

地すべり抑止鋼管杭の計算 (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.100+10

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

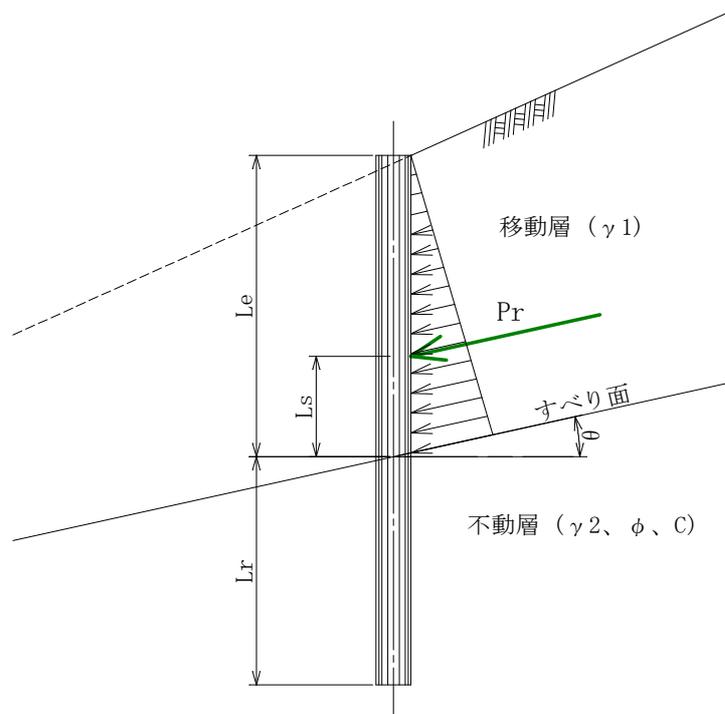
- ・必要抑止力 $P_r = 123.4$ (kN/m)
- ・すべり面の傾斜角 $\theta = 15.000$ (°)
- ・地すべり荷重の分布形状 : 三角形

(2) 地盤条件

- ・不動層の変形係数 $E_0 = 126,000$ (kN/m²)
- ・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	SCW490-CF および同等品
・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 = 350.0 (mm)
・鋼管杭の肉厚	t = 30.0 (mm)
・鋼管杭の断面積	A = 3.016E-02 (m ²)
・鋼管杭の断面2次モーメント	I = 3.890E-04 (m ⁴)
・鋼管杭の断面係数	Z = 2.230E-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 = 77,800 (kN/m ²)

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。

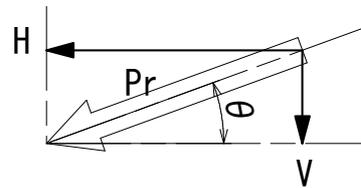
・水平力

$$\begin{aligned} H &= Pr \times \cos \theta \times W / N \\ &= 123.4 \times \cos 15.00 \times 1.500 / 1.0 \\ &= 178.8 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

・鉛直力

$$\begin{aligned} V &= Pr \times \sin \theta \times W / N \\ &= 123.4 \times \sin 15.00 \times 1.500 / 1.0 \\ &= 47.9 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

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。

$$\begin{aligned} kh &= \frac{(\alpha \cdot E_0)^{32/29}}{0.3^{8/29} \times (4 \cdot E \cdot I)^{3/29} \times D^{9/29}} \quad \dots\dots \text{式(5)} \\ &= \frac{424,614.758}{1.916} \\ &= 221,558 \text{ (kN/m}^3\text{)} \end{aligned}$$

4. 杭の特性値の計算

杭の特性値(β)は以下の式で求める。

$$\begin{aligned} \beta &= \left[\frac{kh \cdot D}{4 \cdot E \cdot I} \right]^{1/4} \\ &= \left[\frac{221,558 \times 0.35}{4 \times 77,800} \right]^{1/4} \\ &= \left[\frac{77,545}{311,200} \right]^{1/4} \\ &= 0.7065 \text{ (m}^{-1}\text{)} \end{aligned}$$

5. 最大曲げモーメントの計算 (半無限長杭の算定式)

1) 最大曲げモーメントが生じる深さの計算

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。

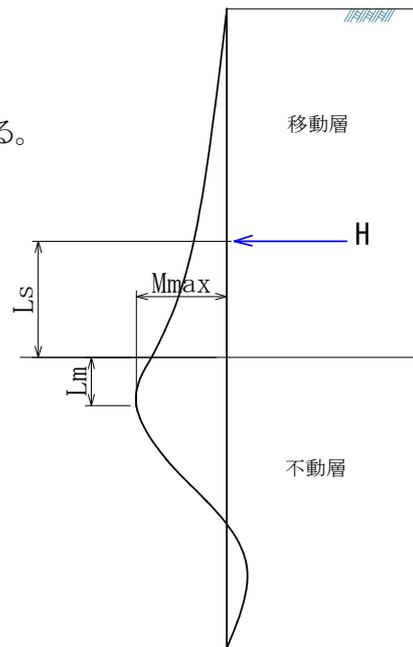
$$L_m = \frac{1}{\beta} \cdot \tan^{-1} \frac{1}{1 + 2 \cdot \beta \cdot L_s}$$
$$= 0.245 \text{ (m)}$$

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。

$$M_{\max} = -\frac{H}{2\beta} \sqrt{(1 + 2 \cdot \beta \cdot L_s)^2 + 1} \cdot \exp(-\beta \cdot L_m)$$
$$= -616.72 \text{ (kN}\cdot\text{m)}$$

ここに、H: 作用する水平力 = 178.80 (kN)
L_m: 最大曲げモーメントが生じる深さ = 0.245 (m)
L_s: 水平力の作用高さ = 3.333 (m)
β: 杭の特性値 = 0.7065 (m⁻¹)



6. 最大せん断力の計算 (半無限長杭の算定式)

1) 移動層部

移動層部でせん断力が最大となるのはすべり面位置で、最大せん断力は以下の式で算定する。

$$\begin{aligned} S_{\max 1} &= H \\ &= 178.80 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

ここに、H：作用する水平力 = 178.80 (kN)

2) 不動層部

a) 最大せん断力が生じる深さの計算

最大せん断力が生じる深さは以下の式により算定する。

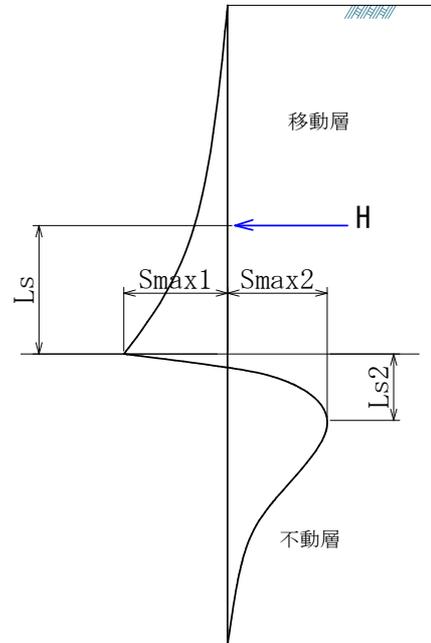
$$\begin{aligned} L_{s2} &= \frac{1}{\beta} \cdot \tan^{-1} \frac{1 + \beta \cdot L_s}{\beta \cdot L_s} \\ &= 1.357 \text{ (m)} \end{aligned}$$

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。

$$\begin{aligned} S_{\max 2} &= H \cdot \sqrt{(2(\beta \cdot L_s)^2 + 2 \cdot \beta \cdot L_s + 1) \cdot \exp(-\beta \cdot L_{s2})} \\ &= 280.94 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

ここに、H：作用する水平力 = 178.80 (kN)
 L_{s2} ：最大せん断力が生じる深さ = 1.357 (m)
 L_s ：水平力の作用高さ = 3.333 (m)
 β ：杭の特性値 = 0.7065 (m^{-1})



3) 最大せん断力

移動層部と不動層部の最大せん断力を比較して、大きい値を採用する。

$$\begin{aligned} S_{\max} &= \text{MAX}(S_{\max 1}, S_{\max 2}) \\ &= \text{MAX}(178.80, 280.94) \\ &= 280.94 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

7. 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。

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{|M_{\max}|}{Z} + \frac{V}{A} \\ &= \frac{616.72}{2.230E-03} + \frac{47.90}{3.016E-02} \\ &= 276,556 + 1,588 \\ &= 278,144 \text{ (kN/m}^2\text{)} \leq \sigma_{sa} = 280,000 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad [\text{O.K.}]\end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{aligned}M_{\max} : \text{最大曲げモーメント} &= -616.72 \text{ (kN}\cdot\text{m)} \\ V : \text{杭1本に作用する鉛直力} &= 47.90 \text{ (kN)} \\ Z : \text{杭の断面係数} &= 2.230E-03 \text{ (m}^3\text{)} \\ A : \text{杭の断面積} &= 3.016E-02 \text{ (m}^2\text{)}\end{aligned}$$

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。

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{\alpha_0 \times S_{\max}}{A} \\ &= \frac{2.00 \times 280.94}{3.016E-02} \\ &= 18,630 \text{ (kN/m}^2\text{)} \leq \tau_a = 160,000 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad [\text{O.K.}]\end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{aligned}S_{\max} : \text{最大せん断力} &= 280.94 \text{ (kN}\cdot\text{m)} \\ A : \text{杭の断面積} &= 3.016E-02 \text{ (m}^2\text{)} \\ \alpha_0 : \text{せん断応力補正係数} &= 2.00 \text{ (kN)} \\ &\text{(一般には、}\alpha_0=2.0\text{として良い)}\end{aligned}$$

8. 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。

$$\begin{aligned} Lrc &\geq \frac{k \cdot \pi}{\beta} \\ &= \frac{1.50 \times 3.1416}{0.7065} \\ &= 6.67 \text{ (m)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Lrn &= \max(Lrc, 3.0) \\ &= \max(6.67, 3.0) \\ &= 6.67 \text{ (m)} \end{aligned}$$

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 = 0.7065 (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。

$$\begin{aligned} L &= Le + Lrn \\ &= 10.000 + 6.67 \\ &= 16.670 \text{ (m)} \\ &= 17.00 \text{ (m)} \cdots \cdots 50\text{cm単位に丸める。} \end{aligned}$$

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。

$$\begin{aligned} Lr &= L - Le \\ &= 17.00 - 10.000 \\ &= 7.000 \text{ (m)} \end{aligned}$$

9. 変位の計算（半無限長杭の算定式）

抑止杭頭部の変位量は次式により算定する。

$$\begin{aligned}\delta &= \delta 1 + \delta 2 + \delta 3 \\ &= 0.2955 \text{ (m)} \\ &= 295.5 \text{ (mm)}\end{aligned}$$

ここに、

- δ : 抑止杭頭部の変位量 (m)
- $\delta 1$: すべり面での変位量 (m)
- $\delta 2$: すべり面でのたわみ角による変位量 (m)
- $\delta 3$: 移動層部(片持梁)のたわみ変位量 (m)

$$\delta 1 = \frac{1 + \beta \cdot L_s}{2 \cdot E \cdot I \cdot \beta^3} H = 0.0109 \text{ (m)}$$

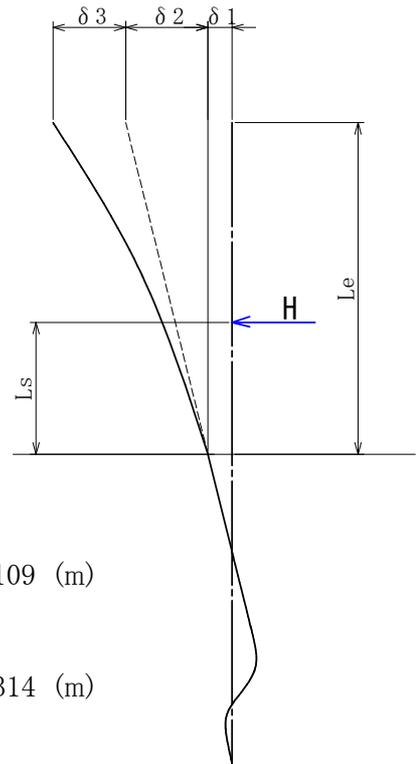
$$\delta 2 = \frac{1 + 2\beta \cdot L_s}{2 \cdot E \cdot I \cdot \beta^2} H \cdot L_e = 0.1314 \text{ (m)}$$

$$\delta 3 = \frac{p \cdot L_e^4}{30 \cdot E \cdot I} = 0.1532 \text{ (m)}$$

ここに、

- H : 作用する水平力 = 178.80 (kN)
- Le: 杭の有効長 = 10.000 (m)
- Ls : 水平力の作用高さ = 3.333 (m)

- E : 杭の弾性係数 = 2.000E+08 (kN/m²)
- I : 杭の断面2次モーメント = 3.890E-04
- β : 杭の特性値 = 0.7065 (m⁻¹)
- p : 分布荷重の底面での荷重強度 (kN/m)
- $p = \frac{2 \cdot H}{L_e} = 35.76 \text{ (kN/m}^2\text{)}$



※ 杭頭部の変位量は地上に突出した杭の変位量算定式により求める。
 (「道路土工－仮設構造物工指針」のp.154～p.155 参照)

10. 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。

$$\begin{aligned} Q_p &= 3D \{ (1/2 \cdot \gamma_2 \cdot L_r^2 + \gamma_1 \cdot L_e \cdot L_r) \cdot K_p + 2 \cdot C \cdot L_r \cdot \sqrt{K_p} \} / F_s \\ &= 3 \times 0.3500 \times \{ (1/2 \times 20.0 \times 7.00^2 + 18.0 \times 10.00 \times 7.00) \times 3.690 \\ &\quad + 2 \times 50.0 \times 7.00 \times \sqrt{3.690} \} / 2.00 \\ &= 4,096.13 \text{ (kN)} \quad \geq H = 178.80 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

$Q_p \geq H$ 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 =	0.3500 (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 =	7.000 (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 =	178.80 (kN)

11. 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 = 0.7065 (m^{-1})
 L_r : 杭の根入れ長 = 7.000 (m)

$$\begin{aligned} \beta \cdot L_r &= 0.7065 \times 7.000 \\ &= 4.946 \text{ (m)} \end{aligned}$$

$\beta \cdot L_r \geq 3.0$ 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。

$$\begin{aligned} \beta \cdot L_r &= 0.7065 \times 7.000 \\ &= 4.946 \text{ (m)} \end{aligned}$$

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

12. 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	123.400
	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
	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
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	SCW490-CF および同等品		
	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	350
	肉厚	t	mm	30
	断面積	A	m ²	3.016E-02
	断面2次モーメント	I	m ⁴	3.890E-04
	断面係数	Z	m ³	2.230E-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	178.80
	鉛直力	V	kN	47.90
鋼管杭の断面力	最大曲げモーメント	Mmax	kN・m	-616.72
	最大せん断	Smax	kN	280.94
鋼管杭の応力度	曲げ応力度	σ	kN/m ²	278,144
	せん断応力度	τ	kN/m ²	18,630
応力度照査	曲げ応力度	$\sigma \leq \sigma a$ O.K.		
	せん断応力度	$\tau \leq \tau a$ O.K.		
抑止杭長	不動層必要根入れ長	Lrn	m	6.670
	不動層設計根入れ長	Lr	m	7.000
	移動層有効長	Le	m	10.000
	抑止杭全長 (L = Le + Lr)	L	m	17.000
杭頭変位量		δ	mm	295.5
地盤の降伏破壊検討	杭前面の受働土圧	Qp	kN	4,096.13
	降伏破壊に対する安定照査	$Qp \geq H$ (水平力) O.K.		
杭の計算式	判定境界値 ($\beta \cdot Lr$)	$\beta \cdot Lr$	-	4.946
	半無限長杭計算式の妥当性	$\beta \cdot Lr \geq 3.0$ O.K		
	曲げ杭としての妥当性	$\beta \cdot Lr > 2.0$ O.K.		

変位・断面力図

