

---

第 1 回 中部支部イブニングセミナー(初級編①)

**「解けばなるほど・支持力」**

平成 22 年 6 月 18 日(金) 名城大学

大同大学 工学部 都市環境デザイン学科 准教授

**棚橋 秀行**

---

**内容**

1. 浅い基礎の支持力

- 1.1 一般的な問題 (例題 1・問題 1)
- 1.2 砂地盤の問題 (例題 2・問題 2)

2. 深い基礎の支持力

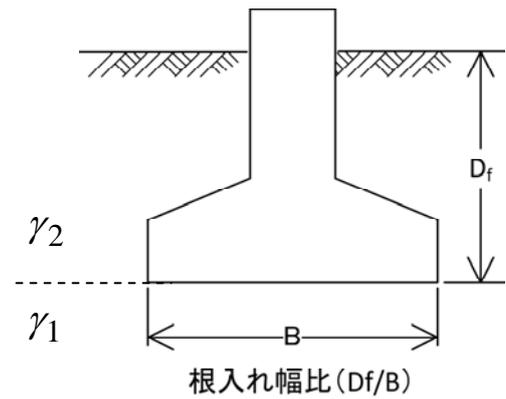
- 2.1 テルツァギの極限支持力修正式 (例題 3・問題 3)
- 2.2 マイヤホフの極限支持力修正式 (例題 4・問題 4)

# 1. 浅い基礎の支持力

■ 右図参照

$D_f$  (根入れ深さ) が  $B$  (基礎幅) より小さい ( $D_f / B \leq 1$ )  
ものを **浅い基礎** という。

$D_f$  (根入れ深さ) が  $B$  (基礎幅) より大きい ( $D_f / B > 1$ )  
ものを **深い基礎** という。



■ 右図参照

基礎に荷重を載せていくと、沈下が進んでいく。

(a) 全般せん断破壊・・・地盤が締まっているとき

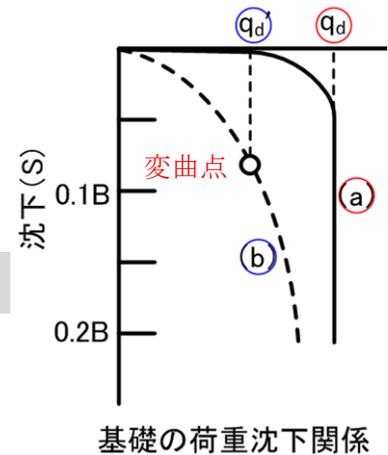
極限支持力  $q_d$  の式

$$q_d = \alpha \cdot c \cdot N_c + \beta \cdot \gamma_1 \cdot B \cdot N_\gamma + \gamma_2 \cdot D_f \cdot N_q$$

(b) 局部せん断破壊・・・地盤が緩いとき

極限支持力  $q_d'$  の式

$$q_d' = \alpha \cdot \left(\frac{2}{3}\right) \cdot c \cdot N_c' + \beta \cdot \gamma_1 \cdot B \cdot N_\gamma' + \gamma_2 \cdot D_f \cdot N_q'$$



\* 極限支持力は「力」といいながら単位は「圧力・応力」であることに注意。

【表1】  
実用的に修正した支持力係数

$\phi$	$N_c$	$N_r$	$N_q$
0°	5.3	0.0	1.0
5°	5.3	0.0	1.4
10°	5.3	0.0	1.9
15°	6.5	1.2	2.7
20°	7.9	2.0	3.9
25°	9.9	3.3	5.6
28°	11.4	4.4	7.1
32°	20.9	10.6	14.1
36°	42.2	30.5	31.6
40°	95.7	114.0	81.2
45°	172.3	325.8	173.3
50°	347.1	1073.4	414.7

【表2】 各種フーチングの形状係数

フーチングの形状	$\alpha$	$\beta$
帯状	1.0	0.5
円形	1.3	0.3
正方形	1.3	0.4
長方形	$1 + 0.3 \frac{B}{L}$	$0.5 - 0.1 \frac{B}{L}$

B:長方形の短辺長、L:長辺長

$c$  : 粘着力

$\gamma_1$  : 基礎底面より **下** にある土の単位体積重量

$\gamma_2$  : 基礎底面より **上** にある土の単位体積重量

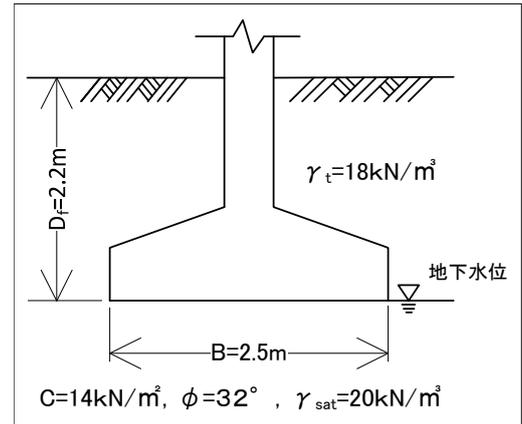
■ **許容支持力** ( $q_a$ ) =  $\frac{\text{極限支持力} (q_d)}{\text{安全率} (F)}$

## 1.1 一般的な問題

### 例題-1

右図に示す地盤条件のもとで、深さ 2.2m の地下水位のところまで掘削して、一辺の長さが 2.5m の正方形フーチング基礎を設置する。この地盤の極限支持力  $q_d$  を求めよ。ただし、 $c=14\text{kN/m}^2$ 、 $\phi=32^\circ$ 、 $\gamma_t=18\text{kN/m}^3$ 、の均質な地盤で地下水面下では  $\gamma_{\text{sat}}=20\text{kN/m}^3$  である。

また、安全率を 3 としたとき許容支持力  $q_a$  はいくらか。



全般破壊での極限支持力の一般式に必要な数値を決めてゆく。

$$q_d = \alpha \cdot c \cdot N_c + \beta \cdot \gamma_1 \cdot B \cdot N_\gamma + \gamma_2 \cdot D_f \cdot N_q$$

■正方形フーチング→表 2 より  $\alpha = 1.3$ 、 $\beta = 0.4$  である。

■内部摩擦角  $\phi = 32^\circ$ →表 1 より  $N_c = 20.9$ 、 $N_r = 10.6$ 、 $N_q = 14.1$  である。

■基礎底面下の単位体積重量  $\gamma_1 = 20 - 9.8 = 10.2$  (kN/m<sup>3</sup>) である。

■基礎底面上の単位体積重量  $\gamma_2 = 18$  (kN/m<sup>3</sup>) である。

これらを代入すると、極限支持力  $q_d$  は、

$$\begin{aligned} q_d &= 1.3 \times 14 \times 20.9 + 0.4 \times 10.2 \times 2.5 \times 10.6 + 18 \times 2.2 \times 14.1 \\ &= 1046.9 \text{ (kN/m}^2\text{)} \text{ である。} \end{aligned}$$

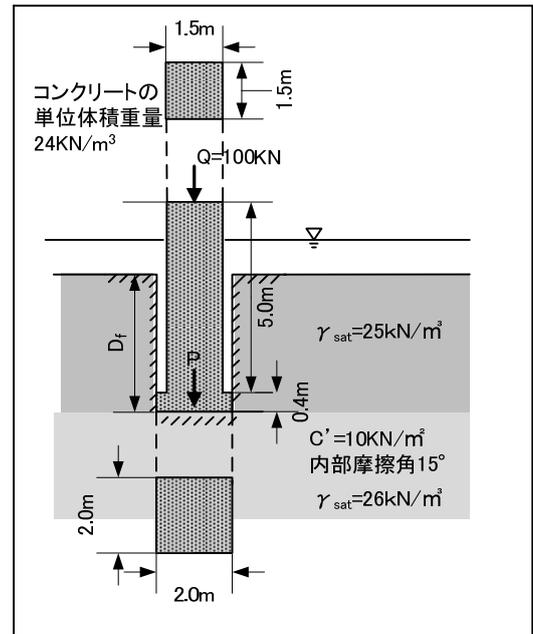
安全率  $F=3$  なので、許容支持力  $q_a$  は

$$q_a = 1046.9 / 3 = 349 \text{ (kN/m}^2\text{)} \text{ である。}$$

## 問題-1

右図に示すような、 $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$  の正方形断面を持つ高さ  $5\text{m}$  のコンクリート構造物がある。

これが、 $2.0\text{m} \times 2.0\text{m}$  の正方形平面を持ち、厚さ  $0.4\text{m}$  コンクリートフーチングの上に載り、また構造物の上部中央に  $100\text{kN}$  の集中荷重がかかったとき、この構造物が安定するために必要な根入れの深さを、安全率  $1.5$  として求めよ。



全般破壊での極限支持力の一般式に、根入れ深さ  $D_f$  以外の数値を決めて代入してゆく。

$$q_d = \alpha \cdot c \cdot N_c + \beta \cdot \gamma_1 \cdot B \cdot N_\gamma + \gamma_2 \cdot D_f \cdot N_q$$

■正方形フーチング→表 2 より  $\alpha = 1.3$ 、 $\beta = 0.4$  である。

■内部摩擦角  $\phi = 15^\circ$ →表 1 より  $N_c = 6.5$ 、 $N_\gamma = 1.2$ 、 $N_q = 2.7$  である。

■基礎底面下の単位体積重量  $\gamma_1 = 26 - 9.8 = 16.2$  ( $\text{kN/m}^3$ ) である。

■基礎底面上の単位体積重量  $\gamma_2 = 25 - 9.8 = 15.2$  ( $\text{kN/m}^3$ ) である。

これらを代入すると、極限支持力  $q_d$  は、

$$q_d = 1.3 \times 10 \times 6.5 + 0.4 \times 16.2 \times 2 \times 1.2 + 15.2 \times D_f \times 2.7$$

$$= 100.05 + 41.04 D_f \quad (\text{kN/m}^2) \text{ である。}$$

$$\text{コンクリート構造物の自重 } W = (2 \times 2 \times 0.4 + 1.5 \times 1.5 \times 5) \times 24$$

$$= 308.4 \quad (\text{kN}) \text{ である。}$$

$$\text{基礎底面にかかる圧力 } P = (W+Q) / A = (308.4 + 100) / 4$$

$$= 102.1 \quad (\text{kN/m}^2) \text{ である。}$$

安全率  $F=1.5$  なので、 $q_d / 1.5 = P$  である。この式に  $q_d$ 、 $P$  を代入して根入れ深さ  $D_f$  について求めると、

$$\text{(途中計算)} \quad (100.05 + 41.04 D_f) / 1.5 = 102.1$$

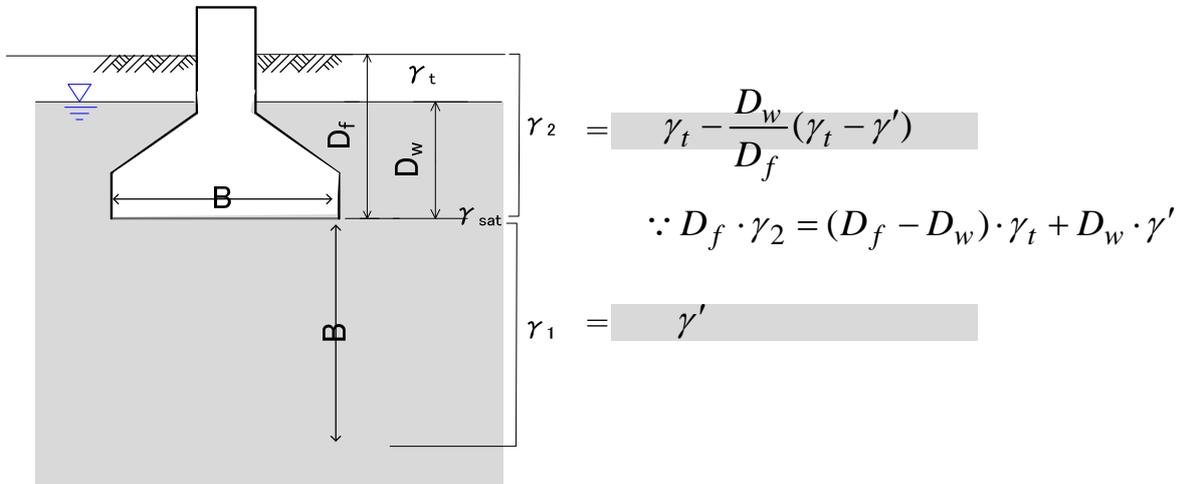
$$\text{(途中計算)} \quad 100.05 + 41.04 D_f = 153.15$$

よって、必要な根入れ深さ  $D_f = 1.29$  m である。

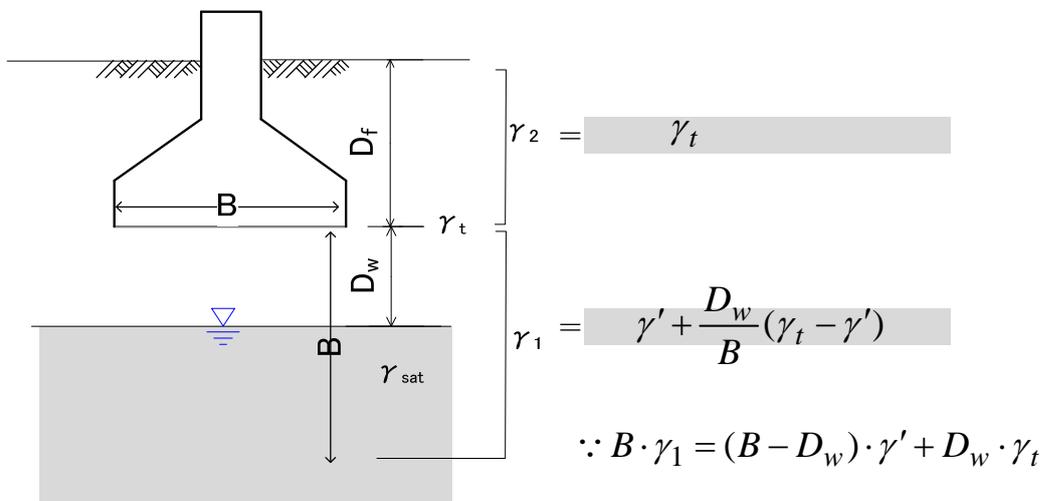
## 1.2 砂地盤の問題

式  $q_d = \alpha \cdot c \cdot N_c + \beta \cdot \gamma_1 \cdot B \cdot N_\gamma + \gamma_2 \cdot D_f \cdot N_q$  の中の  $\gamma_1$  と  $\gamma_2$  について

地下水位が基礎底面より上にある場合

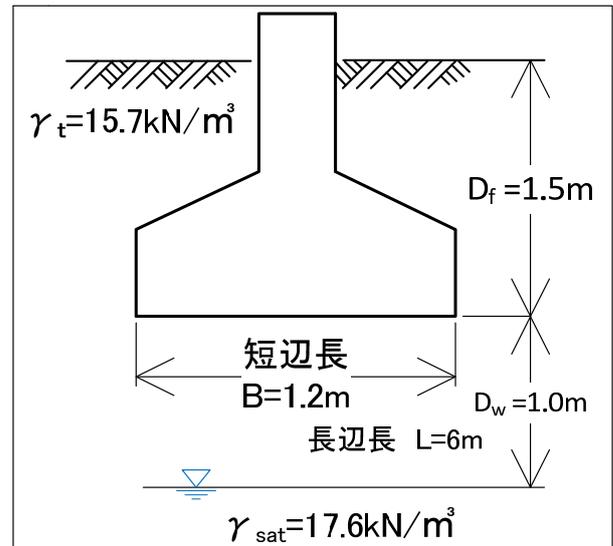


地下水位が基礎底面より下にある場合



## 例題 2

右図に示す長方形の基礎を、砂質土に施工する場合の許容支持力を安全率 3 として求めよ。この砂地盤に粘着力はなく、内部摩擦角  $\phi_d=30^\circ$  とする。



全般破壊での以下の極限支持力の一般式に必要な数値を決めてゆく。

$$q_d = \alpha \cdot c \cdot N_c + \beta \cdot \gamma_1 \cdot B \cdot N_\gamma + \gamma_2 \cdot D_f \cdot N_q$$

■長方形の基礎→表 2 より  $\alpha = 1 + 0.3 \times 1.2 / 6 = 1.06$ 、  
 $\beta = 0.5 - 0.1 \times 1.2 / 6 = 0.48$  である。

■内部摩擦角  $\phi = 30^\circ$ →表 1 に数値がないので内挿すると、

$$N_c = (11.4 + 20.9) / 2 = 16.15、$$

$$N_\gamma = (4.4 + 10.6) / 2 = 7.5、$$

$$N_q = (7.1 + 14.1) / 2 = 10.6 \text{ である。}$$

■基礎底面下の単位体積重量  $\gamma_1 = 17.6 + (15.7 - (17.6 - 9.8)) / 1.2 = 14.4$  (kN/m<sup>3</sup>) である。

■基礎底面上の単位体積重量  $\gamma_2 = 15.7$  (kN/m<sup>3</sup>) である。

これらを代入すると、極限支持力  $q_d$  は、

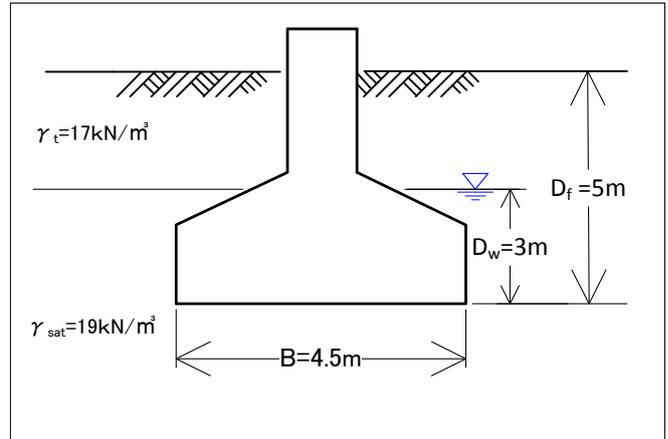
$$q_d = 1.06 \times 0 \times 16.15 + 0.48 \times 1.2 \times 14.4 \times 7.5 + 15.7 \times 1.5 \times 10.6 = 311.8 \text{ (kN/m}^2\text{) である。}$$

安全率  $F=3$  なので、許容支持力  $q_a$  は

$$q_a = 311.8 / 3 = 104 \text{ (kN/m}^2\text{) である。}$$

## 問題 2

右図に示す円形の基礎を、砂質土に施工する場合の許容支持力を安全率 3 として求めよ。この砂地盤に粘着力はなく、内部摩擦角  $\phi_d=25^\circ$  とする。



全般破壊での以下の極限支持力の一般式に必要な数値を決めてゆく。

$$q_d = \alpha \cdot c \cdot N_c + \beta \cdot \gamma_1 \cdot B \cdot N_\gamma + \gamma_2 \cdot D_f \cdot N_q$$

■ 円形の基礎→表 2 より  $\alpha = 1.3$ 、 $\beta = 0.3$  である。

■ 内部摩擦角  $\phi = 25^\circ$ →表 1 より、 $N_c = 9.9$ 、 $N_\gamma = 3.3$ 、 $N_q = 5.6$  である。

■ 基礎底面下の単位体積重量  $\gamma_1 = 19 - 9.8 = 9.2$  (kN/m<sup>3</sup>) である。

■ 基礎底面上の単位体積重量  $\gamma_2 = 17 + (3/5)(17 - 9.2)$   
 $= 12.32$  (kN/m<sup>3</sup>) である。

これらを代入すると、極限支持力  $q_d$  は、

$$q_d = 1.3 \times 0 \times 9.2 + 0.3 \times 4.5 \times 9.2 \times 3.3 + 12.32 \times 5.6 \times 5$$

$$= 386.0 \text{ (kN/m}^2\text{)} \text{ である。}$$

安全率  $F=3$  なので、許容支持力  $q_a$  は

$$q_a = 386.0 / 3 = 129 \text{ (kN/m}^2\text{)} \text{ である。}$$

## 2. 深い基礎の支持力

### 2.1 テルツァギの極限支持力修正式

杭の極限支持力  $Q_d$  は、杭先端の地盤の極限支持力  $Q_p$  と、杭の周面に働く摩擦力  $Q_f$  の和として次式で求められる（杭の断面が円形とした場合）。

$$\begin{aligned}
 Q_d &= Q_p + Q_f \\
 &= q_d \cdot A_p + f_s \cdot \pi \cdot B \cdot D_f \\
 &= (1.3c \cdot N_c + 0.3 \cdot \gamma_1 \cdot B \cdot N_r + \gamma_2 \cdot D_f \cdot N_q) \cdot A_p + f_s \cdot \pi \cdot B \cdot D_f \quad (\text{kN})
 \end{aligned}$$

ここで、 $c$ ：杭先端の地盤の粘着力(kN/m<sup>2</sup>)

$\gamma_1$ ：杭先端より 下 の土の単位体積重量(kN/m<sup>3</sup>)

$\gamma_2$ ：杭先端より 上 の土の単位体積重量(kN/m<sup>3</sup>)

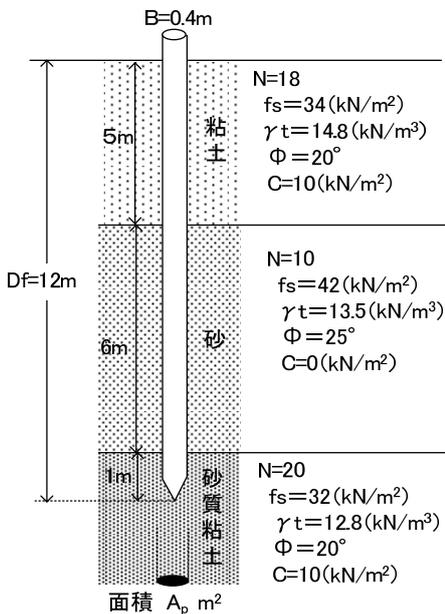
$A_p$ ：杭先端の面積(m<sup>2</sup>)  $B$ ：杭の直径(m)  $f_s$ ：杭の周面摩擦力(kN/m<sup>2</sup>)

$D_f$ ：地盤表面から杭先端までの深さ(m)

$N_c$ 、 $N_r$ 、 $N_q$  支持力係数（浅い基礎と同じ。表 1）

実際には地層が一つではないことが多く、以下の例題 3 に示したような計算になる。

**例題 3** 図に示す杭の極限支持力（kN）をテルツァギの式で求めよ。



$$Q_d = q_d \cdot A_p + f_s \cdot \pi \cdot B \cdot D_f$$

に代入する数値：（ $q_d$  は別途計算する。）

$$A_p = \pi \times 0.2 \times 0.2 = 0.1256 (\text{m}^2)$$

$f_s$ ：杭の周面摩擦力を重みづけ平均する。

$$f_s = (5 \times 34 + 6 \times 42 + 1 \times 32) / 12$$

$$= 37.83 \quad (\text{kN/m}^2)$$

$$B=0.4\text{m} \quad D_f=12\text{m}$$

$$q_d = 1.3 \cdot c \cdot N_c + 0.3 \cdot \gamma_1 \cdot B \cdot N_r + \gamma_2 \cdot D_f \cdot N_q$$

に代入する数値：

第 1 項 杭の先端近傍  $c=10(\text{kN/m}^2)$   $N_c=7.9$  ( $\phi=20^\circ$ 、表-1 より)

第 2 項 杭の先端下  $\gamma_1=12.8(\text{kN/m}^3)$   $N_r=2.0$  ( $\phi=20^\circ$ 、表-1 より)

第 3 項 杭の先端上 以下の合計をする

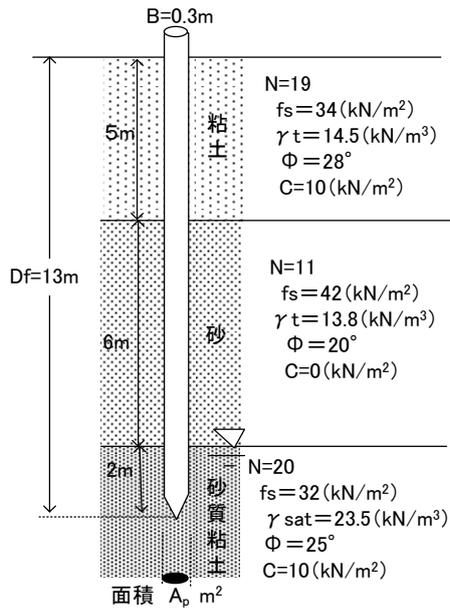
5m の粘土層  $14.8 \times 5 \times 3.9$  ( $\phi=20^\circ$ 、表-1 より  $N_q=3.9$ )

6m の砂層  $13.5 \times 6 \times 5.6$  ( $\phi=25^\circ$ 、表-1 より  $N_q=5.6$ )

1m の砂質粘土層  $12.8 \times 1 \times 3.9$  ( $\phi=20^\circ$ 、表-1 より  $N_q=3.9$ ) →計 792.1(kN/m<sup>2</sup>)

以上の数値をすべて代入すると・・・(途中計算省略) 極限支持力  $Q_d=683.0$  (kN) が求まる。

**問題 3** 図に示す杭の極限支持力 (kN) をテルツァギの式で求めよ。



$$f_s = 37.38$$

$$A_p = 0.0707$$

$$f_s \cdot \pi \cdot B \cdot D_f = 457.99$$

$$q_d = 1123.88$$

$$\therefore Q_d = 1123.88 \times 0.0707 + 457.99$$

$$= 537.5 \text{ (kN)}$$

## 2.2 マイヤホフの極限支持力修正式

テルツァギの式で必要となる杭先端部分の強度定数 $c$ 、 $\phi$ などを測定することは困難な場合が多いため、マイヤーホフ (Meyerhof) は実用を考え、 $N$  値から極限支持力  $Q_d$  を求める式を提案した。その後、我が国において適用できるように修正されたのが以下の式である。

マイヤホフの極限支持力  $Q_d$  の式

$$Q_d = (40N \cdot A_b + 0.2N_a \cdot \sum A_{s,i} + 0.5N_{cl} \cdot \sum A_{cl,i}) \times g$$

$$N = (N'_1 + N'_2) / 2$$

$N'_1$ …杭径  $B$  に対して杭先端から下方  $3B$  内の 最小  $N$  値(無次元)

$N'_2$ …杭径  $B$  に対して杭先端から上方  $10B$  内の 平均  $N$  値(無次元)

$A_b$ …杭の底面積( $m^2$ )

$N_s$ …杭全体の 砂質・砂礫土 の 平均  $N$  値(無次元)

$\sum A_{s,i}$ …杭全体の 砂質・砂礫土 の表面積の和( $m^2$ )

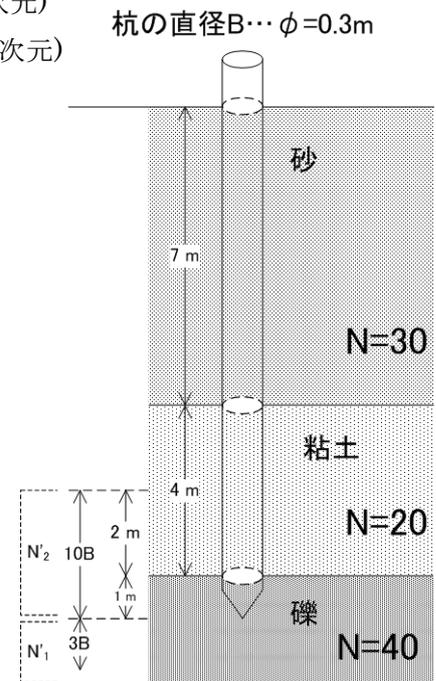
$N_{cl}$ …杭全体の 粘性土 の 平均  $N$  値(無次元)

$\sum A_{cl,i}$ …杭全体の 粘性土 の表面積の和( $m^2$ )

重力加速度  $g = 9.81(m/s^2)$

マイヤホフの極限支持力式を用いる場合、ふつう安全率は 3 とする。

$$(\text{許容支持力 } Q_a) = (\text{極限支持力 } Q_d) / (\text{安全率 } 3)$$



**例題 4** 図に示す杭の許容支持力 (kN) を、マイヤホフ式で求めよ。安全率は 3 とする。

**解答** 極限支持力に関するマイヤホフ式

$$Q_d = (40NA_b + 0.2N_s \sum A_{s,i} + 0.5N_{cl} \sum A_{cl,i})g \text{ に必要な数値を決めてゆく。}$$

$$N = (N'_1 + N'_2) / 2$$

\*  $N'_1$ …杭径 B に対して杭先端から下方 3B 内の最小 N 値

$$\text{図より、} N'_1 = 50$$

\*  $N'_2$ …杭径 B に対して杭先端から上方 10B 内の平均 N 値

$$10B = 10 \times 0.4 = 4 \text{ m}$$

この 4m のうち 3m は砂層 (N=30)、1m は礫層 (N=50) であるので、重み付けした平均をとる。

$$N'_2 = (3 \times 30 + 1 \times 50) / 4 = 35$$

… $N'_1$  と  $N'_2$  を代入して、 $N = (N'_1 + N'_2) / 2$

$$= (50 + 35) / 2 = 42.5$$

$$\text{杭の底面積 } A_b = \pi r^2 = 0.2^2 \times 3.1415 = 0.126 \text{ (m}^2\text{)}$$

$N_s$ …杭全体の砂質・砂礫土の平均 N 値

砂質・砂礫土あわせて 7m のうち、6m は砂層 (N=30)、

1m は礫層 (N=50) であるので、重み付けした平均をとる。  $N_s = (6 \times 30 + 1 \times 50) / 7 = 32.86$

$\sum A_{s,i}$ …杭全体の砂質・砂礫土の表面積の和

$$\sum A_{s,i} = 2\pi r l_s = 2\pi \times 0.2 \times 7 = 8.792 \text{ (m}^2\text{)} \quad \text{ここで } l_s \text{ は砂質・砂礫土層の厚み (m)}$$

$N_{cl}$ …杭全体の粘性土の平均 N 値

$$\text{図より、} N_{cl} = 2$$

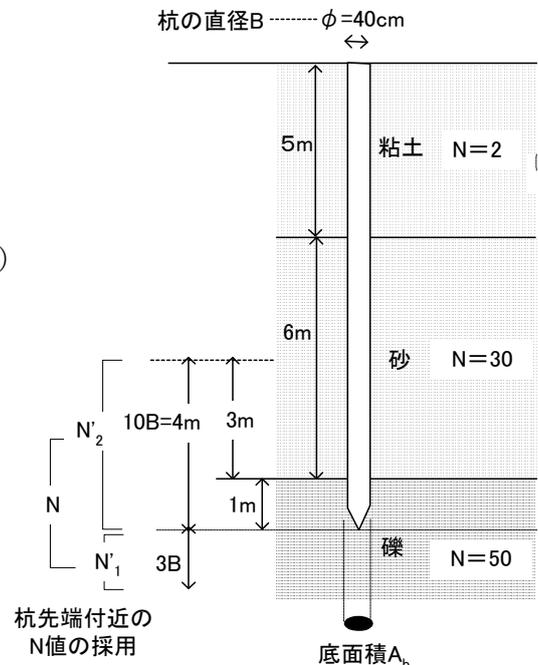
$\sum A_{cl,i}$ …杭全体の粘性土の表面積の和

$$\text{図より、} \sum A_{cl,i} = 2\pi r l_c = 2\pi \times 0.2 \times 5 = 6.28 \text{ (m}^2\text{)} \quad \text{ここで } l_c \text{ は粘性土層の厚み (m)}$$

マイヤホフの極限支持力式に上記の数値を代入すると、極限支持力  $Q_d$  は、

$$\begin{aligned} Q_d &= (40NA_b + 0.2N_s \sum A_{s,i} + 0.5N_{cl} \sum A_{cl,i})g \\ &= (40 \times 42.5 \times 0.126 + 0.2 \times 32.86 \times 8.792 + 0.5 \times 2 \times 6.28) \times 9.81 \\ &= 2723.1 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

$$\text{許容支持力 } Q_a = \text{極限支持力 } Q_d / (\text{安全率 } 3) = 2723.1 / 3.0 = 907.7 \text{ (kN)}$$



**答** 許容支持力  $Q_a = 908 \text{ (kN)}$

**問題 4** 図に示す杭の許容支持力 (kN) をマイヤホフ式で求めよ。安全率は 3 とする。

**解答** 極限支持力に関するマイヤホフ式

$$Q_d = (40NA_b + 0.2N_s \sum A_{s,i} + 0.5N_{cl} \sum A_{cl,i})g \text{ に必要な数値を決めてゆく。}$$

$$N = (N'_1 + N'_2) / 2$$

\*  $N'_1$ …杭径 B に対して杭先端から下方 3B 内の最小 N 値

$$B = 0.5 \text{ m} \quad 3B = 3 \times 0.5 = 1.5 \text{ m}$$

図より、 $N'_1 = 4$

\*  $N'_2$ …杭径 B に対して杭先端から上方 10B 内の平均 N 値

$$10B = 10 \times 0.5 = 5 \text{ m}$$

この 5 m のうち 1m は粘土層 ( $N = 2$ )、4m は礫層 ( $N = 40$ ) であるので、重み付けした平均をとる。

$$N'_2 = (1 \times 2 + 4 \times 40) / 5 = 32.4$$

$N'_1$  と  $N'_2$  を代入して、

$$N = (N'_1 + N'_2) / 2 = (4 + 32.4) / 2 = 18.2$$

$$\text{杭の底面積 } A_b = \pi r^2 = 3.14 \times 0.25^2 = 0.196 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$N_s \dots \text{杭全体の砂質・砂礫土の平均 N 値} \quad (3 \times 30 + 1 \times 50) / 4$$

砂質・砂礫土あわせて(4+2+4)= 10 m のうち、上から 4m は砂層 ( $N = 30$ )、2m は礫層 ( $N = 50$ )、4m は礫層 ( $N = 40$ ) であるので、重み付けした平均をとる。

$$N_s = (4 \times 30 + 2 \times 50 + 4 \times 40) / 10 = 38$$

$\sum A_{s,i}$ …杭全体の砂質・砂礫土の表面積の和

$$\sum A_{s,i} = 2\pi r l_s = 2\pi \times 0.25 \times 10 = 15.71 \text{ (m}^2\text{)} \quad \text{ここで } l_s \text{ は砂質・砂礫土層の厚み (m)}$$

$N_{cl}$ …杭全体の粘性土の平均 N 値

粘性土はあわせて(2+4)= 6 m のうち、すべて  $N = 2$  であるので、 $N_{cl} = 2$

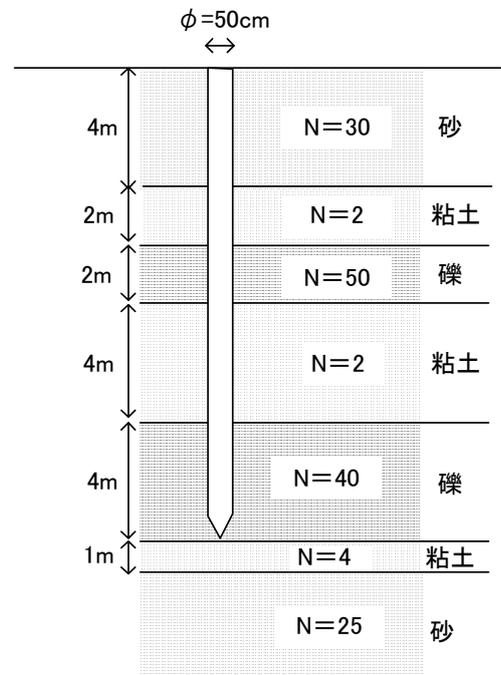
$\sum A_{cl,i}$ …杭全体の粘性土の表面積の和

$$\text{図より、} \sum A_{cl,i} = 2\pi r l_c = 2\pi \times 0.25 \times 6 = 9.42 \text{ (m}^2\text{)} \quad \text{ここで } l_c \text{ は粘性土層の厚み (cm)}$$

マイヤホフの極限支持力式に上記の数値を代入すると、極限支持力  $Q_d$  は、

$$\begin{aligned} Q_d &= (40NA_b + 0.2N_s \sum A_{s,i} + 0.5N_{cl} \sum A_{cl,i})g \\ &= (40 \times 18.2 \times 0.196 + 0.2 \times 38 \times 15.71 + 0.5 \times 2 \times 9.42) \times 9.81 \\ &= 2663 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

$$\text{許容支持力 } Q_a = \text{極限支持力 } Q_d / (\text{安全率 } 3) = 2663 / 3.0 = 887.7 \text{ (kN)}$$



**答** 許容支持力  $Q_a = 888$  (kN)