

杭設計計算

- 曲げ抑え杭の設計計算 -

| | |
|-----|--------------|
| 地区名 | 抑止杭 Version3 |
| 測線名 | |
| 備考 | サンプルデータ(抑え杭) |

| 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 | 350.0 | | | | | |
| | 肉厚 | | t | mm | 29.0 | | | | | |
| 設計条件 | 移動層の厚さ | | l_t | m | 10.00 | | | | | |
| | 杭の有効長 | | l_e | m | 10.00 | | | | | |
| | 必要抑止力 | | Pr | kN/m | 120.0 | | | | | |
| | 荷重の作用状態 | | — | — | 三角形荷重 | | | | | |
| | 荷重の作用位置 | | — | — | 移動層 | | | | | |
| | 杭間隔 | | D | m | 1.5 | | | | | |
| | すべり面傾斜角度 | | e | ° | 15.0 | | | | | |
| | 杭にかかる初期軸力 | | Nf_1 | kN | 0.0 | | | | | |
| 許容値 | 許容応力度 (短期) | 曲げ | sa | N/mm ² | 279 | | | | | |
| | | せん断 | sa | N/mm ² | 162 | | | | | |
| 地盤 | 不動層の変形係数 | | Es_r | kN/m ² | 87317 | | | | | |
| | 粘着力 | | Ce, Cr | kN/m ² | (移動層) 10.0 | (不動層) 50.0 | | | | |
| | 内部摩擦角 | | e, r | ° | 25.0 | | 35.0 | | | |
| | 単位体積重量 | | e, r | kN/m ³ | 18.0 | | 20.0 | | | |
| | 安全率 | | Fs | — | 1.2 | | | | | |

計算結果

杭頭：x=0

| 項 目 | | 記 号 | 単 位 | 数 値 | | |
|------------------|------------|-----------|-------------------|--------|-------------|-------|
| 発 生 応 力 | 最大曲げモーメント | M_{max} | kN・m | 598.56 | | |
| | 発 生 位 置 | X_M | m | 10.23 | | |
| | 最大せん断力 | S_{max} | kN | 282.6 | | |
| | 発 生 位 置 | X_S | m | 11.30 | | |
| | 杭 頭 変 位 | Y | mm | 288.2 | | |
| | 発 生 位 置 | X_Y | m | 0.00 | | |
| 応 力 度 | 曲 げ 応 力 度 | s | kN/m ² | 277431 | | |
| | せん断応力度 | s | kN/m ² | 19324 | | |
| | 曲げ応力度照査 | — | kN/m ² | 277431 | 279000・・・OK | |
| | せん断応力度照査 | — | kN/m ² | 19324 | 162000・・・OK | |
| 杭 長 | 必 要 根 入 長 | l_r' | m | 6.44 | | |
| | 根 入 長 | l_r | m | 6.50 | | |
| | 杭 全 長 | l_p | m | 16.50 | | |
| 降 伏 破 壊 | 水 平 負 担 力 | H | kN | 173.9 | | |
| | 受働土圧 | 移動層 | Q_{pe} | kN | 2215.1 | |
| | | 不動層 | Q_{pr} | kN | 6654.1 | |
| | 地盤降伏・破壊の検討 | — | kN | 173.9 | 2215.1 | ・・・OK |
| — | | kN | 173.9 | 6654.1 | ・・・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 | | 曲げ抑え杭 |
|--------------|--|----------------|
| 荷重の作用状態 | | 三角形荷重 |
| 必要抑止力 | $Pr =$ | 120.0 (kN/m) |
| すべり面傾斜角度 | $e =$ | 15.0 (°) |
| 単位幅当たりの水平負担力 | $Hu = Pr \cdot \cos e$ $= 120.0 \times \cos(15.0)$ $=$ | 115.9 (kN/m) |
| 単位幅当たりの鉛直負担力 | $Vu = Pr \cdot \sin e$ $= 120.0 \times \sin(15.0)$ $=$ | 31.1 (kN/m) |
| 杭の間隔 | $D =$ | 1.5 (m) |
| 杭一本当たりの水平負担力 | $H = Hu \cdot D$ $= 115.9 \times 1.5$ $=$ | 173.9 (kN/本) |
| 杭一本当たりの鉛直負担力 | $V = Vu \cdot D$ $= 31.1 \times 1.5$ $=$ | 46.7 (kN/本) |
| 移動層の厚さ | $l_t =$ | 10.00 (m) |
| 杭の有効長 | $l_e =$ | 10.00 (m) |

1.2 杭材に関する条件

1.2.1 設計強度

当地区の杭は、長期間の応力に対応しなければならない杭ではないと考え短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 (短期) | $s_a =$ | 279 | (N/mm ²) |
| 許容せん断応力度(短期) | $s_a =$ | 162 | (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 | $d =$ | 350.0 | (mm) |
| 肉厚 | $t =$ | 29.0 | (mm) |
| 断面積 | $A =$ | 2.925×10^{-2} | (m ²) |
| 断面二次モーメント | $I =$ | 3.800×10^{-4} | (m ⁴) |
| 断面係数 | $Z =$ | 2.170×10^{-3} | (m ³) |
| 杭の弾性係数 | $E =$ | 2.0×10^8 | (kN/m ²) |
| 杭の曲げ剛性 | $EI = E \cdot I$ | | |
| | | $= 2.0 \times 10^8 \times 3.800 \times 10^{-4}$ | |
| | | $= 7.600 \times 10^4$ | (kN・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 | $c_e =$ | 10.0 | (kN/m ²) |
| 内部摩擦角 | $e =$ | 25.0 | (°) |
| 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 | (°) |
| 単位体積重量 | $r =$ | 20.0 | (kN/m ³) |
| 安全率 | $Fs =$ | 1.2 | |

1.4 地盤に関する条件

< 不動層 >

$$\begin{aligned} \text{地盤の変形係数} \quad E_{s_r} &= Kh_r \cdot d \\ &= 249477 \times 0.3500 \\ &= 87317 \quad (\text{kN/m}^2) \end{aligned}$$

ここで、

横方向地盤反力係数 (Kh_r) は道路橋示方書下部構造編の N 値による方法で算出すると次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{横方向地盤反力係数} \quad Kh_r &= 0.3^{24/29} \cdot (4 EI)^{-3/29} \cdot d^{-9/29} \cdot \left(\frac{2800 N_r}{0.3} \right)^{32/29} \\ &= 0.3^{24/29} \times (4 \times 7.600 \times 10^4)^{-3/29} \times 350.0^{-9/29} \\ &\quad \times \left(\frac{2800 \times 50}{0.3} \right)^{32/29} \\ &= 249477 \quad (\text{kN/m}^3) \end{aligned}$$

EI : 杭の曲げ剛性 (kN・m²)

d : 杭の外径 (m)

N_r : 標準貫入試験における N 値

1.5 杭の特性値の算定

<不動層>

$$r = \sqrt[4]{\frac{Es_r}{4EI}} = \sqrt[4]{\frac{87317}{4 \times 7.600 \times 10^4}}$$

$$= 0.7321 \quad (\text{m}^{-1})$$

1.6 杭形式の区分

設計における杭形式の区分は次によるのを原則とする。

| 杭形式 | | $e l_e$ または $r l_r$ | | | | |
|-----|----------------------------|---------------------|-------|---|-------|---|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 杭 | 短い杭 (有限の杭) (1 $l < 3$) | | ————— | | | |
| | 長い杭 (無限の杭) (3 l) | | | | ————— | |

ここに、
 l_e : 杭の有効長
 l_r : 杭の根入長
 e : 杭の移動層での特性値
 r : 杭の不動層での特性値

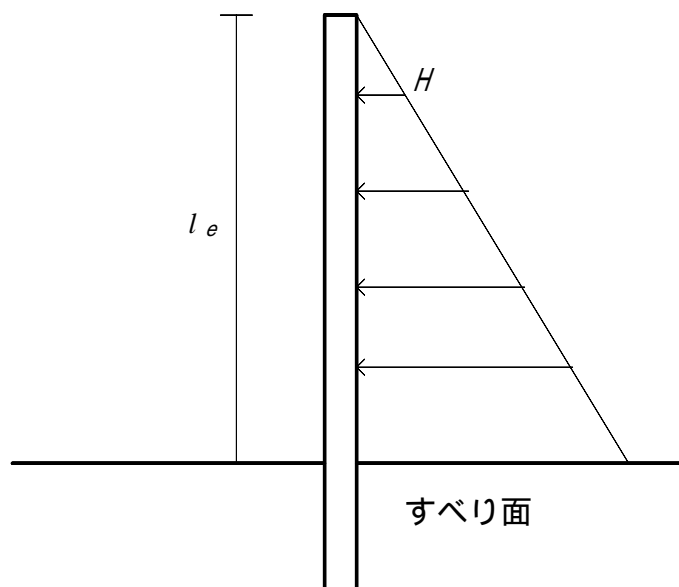
一般的に用いられている各杭の設計上の区分について規定したがこれらは必ずしも明確に区分されるものではないため、その境界値近傍の杭形式によっては他の杭形式の検討が必要となる場合がある。

地すべり防止対策杭の設計において長い杭とはすべり面より上、下それぞれで $e l_e$ または $r l_r$ 3となるものをいい、短い杭とはすべり面の上下で何れか一方が、あるいは両方が1 $e l_e$ または $r l_r < 3$ となるものをいう。

「地すべり鋼管杭設計要領 2003年6月版 P61」より引用加筆

2. 設計式

2.1 基本式



地盤の反力が杭のタワミに比例すると仮定したChangの式を用いる。

< 移動層 >

$$EI \cdot \frac{d^4 y}{dx^4} = \frac{2H}{l_e^2} \cdot x$$

< 不動層 >

$$EI \cdot \frac{d^4 y}{dx^4} + Es \cdot y = 0$$

ここで、

x : 任意の深さ (杭頭を0とする)

y : 深さ x における杭の変位

EI : 杭の曲げ剛性

Es : 地盤の変形係数

上記の微分方程式を解いて一般解を得る。一般式に境界条件を与えて、次節の特殊解を得る。

2.2 特殊解

杭の変位を y 、曲げモーメントを M 、せん断力を S とすると特殊解は次のようになる。

【 移動層(杭頭～すべり面) [0 x 10.00] 】

$$y_1 = C_1 + C_2 \cdot x + \frac{Pr_2}{120 EI} \cdot x^5$$

$$M_1 = -\frac{Pr_2}{6 l_e} \cdot x^3$$

$$S_1 = -\frac{Pr_2 \cdot l_e}{2} \cdot x^2$$

【 不動層(すべり面～杭下端) [10.00 x] 】

$$y_2 = e^{-X} \cdot (C_5 \cdot \cos X + C_6 \cdot \sin X)$$

$$M_2 = -\frac{E_s}{2 r^2} \cdot e^{-X} \cdot (C_5 \cdot \sin X - C_6 \cdot \cos X)$$

$$S_2 = -\frac{E_s}{2 r} \cdot e^{-X} \cdot \left\{ C_5 \cdot (\cos X - \sin X) + C_6 \cdot (\cos X + \sin X) \right\}$$

ここで、

$C_1 \sim C_6$: 抑え杭に使用する係数

Pr_2 : すべり面における荷重強度 (kN/m²)

EI : 杭の曲げ剛性 (kN・m²)

X : $r \cdot (x - l_e)$

E_s : 地盤の変形係数 (kN/m²)

2.3 係数の算出

杭1本当たりのすべり面における荷重強度 Pr_2 は、以下の通りである。

$$\begin{aligned} Pr_2 &= \frac{1}{l_e} \cdot 2H \\ &= \frac{1}{10.00} \times 2 \times 173.9 \\ &= 34.78 \quad (\text{kN/m} \cdot \text{本}) \end{aligned}$$

係数 C を求める。

$$\begin{aligned} C_6 &= -\frac{Pr_2 \cdot l_e^2}{12EI \cdot r^2} \\ &= -\frac{34.78 \times 10.00^2}{12 \times 7.600 \times 10^4 \times 0.7321^2} \\ &= -7.1153 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

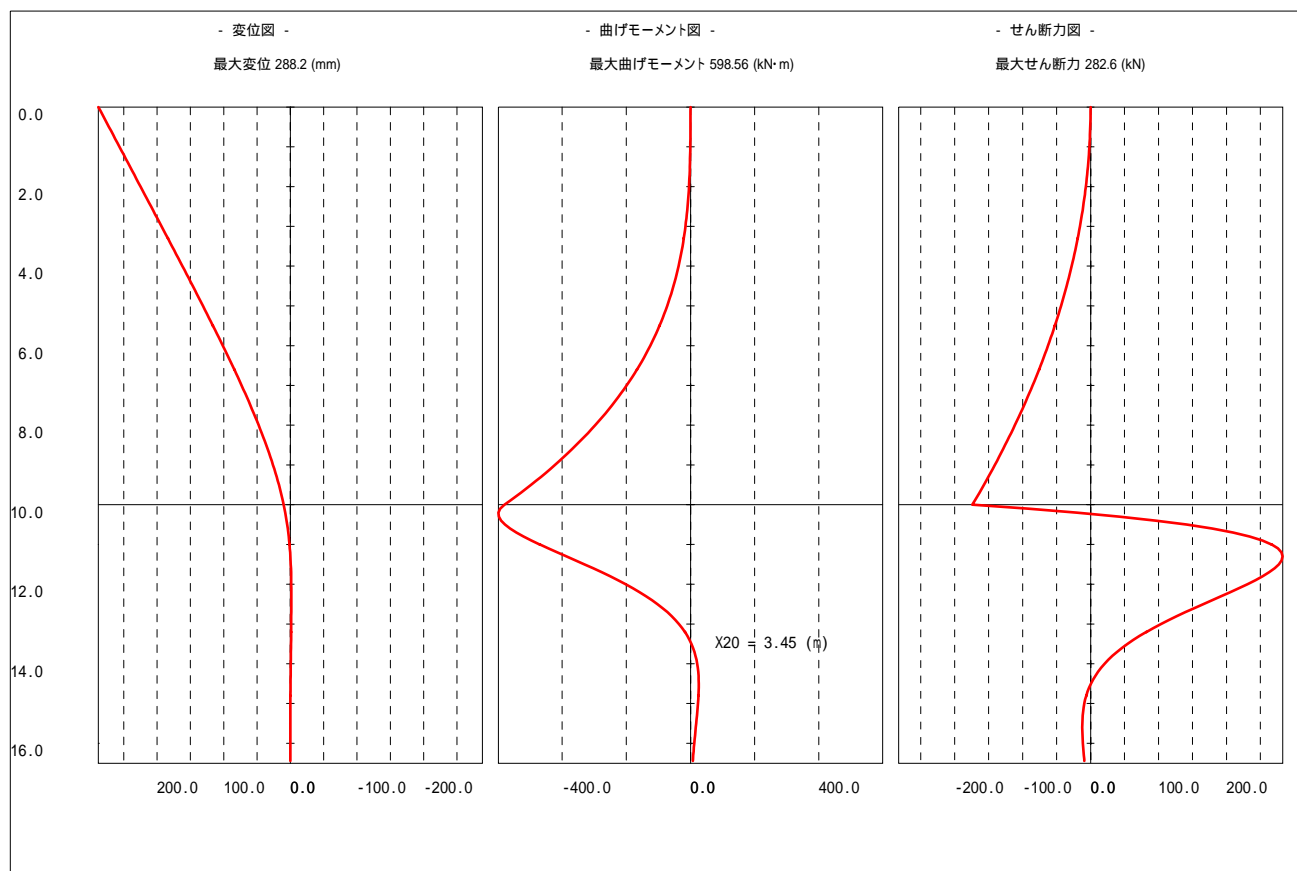
$$\begin{aligned} C_5 &= -C_6 + \frac{Pr_2 \cdot l_e}{4EI \cdot r^3} \\ &= -(-7.1153 \times 10^{-3}) + \frac{34.78 \times 10.00}{4 \times 7.600 \times 10^4 \times 0.7321^3} \\ &= 1.0031 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_2 &= r \cdot (C_6 - C_5) - \frac{Pr_2 \cdot l_e^3}{24EI} \\ &= 0.7321 \times (-7.1153 \times 10^{-3} - 1.0031 \times 10^{-2}) - \frac{34.78 \times 10.00^3}{24 \times 7.600 \times 10^4} \\ &= -3.1621 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_1 &= C_5 - l_e \cdot C_2 - \frac{Pr_2 \cdot l_e^4}{120EI} \\ &= 1.0031 \times 10^{-2} - 10.00 \times (-3.1621 \times 10^{-2}) - \frac{34.78 \times 10.00^4}{120 \times 7.600 \times 10^4} \\ &= 2.8811 \times 10^{-1} \end{aligned}$$

3. 変位 - 曲げモーメント - せん断力図

変位 - 曲げモーメント - せん断力を計算した結果を以下の図に示す。



4. 最大曲げモーメント

杭1本当たりの最大曲げモーメントは以下の位置で発生する。

【 不動層(すべり面～杭下端) [10.00 x] 】

$$\begin{aligned}X_M &= l_e + \frac{1}{r} \cdot \tan^{-1}\left(\frac{C_5 + C_6}{C_5 - C_6}\right) \\&= 10.00 + \frac{1}{0.7321} \times \tan^{-1}\left(\frac{1.0031 \times 10^{-2} + -7.1153 \times 10^{-3}}{1.0031 \times 10^{-2} - -7.1153 \times 10^{-3}}\right) \\&= 10.23 \quad (\text{ m })\end{aligned}$$

したがって、最大曲げモーメントは以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned}M_{max} &= \left| -e^{-X} \cdot \frac{E_s}{2r^2} \cdot (C_5 \cdot \sin X - C_6 \cdot \cos X) \right| \\&= \left| -e^{-X} \times \frac{87317}{2 \times 0.7321^2} \times (1.0031 \times 10^{-2} \times \sin 0.168383 \right. \\&\quad \left. - -7.1153 \times 10^{-3} \times \cos 0.168383) \right| \\&= 598.56 \quad (\text{ kN}\cdot\text{m })\end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned}X &= r \cdot (X_M - l_e) \\&= 0.7321 \times (10.23 - 10.00) \\&= 0.168383\end{aligned}$$

5. 最大せん断力

杭1本当たりの最大せん断力は以下の位置で発生する。

【 不動層(すべり面～杭下端) [10.00 x] 】

$$\begin{aligned} X_s &= l_e + \frac{1}{r} \cdot \tan^{-1} \left(- \frac{C_5}{C_6} \right) \\ &= 10.00 + \frac{1}{0.7321} \times \tan^{-1} \left(- \frac{1.0031 \times 10^{-2}}{-7.1153 \times 10^{-3}} \right) \\ &= 11.30 \quad (\text{ m }) \end{aligned}$$

したがって、最大せん断力は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} S_{max} &= \left| - \frac{E_s}{2r} \cdot e^{-X} \cdot (C_5 \cdot (\cos X - \sin X) + C_6 \cdot (\cos X + \sin X)) \right| \\ &= \left| - \frac{87317}{2 \times 0.7321} \times e^{-X} \times (1.0031 \times 10^{-2} \times (\cos 0.951730 - \sin 0.951730) \right. \\ &\quad \left. + -7.1153 \times 10^{-3} \times (\cos 0.951730 + \sin 0.951730)) \right| \\ &= 282.6 \quad (\text{ kN }) \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} X &= r \cdot (X_s - l_e) \\ &= 0.7321 \times (11.30 - 10.00) \\ &= 0.951730 \end{aligned}$$

6. 軸力の計算

軸力 Nf としては以下のものがある。

杭1本当たりに作用する地すべり力の鉛直成分

$$Nf_2 = V = 46.7 \quad (\text{kN})$$

したがって、杭1本にかかる軸力 Nf は、

$$\begin{aligned} Nf &= Nf_2 \\ &= 46.7 \quad (\text{kN}) \end{aligned}$$

7. 断面強度の照査

杭に生じる曲げ応力度 s を照査する。

$$\begin{aligned} s &= \frac{M_{max}}{Z} + \frac{Nf}{A} = \frac{598.56}{2.170 \times 10^{-3}} + \frac{46.7}{2.925 \times 10^{-2}} \\ &= 277431 \quad (\text{kN/m}^2) \quad s_a = 279000 \quad (\text{kN/m}^2) \dots \text{OK} \end{aligned}$$

杭に生じるせん断応力度 s を照査する。

$$\begin{aligned} s &= \rho \cdot \frac{S_{max}}{A} = 2.000 \times \frac{282.6}{2.925 \times 10^{-2}} \\ &= 19324 \quad (\text{kN/m}^2) \quad s_a = 162000 \quad (\text{kN/m}^2) \dots \text{OK} \end{aligned}$$

ρ : せん断応力補正係数 = 2.000

上記より、当該杭は設計条件に対して安全である。

8. 杭間隔の照査

次の規定について杭間隔を照査する。

地すべり層の厚さ 10.00 m に対する杭標準間隔 : 3.0 m 以下

削孔径を 400 mm とした場合の孔壁間の距離 : 1.000 m + 0.400 m = 1.400 m 以上

設定した杭間隔 $D = 1.5 \text{ m}$ は上記の条件を満足するので問題ない。

9. 根入長

杭の根入長は / の 1.5 倍以上を確保する。

$$l_r' = \frac{\quad}{r} \cdot 1.5 = \frac{\quad}{0.7321} \times 1.5$$
$$= 6.44 \quad (\text{ m })$$

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 $10.00 + 6.44 = 16.44$ 16.50 m となり、
根入長は $16.50 - 10.00 = 6.50$ m となる。

10. 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 Q_p は次式により与えられる。

$$\begin{aligned}
 \text{＜移動層＞ } Q_{pe} &= 3d \left(\frac{1}{2} e l e^2 K_{pe} + 2 c_e l e \sqrt{K_{pe}} \right) \frac{1}{F_s} \\
 &= 3 \times 0.3500 \times \left(\frac{1}{2} \times 18.0 \times 10.00^2 \times 2.464 \right. \\
 &\quad \left. + 2 \times 10.0 \times 10.00 \times \sqrt{2.464} \right) \times \frac{1}{1.2} \\
 &= 2215.1 \quad (\text{ kN })
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{＜不動層＞ } Q_{pr} &= 3d \left\{ \left(\frac{1}{2} r l r^2 + r l e l_r \right) K_{pr} + 2 c_r l r \sqrt{K_{pr}} \right\} \frac{1}{F_s} \\
 &= 3 \times 0.3500 \times \left\{ \left(\frac{1}{2} \times 20.0 \times 6.50^2 + 20.0 \times 10.00 \times 6.50 \right) \right. \\
 &\quad \left. \times 3.690 + 2 \times 50.0 \times 6.50 \times \sqrt{3.690} \right\} \times \frac{1}{1.2} \\
 &= 6654.1 \quad (\text{ kN })
 \end{aligned}$$

ここで、

$$\text{移動層における受働土圧係数} \quad K_{pe} = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{e}{2} \right) = 2.464$$

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

受働土圧 Q_{pe} 、 Q_{pr} が杭一本当たりの水平負担力よりも大きくなければならない。

$$H = 173.9 \quad (\text{ kN }) \quad Q_{pe} = 2215.1 \quad (\text{ kN }) \quad \dots \text{OK}$$

$$H = 173.9 \quad (\text{ kN }) \quad Q_{pr} = 6654.1 \quad (\text{ kN }) \quad \dots \text{OK}$$

以上から、地盤の降伏・破壊に対して安全である。

11. 変位

杭頭変位を求める。

$$X_Y = 0 \quad (\text{ m })$$

杭1本当たりの杭頭変位は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} Y_{max} &= \left| C_1 + C_2 \cdot X_Y + \frac{Pr_2}{120 EI \cdot l_e} \cdot X_Y^5 \right| \\ &= \left| 2.8811 \times 10^{-1} + -3.1621 \times 10^{-2} \times 0 + \frac{34.78}{120 \times 7.600 \times 10^4 \times 10.00} \times 0^5 \right| \\ &= 288.2 \times 10^{-3} \quad (\text{ m }) \\ &= 288.2 \quad (\text{ mm }) \end{aligned}$$

12. 杭形式の照査

前述した杭形式の区分について照査する。

$$r l_r = 0.7321 \times 6.50 = 4.7587$$

したがって、この杭は下図より無限の杭として区分できる。

| 杭形式 または $r l_r$ | | $e l_e$ | | | | |
|-----------------------|---------------------------|---------|-------|---|-------|---|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 杭 | 短い杭(有限の杭) (1 $l < 3$) | | ————— | | | |
| | 長い杭(無限の杭) (3 l) | | | | ————— | |