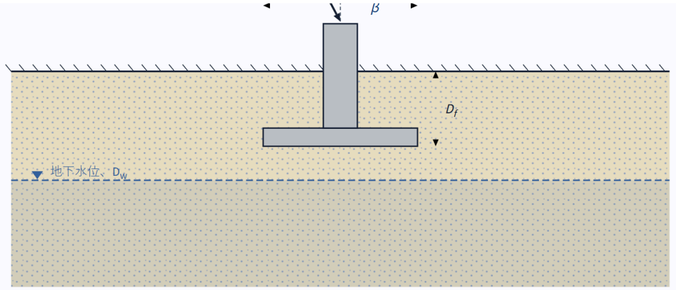
解答

解答

1 $\beta = 10°$, $\phi' = 32°$ ($\beta < \phi$)

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

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



この式が与えるのは、傾斜荷重の鉛直成分に対する極限支持力のみである。

10°の荷重はq項とc項を**21%**、自重項を**53%**低下させる；$\beta = \phi' = 32°$では自重項は完全に消える。

GeoTervaで解答を確認する ↗

一般式と非排水条件

理論

§5–10の係数で一般式を完成させる。鉛直荷重下、底面レベルにおける**帯状基礎**ではすべての補正係数が1であり、式はTerzaghiの形となる：ただしTerzaghiの係数の代わりにReissnerのN_q、PrandtlのN_c、VesicのN_γが現れる。

非排水載荷（$\phi = 0$、$c = c_u$）：$N_c = 5.14$、$N_q = 1$、$N_\gamma = 0$：

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

地下水はTerzaghiと同様に式に入る（§12）：qおよび第3項の単位体積重量を通じてであり、**係数を通じてでは決してない。**

問題

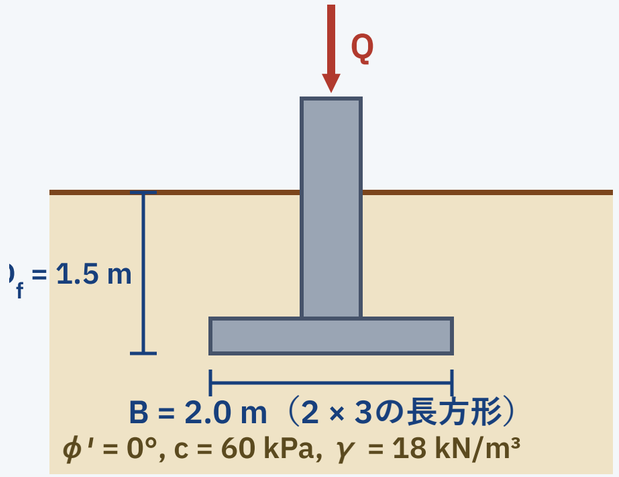
例題

与条件

基礎	長方形2 m × 3 m、D_f = 1.5 m、中心鉛直載荷
地盤	粘土、$\varphi = 0,\ c_u = 60$ kPa, $\gamma = 18$ kN/m^3；地下水なし
安全	FS = 3

求めるもの

q_u、全q_{all}および純支持力を求めよ。



解答

解答

1 上載荷重と係数（ϕ = 0：N_c = 5.14、N_q = 1、N_γ = 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 支持力（$F_{ci} = F_{qi} = 1$、$F_{qs} = F_{qd} = 1$）

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

3 全許容圧力と純許容圧力

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

非排水粘土では支持力はほぼ完全に**粘着力項による**（453 / 480 kPa）：形状係数（1.13）と根入れ深さ係数（1.30）がそれを約47%増加させる；ϕ = 0ではN_γ = 0であるため自重項はない。

GeoTervaで解答を確認する ↗

係数は不変；qとγが変化する

理論

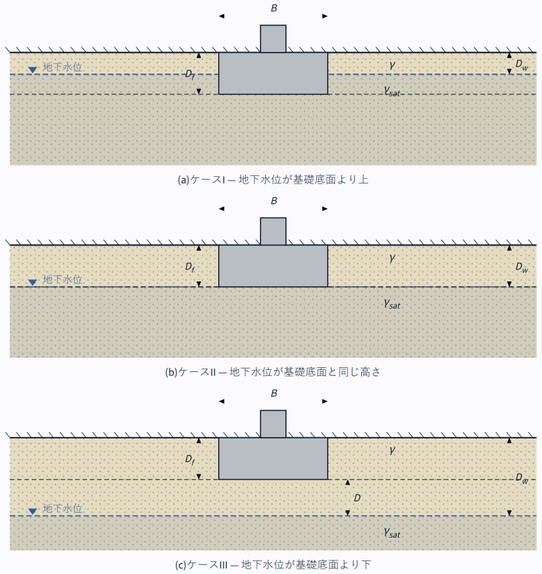
地下水位以下では有効単位体積重量$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$（$\gamma_w = 9.81$）が作用する。モジュールは3つの場合を区別する。$D_w$は地表面からの地下水深さである：

$$\text{I } (D_w \le D_f):\ q = \gamma D_w + \gamma'(D_f - D_w),\ \ \gamma \to \gamma' \text{ (第3項)}$$

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

ケースII（$D_w = D_f$）はIの特別な場合である：$q = \gamma\ D_f$、第3項ではγ'を用いる。

底面からBの1倍より深い位置では水は**影響しない**。



問題

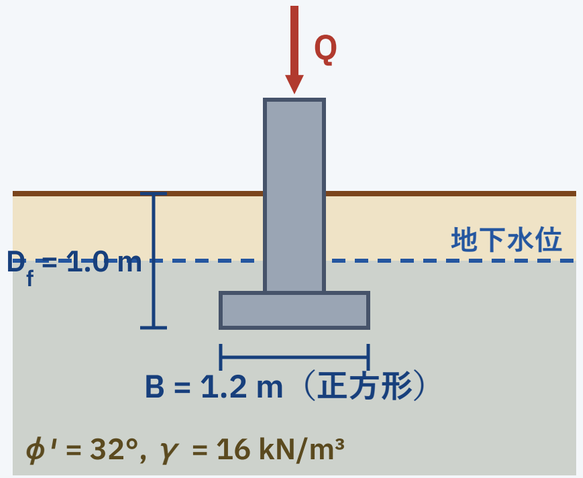
例題

与条件

基礎	**正方形、B = L = 1.2 m、根入れ深さ D_f = 1.0 m**
地盤	**砂：$\varphi' = 32^\circ,\ c = 0$**
単位体積重量	$\gamma = 16$ kN/m^3（上部）、$\gamma_{sat} = 19.5$ kN/m^3（地下水位以深）
荷重	**鉛直・中心載荷；ε なし**

求めるもの

地下水位 D_w = 0.5、1.0、1.5、2.6 mの場合について、**q**、第3項の単位体積重量および**q_u**の値を求めよ。（F_{qs} = 1.625、F_{qd} = 1.230、$F_{\gamma s}$ = 0.6、N_q = 23.18、N_γ = 30.21、傾斜なし）



解答 (1/2)

解答

1 ケースI（$D_w = 0.5 < D_f$）および$D_w = D_f$

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

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

2 ケースIII（$D_w = 1.5 \Rightarrow D = 0.5 \text{ m} \leq B$）および水の影響なし（$D_w = 2.6 \Rightarrow D = 1.6 > B$）

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

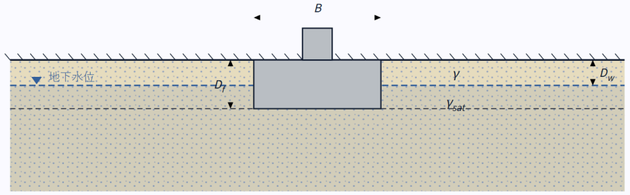
$$D_w = 2.6: \ q = 16, \ \gamma = 16$$

解答 (2/2)

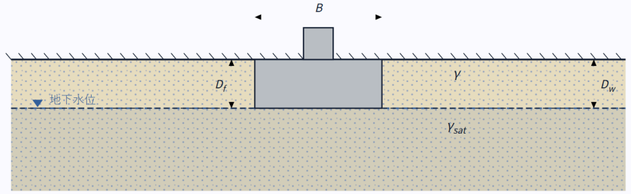
解答

D_w (m)	条件	q (kPa)	γ 第3項	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	無視できる	16.00	16.00	**667.9**

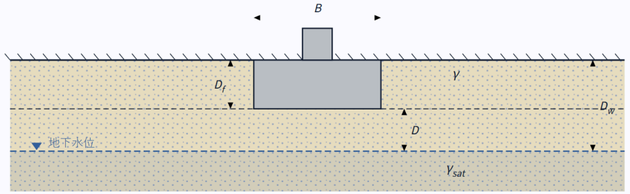
地下水は支持力を2つの経路で低下させる：上載荷重qが減少し、自重項がγ'で計算される。水が0.5 mにある場合q_u = 520、水が深い場合668 kPa（22%の差）。係数はまったく変化しない：**水はqとγを通じてのみ影響する。**



(a)ケースI — 地下水位が基礎底面より上



(b)ケースII — 地下水位が基礎底面と同じ高さ



(c)ケースIII — 地下水位が基礎底面より下

GeoTervaで解答を確認する ↗

問題

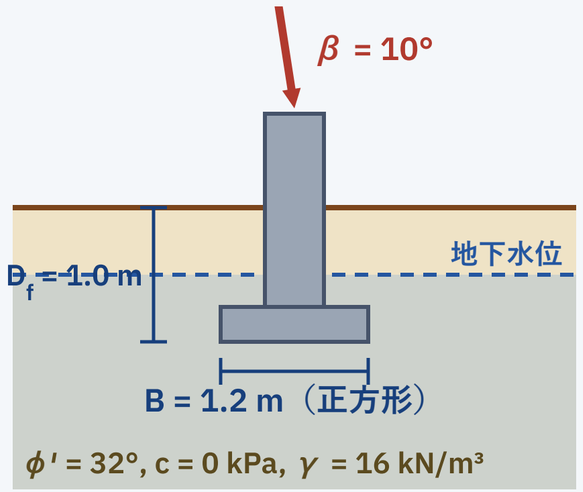
例題

与条件

基礎	**正方形、B = L = 1.2 m、根入れ深さ D_f = 1.0 m**
地盤	**砂：$\varphi' = 32°,\ c = 0$**
単位体積重量	$\gamma = 16$ kN/m^3（**上部**）、$\gamma_{sat} = 19.5$ kN/m^3（**地下水位以深**）
地下水	**D_W = 0.5 m（ケースI）**
荷重	**鉛直方向からβ = 10°傾斜**
安全	**FS = 3**

求めるもの

q_u、全**q_{all}**、許容鉛直荷重および**許容合力**荷重、次にc = 5 kPaに対するq_u。



解答 (1/2)

解答

1 係数（ϕ' = 32° ; B/L = 1 ; D_f/B = 0.833 ; β = 10° < ϕ'）

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

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

2 ケースI：q = 16(0.5) + (19.5 – 9.81)(0.5) ; γ' = 9.69 kN/m³（第3項において）

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

解答 (2/2)

解答

3 支持力（c = 0：粘着力の項なし）

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

4 許容圧力と荷重（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：粘着力項（F_{cd} = 1.241, F_{cs} = 1.653, F_{ci} = 0.790）

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

GeoTervaで解答を確認する ↗

全と純、鉛直と合力

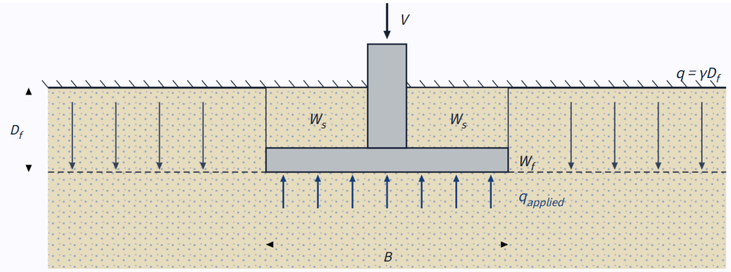
理論

q_uは破壊時の鉛直圧力である。モジュールは**全**圧力と**純**圧力を別々に扱う：

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

作用圧力q_{app}は、供用荷重下での底面における**鉛直全圧力**であり、V/Aである；偏心荷重では合力ではなく鉛直成分を面積で除して求める。基礎は次の条件で許容される：

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



許容鉛直荷重 $Q_{all} = q_{all,g} A$、傾斜βにおける許容合力は $Q_{all}/\cos\beta$。q_{app}を入力しない場合、モジュールは支持力のみを与える。

問題

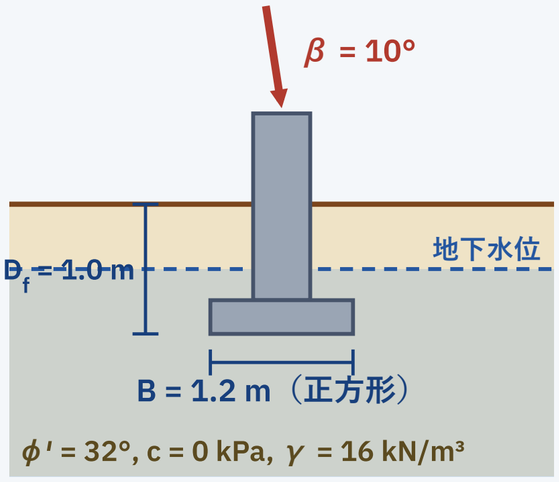
例題

与条件

基礎	**正方形、B = L = 1.2 m、根入れ深さ D_f = 1.0 m**
地盤	**砂：$\varphi' = 32°,\ c = 0$**
単位体積重量	$\gamma = 16$ kN/m^3（上部）、$\gamma_{sat} = 19.5$ kN/m^3（地下水位以深）
地下水位、勾配	**D_w = 0.5 m、β = 10°（例題8）**
作用	**q_{app} = 150 kPa（鉛直、全応力）**
結果（例題8）	**q_u = 519.99 kPa, q = 12.845 kPa, FS = 3**

求めるもの

3つの条件（全応力、FS_{actual}、純）を照査する。



解答

解答

1 全許容圧力度

$$q_{app} = 150\ \text{kPa} \le q_{all,g} = 173.33\ \text{kPa} \ \Rightarrow\ \text{成立する}$$

2 実際の安全率

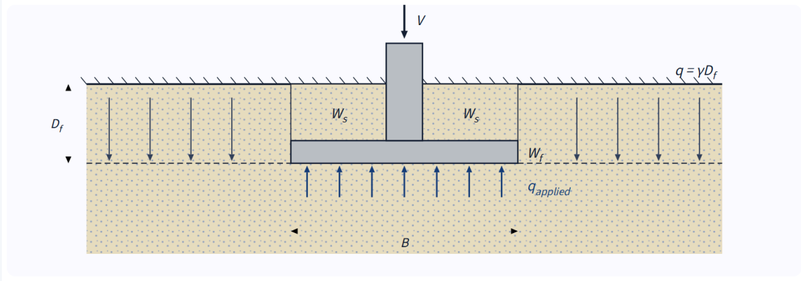
$$FS_{actual} = \frac{q_u}{q_{app}} = \frac{519.99}{150} = \mathbf{3.47}\ \ge 3$$

3 Net

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

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

基礎は3つの条件すべてで許容される。鉛直荷重 V = 150 × 1.44 = 216 kN；合力 216/cos10° = 219.3 kN ≤ 許容合力 253.4 kN。



GeoTervaで解答を確認する ↗

問題

例題

与条件

基礎	**正方形、B = L = 1.2 m、根入れ深さ D_f = 1.0 m**
地盤	**砂：$\varphi' = 32°,\ c = 0$**
単位体積重量	$\gamma = 16$ kN/m^3（**上部**）、$\gamma_{sat} = 19.5$ kN/m^3（**地下水位以深**）
地下水位、勾配	**D_w = 0.5 m, β = 10°**
比較	**VesicのN$_\gamma$ = 30.21、およびMeyerhof (1963)のN$_\gamma$ = 22.02**

求めるもの

例題8のq_uと全q_{all}は、MeyerhofのN$_\gamma$を用いるとどうなるか。

解答

解答

1 第3項のみが変化する

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

2 q_uとq_{all}

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

この基礎では差は**2.6%**のみ（520 → 506 kPa）：自重項はq_uの約10%である。**広い基礎**で上載荷重が小さい場合、自重項が支配的となり、N_γの選択が結果を明確に変化させる。

GeoTervaで解答を確認する ↗

まとめ

ポイントのまとめ

一般式：$q_u = cN_cF_{c.} + qN_qF_{q.} + ½\,\gamma\,BN_\gamma F_{\gamma.}$；形状係数（s）、根入れ深さ係数（d）、荷重傾斜係数（i）を用いる

Meyerhof理論：くさびは$45° + \phi/2$、放射状領域、混合領域；基礎底面より上の等価自由表面（p_o、s_o、m、η、β）で表される

浅い基礎：$N_q = e^{\pi \tan\phi}\tan^2(45° + \phi/2)$（Reissner）、$N_c = (N_q - 1)\cot\phi$（Prandtl）、$N_\gamma = 2(N_q + 1)\tan\phi$（Vesic）

De Beerの形状係数、**Hansen**の根入れ深さ係数、**Meyerhof**の荷重傾斜係数。$\phi = 0$では$N_c = 5.14$、$N_q = 1$、$N_\gamma = 0$である

地下水位はqとγのみを変化させ（3ケース）、係数は変化させない。

照査：$q_{app} \le q_{all,g}$、FS_{actual}および純支持力；傾斜荷重では安全な合力$Q_{all}/\cos\beta$

参考文献

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 — 第2.4–2.5節。本ページは導出の順序に従う。本ページの本文中の「出典」はこの文献を指す。

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage — 一般支持力式とその係数。本ページの本文中の「第2の出典」はこの文献を指す。

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.

図は破壊機構そのものから作図している。Nqの図表は本ページの式から計算したものである。

注記

本スライドの図はGeoTervaの理論ページから引用したものである。数値例はすべてモジュール自身の計算ライブラリで作成しており、モジュールは同じ値を与える。

GeoTerva

オンライン地盤工学計算

理論から実務へ

本講義の例題基礎をGeoTervaで手順ごとに計算する：モジュールはこのモデルで開く。

モジュールを開く →

理論ページ →

スマートフォンで開く

お試しモジュールは登録不要です。

講義で使用したい場合：info@geoterva.com