

地すべり抑止鋼管杭の計算 (アンカー付き抑え杭タイプ)

計算書タイトル	〇〇地区地すべり検討
計算書サブタイトル	検討断面 NO.10+0

地すべり抑止杭の設計に当っては、以下の文献に準拠するものとした。

- ・「新版 地すべり鋼管杭設計要領」(地すべり対策技術協会)
- ・「道路土工一切土工・斜面安定工指針」(日本道路協会)
- ・「道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編」(日本道路協会)

1. 計算条件

(1) 地すべり諸元

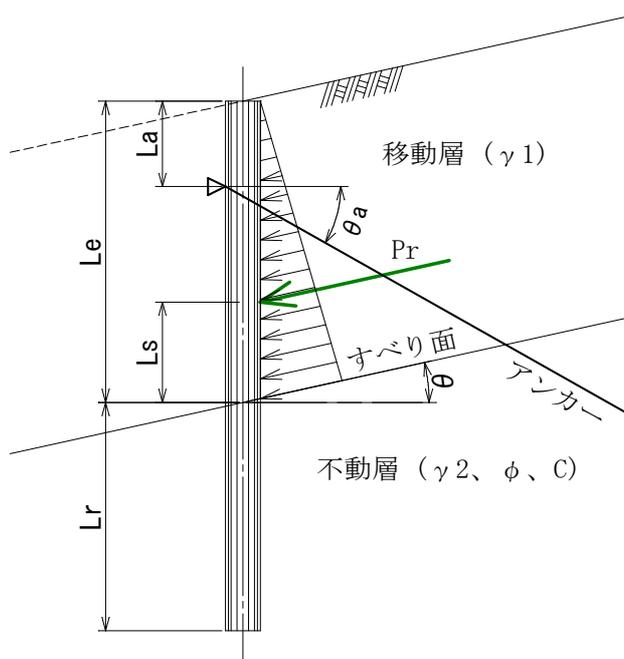
- ・必要抑止力 $Pr = 333.3 \text{ (kN/m)}$
- ・すべり面の傾斜角 $\theta = 15.000 \text{ (}^\circ\text{)}$
- ・地すべり荷重の分布形状 : 三角形分布荷重

(2) 地盤条件

- ・不動層の変形係数 $E_0 = 126,000 \text{ (kN/m}^2\text{)}$
- ・試験方法による係数 $\alpha = 1$

変形係数 E_0 と α

変形係数 E_0 の推定方法	係数 α
	常時
孔内水平載荷試験で求めた変形係数	4
供試体の一軸、三軸試験から求めた変形係数	4
N値から $E_0=2800N$ で推定した変形係数	1



抑え杭断面図(模式図)

(3) 抑止杭諸元

・地すべり抑止杭の設計タイプ	Type =	抑え杭
・抑止杭の有効長	Le =	10.000 (m)
・地すべり合力作用点高さ 杭の有効長の比 ($\alpha e = L_s / Le$)	$\alpha e =$	$1/3 = 0.333$
・地すべり合力作用点高さ	$L_s = \alpha e \cdot Le =$	3.333 (m)
・抑止杭の列数	N =	1 (列)
・抑止杭の間隔	W =	1.500 (m)

(4) 鋼管杭諸元

・鋼管杭の材質	その他
・鋼管杭の強度種別	: 短期強度
・許容曲げ応力度	$\sigma_a = 280,000$ (kN/m ²)
・許容せん断応力度	$\tau_a = 160,000$ (kN/m)
・鋼管杭の外径	D = 300.0 (mm)
・鋼管杭の肉厚	t = 28.0 (mm)
・鋼管杭の断面積	A = 2.393E-02 (m ²)
・鋼管杭の断面2次モーメント	I = 2.240E-04 (m ⁴)
・鋼管杭の断面係数	Z = 1.490E-03 (m ³)
・鋼管杭の弾性係数	E = 2.000E+08 (kN/m ²)
・鋼管杭の曲げ剛性	EI = 44,800 (kN/m ²)

(5) アンカー工諸元

・アンカー位置(杭頭からの距離)	La =	1.000 (m)
・すべり面の傾斜角	$\theta =$	30.000 (°)

2. 作用荷重の計算

抑止杭1本に作用する荷重は次式により算定する。

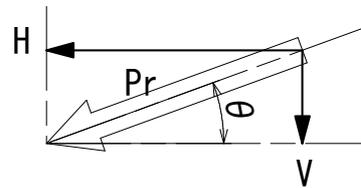
・水平力

$$\begin{aligned} H &= Pr \times \cos \theta \times W / N \\ &= 333.3 \times \cos 15.00 \times 1.500 / 1.0 \\ &= 482.9 \text{ (kN・本)} \end{aligned}$$

・鉛直力

$$\begin{aligned} V &= Pr \times \sin \theta \times W / N \\ &= 333.3 \times \sin 15.00 \times 1.500 / 1.0 \\ &= 129.4 \text{ (kN・本)} \end{aligned}$$

ここに、Pr : 必要抑止力 (kN/m)
 θ : すべり面傾斜角 (θ)
W : 抑止杭の間隔 (m)
N : 抑止杭の列数 (列)



3. 水平地盤反力係数の計算

抑止杭の断面力、変位および根入れ長算定に必要な地盤反力係数(Kh)は、「道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編 p285～287」に示された以下の算定式で求める。

$$kh = kh_0 \left(\frac{Bh}{0.3} \right)^{-3/4} \quad \dots\dots\dots \text{式(1)}$$

$$kh_0 = \frac{1}{0.3} \cdot \alpha \cdot E_0 \quad \dots\dots\dots \text{式(2)}$$

$$Bh = \sqrt{\frac{D}{\beta}} \quad \dots\dots\dots \text{式(3)}$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{kh \cdot D}{4 \cdot E \cdot I}} \quad \dots\dots\dots \text{式(4)}$$

ここに、

kh : 水平方向地盤反力係数 (kN/m³)

kh₀ : 直径30cmの剛体円板による平板載荷試験に相当する水平方向地盤反力係数

Bh : 杭の換算載荷幅 (m)

β : 杭の特性値 (m⁻¹)

D : 杭外径 (m)

α : 地盤反力係数の推定に用いる係数

E₀ : 不動地盤の変形係数 (kN/m²)

E : 杭のヤング係数 (kN/m²)

I : 杭の断面2次モーメント (m⁴)

水平地盤反力係数は上の式(1)～式(4)を整理した下記の式(5)より求める。

$$\begin{aligned} kh &= \frac{(\alpha \cdot E_0)^{32/29}}{0.3^{8/29} \times (4 \cdot E \cdot I)^{3/29} \times D^{9/29}} \quad \dots\dots \text{式(5)} \\ &= \frac{424,614.758}{1.726} \\ &= 246,072 \text{ (kN/m}^3\text{)} \end{aligned}$$

4. 杭の特性値の計算

杭の特性値(β)は以下の式で求める。

$$\begin{aligned} \beta &= \left[\frac{kh \cdot D}{4 \cdot E \cdot I} \right]^{1/4} \\ &= \left[\frac{246,072 \times 0.3}{4 \times 44,800} \right]^{1/4} \\ &= \left[\frac{73,822}{179,200} \right]^{1/4} \\ &= 0.8011 \text{ (m}^{-1}\text{)} \end{aligned}$$

5. 断面計算式

(1) 杭の基本式

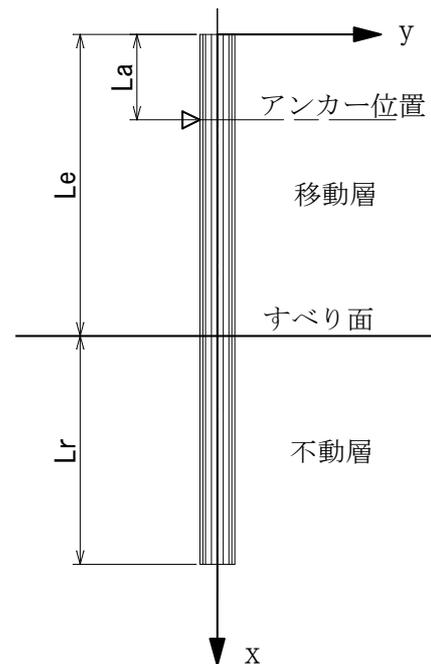
弾性床土上の梁の一般式は、以下のChangの式で表される。

[移動層(地盤反力なし)]

$$E \cdot I \cdot d^4 y / dx^4 = a \cdot x + b$$

[不動層(地盤反力あり)]

$$E \cdot I \cdot d^4 y / dx^4 + E_s \cdot y = 0$$



上記の微分方程式を解いた一般式は、杭の各区分ごとで次のようになる。

① 移動層(杭頭～アンカー区間)

・たわみ方程式

$$y_1 = C_1 + C_2 \cdot x + C_3 \cdot x^2 + C_4 \cdot x^3 + a/(120EI) \cdot x^5 \quad \dots \text{式(1)}$$

・たわみ角

$$i_1 = y'_1 = C_2 + 2C_3 \cdot x + 3C_4 \cdot x^2 + a/(24EI) \cdot x^4 \quad \dots \text{式(2)}$$

・モーメント

$$M_1 = -EIy''_1 = -2EIC_3 - 6EIC_4 \cdot x - a/6 \cdot x^3 \quad \dots \text{式(3)}$$

・せん断力

$$S_1 = -EIy'''_1 = -6EIC_4 - a/2 \cdot x^2 \quad \dots \text{式(4)}$$

② 移動層(アンカー～すべり面区間) $x_{la} = x - La$

・たわみ方程式

$$y_2 = C_5 + C_6 \cdot x_{la} + C_7 \cdot x_{la}^2 + C_8 \cdot x_{la}^3 + b/(24EI) \cdot x_{la}^4 + a/(120EI) \cdot x_{la}^5 \quad \dots \text{式(5)}$$

・たわみ角

$$i_2 = y'_2 = C_6 + 2C_7 \cdot x_{la} + 3C_8 \cdot x_{la}^2 + b/(6EI) \cdot x_{la}^3 + a/(24EI) \cdot x_{la}^4 \quad \dots \text{式(6)}$$

・モーメント

$$M_2 = -EIy''_2 = -2EIC_7 - 6EIC_8 \cdot x_{la} - b/2 \cdot x_{la}^2 - a/6 \cdot x_{la}^3 \quad \dots \text{式(7)}$$

・せん断力

$$S_2 = -EIy'''_2 = -6EIC_8 - b \cdot x_{la} - a/2 \cdot x_{la}^2 \quad \dots \text{式(8)}$$

③不動層(すべり面以深)

$$xle = x - Le$$

・たわみ方程式

$$y_3 = e^{-\beta xle} (C_9 \cdot \cos \beta xle + C_{10} \cdot \sin \beta xle) \quad \dots \text{式(9)}$$

・たわみ角

$$i_3 = y' = -\beta e^{-\beta xle} \{ (C_9 - C_{10}) \cos \beta xle + (C_9 + C_{10}) \sin \beta xle \} \quad \dots \text{式(10)}$$

・モーメント

$$M_3 = -EIy'' = -2EI\beta^2 \cdot e^{-\beta xle} (-C_{10} \cdot \cos \beta xle + C_9 \cdot \sin \beta xle) \quad \dots \text{式(11)}$$

・せん断力

$$S_3 = -EIy''' = -2EI\beta^3 e^{-\beta xle} \{ (C_9 + C_{10}) \cos \beta xle + (C_{10} - C_9) \sin \beta xle \} \quad \dots \text{式(12)}$$

ここに、

x : 杭頭を原点とした場合の深度

y : 深度 x における杭の変位

EI : 杭の曲げ剛性

β : 杭の特性値

$C_1 \sim C_{10}$: 任意定数

xla : アンカー位置からの深度 (= x - La)

xle : すべり面からの深度 (= x - Le)

a : 移動層に作用する分布荷重の勾配 $a = 2H/Le^2$

$$a = 2H/Le^2 = 2 \times 482.9 / 10.000^2 = 9.658$$

b : 計算始端における荷重強度

$$\text{①区間} \quad b = 0.000 \text{ (kN/m} \cdot \text{本)}$$

$$\text{②区間} \quad b = a \cdot La = 9.658 \times 1.000 = 9.658 \text{ (kN/m} \cdot \text{本)}$$

H : 杭1本に作用する水平力(kN・本)

Le : 抑止杭の有効長 (m)

La : 杭頭からアンカー位置までの距離 (m)

(3) 定数の算定

- ・条件1と式(1)より、以下の式を得る

$$-2EIC_3 = 0 \quad \text{よって、} \quad C_3 = 0.000$$

- ・条件2と式(2)より、以下の式を得る

$$-6EIC_4 = 0 \quad \text{よって、} \quad C_4 = 0.000$$

- ・条件4と式(5)より、以下の式を得る

$$C_5 = 0.000$$

- ・条件5と式(3)、式(7)より、以下の式を得る

$$-a \cdot La^3 / 6 = -2EIC_7 \quad \text{よって、} \quad C_7 = a \cdot La^3 / (12EI) = 1.7965E-05$$

- ・条件3と式(1)より、以下の式を得る

$$C_1 + C_2 \cdot La + a / (120EI) \cdot La^5 = 0 \quad \dots \text{式(A)}$$

- ・条件6と式(2)、式(6)より、以下の式を得る

$$C_2 + a / (24EI) \cdot La^4 = C_6 \quad \dots \text{式(B)}$$

- ・条件7と式(5)、式(9)より、以下の式を得る

$$C_6 \cdot Lea + C_7 \cdot Lea^2 + C_8 \cdot Lea^3 + b / (24EI) \cdot Lea^4 + a / (120EI) \cdot Lea^5 = C_9 \quad \dots \text{式(C)}$$

- ・条件8と式(6)、式(10)より、以下の式を得る

$$C_6 + 2C_7 \cdot Lea + 3C_8 \cdot Lea^2 + b / (64EI) \cdot Lea^3 + a / (24EI) \cdot Lea^4 = \beta (-C_9 + C_{10}) \quad \dots \text{式(D)}$$

- ・条件9と式(7)、式(11)より、以下の式を得る

$$-2EIC_7 - 6EIC_8 \cdot Lea - b / 2 \cdot Lea^2 - a / 6 \cdot Lea^3 = 2EI \beta^2 \cdot C_{10} \quad \dots \text{式(E)}$$

- ・条件10と式(8)、式(12)より、以下の式を得る

$$-6EIC_8 - b \cdot Lea - a / 2 \cdot Lea^2 = -2EI \beta^3 \cdot (C_9 + C_{10}) \quad \dots \text{式(F)}$$

ここに、

$$Lea = Le - La = 10.000 - 1.000 = 9.000 \text{ (m)}$$

未知数である、C1、C2、C6、C8～C10 は、式(A)～式(F)の6元連立方程式を解いて求める。

係数行列を A、変数ベクトルを X、定数ベクトルを C とすれば、連立方程式は、 $C=A \cdot X$ の行列式で表すことができる。変数ベクトル X は、Aの逆行列 A^{-1} にCを掛けることで求めることができる。 $(X=A^{-1} \cdot C)$

$$\begin{matrix} \text{定数ベクトルC} \\ \begin{pmatrix} K1 \\ K2 \\ K6 \\ K8 \\ K9 \\ K10 \end{pmatrix} \end{matrix} = \begin{matrix} \text{係数行列 A} \\ \begin{pmatrix} 1 & La & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Lea & Lea^3 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 3Lea^2 & \beta & -\beta \\ 0 & 0 & 0 & -6Lea & 0 & -2\beta^2 \\ 0 & 0 & 0 & -6 & 2\beta^3 & 2\beta^3 \end{pmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} \text{変数ベクトルX} \\ \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_6 \\ C_8 \\ C_9 \\ C_{10} \end{pmatrix} \end{matrix}$$

定数ベクトル K1～K6は以下の値である。

$$\begin{aligned} K1 &= -a/(120EI) \cdot La^5 = & -1.7965E-06 \\ K2 &= -a/(24EI) \cdot La^4 = & -8.9825E-06 \\ K6 &= -C_7 \cdot Lea^2 - b/(24EI) \cdot Lea^4 - a/(120EI) \cdot Lea^5 = & -1.6647E-01 \\ K8 &= -2C_7 \cdot Lea - b/(6EI) \cdot Lea^3 - a/(24EI) \cdot Lea^4 = & -8.5451E-02 \\ K9 &= 2C_7 + b/(2EI) \cdot Lea^2 + a/(6EI) \cdot Lea^3 = & 3.4960E-02 \\ K10 &= b/EI \cdot Lea + a/(2EI) \cdot Lea^2 = & 1.0671E-02 \end{aligned}$$

マトリックス表(6元連立方程式)

係数項 (A)						定数項 (C)
C ₁	C ₂	C ₆	C ₈	C ₉	C ₁₀	
1.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	-1.7965E-06
0.00000	1.00000	-1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	-8.9825E-06
0.00000	0.00000	9.00000	729.00000	-1.00000	0.00000	-1.6647E-01
0.00000	0.00000	1.00000	243.00000	0.80110	-0.80110	-8.5451E-02
0.00000	0.00000	0.00000	-54.00000	0.00000	-1.28352	3.4960E-02
0.00000	0.00000	0.00000	-6.00000	1.02823	1.02823	1.0671E-02

逆行列計算表

逆マトリックス表 (A ⁻¹)						解 (X)
1.0000E+00	-1.0000E+00	-1.4623E-01	3.1610E-01	-5.0852E-01	-3.8850E-01	
0.0000E+00	1.0000E+00	1.4623E-01	-3.1610E-01	5.0852E-01	3.8850E-01	2.4582E-02
0.0000E+00	0.0000E+00	1.4623E-01	-3.1610E-01	5.0852E-01	3.8850E-01	2.4591E-02
0.0000E+00	0.0000E+00	-4.6411E-04	4.1770E-03	-5.5757E-03	-3.7057E-03	-5.1414E-04
0.0000E+00	0.0000E+00	-2.2234E-02	2.0011E-01	5.1199E-01	7.9502E-01	1.2985E-02
0.0000E+00	0.0000E+00	1.9526E-02	-1.7573E-01	-5.4453E-01	1.5591E-01	-5.6068E-03

以上の計算より求めた定数を以下に示す。

$$\begin{aligned} C_1 &= -2.4584E-02 & C_6 &= 2.4591E-02 \\ C_2 &= 2.4582E-02 & C_7 &= 1.7965E-05 \\ C_3 &= 0.0000E+00 & C_8 &= -5.1414E-04 \\ C_4 &= 0.0000E+00 & C_9 &= 1.2985E-02 \\ C_5 &= 0.0000E+00 & C_{10} &= -5.6068E-03 \end{aligned}$$

5. 最大曲げモーメントの計算

(1) すべり面上部(アンカー位置～すべり面区間)

1) 最大曲げモーメントが生じる深さの計算 (アンカー位置からの深さ)

最大曲げモーメントが生じる深さは以下の式により算定する。

$$\begin{aligned}x_{m1} &= (-b + \sqrt{b^2 - 12a \cdot EI \cdot C_8}) / a \\ &= 4.442 \text{ (m)} \quad \text{※ 杭頭からの距離 } x = x_{m1} + L_a = 5.442 \text{ (m)}\end{aligned}$$

2) 最大曲げモーメントの計算

最大曲げモーメントは以下の式により算定する。

$$\begin{aligned}M_{1\max} &= -2EIC_7 - 6EIC_8 \cdot x_{m1} - b/2 \cdot x_{m1}^2 - a/6 \cdot x_{m1}^3 \\ &= 375.91 \text{ (kN}\cdot\text{m)}\end{aligned}$$

(2) すべり面下部(不動層部)

1) 最大曲げモーメントが生じる深さの計算(すべり面からの深さ)

最大曲げモーメントが生じる深さは以下の式により算定する。

$$\begin{aligned}x_{m2} &= 1/\beta \cdot \tan^{-1}\{(C_9 + C_{10}) / (C_9 - C_{10})\} \\ &= 0.472 \text{ (m)} \quad \text{※ 杭頭からの距離 } x = x_{m2} + L_e = 10.472 \text{ (m)}\end{aligned}$$

2) 最大曲げモーメントの計算

最大曲げモーメントは以下の式により算定する。

$$\begin{aligned}M_{2\max} &= -2EI\beta^2 \cdot e^{-\beta x_{m2}} (-C_{10} \cdot \cos \beta x_{m2} + C_9 \cdot \sin \beta x_{m2}) \\ &= -394.15 \text{ (kN}\cdot\text{m)}\end{aligned}$$

(3) 最大曲げモーメント

$$\begin{aligned}M_{\max} &= \text{MAX}(|M_{1\max}|, |M_{2\max}|) \\ &= \text{MAX}(375.91, 394.15) \\ &= \underline{394.15} \text{ (kN}\cdot\text{m)} \quad \text{※ 杭頭からの距離 } x = 10.472 \text{ (m)}\end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{aligned}EI : \text{杭の剛性} &= 44,800 \text{ (kN/m}^2\text{)} \\ \beta : \text{杭の特性値} &= 0.8011 \text{ (m}^{-1}\text{)} \\ C_7 \sim C_{10} : \text{基本式の定数}\end{aligned}$$

6. 最大せん断力の計算

せん断力は、アンカー位置、すべり面および不動層内の3箇所で計算し、最大値を採用する。

1) アンカー位置 ($x_{la} = 0$)

$$\begin{aligned} S_{max1} &= -6EIC_8 - b \cdot x_{la} - a/2 \cdot x_{la}^2 \\ &= -6EIC_8 \\ &= 138.20 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

2) すべり面 ($x_{la} = L_e - L_a = L_{ea}$)

$$\begin{aligned} S_{max2} &= -6EIC_8 - b \cdot x_{la} - a/2 \cdot x_{la}^2 \\ &= -6EIC_8 - b \cdot L_{ea} - a/2 \cdot L_{ea}^2 \\ &= -339.87 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

3) 不動層内

a) 最大せん断力が生じる深さの計算(すべり面からの深さ)

不動層部で最大せん断力が生じる深さは次式で算定する。

$$\begin{aligned} x_s &= 1/\beta \cdot \tan^{-1} (-C_9 / C_{10}) \\ &= 1.452 \text{ (m)} \quad \text{※ 杭頭からの距離 } x = x_s + L_e = 11.452 \text{ (m)} \end{aligned}$$

b) 最大せん断力の計算

最大せん断力は以下の式により算定する。

$$\begin{aligned} S_{max3} &= -2EI\beta^3 e^{-\beta x_s} \{ (C_9 + C_{10}) \cos \beta x_s + (C_{10} - C_9) \sin \beta x_s \} \\ &= 203.59 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

4) 最大せん断力

3箇所で求めたせん断力を比較して、大きい値を採用する。

$$\begin{aligned} S_{max} &= \text{MAX}(|S_{max1}|, |S_{max2}|, |S_{max3}|) \\ &= \text{MAX}(138.20, 339.87, 203.59) \\ &= \underline{339.87} \text{ (kN)} \quad \text{※ 杭頭からの距離 } x = 10.000 \text{ (m)} \end{aligned}$$

ここに、

$$EI : \text{杭の剛性} = 44,800 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$\beta : \text{杭の特性値} = 0.8011 \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

$C_8 \sim C_{10}$: 基本式の定数

7. 設計アンカー力の計算

(1) アンカー支点反力 T_h

$$\begin{aligned} T_h &= | -6EIC_8 + b \cdot La / 2 | \\ &= | -6 \times 4.4800E+04 \times -5.1414E-04 + 9.658 \times 1.000 / 2 | \\ &= 143.03 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

(2) 設計アンカー力 T_a

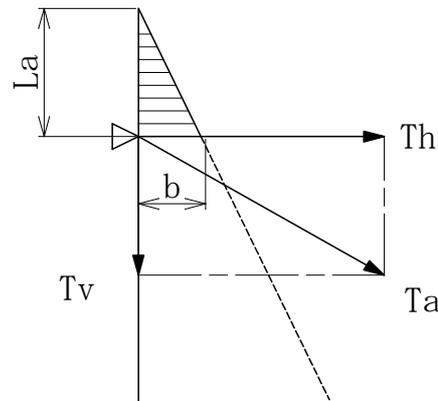
$$\begin{aligned} T_a &= T_h / \cos \theta a \\ &= 143.03 / \cos(30.00) \\ &= 165.16 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

(2) アンカーによる軸力 T_v

$$\begin{aligned} T_v &= T_h \cdot \tan \theta a \\ &= 143.03 \times \tan(30.00) \\ &= 82.58 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

(2) 杭に作用する鉛直力 N

$$\begin{aligned} N &= V + T_v \\ &= 129.40 + 82.58 \\ &= 211.98 \text{ (kN)} \end{aligned}$$



ここに、

- C_8 : 基本式の定数
- b : アンカー位置における荷重強度 (kN/m)
- La : 杭頭からアンカーまでの距離 (m)
- θa : アンカー傾角 ($^\circ$)
- V : 地すべり力の鉛直成分 (kN)

8. 応力度の照査

(1) 曲げ応力度の照査

鋼材の曲げ応力度は以下の式により算定する。

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{|M_{\max}|}{Z} + \frac{N}{A} \\ &= \frac{394.15}{1.490E-03} + \frac{211.98}{2.393E-02} \\ &= 264,530 + 8,858 \\ &= 273,389 \text{ (kN/m}^2\text{)} \leq \sigma_{sa} = 280,000 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad [\text{O.K.}]\end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{aligned}M_{\max} : \text{最大曲げモーメント} &= 394.15 \text{ (kN}\cdot\text{m)} \\ N : \text{杭1本に作用する鉛直力} &= 211.98 \text{ (kN)} \\ Z : \text{杭の断面係数} &= 1.490E-03 \text{ (m}^3\text{)} \\ A : \text{杭の断面積} &= 2.393E-02 \text{ (m}^2\text{)}\end{aligned}$$

(2) せん断応力度の照査

鋼材のせん断応力度は以下の式により算定する。

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{\alpha_0 \times S_{\max}}{A} \\ &= \frac{2.00 \times 339.87}{2.393E-02} \\ &= 28,405 \text{ (kN/m}^2\text{)} \leq \tau_a = 160,000 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad [\text{O.K.}]\end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{aligned}S_{\max} : \text{最大せん断力} &= 339.87 \text{ (kN}\cdot\text{m)} \\ A : \text{杭の断面積} &= 2.393E-02 \text{ (m}^2\text{)} \\ \alpha_0 : \text{せん断応力補正係数} &= 2.00 \text{ (kN)} \\ &\text{(一般には、}\alpha_0=2.0\text{として良い)}\end{aligned}$$

9. 根入れ長および杭全長の計算

(1) 必要根入れ長の計算

抑止杭の必要根入れ長は以下の式から求まる値と3.0m(最低長)の何れか大きい値とする。

$$\begin{aligned} Lrc &\geq \frac{k \cdot \pi}{\beta} \\ &= \frac{1.50 \times 3.1416}{0.8011} \\ &= 5.88 \text{ (m)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Lrn &= \max(Lrc, 3.0) \\ &= \max(5.88, 3.0) \\ &= 5.88 \text{ (m)} \end{aligned}$$

ここに、

- Lrn : 抑止杭の必要根入れ長 (m)
- Lrmin : 抑止杭の最低根入れ長 (m)
- Lrc : 抑止杭の計算上の必要根入れ長 (m)
- β : 杭の特性値 = 0.8011 (m^{-1})
- k : 根入れ長補正係数 = 1.50
(一般には、k=1.0~1.5の範囲)

(2) 抑止杭全長の計算

抑止杭の全長は、50cm単位のラウンド長となるように決定する。

$$\begin{aligned} L &= Le + Lrn \\ &= 10.000 + 5.88 \\ &= 15.880 \text{ (m)} \\ &= 16.00 \text{ (m)} \cdots \cdots 50\text{cm単位に丸める。} \end{aligned}$$

(3) 根入れ長の計算

抑止杭の根入れ長は全長から杭の有効長を引いて求める。

$$\begin{aligned} Lr &= L - Le \\ &= 16.00 - 10.000 \\ &= 6.000 \text{ (m)} \end{aligned}$$

10. 変位の計算

(1) 杭頭変位量の計算

杭頭部 ($x=0$) の変位量は次式により算定する。

$$\begin{aligned}\delta &= | C_1 + C_2 \cdot x + a/(120EI) \cdot x^5 | \\ &= | C_1 | \\ &= 24.6 \text{ (mm)}\end{aligned}$$

ここに、

δ : 抑止杭頭部の変位量 (mm)

a : 移動層に作用する分布荷重の勾配 $a=2H/Le^2$

EI : 杭の剛性

C_1, C_2 : 基本式の定数

(2) 最大変位量の計算

- ・最大変位は、アンカー位置～すべり区間に発生する。
- ・たわみ角が0となるときに、変位量は最大となる。

たわみ角の方程式を以下に示す。

$$\begin{aligned}i &= C_6 + 2C_7 \cdot xla + 3C_8 \cdot xla^2 + b/(6EI) \cdot xla^3 + a/(24EI) \cdot xla^4 \\ \therefore C_6 + 2C_7 \cdot xla + 3C_8 \cdot xla^2 + b/(6EI) \cdot xla^3 + a/(24EI) \cdot xla^4 &= 0.0000\end{aligned}$$

たわみ角がゼロとなる xla は、上記の4次方程式を解いて求める。

$$xla = 4.557 \text{ (m)} \quad \text{※ 杭頭からの距離 } x = La + xla = 5.557 \text{ (m)}$$

最大変位量は以下の式で求める。

$$\begin{aligned}\delta \text{ max} &= C_5 + C_6 \cdot xla + C_7 \cdot xla^2 + C_8 \cdot xla^3 + b/(24EI) \cdot xla^4 + a/(120EI) \cdot xla^5 \\ &= 71.2 \text{ (mm)}\end{aligned}$$

ここに、

$\delta \text{ max}$: 最大変位量 (mm)

a : 移動層に作用する分布荷重の勾配 $a=2H/Le^2$

b : アンカー位置における荷重強度 (kN/m)

EI : 杭の剛性

$C_5 \sim C_8$: 基本式の定数

11. 根入れ地盤の降伏破壊検討

抑止杭前面の受働土圧 Q_p が、抑止杭に作用する水平荷重より大きいことを照査する。
抑止杭前面の受働土圧 Q_p は、次式により求める。

$$\begin{aligned} Q_p &= 3D \{ (1/2 \cdot \gamma_2 \cdot L_r^2 + \gamma_1 \cdot L_e \cdot L_r) \cdot K_p + 2 \cdot C \cdot L_r \cdot \sqrt{K_p} \} / F_s \\ &= 3 \times 0.3000 \times \{ (1/2 \times 20.0 \times 6.00^2 + 18.0 \times 10.00 \times 6.00) \times 3.690 \\ &\quad + 2 \times 50.0 \times 6.00 \times \sqrt{3.690} \} / 2.00 \\ &= 2,909.77 \text{ (kN)} \quad \geq H = \quad 482.90 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

$Q_p \geq H$ となるので、地盤の降伏破壊に対して安全である。

ここに、

Q_p : 杭前面の受働土圧 (kN)	
D : 鋼管杭の外径 =	0.3000 (m)
γ_1 : 移動層の単位体積重量 =	18.0 (kN/m ³)
γ_2 : 不動層の単位体積重量 =	20.0 (kN/m ³)
ϕ : 不動層の内部摩擦角 =	35.0 (°)
C : 不動層の粘着力 =	50.0 (kN/m ²)
L_e : 移動層の杭長 =	10.000 (m)
L_r : 不動層の杭長 =	6.000 (m)
F_s : 安全率 =	2.0
K_p : 不動層の受働土圧係数	
$K_p = \tan^2(45^\circ + \phi/2) =$	3.690
H : 抑止杭に作用する水平力 =	482.90 (kN)

12. 杭の計算式の妥当性

1) 有限長杭と半無限長杭の使い分け

本計算は、半無限長杭の計算式を用いている。

「新版 地すべり鋼管杭設計要領」に示された 設計上の杭型式の区分を表-1に示す。本表によると、 $\beta \cdot L_r = 3$ を有限長杭と半無限長杭の境界としている。

表-1 有限長杭と半無限長杭の区分表

適用する杭の計算式	$\beta \cdot L_r$					
	0	1	2	3	4	5
有限長の計算式 ($\beta \cdot L_r < 3$)						
半無限長の計算式 ($\beta \cdot L_r \geq 3$)						

ここに、 β : 杭の特性値 = 0.8011 (m^{-1})
 L_r : 杭の根入れ長 = 6.000 (m)

$$\begin{aligned} \beta \cdot L_r &= 0.8011 \times 6.000 \\ &= 4.807 \text{ (m)} \end{aligned}$$

$\beta \cdot L_r \geq 3.0$ となるので、半無限長杭の計算式は妥当である。

2) 曲げ杭とケーソン(剛体杭)の使い分け

本計算は、曲げ杭(抑え杭)として計算を行っている。

「道路土工一切土工・斜面安定工指針 (p.423)」には次の記述がある。

- ・ $\beta \cdot L_r \leq 2$ の場合はケーソン(剛体杭)として設計する。
- ・ $\beta \cdot L_r > 2$ の場合は曲げ杭として設計する。

$$\begin{aligned} \beta \cdot L_r &= 0.8011 \times 6.000 \\ &= 4.807 \text{ (m)} \end{aligned}$$

$\beta \cdot L_r > 2$ となるので、曲げ杭としての計算は妥当である。

13. 計算結果の総括表

計算条件一覧表				
項目		記号	単位	数値
地すべり諸元	必要抑止力	Pr	kN/m	333.300
	すべり面傾斜角	θ	度	15.000
	地すべり荷重の分布形状	-	-	三角形分布荷重
	地すべり荷重の作用高さ	Ls	m	3.333
	合力作用点係数 ($\alpha e=Ls/Le$)	αe	-	0.333
アンカー条件	杭頭からのアンカー位置	La	m	1.000
	アンカー傾角	θa	度	30.000
鋼管杭の配置	抑止杭の有効高さ	Le	m	10.000
	抑止杭の間隔	W	m	1.500
	抑止杭の列数	N	列数	1
鋼管杭の規格	鋼管杭の規格	その他		
	設計強度の設定	-	-	短期強度
	弾性係数	E	kN/m ²	2.000E+08
	許容曲げ応力度	σa	kN/m ²	280,000
	許容せん断応力度	τa	kN/m ²	160,000
鋼管杭の断面諸量	外径	D	mm	300
	肉厚	t	mm	28
	断面積	A	m ²	2.393E-02
	断面2次モーメント	I	m ⁴	2.240E-04
	断面係数	Z	m ³	1.490E-03
根入れ地盤条件	地盤の変形係数	E ₀	kN/m ²	2.000E+08
	試験方法による係数	α	-	1
根入れ長補正係数	$Lr = k \cdot \pi / \beta$	k	-	1.50

計算結果一覧表				
項目		記号	単位	数値
設計外力	水平力	H	kN	482.90
	鉛直力	V	kN	129.40
鋼管杭の断面力	最大曲げモーメント	Mmax	kN・m	394.15
	最大せん断	Smax	kN	339.87
鋼管杭の応力度	曲げ応力度	σ	kN/m ²	273,389
	せん断応力度	τ	kN/m ²	28,405
応力度照査	曲げ応力度	$\sigma \leq \sigma_a \dots\dots$ O.K.		
	せん断応力度	$\tau \leq \tau_a \dots\dots$ O.K.		
設計アンカー力	アンカー支点水平反力	Th	kN	143.03
	設計アンカー力	Ta	kN	165.16
	アンカー力の鉛直成分	Tv	kN	82.58
抑止杭長	不動層必要根入れ長	Lrn	m	5.880
	不動層設計根入れ長	Lr	m	6.000
	移動層有効長	Le	m	10.000
	抑止杭全長 (L = Le + Lr)	L	m	16.000
杭頭変位量		δ	mm	24.6
地盤の 降伏破壊検討	杭前面の受働土圧	Qp	kN	2,909.77
	降伏破壊に対する安定照査	$Q_p \geq H$ (水平力) $\dots\dots$ O.K.		
杭の計算式	判定境界値 ($\beta \cdot L_r$)	$\beta \cdot L_r$	-	4.807
	半無限長杭計算式の妥当性	$\beta \cdot L_r \geq 3.0 \dots\dots$ O.K.		
	曲げ杭としての妥当性	$\beta \cdot L_r > 2.0 \dots\dots$ O.K.		

変位・断面力図

