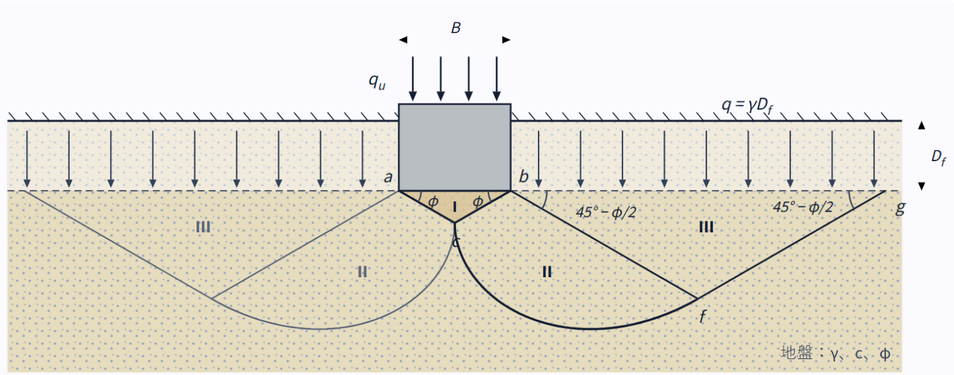
GeoTerva

地盤工学の講義資料 ・ 基礎

Terzaghiの支持力

講義：Terzaghiの破壊機構とその誘導からN_q、N_c、N_γの各係数へ、正方形・円形基礎から局部せん断破壊および地下水へ；各項目に計算例。

三つの領域
対数らせん
$N_c \cdot N_q \cdot N_\gamma$
正方形および円形基礎
局部せん断
計算例



この講義で学ぶこと

- Terzaghi式の**仮定**と**全般/局部せん断**破壊の区別
- 破壊メカニズム（**3つの領域**、対数らせん）と、受働力が3つの部分に分解されることを追う
- N_qとN_cの各係数を閉形式から、N_γをKumbhojkarの表から求めること
- **帯状、正方形、円形**基礎について式を書くこと；非排水（$\phi = 0$）の場合を扱うこと
- **局部せん断破壊**に対してc'とϕ'で同じ式を適用すること
- **地下水**の3つのケースと全・純許容圧力を計算し、基礎を**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、モジュールを開いたときのモデル：$c = 15.2$ kPa、$\phi' = 20°$、$\gamma = 17.8$ kN/m³の地盤中の1.5 m × 1.5 m正方形基礎、$D_f = 1$ m、地下水位2 m。

Terzaghiの式は何に基づくか？

理論

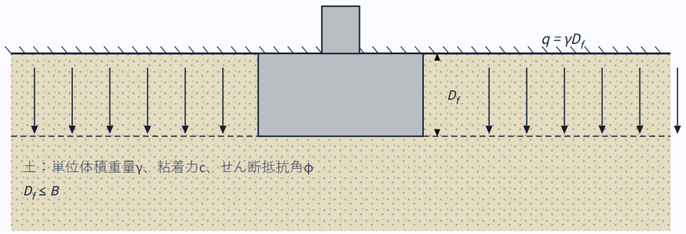
Terzaghi (1943)は支持力q_u、すなわち基礎下の地盤がせん断によって破壊するときの平均圧力を、仮定した破壊機構とその部分の釣合いから求めた。導出は次の仮定に基づく：

基礎は**長い帯状**（平面ひずみ状態）で、剛体かつ**粗い底面**をもつ：底面の地盤は滑動できず、基礎と一体となって沈下する。

底面下の地盤は**均質**で非常に深い；荷重は**鉛直かつ中心**である。

基礎は**浅い**、$D_f \le B$：底面より上の地盤は破壊機構に寄与せず、**上載荷重$q = \gamma D_f$**としてのみ作用する；せん断強さは無視する（安全側の単純化）。

地盤は**全般せん断破壊**で崩壊する；局部せん断は後から低減したパラメータで扱う。



せん断強さはMohr–Coulombに従う：

$$s = c + \sigma' \tan\varphi$$

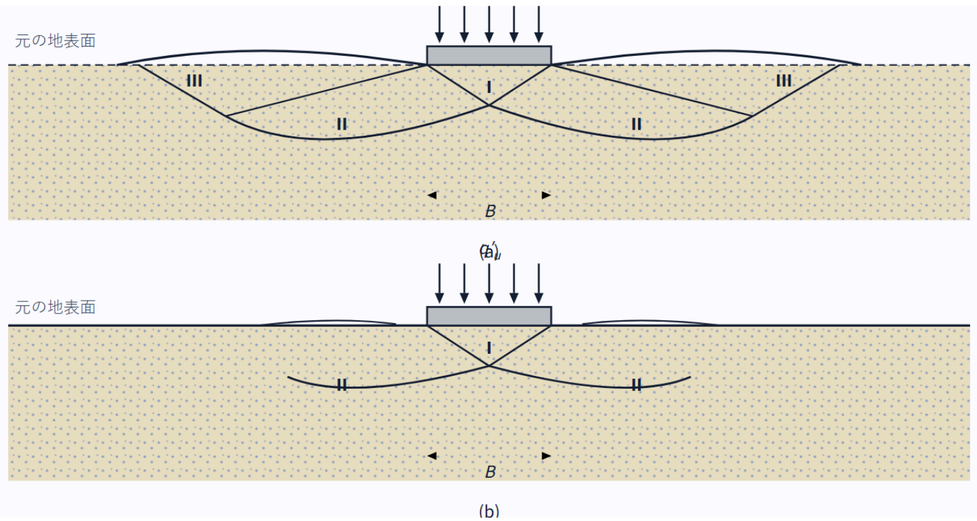
フーチングはどのように破壊するか

理論

密な砂または硬い粘土上の帯状基礎に段階的に載荷しよう。沈下はまずゆっくり増加する；その後ある圧力で**荷重が増加しないまま**沈下が急増する：基礎の縁から地表へ延びる連続的なすべり面が形成され、基礎の側方で地盤が隆起する。これが**全般せん断破壊**であり、その圧力がq_uである。

ゆるい砂および軟弱粘土では曲線にピークがない：q'_u以降はより急であるがなお上昇する直線に移行する；すべり面は地盤内にとどまり、隆起は小さい：**局部せん断破壊**。

基礎下の三つの領域：一体として下方へ移動する**くさび（I）**、くさびに押される**ラジアル領域（II）**、上方・側方へ押される**受働領域（III）**。局部せん断破壊ではくさびは同様に形成されるが、IIおよびIIIは地表に達せず地盤中で減衰する。



3つの領域と対数らせん

理論

Terzaghiは両側の地盤を3つの領域に分けた：

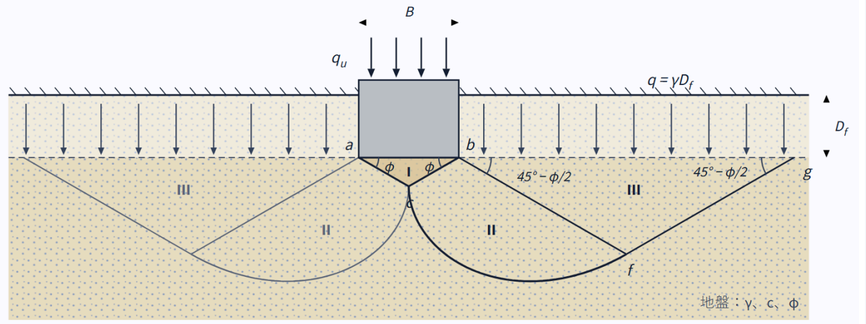
I・くさびabc：粗い底面は付着し；基礎とともに剛体的に降下する。辺acとbcは水平と $\alpha = \phi$ をなす。

II・放射状領域 bcf（Prandtl）：bから出る各放射線はすべり線であり、cfの境界は極をbとする**対数らせん**弧である。

III・受働Rankine領域bfg：bfとfgは水平と $45° - \phi/2$ をなす直線のすべり線である。

$$r = r_0\, e^{\theta \tan\varphi} \qquad \theta_1 = \angle cbf = 180^\circ - \varphi - \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) = \frac{3\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$$

らせんの性質：各点で極から引いた半径は曲線の法線と ϕ の角度をなす。したがってらせん上の摩擦は極に関して**モーメントを生じない**ため、釣り合いはこの極まわりのモーメントで表す。



鉛直であり、3つの部分に分かれる。

理論

基礎はくさびを下方へ押す；領域IIおよびIIIの地盤は各面で**受働力P_p**によって抵抗する。土と土が相対的にすべるため、せん断抵抗角の全体が作用する：P_pは面の法線とϕをなす。面bcは水平とϕをなすため、その法線は鉛直とϕをなす；この法線からϕだけ偏る力は**完全に鉛直**である。

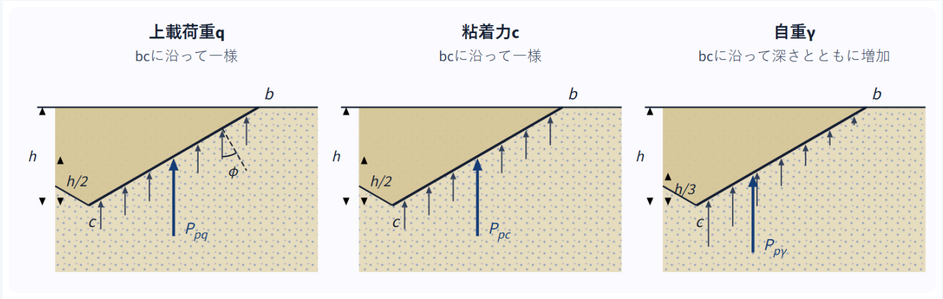
P_pは同時にq、c、γに依存し、三者を合わせても閉形式解は得られない。Terzaghiは他の二つがゼロであるとして各項を求め、それらを**加算**した（重ね合わせ）：

$$P_p = P_{pq} + P_{pc} + P_{p\gamma} \qquad h = \frac{B}{2}\tan\varphi$$

P_{pq}：上載荷重のみ（γ = 0、c = 0）→ **N_q**

P_{pc}：粘着力のみ（γ = 0、q = 0）→ **N_c**

$P_{p\gamma}$：土の重量のみ（q = 0, c = 0）→ **N_γ**



点bまわりのモーメント

理論

上載荷重のみの場合、極はbにある。質量bcfjにはbcに沿ってP_{pq}、bjに沿ってq、jfに沿ってRankineの受働土圧、対数らせんに沿って合力Fが作用する；Fは極を通るためモーメントの式から消える：

$$P_{p(1)} = q\,H_d \tan^2\left(45^\circ + \tfrac{\varphi}{2}\right) \qquad P_{pq}\frac{B}{4} = q\,\overline{bj}\,\frac{\overline{bj}}{2} + P_{p(1)}\frac{H_d}{2}$$

$$r_0 = \frac{B}{2}\sec\varphi \quad r_1 = r_0\, e^{\left(\frac{3\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\tan\varphi} \quad \overline{bj} = r_1\cos\left(45^\circ - \tfrac{\varphi}{2}\right) \quad H_d = r_1\sin\left(45^\circ - \tfrac{\varphi}{2}\right)$$

$\tan(45° + \phi/2) = \cot(45° - \phi/2)$であるため、2つの項は等しくなる：$P_{pq} = (4/B)\, q\, r_1^2 \cos^2(45° - \phi/2)$。くさびのつり合い$q_q B = 2 P_{pq}$より：

$$q_q = qN_q \qquad N_q = \frac{e^{2\left(\frac{3\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\tan\varphi}}{2\cos^2\left(45^\circ + \tfrac{\varphi}{2}\right)}$$

結果

$\phi = 0$では$N_q = 1$：摩擦がない場合、上載荷重はそのまま伝達される。$\phi = 30°$では**$N_q = 22.46$**。

問題

例題

与条件

地盤　$\varphi' = 30^\circ$ と $\varphi' = 20^\circ$（**モジュールモデル**）

式　$$N_q = \frac{e^{2(3\pi/4 - \varphi/2)\tan\varphi}}{2\cos^2(45^\circ + \varphi/2)}$$

求めるもの

各ϕ'について**N_q**の値を閉形式から求めよ。

解答

解答

1 ϕ' = 30° ($3\pi/4 - \phi/2$ = 2.0944 rad; tan 30° = 0.5774; 45° + 15° = 60°)

$$N_q = \frac{e^{2(2.0944)(0.5774)}}{2\cos^2 60^\circ} = \frac{e^{2.4184}}{2(0.25)} = \frac{11.228}{0.5} = \mathbf{22.46}$$

2 ϕ' = 20°（$3\pi/4 - \phi/2$ = 2.1817 rad、tan 20° = 0.3640、45° + 10° = 55°）

$$N_q = \frac{e^{2(2.1817)(0.3640)}}{2\cos^2 55^\circ} = \frac{e^{1.5881}}{2(0.3290)} = \frac{4.895}{0.6580} = \mathbf{7.44}$$

N_q(30°) = **22.46**、N_q(20°) = **7.44**、ϕ' = 0に対してN_q = 1。これらはモジュールの表の値である。

GeoTervaで解答を確認する ↗

理論・粘着力項 N_c

$\cot\phi\,(N_q - 1)$

理論

粘着力のみの場合も極は再びbにある。bcfjの質量には粘着力C = c·bcが働き（半径方向に沿って、モーメントは生じない）、jf上には粘着力を考慮したRankine受働力が働き、対数らせんに沿ってcが働く。らせんの要素はds = r sec ϕ dθ であり、そのモーメントはc r² dθ である：

$$P_{p(2)} = 2cH_d \tan\left(45^\circ + \tfrac{\varphi}{2}\right) \qquad M_c = \int_0^{\theta_1} c\,r^2 d\theta = \frac{c}{2\tan\varphi}\left(r_1^2 - r_0^2\right)$$

モーメントのつり合い $P_{pc}\,B/4 = P_{p(2)}\,H_d/2 + M_c$ から P_{pc} を求める。くさびのつり合い $q_c B = 2C\sin\phi + 2P_{pc}$（Cの鉛直成分）より、2つの関係式で括弧内の項が相殺される：

$$q_c = c\cot\varphi\left[\frac{e^{2\left(\frac{3\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\tan\varphi}}{2\cos^2\left(45^\circ+\frac{\varphi}{2}\right)} - 1\right] = c\cot\varphi\,(N_q - 1) = cN_c$$

$$N_c = \cot\varphi\,(N_q - 1)$$

結果

$\phi \to 0$ のとき $N_c \to 3\pi/2 + 1 = 5.71$ となる。Terzaghiの $\phi = 0$ における値は**5.7**である（Prandtlの5.14とは異なる方法）。$\phi = 30°$ に対して **$N_c = 37.16$**。

問題

例題

与条件

地盤	$\varphi' = 30^\circ$ と $\varphi' = 20^\circ$
前の例題	$N_q(30^\circ) = 22.46,\ N_q(20^\circ) = 7.44$

求めるもの

N_cの値を$N_c = \cot\phi\,(N_q - 1)$で求めよ；$\phi \to 0$の極限を記せ。

解答

解答

1 $\phi' = 30°$ と $\phi' = 20°$

$$N_c(30^\circ) = \frac{22.46 - 1}{0.5774} = \mathbf{37.16} \qquad N_c(20^\circ) = \frac{7.44 - 1}{0.3640} = \mathbf{17.69}$$

2 $\phi \to 0$の極限

$$N_c \to \frac{3\pi}{2} + 1 = \mathbf{5.71} \approx 5.7 \quad \text{（Terzaghiの値）}$$

$N_c(30°)$ = **37.16**、$N_c(20°)$ = **17.69**。同じϕ'ではN_cはN_qよりはるかに大きい：粘着力の項は低いϕ'で支配的となる。

GeoTervaで解答を確認する ↗

試行極と閉形式を持たない係数

理論

自重を考慮すると、極bにおけるらせんはもはや臨界ではない：極Oは直線fbのbを越えた延長上で**試行錯誤により**移動させる；各位置が新たならせんと新たなbcfjの質量を与える。Oまわりのモーメント：

$$P_{p\gamma} = \frac{W\, l_w + P_{p(3)}\, l_R}{l_p} \qquad P_{p(3)} = \tfrac{1}{2}\gamma H_d^2 \tan^2\!\left(45^\circ + \tfrac{\varphi}{2}\right)$$

最小の$P_{p\gamma}$は地盤が発揮する値である。くさびは今や自重も負担する：$W_w = \tfrac{1}{2} B\, h\, \gamma = (B^2/4)\, \gamma \tan\phi$。$P_{p\gamma} = \tfrac{1}{8}\, \gamma\, B^2\, K_{p\gamma} \tan^2\phi$と書けば（$K_{p\gamma}$は$\phi$のみに依存）：

$$q_\gamma B = 2P_{p\gamma} - W_w \;\Rightarrow\; q_\gamma = \tfrac{1}{2}\gamma B\, N_\gamma \qquad N_\gamma = \tfrac{1}{2}K_{p\gamma}\tan^2\varphi - \tfrac{1}{2}\tan\varphi$$

$K_{p\gamma}$は試行錯誤的な低減から得られるため、**N_γには閉形式が存在しない。**ϕごとに数値的に計算する。モジュールは**Kumbhojkar (1993)**の値（表1）を用い、その間を線形補間する：ϕ = 30° の場合、N_γ = 19.13である。

なぜ表なのか？

N_cとN_qは閉形式の式から求める。一方N_γは最小化の結果であり、同じ手法で表されても万人が使う式は存在しない。

問題

例題

与条件

地盤	$\varphi' = 20^\circ$（モジュールモデル）と30°、さらに22.5°
出典	**Kumbhojkar (1993) 表1：N_γ(22°) = 5.09、N_γ(23°) = 6.00**

求めるもの

N_γ(20°)、N_γ(30°)。これらから$K_{p\gamma}$を求める。さらにN_γ(22.5°)（線形補間）。

解答

解答

1 表1（$N_\gamma = \frac{1}{2} K_{p\gamma} \tan^2\phi - \frac{1}{2}\tan\phi \Rightarrow K_{p\gamma} = (2N_\gamma + \tan\phi)/\tan^2\phi$）

$$N_\gamma(20^\circ) = 3.64 \;\Rightarrow\; K_{p\gamma} = \frac{2(3.64) + 0.3640}{0.3640^2} = 57.7$$

$$N_\gamma(30^\circ) = 19.13 \;\Rightarrow\; K_{p\gamma} = \frac{2(19.13) + 0.5774}{0.5774^2} = 116.5$$

2 $\phi' = 22.5^\circ$：22°と23°の中間（t = 0.5）

$$N_\gamma = 5.09 + 0.5(6.00 - 5.09) = \mathbf{5.545}$$

$N_\gamma(20^\circ) = \mathbf{3.64}$、$N_\gamma(30^\circ) = \mathbf{19.13}$；$K_{p\gamma}$は57.7 → 116.5。モジュールは$N_c$と$N_q$も同じ表から線形補間する：22.5°では$N_c = 21.01$、$N_q = 9.71$。

GeoTervaで解答を確認する ↗

3つの部分の合計と表1

理論

3つの項を合計すると、粘性土・摩擦性土・重量を考慮した地盤における**帯状基礎**の支持力は次のようになる。

$$q_u = q_c + q_q + q_\gamma = c\,N_c + q\,N_q + \tfrac{1}{2}\gamma B\,N_\gamma$$

N_q、N_c、N_γは**ϕのみ**に依存する。表1はモジュールが読み込む値を与える。

重ね合わせは厳密ではない：N_qとN_cは基礎縁を極とする対数らせんから、N_γはOを極とする対数らせんから導かれる。別々に最小化した部分の和は、結合問題の最小値を超えることはない。誤差は**安全側である**。

実験は、くさびの辺がϕではなくおよそ**45° + ϕ/2**であることを示す。Terzaghiの係数（および本モジュール）は$\alpha = \phi$を保つ。45° + ϕ/2のくさびはPrandtl–Reissnerの係数（Meyerhof、Hansen、Vesicのモジュール）の基礎であり、それらのN_c、N_qの値が異なるのはこのためである。

表1（Terzaghi）

ϕ' (°)	N_c	N_q	N_γ
0	5.70	1.00	0.00
5	7.34	1.64	0.14
10	9.60	2.69	0.56
15	12.86	4.45	1.52
20	17.69	7.44	3.64
25	25.13	12.72	8.34
30	37.16	22.46	19.13
35	57.75	41.44	45.41
40	95.66	81.27	116.31
45	172.29	173.29	325.34
50	347.51	415.15	1,072.80

問題

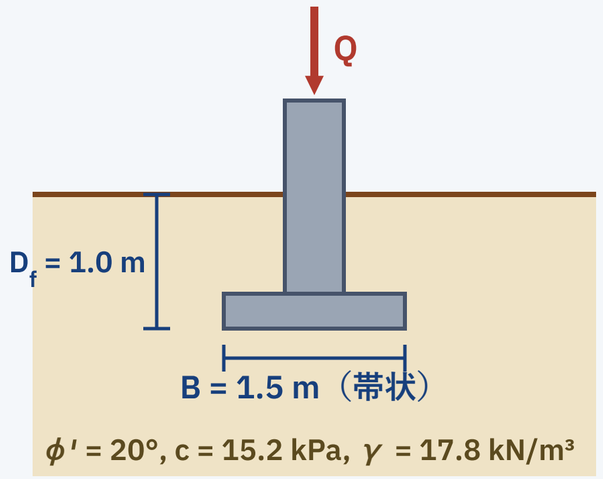
例題

与条件

基礎	**帯状（連続）、B = 1.5 m、D_f = 1.0 m**
地盤	$c = 15.2$ kPa, $\varphi' = 20°$, $\gamma = 17.8$ kN/m^3
地下水	**なし（深部）**
表1 (20°)	**N_c = 17.69, N_q = 7.44, N_γ = 3.64**

求めるもの

q_uおよび単位長さ当たりのQ_uの値を求めよ。



解答

解答

1 上載荷重 q = γ D_f = 17.8 × 1.0 = 17.8 kPa；帯状基礎では形状係数はない

$$q_u = 15.2(17.69) + 17.8(7.44) + \tfrac{1}{2}(17.8)(1.5)(3.64)$$
$$= 268.89 + 132.43 + 48.59 = \mathbf{449.91}\ \text{kPa}$$

2 単位長さ当たりの荷重

$$Q_u = q_u B = 449.91(1.5) = \mathbf{674.9}\ \text{kN/m}$$

帯状基礎の支持力は**449.9 kPa**：粘着力項60%、上載荷重29%、自重11%。

GeoTervaで解答を確認する ↗

半経験的な形状係数

理論

正方形または円形基礎の下の地盤は平面ひずみ状態ではない；導出を直接適用することはできない。Terzaghiは粘着力項と自重項に対して**半経験的係数**を提案した：

$$q_u = 1.3\,c\,N_c + q\,N_q + 0.4\,\gamma B\,N_\gamma \qquad \text{（正方形、B × B）}$$

$$q_u = 1.3\,c\,N_c + q\,N_q + 0.3\,\gamma B\,N_\gamma \qquad \text{（円形、直径B）}$$

飽和粘土中の非排水載荷（$\phi = 0$, $c = c_u$; $N_c = 5.7$, $N_q = 1$, $N_\gamma = 0$）：

$$q_u = 5.7\,c_u + q \ \text{（帯状）} \qquad q_u = 1.3 \times 5.7\,c_u + q = 7.41\,c_u + q \ \text{（正方形、円形）}$$

> モジュールの**形状**オプションはこれらの係数を選択する。Terzaghiは長方形基礎に対する係数を与えていない。その場合は形状係数付きの一般支持力式（Meyerhof、Hansen、Vesic）で扱う。

係数

基礎	c N_c	γ B N_γ	B
帯状	1	0.5	幅
正方形	1.3	0.4	縁
円	1.3	0.3	直径

問題

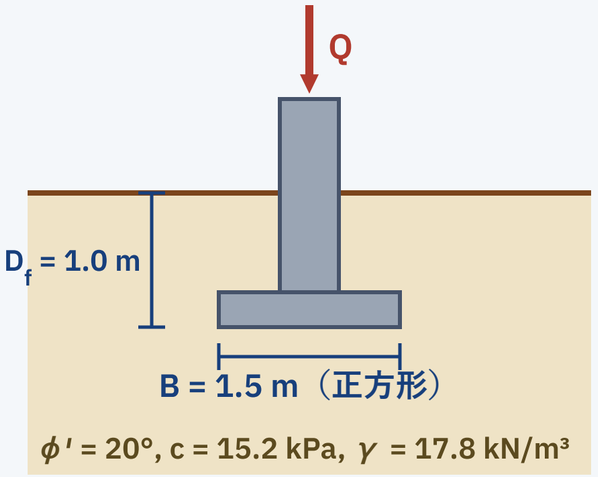
例題

与条件

基礎	**正方形、B = L = 1.5 m、根入れ深さD_f = 1.0 m**
地盤	$c = 15.2$ kPa, $\varphi' = 20^\circ$
単位体積重量	$\gamma = 17.8$ kN/m^3（上）
地下水	**なし（深部）**
比較	**円形、直径B = 1.5 m；また粘土：ϕ = 0、c_u = 40 kPa、γ = 18 kN/m³、D_f = 1 m**

求めるもの

正方形と円形についてはq_uとQ_u；粘土の帯状基礎と正方形基礎についてはq_u。



解答 (1/2)

解答

1 正方形 (0.4) と円形 (0.3)；$N_c = 17.69$、$N_q = 7.44$、$N_\gamma = 3.64$

$$\text{正方形：}\ q_u = 1.3(15.2)(17.69) + 17.8(7.44) + 0.4(17.8)(1.5)(3.64)$$
$$= 349.55 + 132.43 + 38.88 = \mathbf{520.86}\ \text{kPa}$$
$$\text{円：}\ q_u = 349.55 + 132.43 + 0.3(17.8)(1.5)(3.64) = \mathbf{511.14}\ \text{kPa}$$

2 荷重

$$Q_u^{square} = q_u B^2 = 520.86(2.25) = \mathbf{1{,}171.9}\ \text{kN}$$
$$Q_u^{circle} = q_u \frac{\pi B^2}{4} = 511.14(1.767) = \mathbf{903.3}\ \text{kN}$$

正方形基礎のq_uは円形基礎よりわずか1.9%大きいのみである（γ項のみが異なる）。

解答 (2/2)

解答

3 非排水粘土（q = 18 × 1 = 18 kPa；N_c = 5.7）

$$\text{帯状：}\ q_u = 5.7(40) + 18 = \mathbf{246.0}\ \text{kPa}$$

$$\text{正方形、円形：}\ q_u = 1.3(5.7)(40) + 18 = 7.41(40) + 18 = \mathbf{314.4}\ \text{kPa}$$

基礎	c N_cの項	q	q_u (kPa)
帯状	228.0	18.0	**246.0**
正方形／円形	296.4	18.0	**314.4**

粘土では支持力はほぼ粘着力のみに由来する；正方形基礎および円形基礎は帯状基礎より**28%**多く支持する（係数1.3）。

GeoTervaで解答を確認する ↗

同一の式、低減したcとϕ

理論

地盤が局部せん断で破壊するときは機構が十分に発達せず、強度の一部のみが発揮される。Terzaghiは**同じ式**を保ち、強度パラメータを低減した：

$$c' = \frac{2}{3}\,c \qquad \varphi' = \tan^{-1}\left(\frac{2}{3}\tan\varphi\right)$$

補正したN′c、N′q、N′γは同じ関数をϕ′で計算した値である（表3）：

$$q_u = c' N'_c + q N'_q + \tfrac{1}{2}\gamma B N'_\gamma \quad \text{（帯状）} \qquad q_u = 1.3\,c' N'_c + q N'_q + 0.4\,\gamma B N'_\gamma \quad \text{（正方形）}$$

c′ = ⅔ cであるから、正方形基礎と円形基礎では粘着力の項は1.3 × ⅔ = **0.867 c N′c**となる。

砂に対して、Vesic（1973）は固定値⅔の代わりに相対密度に依存する低減を提案した：**ϕ′ = tan⁻¹(k tan ϕ)**、k = 0.67 + D_r − 0.75 D_r^2（0 ≤ D_r ≤ 0.67）。

表3（局部せん断破壊）

ϕ (°)	ϕ′ (°)	N′c	N′q	N′γ
10	6.70	8.03	1.94	0.25
15	10.13	9.67	2.73	0.58
20	13.64	11.86	3.88	1.18
25	17.27	14.82	5.61	2.29
30	21.05	18.99	8.31	4.35
35	25.02	25.18	12.75	8.38
40	29.22	34.89	20.53	16.84

問題

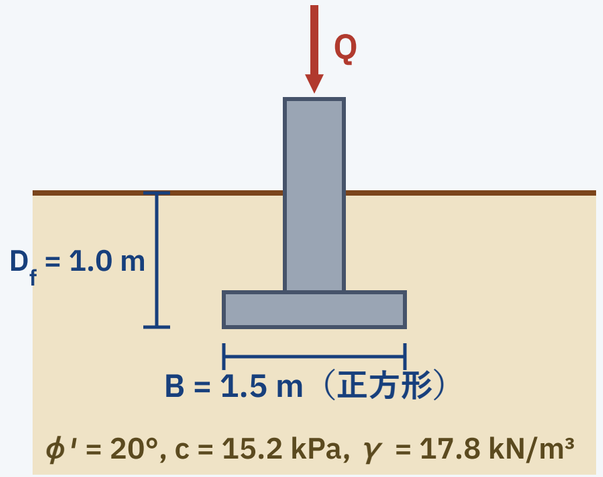
例題

与条件

基礎	**正方形、B = L = 1.5 m、根入れ深さD_f = 1.0 m**
地盤	$c = 15.2$ kPa, $\varphi' = 20^\circ$
単位体積重量	$\gamma = 17.8$ kN/m^3（上）
地下水	**なし（深部）**
破壊形式	**局部せん断破壊**

求めるもの

c′、ϕ'、補正した係数と**q_u**；全般せん断破壊に対する比。



解答 (1/2)

解答

1 低減した強さ（tan 20° = 0.3640）

$$\varphi' = \tan^{-1}\left(\tfrac{2}{3}\cdot 0.3640\right) = \mathbf{13.64}^\circ \qquad c' = \tfrac{2}{3}(15.2) = \mathbf{10.13}\ \text{kPa}$$

2 表3（ϕ' = 13.64°、補間による）

$$N_c' = \mathbf{11.86} \qquad N_q' = \mathbf{3.88} \qquad N_\gamma' = \mathbf{1.18}$$

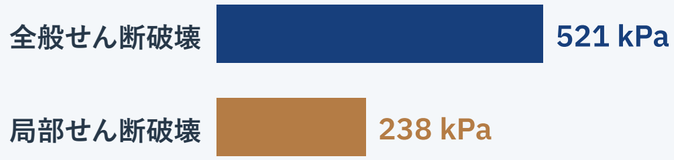
解答 (2/2)

解答

3 正方形基礎（q = 17.8 kPa）

$$q_u = 1.3(10.13)(11.86) + 17.8(3.88) + 0.4(17.8)(1.5)(1.18)$$
$$= 156.20 + 69.05 + 12.61 = \mathbf{237.86}\ \text{kPa}$$

局部せん断ではq_u = **237.86 kPa**であり、全般せん断（520.86 kPa）のわずか**46%**である。ゆるいまたは軟弱な地盤では、この低減により**半分以上**が失われる。



GeoTervaで解答を確認する ↗

水は q と γ のみを変化させる

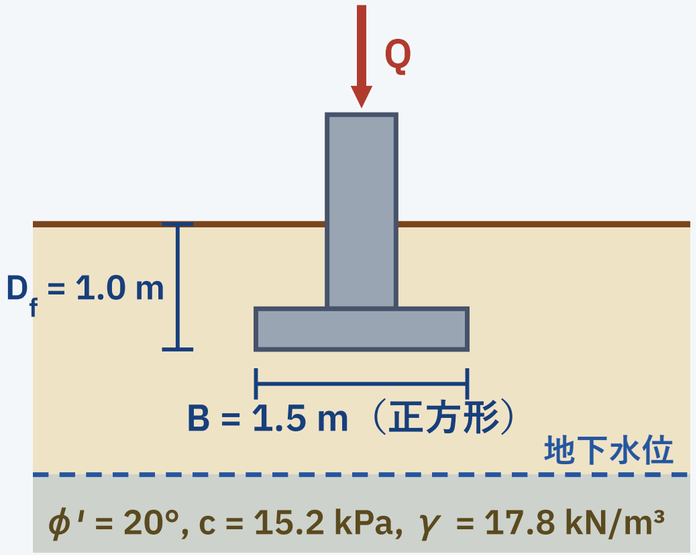
理論

誘導では地下水位が非常に深いと仮定している。底面に近い水は2つのものを変える。**上載荷重q**と½ γ BN γ の項の**単位体積重量**であり、係数を変えることは決してない。地下水位以下では有効単位体積重量は γ′ = γ sat − γ w（γ w = 9.81）となる。モジュールは3つのケースを区別する（D_wは地表面からの深さ）：

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

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

$D_w = D_f$（ケースII）はIの特別な場合であり、q = γ D_f、第3項では γ′を用いる。基礎底面が底面からB以深にある場合（D > B）、水は破壊領域の下にあるため、水がないものとして式を用いる。



問題

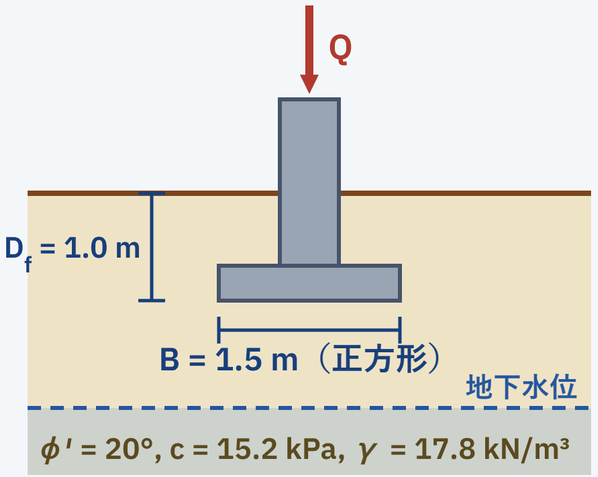
例題

与条件

基礎	**正方形、B = L = 1.5 m、根入れ深さD_f = 1.0 m**
地盤	$c = 15.2$ kPa, $\varphi' = 20^\circ$
単位体積重量	$\gamma = 17.8$ kN/m^3（上）
地下水	$\gamma_{sat} = 19$ kN/m^3；$D_w = 0.5;\ 1.0;\ 2.0$ と3.5 m

求めるもの

各ケースについて**q**、第3項の単位体積重量および正方形基礎のq_uを求めよ。



解答 (1/3)

解答

1 γ' = 19 − 9.81 = 9.19 kN/m³。ケースI（D_w = 0.5）およびII（D_w = D_f = 1.0）

$$D_w = 0.5: \ q = 17.8(0.5) + 9.19(0.5) = \mathbf{13.495}\ \text{kPa},\ \gamma' = 9.19$$

$$D_w = 1.0: \ q = 17.8(1.0) = \mathbf{17.8}\ \text{kPa},\ \gamma' = 9.19$$

2 ケースIII（D_w = 2.0 ⇒ D = 1.0 ≤ B = 1.5）および水の影響なし（D_w = 3.5 ⇒ D = 2.5 > B）

$$D_w = 2.0: \ \bar{\gamma} = \frac{1}{1.5}\left[17.8(1.0) + 9.19(0.5)\right] = \mathbf{14.93}\ \text{kN/m}^3,\ q = 17.8\ \text{kPa}$$

$$D_w = 3.5: \ q = 17.8,\ \gamma = 17.8$$

解答 (2/3)

解答

3 D_w = 2.0 mに対するq_u（正方形；第1項と第2項は不変）

$$q_u = 1.3(15.2)(17.69) + 17.8(7.44) + 0.4(14.93)(1.5)(3.64)$$
$$= 349.55 + 132.43 + 32.61 = \mathbf{514.59}\ \text{kPa}$$

モジュールを開いたときのモデル（D_w = 2 m、ケースIII）：q_u = **514.59 kPa**；水がなければ520.86 kPa。

解答 (3/3)

解答

D_w (m)	条件	q (kPa)	γ 第3項	q_u (kPa)
0.5	I	13.50	9.19	**470.0**
1.0	II	17.80	9.19	**502.1**
2.0	III	17.80	14.93	**514.6**
3.5	無視できる	17.80	17.80	**520.9**

水位が0.5 mのときq_u = 470、深いとき521 kPa（10%の差）。粘着力の項（349.6 kPa）は全く変化しない：**水はqとγを通じてのみ入る。**

GeoTervaで解答を確認する ↗

全応力と純応力、作用圧力

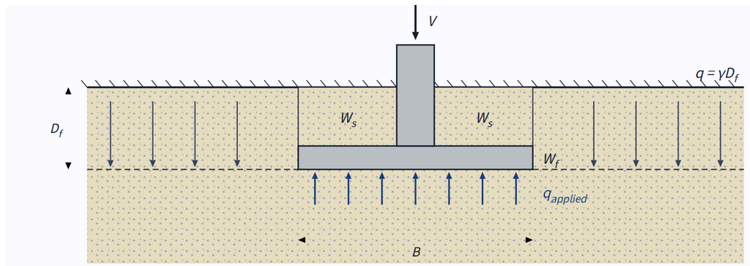
理論

q_uは破壊時の圧力である。モジュールはそれを安全率FSで除し、**全**圧力と**純**圧力を区別して扱う。純圧力とは、基礎が掘削前に底面に存在した上載荷重qの上に**付加する**圧力である：

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

作用させる圧力 q_{app} は、使用荷重作用下で底面に生じる**鉛直全圧力**である：柱荷重 V、基礎自重 W_f および基礎上面の土の重さ W_s の和を底面積で除したものである（正方形 B^2、円形 $\pi B^2/4$、帯状 B）。基礎は次の条件を満たす場合に適合とする：

$$q_{app} = \frac{V + W_f + W_s}{A} \le q_{all,g} \qquad FS_{\text{実際の}} = \frac{q_u}{q_{app}} \qquad q_{app} - q \le q_{all,n}$$



q ≥ 0かつFS ≥ 1ならば**全応力の照査が支配的**である：これが満たされれば純応力の照査も満たされる。$q_{応用}$を入力しなければ、モジュールは支持力のみを与える。FS ≈ 3が慣例である；これは理論よりも強度パラメータの不確実性を考慮したものである。

問題

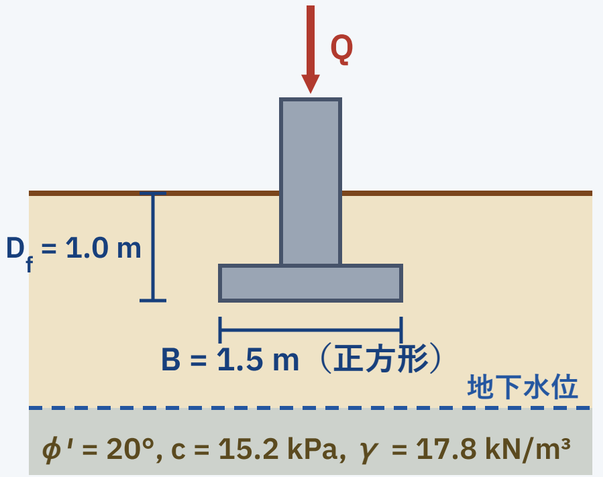
例題

与条件

基礎	**正方形、B = L = 1.5 m、根入れ深さ D_f = 1.0 m**
地盤	$c = 15.2$ kPa, $\varphi' = 20^\circ$
単位体積重量	$\gamma = 17.8$ kN/m^3（上）
地下水	$\gamma_{sat} = 19$ kN/m^3, $D_w = 2$ m（**例題7：$q_u = 514.59$ kPa**）
安全	**FS = 3**
載荷圧力	**(a) q_{app} = 150 kPa ・ (b) q_{app} = 200 kPa**

求めるもの

$q_{u,net}$, $q_{all,g}$, $q_{all,n}$、Q_{all}、および各q_{app}（適用圧力）に対する照査。



解答

解答

1 許容圧力（q = 17.8 kPa）

$$q_{u,net} = 514.59 - 17.8 = 496.79 \text{ kPa}$$

$$q_{all,g} = \frac{514.59}{3} = \mathbf{171.53} \text{ kPa} \qquad q_{all,n} = \frac{496.79}{3} = \mathbf{165.60} \text{ kPa}$$

$$Q_{all} = 171.53(1.5^2) = \mathbf{385.9} \text{ kN}$$

2 照査

(a) $150 \leq 171.53 \Rightarrow$ **成立する**, $FS_{\text{実際の}} = \dfrac{514.59}{150} = 3.43 \geq 3$

(b) $200 > 171.53 \Rightarrow$ **通過しない**, $FS_{\text{実際の}} = \dfrac{514.59}{200} = 2.57 < 3$

$q_{\text{適用}}$ = 150 kPaでは純条件も満たす（132.2 ≤ 165.6 kPa）。200 kPaでは全条件も純条件も満たさない。全条件が満たされれば、純条件は常に満たされる。

GeoTervaで解答を確認する ↗

まとめ

ポイントのまとめ

Terzaghi (1943)：帯状・粗面・浅い（$D_f \le B$）基礎。全般せん断破壊。くさび（I）、放射（II）および受働（III）領域。くさびの辺は $\alpha = \phi$

重ね合わせ：$P_p = P_{pq} + P_{pc} + P_{p\gamma}$ ；$q_u = cN_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma B N_\gamma$

$N_q = e^{2(3\pi/4 - \phi/2)\tan\phi}/[2\cos^2(45° + \phi/2)]$、**$N_c = \cot\phi\,(N_q - 1)$**（閉形式）、**$N_\gamma$** はKumbhojkarの表による（$\phi = 20°$：17.69、7.44、3.64）

正方形：$1.3\,cN_c + qN_q + 0.4\,\gamma B N_\gamma$ ；**円形**：0.3；**非排水**：$N_c = 5.7$、帯状 $5.7\,c_u + q$、正方形 $7.41\,c_u + q$

局部せん断：$c' = \frac{2}{3}c$、$\phi' = \tan^{-1}(\frac{2}{3}\tan\phi)$として同じ式を用いる（例：520.86 → 237.86 kPa）

地下水はqと γ のみを変化させる（3ケース）：例 514.59 kPa

照査：$q_{app} \le q_{all,g}$、FS_{actual}および純。$Q_{all} = q_{all,g} \cdot A$

参考文献

Terzaghi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics. Wiley, New York.

Das, B.M. (2017). Shallow Foundations: Bearing Capacity and Settlement, 3rd ed. CRC Press, Boca Raton — 2.2–2.3節。本ページは同書の導出の順序に従っている。

Das, B.M. (2018). Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed. Cengage Learning — 第16章：地下水位の場合分け、安全率、表16.1。

Kumbhojkar, A.S. (1993). Numerical evaluation of Terzaghi's N_γ. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 119(3), 598–607.

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. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 99(SM1), 45–73.

本ページの図は機構そのものから描いたものであり、式・図・表の番号は本ページ独自のものである。

注記

図の一部はGeoTervaの理論ページから引用した。数値例はすべてモジュール自身の計算ライブラリと表で作成したものであり、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