

杭設計計算

- 補強杭の設計計算 -

| | | | |
|-----|------------------|------------------|--|
| 地区名 | 金沢市黒田一丁目35番地 | | |
| 測線名 | GODAI 測線 | | |
| 備考 | TEL 076-240-9587 | FAX 076-240-9585 | |

| 計算条件 | | 杭頭: x=0 | | | | |
|------|---------------|----------|----------|-------------------|----------|--|
| 項目 | 記号 | 単位 | 数 | 値 | | |
| 杭材 | 鋼材の種類 | — | — | 鋼管 | | |
| | 材質 | — | — | 490材相当品 | | |
| | 外径 | d | mm | 318.5 | | |
| | 肉厚 | t | mm | 25.0 | | |
| 設計条件 | 移動層の杭長 | l_e | m | 16.00 | | |
| | 計画安全率 | F_p | — | 1.050 | | |
| | 必要抑止力 | モーメント検定用 | Pr_m | kN/m | 475.3 | |
| | | せん断検定用 | Pr_s | kN/m | 499.1 | |
| | 荷重の作用位置 | — | — | 三角形分布荷重 (移動層) | | |
| | すべり面傾斜角度 | e | ° | 0.0 | | |
| | 杭にかかる初期軸力 | Nf_1 | kN | 0.0 | | |
| | 安定解析式の値 (杭谷側) | 分子項 | R_k | kN/m | 1265.000 | |
| 分母項 | | T_k | kN/m | -344.500 | | |
| 許容値 | 許容応力度 (長期) | 曲げ | sa | N/mm ² | 185 | |
| | | せん断 | sa | N/mm ² | 105 | |
| 地盤 | 変形係数 | 移動層 | E_{se} | kN/m ² | 30000 | |
| | | 不動層 | E_{sr} | kN/m ² | 50000 | |
| | 粘着力 | 移動層 | C_e | kN/m ² | 20.0 | |
| | | 不動層 | C_r | kN/m ² | 50.0 | |
| | 内部摩擦角 | 移動層 | e | ° | 20.0 | |
| | | 不動層 | r | ° | 35.0 | |
| | 単位体積重量 | 移動層 | e | kN/m ³ | 18.0 | |
| | | 不動層 | r | kN/m ³ | 20.0 | |
| | 安全率 | | F_s | — | 2.0 | |

計算結果

杭頭：x=0

| 項 | | 目 | 記号 | 単位 | 数 | 値 |
|-------|-------------|-----|-----------|-------------------|--------|-------------|
| 水平負担力 | モーメント検定用 | | H_m | kN | 1140.7 | |
| | せん断検定用 | | H_s | kN | 1197.8 | |
| 発生応力 | 最大曲げモーメント | | M_{max} | kN・m/m | 14.29 | |
| | 発生位置 | | X_m | m | 14.71 | |
| | 最大変位 | | Y_{max} | mm/m | 1.7 | |
| | 発生位置 | | X_y | m | 13.31 | |
| 杭間隔 | せん断力による所要間隔 | | D_s | m | 2.43 | |
| | 曲げモーメント所要間隔 | | D_m | m | 20.20 | |
| | 変位による所要間隔 | | D_y | m | 11.76 | |
| | 決定杭間隔 | | D | m | 2.4 | |
| 応力度 | 曲げ応力度 | | s | kN/m ² | 22977 | |
| | せん断応力度 | | s | kN/m ² | 103463 | |
| | 曲げ応力度照査 | | — | kN/m ² | 22977 | 185000・・・OK |
| | せん断応力度照査 | | — | kN/m ² | 103463 | 105000・・・OK |
| 杭長 | 必要根入長 | | l_r' | m | 5.51 | |
| | 根入長 | | l_r | m | 6.00 | |
| | 杭全長 | | l_p | m | 22.00 | |
| 降伏破壊 | 受働土圧 | 移動層 | Q_{pe} | kN | 2682.2 | |
| | | 不動層 | Q_{pr} | kN | 4570.0 | |
| | 地盤降伏・破壊の検討 | | — | kN | 1140.7 | 2682.2・・・OK |
| | | | — | kN | 1140.7 | 4570.0・・・OK |

1. 設計条件

1.1 荷重に関する条件

荷重条件は以下の通りである。

| 杭の解析種別 | | 補強杭 |
|----------------------------|---|----------------|
| 荷重の作用状態 | | 三角形分布荷重 |
| 移動層の杭長 | $l_e =$ | 16.00 (m) |
| 必要抑止力(モーメント検定用) | $Pr_m =$ | 475.3 (kN/m) |
| 必要抑止力(せん断検定用) | $Pr_s =$ | 499.1 (kN/m) |
| すべり面傾斜角度 | $e =$ | 0.0 (°) |
| 単位幅当たりの水平負担力 (モーメント検定用) | $H_{mu} = Pr_m \cos e$ $= 475.3 \times \cos(0.0)$ $= 475.3$ | (kN/m) |
| 単位幅当たりの水平負担力 (せん断検定用) | $H_{su} = Pr_s \cos e$ $= 499.1 \times \cos(0.0)$ $= 499.1$ | (kN/m) |
| 単位幅当たりの鉛直負担力 | $V_u = Pr_m \sin e$ $= 475.3 \times \sin(0.0)$ $= 0.0$ | (kN/m) |

1.2 杭材に関する条件

1.2.1 設計強度

当地区の杭は打設位置及び移動土塊の特性上、常時設計外力が作用する杭と判断できる。従って長期強度を用いて設計する。

| 杭の材質 | | 490材相当品 |
|--------------|---------|---------------------------|
| 許容曲げ応力度 (長期) | $s_a =$ | 185 (N/mm ²) |
| 許容せん断応力度(長期) | $s_a =$ | 105 (N/mm ²) |

1.2.2 設計に用いる杭の諸元

設計に用いる鋼管杭の諸元は以下のとおりである。

| | | | |
|-----------|------------------|---|--------------------|
| 外径 | $d =$ | 318.5 | (mm) |
| 肉厚 | $t =$ | 25.0 | (mm) |
| 単位長さ質量 | $W =$ | 181.0 | (kg/m) |
| 断面積 | $A =$ | 2.305×10^{-2} | (m^2) |
| 断面二次モーメント | $I =$ | 2.500×10^{-4} | (m^4) |
| 断面係数 | $Z =$ | 1.570×10^{-3} | (m^3) |
| 杭の弾性係数 | $E =$ | 2.0×10^8 | (kN/m^2) |
| 杭の曲げ剛性 | $EI = E \cdot I$ | | |
| | | $= 2.0 \times 10^8 \times 2.500 \times 10^{-4}$ | |
| | | $= 5.000 \times 10^4$ | ($kN \cdot m^2$) |

1.3 地盤の降伏・破壊に関する条件

地盤の降伏・破壊に関する条件は以下の通りである。

| | | | |
|---------|---------|------|----------------|
| 移動層の粘着力 | $c_e =$ | 20.0 | (kN/m^2) |
| 内部摩擦角 | $e =$ | 20.0 | ($^{\circ}$) |
| 単位体積重量 | $e =$ | 18.0 | (kN/m^3) |
| 不動層の粘着力 | $c_r =$ | 50.0 | (kN/m^2) |
| 内部摩擦角 | $r =$ | 35.0 | ($^{\circ}$) |
| 単位体積重量 | $r =$ | 20.0 | (kN/m^3) |
| 安全率 | $Fs =$ | 2.0 | |

1.4 地盤に関する条件

< 移動層 >

地盤の変形係数 $Es_e = 30000$ (kN/m^2)

< 不動層 >

地盤の変形係数 $Es_r = 50000$ (kN/m^2)

1.5 杭の特性値の算定

選択した杭材に対する地盤の特性値 と特性値比 n を求める。

$$\begin{aligned} \text{移動層の特性値 } e &= \sqrt[4]{\frac{Es_e}{4EI}} = \sqrt[4]{\frac{30000}{4 \times 5.000 \times 10^4}} \\ &= 0.6223 \quad (\text{ m}^{-1}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{不動層の特性値 } r &= \sqrt[4]{\frac{Es_r}{4EI}} = \sqrt[4]{\frac{50000}{4 \times 5.000 \times 10^4}} \\ &= 0.7071 \quad (\text{ m}^{-1}) \end{aligned}$$

$$\text{特性値比 } n = \frac{e}{r} = \frac{0.6223}{0.7071} = 0.880$$

杭設置地点でのすべり面深さ l_e と移動層の特性値 e の積を求める。

$$e l_e = 0.6223 \times 16.00 = 9.9568$$

よって、 $2 e l_e < 10$ の条件を満足している。

2. 設計式

2.1 基本式

地盤の反力が杭のたわみに比例すると仮定したChangの式を用いる。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = f(x) - Es \cdot y$$

ここで、

| | |
|-------------------------|----------------------------------|
| x : 任意の深さ | (m) |
| y : 深さ x における杭の変位 | (m) |
| EI : 杭の曲げ剛性 | ($\text{kN} \cdot \text{m}^2$) |
| $f(x)$: 杭に作用する地すべり分布荷重 | (kN/m) |
| Es : 地盤の変形係数 | (kN/m^2) |

上記の微分方程式を解いて一般解を得る。

<一般解>

$$y = e^{-x} (A \cos x + B \sin x) + e^{-x} (C \cos x + D \sin x) + \frac{f(x)}{Es}$$

ここで、

A, B, C, D : 積分定数

杭に作用する地すべり分布荷重が三角形分布の場合、 $f(x)$ は以下のようにになる。

$$f(x) = \frac{2H_m}{l_e^2} x$$

ここで、

| | |
|------------------------|-------------------|
| H_m : 杭1本当たりの水平負担力 | (kN/本) |
| l_e : 地表からのすべり面までの深さ | (m) |

一般解を逐次微分して、

<たわみ角>

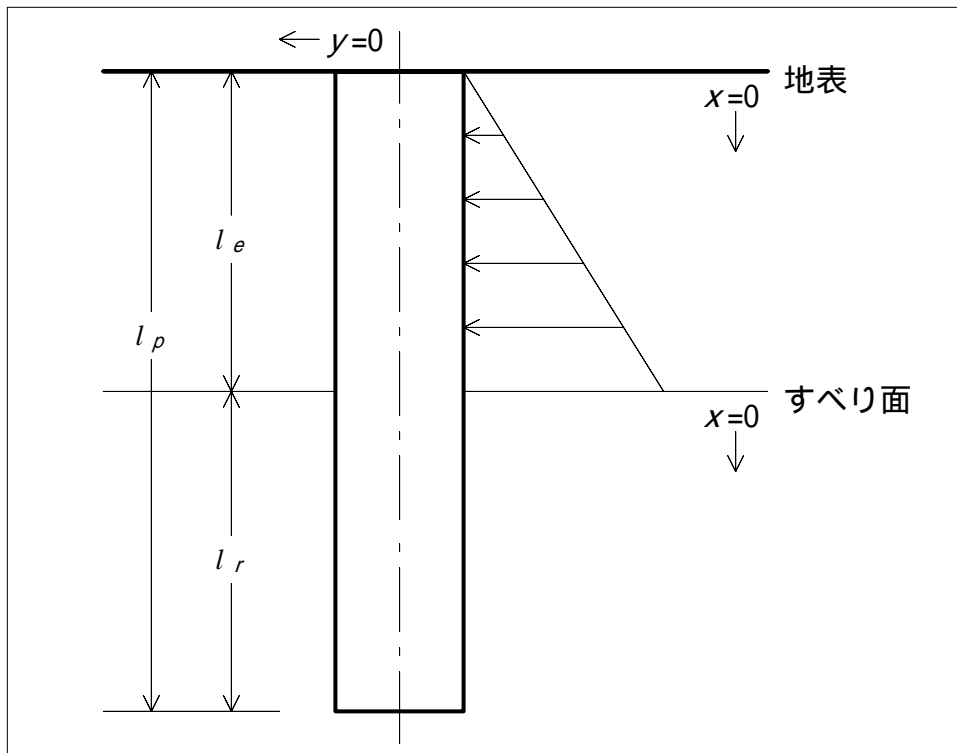
$$\begin{aligned}
 i &= \frac{dy}{dx} \\
 &= \left\{ e^x [A(\cos x - \sin x) + B(\cos x + \sin x)] \right. \\
 &\quad \left. - e^{-x} [C(\cos x + \sin x) - D(\cos x - \sin x)] \right\} + \frac{2H_m}{l e^2 E_s} \quad (\text{rad})
 \end{aligned}$$

<曲げモーメント>

$$\begin{aligned}
 M &= -EI \frac{d^2y}{dx^2} \\
 &= 2^2 EI [e^x (-A \sin x + B \cos x) + e^{-x} (C \sin x - D \cos x)] \\
 &\quad (\text{kN} \cdot \text{m})
 \end{aligned}$$

<せん断力>

$$\begin{aligned}
 S &= \frac{dM}{dx} = -EI \frac{d^3y}{dx^3} \\
 &= -2^3 EI \left\{ e^x [-A(\cos x + \sin x) + B(\cos x - \sin x)] \right. \\
 &\quad \left. + e^{-x} [C(\cos x - \sin x) + D(\cos x + \sin x)] \right\} \quad (\text{kN})
 \end{aligned}$$



ここで、

$$\begin{aligned} &= e^x \cos x & &= e^{-x} \cos x \\ &= e^x \sin x & &= e^{-x} \sin x \\ &= e^x (\cos x + \sin x) & &= e^{-x} (\cos x + \sin x) \\ &= e^x (\cos x - \sin x) & &= e^{-x} (\cos x - \sin x) \end{aligned}$$

とすれば、杭の一般式は以下ようになる。

<移動層>

$$\begin{aligned} y_1 &= A_1 e^{-x} + B_1 e^x + C_1 \cos x + D_1 \sin x + \frac{2H_m}{l e^2 E S_e} x \\ i_1 &= -e[A_1 e^{-x} + B_1 e^x - C_1 \sin x + D_1 \cos x] + \frac{2H_m}{l e^2 E S_e} \\ M_1 &= 2 e^2 EI [-A_1 e^{-x} + B_1 e^x + C_1 \cos x - D_1 \sin x] \\ S_1 &= 2 e^3 EI [-A_1 e^{-x} + B_1 e^x + C_1 \sin x + D_1 \cos x] \end{aligned}$$

<不動層>

$$\begin{aligned} y_2 &= A_2 e^{-x} + B_2 e^x + C_2 \cos x + D_2 \sin x \\ i_2 &= -r[A_2 e^{-x} + B_2 e^x - C_2 \sin x + D_2 \cos x] \\ M_2 &= 2 r^2 EI [-A_2 e^{-x} + B_2 e^x + C_2 \cos x - D_2 \sin x] \\ S_2 &= 2 r^3 EI [-A_2 e^{-x} + B_2 e^x + C_2 \sin x + D_2 \cos x] \end{aligned}$$

2.2 杭頭自由、根入長無限大、三角形分布荷重での解法

以下に境界条件を示す。

$$\begin{aligned} M_{1x=0} &= 0, & S_{1x=0} &= 0 \\ y_{1x=l} &= y_{2x=0}, & i_{1x=l} &= i_{2x=0} \\ M_{1x=l} &= M_{2x=0}, & S_{1x=l} &= S_{2x=0} \end{aligned}$$

すべり面下の根入長が $x=$ とすれば、たわみおよびたわみ角が無限大となるはずはないので、 e^{-x} を含む係数は0となる。よって、 $A_2 = B_2 = 0$ となる。

この境界条件から連立方程式のマトリックスは次のように表される。

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ & & & & -1 & 0 \\ n & n & -n & n & 1 & -1 \\ -n^2 & n^2 & n^2 & -n^2 & 0 & 1 \\ -n^3 & n^3 & n^3 & n^3 & -1 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \\ D_1 \\ C_2 \\ D_2 \end{pmatrix} = \frac{K}{e} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -e l e \\ -n \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

ただし、 n, K は次のように定義する。

$$n = \frac{e}{r}, \quad K = \frac{1}{4EI e^4}, \quad = \frac{2H_m}{l e^2}$$

この連立方程式の解として、定数 $A_1, B_1, C_1, D_1, C_2, D_2$ は次の値となる。

$$\begin{aligned} A_1 &= 4.7912 \times 10^{-8} \\ B_1 &= 2.7218 \times 10^{-8} \\ C_1 &= -6.5234 \times 10^{-9} \\ D_1 &= 2.7218 \times 10^{-8} \\ C_2 &= 8.1813 \times 10^{-4} \\ D_2 &= -1.3868 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

3. 杭設置位置の検討(Fd検定)

杭設置地点より谷側の移動力の単独すべり出しの危険性について検討する。

杭を介して杭谷側に伝達し得る単位幅当たりの許容最大水平推力 r_s' は、

$$r_s' = \frac{R_k - F_p T_k}{F_p \cos e} = \frac{1265.000 - 1.050 \times -344.500}{1.050 \times \cos(0.0)} \\ = 1549.2 \quad (\text{kN/m})$$

ここで、

R_k : 杭谷側のみ集計した安定解析式の分子項 (kN/m)

T_k : 杭谷側のみ集計した安定解析式の分母項 (kN/m)

F_p : 計画安全率

e : 杭設置地点でのすべり面傾斜角 (°)

杭を介して杭谷側に伝達し得る単位幅当たりの水平推力は、

$$H_{mu} \bullet = \int_0^{l_e} E s_e y dx \\ = \int_0^{l_e} E s_e \left\{ e^{e x} (A_1 \cos e x + B_1 \sin e x) + e^{-e x} (C_1 \cos e x + D_1 \sin e x) + \frac{f(x)}{E s_e} \right\} dx \\ = \left[\begin{array}{l} \frac{E s_e}{2 e} e^{e x} \{ (A_1 - B_1) \cos e x + (A_1 + B_1) \sin e x \} \\ - \frac{E s_e}{2 e} e^{-e x} \{ (C_1 + D_1) \cos e x + (-C_1 + D_1) \sin e x \} + \frac{H_{mu}}{l e^2} x^2 \end{array} \right]_0^{l_e} \\ = 446.9 \quad (\text{kN/m})$$

よって、

$$r_s' = 1549.2 \quad H_{mu} \bullet = 446.9 \quad \dots \text{OK}$$

4. 断面計算

4.1 最大曲げモーメント

<移動層>

移動層では、杭頭を $x = 0$ とすると以下の位置で発生する。

$$X_{m1} = 14.71 \quad (\text{ m })$$

したがって、移動層における最大曲げモーメントは、

$$\begin{aligned} M_{max1} &= \left| 2 e^2 EI \left\{ e^{e X_{m1}} (-A_1 \sin e X_{m1} + B_1 \cos e X_{m1}) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + e^{-e X_{m1}} (C_1 \sin e X_{m1} - D_1 \cos e X_{m1}) \right\} \right| \\ &= 14.29 \quad (\text{ kN } \cdot \text{ m/m}) \end{aligned}$$

ここで、

$$e X_{m1} = 0.6223 \times 14.71 = 9.154033$$

<不動層>

不動層では、すべり面を $x = 0$ とすると以下の位置で発生する。

$$X_{m2} = 1.09 \quad (\text{ m })$$

したがって、不動層における最大曲げモーメントは、

$$\begin{aligned} M_{max2} &= \left| 2 r^2 EI \cdot e^{-r X_{m2}} (C_2 \sin r X_{m2} - D_2 \cos r X_{m2}) \right| \\ &= 13.42 \quad (\text{ kN } \cdot \text{ m/m}) \end{aligned}$$

ここで、

$$r X_{m2} = 0.7071 \times 1.09 = 0.770739$$

以上より、単位幅当たりの水平負担力に対する最大曲げモーメントは、

$$X_m = 14.71 \quad (\text{ m })$$

$$M_{max} = 14.29 \quad (\text{ kN } \cdot \text{ m/m})$$

最大モーメント係数 μ_{max} を算出する。

$$M_{max} = \frac{H_{mu} \cdot \mu_{max}}{e}$$

よって、

$$\mu_{max} = \frac{M_{max} \cdot e}{H_{mu}} = \frac{14.29 \times 0.6223}{475.3} = 0.01871$$

4.2 最大変位

最大変位は以下の位置で発生する。

$$X_y = 13.31 \quad (\text{ m })$$

したがって、単位幅当たりの水平負担力に対する最大変位は、

$$\begin{aligned} Y_{max} &= \left| e^{-eX_y} (A_1 \cos eX_y + B_1 \sin eX_y) \right. \\ &\quad \left. + e^{-eX_y} (C_1 \cos eX_y + D_1 \sin eX_y) + \frac{2H_{mu}}{le^2 Es_e} X_y \right| \\ &= 1.7 \times 10^{-3} \quad (\text{ m/m }) \\ &= 1.7 \quad (\text{ mm/m }) \end{aligned}$$

ここで、

$$eX_y = 0.6223 \times 13.31 = 8.282813$$

最大変位係数 $_{max}$ を算出する。

$$Y_{max} = \frac{H_{mu} \cdot _{max} \cdot e}{Es_e}$$

よって、

$$_{max} = \frac{Y_{max} \cdot Es_e}{H_{mu} \cdot e} = \frac{1.7 \times 10^{-3} \times 30000}{475.3 \times 0.6223} = 0.1724$$

5. 杭間隔の検討

単位幅当たりの水平負担力と杭に発生する断面力の最大値が線形関係にあることを使用し、杭1本当たりの許容応力値から必要な杭間隔を算出する。

せん断力に関する所要杭間隔

$$D_s = \frac{sa \cdot A}{o \cdot H_{su}} = \frac{105000 \times 2.305 \times 10^{-2}}{1.991 \times 499.1}$$

$$= 2.43 \quad (\text{ m })$$

ここで、

$$\text{せん断応力補正係数 } o = \frac{2(3d^2 - 6d \cdot t + 4t^2)}{3(d^2 - 2d \cdot t + 2t^2)} = 1.991$$

曲げモーメントに関する所要杭間隔

$$D_m = \frac{sa - \frac{W_k}{A}}{\frac{Vu}{A} + \frac{M_{max}}{Z}} = \frac{185000 - \frac{26.093}{2.305 \times 10^{-2}}}{\frac{0.0}{2.305 \times 10^{-2}} + \frac{14.29}{1.570 \times 10^{-3}}}$$

$$= 20.20 \quad (\text{ m })$$

ここで、

最大曲げモーメント発生位置 $\chi_m = 14.71$ m における杭の自重

$$W_k = \chi_m \times \text{単位長さ質量} \times 9.8$$

$$= 14.71 \times 181.0 \times 10^{-3} \times 9.8 = 26.093 \quad (\text{ kN })$$

変位に関する所要杭間隔

$$D_y = \frac{Y_a}{Y_{max}} = \frac{20.0 \times 10^{-3}}{1.7 \times 10^{-3}}$$

$$= 11.76 \quad (\text{ m })$$

D_s 、 D_m 、 D_y を比較して、最小となっている D_s を採用する。

また、次の規定について考慮し、杭間隔の目安とする。

地すべり層の厚さ 16.00 m に対する杭標準間隔 : 3.0 m 以下

杭の直径による間隔 : $0.3185 \text{ m} \times 8 = 2.548 \text{ m}$ 以下

削孔径を 369 mm とした場合の孔壁間の距離 : $1.000 \text{ m} + 0.369 \text{ m} = 1.369 \text{ m}$ 以上

以上より、杭間隔は 0.1m 単位で丸めて $D = 2.4$ m とする。

6. 応力度の検討

採用する杭間隔 D に対する応力度の検討を行う。

曲げ応力度の検討

$$\begin{aligned}
 s &= \frac{W_k + D \cdot V_U}{A} + \frac{D \cdot M_{max}}{Z} \\
 &= \frac{26.093 + 2.4 \times 0.0}{2.305 \times 10^{-2}} + \frac{2.4 \times 14.29}{1.570 \times 10^{-3}} \\
 &= 22977 \quad (\text{kN/m}^2) \qquad s_a = 185000 \quad (\text{kN/m}^2) \quad \dots \text{OK}
 \end{aligned}$$

せん断応力度の検討

杭1本当たりのせん断力は、せん断検定用の杭1本当たりの水平負担力であるから、

$$H_s = D \cdot H_{su} = 2.4 \times 499.1 = 1197.8 \quad (\text{kN})$$

$$\begin{aligned}
 s &= \frac{H_s}{A} = 1.991 \times \frac{1197.8}{2.305 \times 10^{-2}} \\
 &= 103463 \quad (\text{kN/m}^2) \qquad s_a = 105000 \quad (\text{kN/m}^2) \quad \dots \text{OK}
 \end{aligned}$$

7. 根入長

杭の根入長は次の条件を確保する長さとする。

不動層変位第一零点の 2.5 倍以上

$$= \frac{e}{r} \tan^{-1} \left(-\frac{C_2}{D_2} \right) = \frac{0.6223}{0.7071} \times \tan^{-1} \left(-\frac{8.1813 \times 10^{-4}}{-1.3868 \times 10^{-5}} \right)$$

$$= 1.37$$

$$l_r' = \frac{e}{r} \cdot 2.5 = \frac{1.37}{0.6223} \times 2.5$$

$$= 5.51 \quad (\text{ m })$$

よって、杭の必要根入長は 5.51 m となる。

ここで、施工性を考慮し杭全長を 0.5 m 単位で丸める。

したがって、杭全長は $16.00 + 5.51 = 21.51 \quad 22.00 \text{ m}$ となり、

根入長は $22.00 - 16.00 = 6.00 \text{ m}$ となる。

根入長 l_r と不動層の特性値 r の積を求める。

$$r l_r = 0.7071 \times 6.00 = 4.2426$$

よって、 $r l_r \geq 3$ の条件を満足している。

8. 地盤の降伏・破壊の検討

「地すべり鋼管杭設計要領（社）地すべり対策技術協会」によると、地すべり防止杭に作用する受働土圧 Qp は次式により与えられる。

< 移動層 >

$$\begin{aligned} Qp_e &= 3d \left(\frac{1}{2} c_e l_e^2 Kp_e + 2 c_e l_e \sqrt{Kp_e} \right) \frac{1}{F_s} \\ &= 3 \times 0.3185 \times \left(\frac{1}{2} \times 18.0 \times 16.00^2 \times 2.040 \right. \\ &\quad \left. + 2 \times 20.0 \times 16.00 \times \sqrt{2.040} \right) \times \frac{1}{2.0} \\ &= 2682.2 \quad (\text{kN}) \end{aligned}$$

< 不動層 >

$$\begin{aligned} Qp_r &= 3d \left\{ \left(\frac{1}{2} c_r l_r^2 + c_r l_e l_r \right) Kp_r + 2 c_r l_r \sqrt{Kp_r} \right\} \frac{1}{F_s} \\ &= 3 \times 0.3185 \times \left\{ \left(\frac{1}{2} \times 20.0 \times 6.00^2 + 20.0 \times 16.00 \times 6.00 \right) \times 3.690 \right. \\ &\quad \left. + 2 \times 50.0 \times 6.00 \times \sqrt{3.690} \right\} \times \frac{1}{2.0} \\ &= 4570.0 \quad (\text{kN}) \end{aligned}$$

ここで、

$$\text{移動層における受働土圧係数} \quad Kp_e = \tan^2\left(45^\circ + \frac{e}{2}\right) = 2.040$$

$$\text{不動層における受働土圧係数} \quad Kp_r = \tan^2\left(45^\circ + \frac{r}{2}\right) = 3.690$$

受働土圧 Qp_e 、 Qp_r が杭1本当たりの水平負担力よりも大きくなければならない。

$$H_m = H_{mu} \cdot D = 475.3 \times 2.4$$

$$= 1140.7 \quad (\text{kN}) \quad Qp_e = 2682.2 \quad (\text{kN}) \quad \dots \text{OK}$$

$$Qp_r = 4570.0 \quad (\text{kN}) \quad \dots \text{OK}$$

以上から、地盤の降伏・破壊に対して安全である。