

# 杭設計計算

- 曲げくさび杭の設計計算 -

地区名	抑止杭 Version3
測線名	
備考	サンプルデータ(アンカー付くさび杭)

計算条件		すべり面: 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	250.0				
	肉厚		$t$	mm	28.0				
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	500.0				
	荷重の作用位置		$l_H$	m	集中荷重	0.0(すべり面)			
	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				
アンカー	鋼材		—	—	PC鋼より線				
	種別		—	—	仮設アンカー 5				
	規格		—	—	5-1				
	アンカー取付位置		$l_a$	m	杭頭(軸力考慮する)				
	アンカー傾角		$a$	°	30.0				
	アンカー初期張力		$P_a$	kN	20.0				
	アンカーの自由長		$l_f$	m	12.00				
	アンカーの弾性係数		$E_a$	kN/m <sup>2</sup>	1.98 × 10 <sup>8</sup>				
許容値	許容応力度(短期)	曲げ	$s_a$	N/mm <sup>2</sup>	279				
		せん断	$s_a$	N/mm <sup>2</sup>	162				
地盤	変形係数	移動層	$E_{s_e}$	kN/m <sup>2</sup>	44317				
		不動層	$E_{s_r}$	kN/m <sup>2</sup>	77869				
地盤	粘着力		$C_e, C_r$	kN/m <sup>2</sup>	(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 <sup>3</sup>	18.0		20.0		
	安全率		$F_s$	—	1.2				

計算結果 すべり面：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	260.60		
	発生位置	$X_M$	m	不動層	0.76	
	最大せん断力	$S_{max}$	kN	661.0		
	発生位置	$X_S$	m	すべり面	0.00	
	杭頭変位	$Y$	mm	37.9		
	発生位置	$X_Y$	m	移動層	10.00	
	アンカー点水平支点反力	$Th$	kN/本	46.200		
	必要アンカー力	$P_0$	kN/本	73.347		
	0.60・ $T_{us}$ (引張荷重)	—	kN/本	109.800		
	0.75・ $T_{ys}$ (降伏荷重)	—	kN/本	117.000		
	引張荷重照査	—	kN/本	109.800	73.347・・・OK	
	降伏荷重照査	—	kN/本	117.000	73.347・・・OK	
応 力 度	曲げ応力度	$s$	kN/m <sup>2</sup>	278280		
	せん断応力度	$s$	kN/m <sup>2</sup>	67691		
	曲げ応力度照査	—	kN/m <sup>2</sup>	278280	279000・・・OK	
	せん断応力度照査	—	kN/m <sup>2</sup>	67691	162000・・・OK	
杭 長	必要根入長	$l_r'$	m	4.88		
	根入長	$l_r$	m	5.00		
	杭全長	$l_p$	m	15.00		
降 伏 破 壊	水平負担力	$H$	kN	724.5		
	受働土圧	移動層	$Q_{pe}$	kN	1582.2	
		不動層	$Q_{pr}$	kN	3483.1	
	地盤降伏・破壊の検討	—	kN	724.5	1582.2・・・OK	
—		kN	724.5	3483.1・・・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	曲げくさび杭	
荷重の作用状態	集中荷重	
必要抑止力	$Pr =$	500.0 ( 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	$Hu = Pr \cdot \cos e$ $= 500.0 \times \cos( 15.0 )$ $=$	483.0 ( kN/m )
単位幅当たりの鉛直負担力	$Vu = Pr \cdot \sin e$ $= 500.0 \times \sin( 15.0 )$ $=$	129.4 ( kN/m )
杭の間隔	$D =$	1.5 ( m )
杭一本当たりの水平負担力	$H = Hu \cdot D$ $= 483.0 \times 1.5$ $=$	724.5 ( kN/本 )
杭一本当たりの鉛直負担力	$V = Vu \cdot D$ $= 129.4 \times 1.5$ $=$	194.1 ( 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 アンカーに関する条件

鋼材		PC鋼より線
種別		仮設アンカー 5
規格		5-1
アンカー取付位置	$l_a =$	杭 頭
アンカー傾角	$a =$	30.0 ( ° )
アンカー初期張力	$P_a =$	20.0 ( kN )
アンカーの自由長	$l_f =$	12.00 ( m )
アンカーの弾性係数	$E_a =$	$1.98 \times 10^8$ ( kN/m <sup>2</sup> )
アンカー本数		杭1本あたりアンカー1本

## 1.3 杭材に関する条件

### 1.3.1 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 <sup>2</sup> )
許容せん断応力度(短期)	$s_a =$	162 ( N/mm <sup>2</sup> )

### 1.3.2 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	$d$	=	250.0	( mm )
肉厚	$t$	=	28.0	( mm )
断面積	$A$	=	$1.953 \times 10^{-2}$	( m <sup>2</sup> )
断面二次モーメント	$I$	=	$1.220 \times 10^{-4}$	( m <sup>4</sup> )
断面係数	$Z$	=	$9.780 \times 10^{-4}$	( m <sup>3</sup> )
杭の弾性係数	$E$	=	$2.0 \times 10^8$	( kN/m <sup>2</sup> )
杭の曲げ剛性	$EI$	=	$E \cdot I$	
		=	$2.0 \times 10^8 \times 1.220 \times 10^{-4}$	
		=	$2.440 \times 10^4$	( kN・m <sup>2</sup> )

### 1.4 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 <sup>2</sup> )
内部摩擦角	$e$	=	25.0	( ° )
単位体積重量	$e$	=	18.0	( kN/m <sup>3</sup> )
不動層の粘着力	$c_r$	=	50.0	( kN/m <sup>2</sup> )
内部摩擦角	$r$	=	35.0	( ° )
単位体積重量	$r$	=	20.0	( kN/m <sup>3</sup> )
安全率	$Fs$	=	1.2	

## 1.5 地盤に関する条件

### < 移動層 >

$$\begin{aligned} \text{地盤の変形係数} \quad E s_e &= K h_e \cdot d \\ &= 177266 \times 0.2500 \\ &= 44317 \quad (\text{kN/m}^2) \end{aligned}$$

ここで、

横方向地盤反力係数( $K h_e$ )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。

$$\begin{aligned} \text{横方向地盤反力係数} \quad K h_e &= 0.3^{24/29} \cdot (4 E I)^{-3/29} \cdot d^{-9/29} \cdot \left( \frac{2800 N_e}{0.3} \right)^{32/29} \\ &= 0.3^{24/29} \times (4 \times 2.440 \times 10^4)^{-3/29} \times 0.2500^{-9/29} \\ &\quad \times \left( \frac{2800 \times 30}{0.3} \right)^{32/29} \\ &= 177266 \quad (\text{kN/m}^3) \end{aligned}$$

$E I$  : 杭の曲げ剛性 (  $\text{kN} \cdot \text{m}^2$  )

$d$  : 杭の外径 (  $\text{m}$  )

$N_e$  : 標準貫入試験における  $N$  値

< 不動層 >

$$\begin{aligned} \text{地盤の変形係数} \quad E_{s_r} &= K_{h_r} \cdot d \\ &= 311476 \times 0.2500 \\ &= 77869 \quad (\text{kN/m}^2) \end{aligned}$$

ここで、  
横方向地盤反力係数 ( $K_{h_r}$ ) 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。

$$\begin{aligned} \text{横方向地盤反力係数} \quad K_{h_r} &= 0.3^{24/29} \cdot (4EI)^{-3/29} \cdot d^{-9/29} \cdot \left( \frac{2800 N_r}{0.3} \right)^{32/29} \\ &= 0.3^{24/29} \times (4 \times 2.440 \times 10^4)^{-3/29} \times 0.2500^{-9/29} \\ &\quad \times \left( \frac{2800 \times 50}{0.3} \right)^{32/29} \\ &= 311476 \quad (\text{kN/m}^3) \end{aligned}$$

$EI$  : 杭の曲げ剛性 (  $\text{kN} \cdot \text{m}^2$  )

$d$  : 杭の外径 (  $\text{m}$  )

$N_r$  : 標準貫入試験における  $N$  値

## 1.6 杭の特性値の算定

< 移動層 >

$$\begin{aligned} e &= \sqrt[4]{\frac{E_{s_e}}{4EI}} = \sqrt[4]{\frac{44317}{4 \times 2.440 \times 10^4}} \\ &= 0.8209 \quad (\text{m}^{-1}) \end{aligned}$$

< 不動層 >

$$\begin{aligned} r &= \sqrt[4]{\frac{E_{s_r}}{4EI}} = \sqrt[4]{\frac{77869}{4 \times 2.440 \times 10^4}} \\ &= 0.9451 \quad (\text{m}^{-1}) \end{aligned}$$

## 1.7 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。

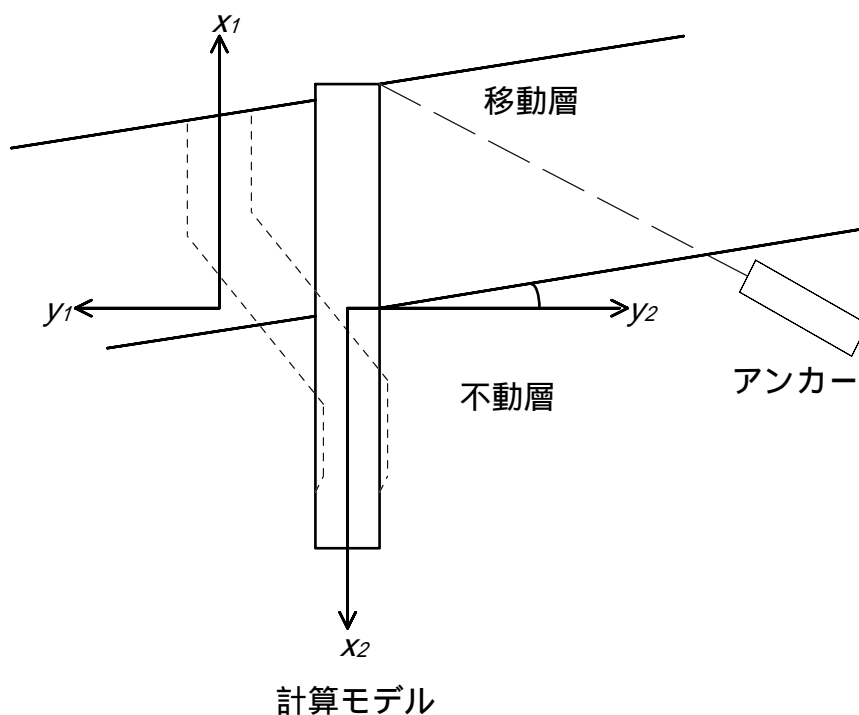
地すべり防止対策杭の設計において長い杭とはすべり面より上、下それぞれで  $e l_e$  または  $r l_r \geq 3$  となるものをいい、短い杭とはすべり面の上下で何れか一方が、あるいは両方が  $1 \leq e l_e$  または  $1 \leq r l_r < 3$  となるものをいう。

「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。

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

ここで、

$x$  : 任意の深さ(すべり面を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。

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

ここで、

$A, B, C, D$  : 積分定数

## 2.2 連立方程式

一般解を逐次微分して杭のたわみ角  $i$ 、曲げモーメント  $M$ 、せん断力  $S$  を求める。

$$\begin{aligned} \text{たわみ角: } i = & \cdot \left\{ e^x [ A \cdot (\cos x - \sin x) \right. \\ & \left. + B \cdot (\cos x + \sin x) ] \right. \\ & \left. + e^{-x} [ -C \cdot (\cos x + \sin x) \right. \\ & \left. + D \cdot (\cos x - \sin x) ] \right\} \quad (\text{rad}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{モーメント: } M = & -2EI \cdot {}^2 \cdot [ e^x ( -A \cdot \sin x + B \cdot \cos x ) \\ & + e^{-x} ( C \cdot \sin x - D \cdot \cos x ) ] \quad (\text{kN}\cdot\text{m}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{せん断力: } S = & -2EI \cdot {}^3 \cdot \left\{ e^x [ -A \cdot (\cos x + \sin x) \right. \\ & \left. + B \cdot (\cos x - \sin x) ] \right. \\ & \left. + e^{-x} [ C \cdot (\cos x - \sin x) \right. \\ & \left. + D \cdot (\cos x + \sin x) ] \right\} \quad (\text{kN}) \end{aligned}$$

ここで、上下に有限な杭と考えると、境界条件は次のように表される。

$x_1 = x_2 = 0$  のとき

$$i_1 = i_2$$

$$M_1 + M_2 = 0$$

$$S_1 = -H + (Ph_a' + Th') \quad S_2 = -H + (Ph_a' + Th')$$

$x_1 = l_e$  のとき

$$M_1 = 0$$

$$S_1 = (Ph_a' + Th')$$

$x_2 = l_r$  のとき

$$M_2 = 0$$

$$S_2 = 0$$

杭頭の変位とアンカーの伸びがつり合うことから

$$y_1(l_e) - y_1(0) - y_2(0) = \frac{Th'}{Kh_a'}$$

前述の式と境界条件により、次の9元連立方程式が得られる。

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{-H + Ph_a'}{2EI \cdot e^3} \\ \frac{-H + Ph_a'}{2EI \cdot r^3} \\ 0 \\ \frac{Ph_a'}{2EI \cdot e^3} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e & e & -e & e & -r & -r & r & -r & 0 \\ 0 & e^2 & 0 & -e^2 & 0 & r^2 & 0 & -r^2 & 0 \\ -1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{2EI \cdot e^3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 1 & \frac{-1}{2EI \cdot r^3} \\ -1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{2EI \cdot e^3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 2 & 2 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 2 & 2 & 2 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ & & & & & & & & & \frac{1}{Kh_a'} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \\ D_1 \\ A_2 \\ B_2 \\ C_2 \\ D_2 \\ Th' \end{pmatrix}$$

ここで

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

この9元連立方程式を解いて、積分定数  $A_1 \sim D_1$ 、 $A_2 \sim D_2$  および  $Th'$  を求めると、

積分定数

$$\begin{aligned}
 A_1 &= 2.1979 \times 10^{-7} & A_2 &= -1.3926 \times 10^{-6} \\
 B_1 &= -5.9757 \times 10^{-7} & B_2 &= 2.8065 \times 10^{-6} \\
 C_1 &= -2.2879 \times 10^{-2} & C_2 &= -1.7263 \times 10^{-2} \\
 D_1 &= -1.6053 \times 10^{-3} & D_2 &= 1.2135 \times 10^{-3}
 \end{aligned}$$

杭1本あたりの杭変位によるアンカー一点水平支点反力

$$Th' = 46.200 \quad (\text{kN})$$

ここで、

$Ph_a'$  : 杭1本に作用するアンカー初期張力の水平成分 ( kN )

$$Ph_a' = Ph_a = 17.32 \quad ( \text{kN} )$$

$$Ph_a = P_a \cdot \cos a = 20.0 \times \cos(30.0) = 17.32 \quad ( \text{kN} )$$

$Ph_a$  : アンカー初期張力の水平成分 ( kN )

$Th'$  : 杭1本あたりの杭変位によるアンカー一点水平支点反力 ( kN )

$Kh_a'$  : 杭1本あたりの杭変位に対するアンカーの水平係数 ( kN/m )

$$Kh_a' = Kh_a = 1222 \quad ( \text{kN/m} )$$

$$Kh_a = K_a \cdot \cos^2 a = 1629 \times \cos^2(30.0) = 1222 \quad ( \text{kN/m} )$$

$$K_a = \frac{E_a \cdot A_a}{l_f} = \frac{1.98 \times 10^8 \times 98.7 \times 10^{-6}}{12.00} = 1629 \quad ( \text{kN/m} )$$

$Kh_a$  : 杭変位に対するアンカーの水平係数 ( kN/m )

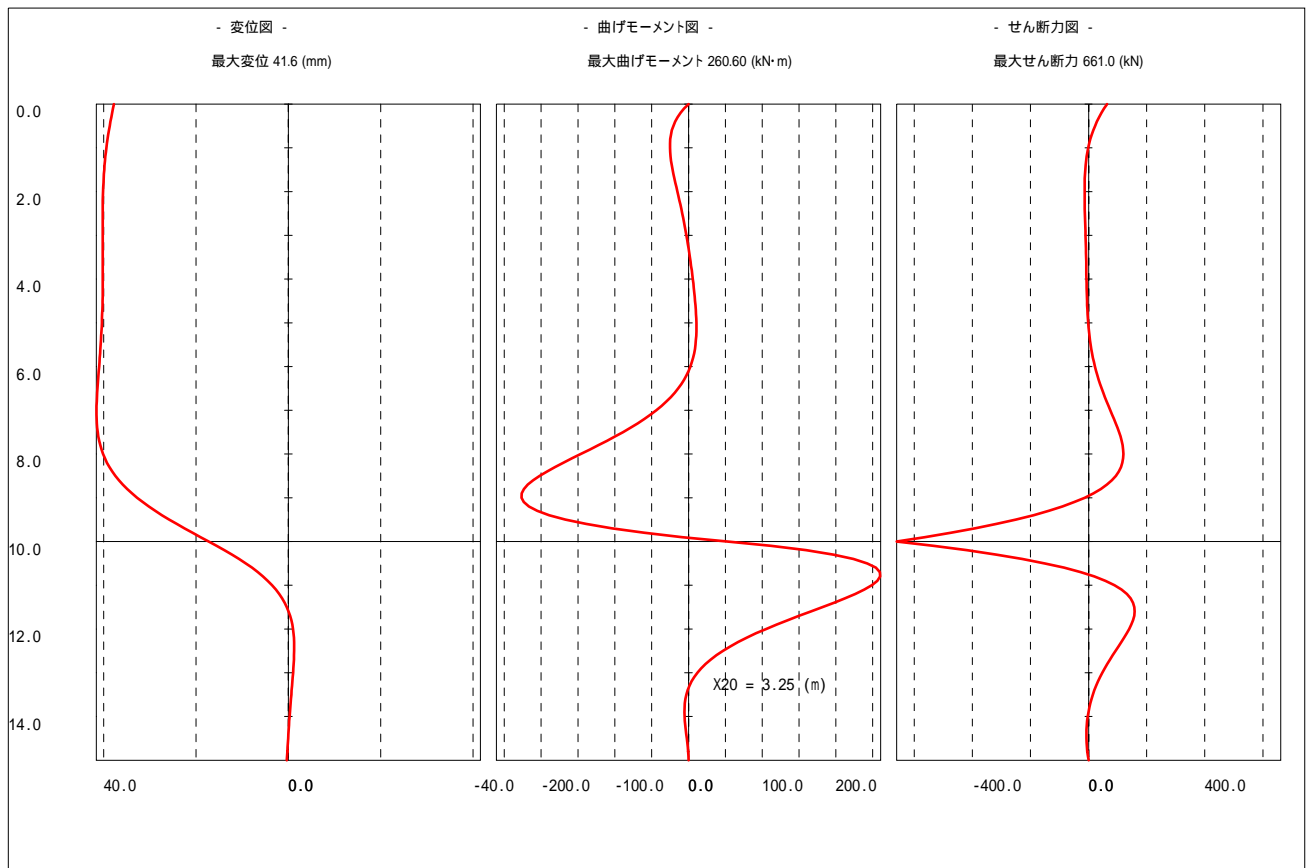
$K_a$  : アンカーのバネ定数 ( kN/m )

$E_a$  : アンカーの弾性係数 ( kN/m<sup>2</sup> )

$A_a$  : アンカーの断面積 ( m<sup>2</sup> )

### 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、すべり面を  $X=0$  とすると次の位置で発生する。

<不動層>

$$X_M = 0.76 \quad (\text{ m } )$$

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。

$$\begin{aligned} M_{max} &= \left| -2 EI \cdot r^2 \left\{ e^{r X_M} (-A_2 \cdot \sin r X_M + B_2 \cdot \cos r X_M) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + e^{-r X_M} (C_2 \cdot \sin r X_M - D_2 \cdot \cos r X_M) \right\} \right| \\ &= 260.60 \quad (\text{ kN}\cdot\text{m } ) \end{aligned}$$

ここで、

$$EI = 2.440 \times 10^4 \quad (\text{ kN}\cdot\text{m}^2 )$$

$$r = 0.9451 \quad (\text{ m}^{-1} )$$

積分定数  $A_2, B_2, C_2, D_2$  は、

$$A_2 = -1.3926 \times 10^{-6}$$

$$B_2 = 2.8065 \times 10^{-6}$$

$$C_2 = -1.7263 \times 10^{-2}$$

$$D_2 = 1.2135 \times 10^{-3}$$

$$r X_M = 0.9451 \times 0.76 = 0.718276$$

## 5. 最大せん断力

杭1本当たりの最大せん断力は、すべり面を  $X = 0$  とすると次の位置で発生する。

<不動層>

$$X_s = 0.00 \quad (\text{ m } )$$

したがって、最大せん断力は以下の式で与えられる。

$$S_{max} = \left| -2 EI \cdot r^3 \cdot \left\{ \begin{array}{l} e^{r X_s} [ -A_2 \cdot (\cos r X_s + \sin r X_s) \\ \quad + B_2 \cdot (\cos r X_s - \sin r X_s) ] \\ + e^{-r X_s} [ C_2 \cdot (\cos r X_s - \sin r X_s) \\ \quad + D_2 \cdot (\cos r X_s + \sin r X_s) ] \end{array} \right\} \right|$$

$$= 661.0 \quad (\text{ kN } )$$

ここで、

$$EI = 2.440 \times 10^4 \quad (\text{ kN} \cdot \text{ m}^2 )$$

$$r = 0.9451 \quad (\text{ m}^{-1} )$$

積分定数  $A_2, B_2, C_2, D_2$  は、

$$A_2 = -1.3926 \times 10^{-6}$$

$$B_2 = 2.8065 \times 10^{-6}$$

$$C_2 = -1.7263 \times 10^{-2}$$

$$D_2 = 1.2135 \times 10^{-3}$$

$$r X_s = 0.9451 \times 0.00 = 0.000000$$

## 6. アンカー力の計算

### 6.1 必要アンカー力の算出

杭変位によるアンカー一点水平支点反力  $Th$  とその軸方向の支点反力  $T$  及び必要なアンカー力  $P_0$  は、それぞれ次のとおりである。

$$Th = Th' = 46.200 \quad (\text{kN/本})$$

$$T = \frac{Th}{\cos(\alpha)} = \frac{46.200}{\cos(30.0)} = 53.347 \quad (\text{kN/本})$$

$$\begin{aligned} P_0 &= T + P_a \\ &= 53.347 + 20.0 = 73.347 \quad (\text{kN/本}) \end{aligned}$$

### 6.2 アンカー引張材の照査

引張材の種類： PC鋼より線

引張材の名称： 仮設アンカー 5 5-1

$$\begin{aligned} 0.60 T_{us} &= 0.60 \times 183.000 \\ &= 109.800 \quad P_0 = 73.347 \quad (\text{kN/本}) \cdots \text{OK} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 0.75 T_{ys} &= 0.75 \times 156.000 \\ &= 117.000 \quad P_0 = 73.347 \quad (\text{kN/本}) \cdots \text{OK} \end{aligned}$$

$T_{us}$  : 引張材の引張荷重 ( kN )

$T_{ys}$  : 引張材の降伏荷重 ( kN )

上記より、当アンカーは設計条件に対して安全である。



## 7. 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

$$Nf_2 = V = 194.1 \quad (\text{kN})$$

杭1本当たりにかかるアンカー力の鉛直成分

$$\begin{aligned} Nf_3 &= (Th + Ph_a) \cdot \tan a \\ &= (46.20 + 17.32) \times \tan(30.0) \\ &= 36.7 \quad (\text{kN}) \end{aligned}$$

したがって、杭1本にかかる軸力  $Nf$  は、

$$\begin{aligned} Nf &= Nf_2 + Nf_3 \\ &= 230.8 \quad (\text{kN}) \end{aligned}$$

## 8. 断面強度の照査

杭に生じる曲げ応力度  $s$  を照査する。

$$\begin{aligned} s &= \frac{M_{max}}{Z} + \frac{Nf}{A} = \frac{260.60}{9.780 \times 10^{-4}} + \frac{230.8}{1.953 \times 10^{-2}} \\ &= 278280 \quad (\text{kN/m}^2) \quad s_a = 279000 \quad (\text{kN/m}^2) \dots \dots \text{OK} \end{aligned}$$

杭に生じるせん断応力度  $s$  を照査する。

$$\begin{aligned} s &= \sigma \cdot \frac{S_{max}}{A} = 2.000 \times \frac{661.0}{1.953 \times 10^{-2}} \\ &= 67691 \quad (\text{kN/m}^2) \quad s_a = 162000 \quad (\text{kN/m}^2) \dots \dots \text{OK} \end{aligned}$$

$$\sigma: \text{せん断応力補正係数} = 2.000$$

上記より、当該杭は設計条件に対して安全である。

## 9. 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

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。

## 10. 有効長の照査

杭の有効長は次の値以上を確保する。

$$\begin{aligned}l_{e'} &= \frac{1}{e} \cdot \left( \tan^{-1} \left( \frac{r - e}{e + r} \right) + \right) \cdot 1.5 \\ &= \frac{1}{0.8209} \times \left( \tan^{-1} \left( \frac{0.9451 - 0.8209}{0.8209 + 0.9451} \right) + \right) \times 1.5 \\ &= 5.87 \quad (\text{ m } ) \quad \quad \quad l_e = 10.00 \quad (\text{ m } ) \dots \text{OK}\end{aligned}$$

## 11. 根入長

根入長はモーメント第一零点の 1.5 倍以上を確保する。

モーメント第一零点による根入長は以下の通りとする。

$$\begin{aligned}X_{20} &= \frac{1}{r} \cdot \left( \tan^{-1} \left( \frac{e - r}{e + r} \right) + \right) \\ &= \frac{1}{0.9451} \times \left( \tan^{-1} \left( \frac{0.8209 - 0.9451}{0.8209 + 0.9451} \right) + \right) \\ &= 3.25 \quad (\text{ m } )\end{aligned}$$

したがって、必要根入長は次の通りである。

$$\begin{aligned}l_{r'} &= X_{20} \cdot 1.5 = 3.25 \times 1.5 \\ &= 4.88 \quad (\text{ m } )\end{aligned}$$

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  $10.00 + 4.88 = 14.88 \approx 15.00 \text{ m}$  となり、  
根入長は  $15.00 - 10.00 = 5.00 \text{ m}$  となる。

## 12. 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。

$$\begin{aligned}
 \text{＜移動層＞ } Q_{pe} &= 3d \left( \frac{1}{2} e l e^2 K_{pe} + 2 c_e l e \sqrt{K_{pe}} \right) \frac{1}{F_s} \\
 &= 3 \times 0.2500 \times \left( \frac{1}{2} \times 18.0 \times 10.00^2 \times 2.464 \right. \\
 &\quad \left. + 2 \times 10.0 \times 10.00 \times \sqrt{2.464} \right) \times \frac{1}{1.2} \\
 &= 1582.2 \quad ( \text{ kN } )
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{＜不動層＞ } Q_{pr} &= 3d \left\{ \left( \frac{1}{2} r l r^2 + r l e l_r \right) K_{pr} + 2 c_r l r \sqrt{K_{pr}} \right\} \frac{1}{F_s} \\
 &= 3 \times 0.2500 \times \left\{ \left( \frac{1}{2} \times 20.0 \times 5.00^2 + 20.0 \times 10.00 \times 5.00 \right) \right. \\
 &\quad \left. \times 3.690 + 2 \times 50.0 \times 5.00 \times \sqrt{3.690} \right\} \times \frac{1}{1.2} \\
 &= 3483.1 \quad ( \text{ kN } )
 \end{aligned}$$

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。

$$H = 724.5 \quad ( \text{ kN } ) \quad Q_{pe} = 1582.2 \quad ( \text{ kN } ) \quad \dots \text{OK}$$

$$H = 724.5 \quad ( \text{ kN } ) \quad Q_{pr} = 3483.1 \quad ( \text{ kN } ) \quad \dots \text{OK}$$

以上から、地盤の降伏・破壊に対して安全である。

### 13. 変位

杭頭 ( すべり面上部  $X_Y = 10.00 \text{ m}$  ) の位置における変位量を求める。

杭頭変位は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} Y_t &= \left| Y_1(X_Y) - Y_1(0) - Y_2(0) \right| \\ &= 37.9 \quad (\text{ mm } ) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_1(X_Y) &= e^{-e X_Y} (A_1 \cdot \cos e X_Y + B_1 \cdot \sin e X_Y) \\ &\quad + e^{-e X_Y} (C_1 \cdot \cos e X_Y + D_1 \cdot \sin e X_Y) \\ &= -2.337 \times 10^{-3} (\text{ m } ) = -2.337 (\text{ mm } ) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_1(0) &= A_1 + C_1 \\ &= -22.879 \times 10^{-3} (\text{ m } ) = -22.879 (\text{ mm } ) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_2(0) &= A_2 + C_2 \\ &= -17.264 \times 10^{-3} (\text{ m } ) = -17.264 (\text{ mm } ) \end{aligned}$$

ここで、

積分定数  $A_1, B_1, C_1, D_1, A_2, C_2$  は

$$A_1 = 2.1979 \times 10^{-7}$$

$$B_1 = -5.9757 \times 10^{-7}$$

$$C_1 = -2.2879 \times 10^{-2}$$

$$D_1 = -1.6053 \times 10^{-3}$$

$$A_2 = -1.3926 \times 10^{-6}$$

$$C_2 = -1.7263 \times 10^{-2}$$

$$e X_Y = 0.8209 \times 10.00 = 8.209000$$

## 14. 杭形式の照査

前述した杭形式の区分について照査する。

移動層は、

$$ele = 0.8209 \times 10.00 = 8.2090$$

不動層は、

$$rlr = 0.9451 \times 5.00 = 4.7255$$

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 $ele$ または $rlr$						
		0	1	2	3	4
杭	短い杭(有限の杭) (1 $l < 3$ )		—————			
	長い杭(無限の杭) (3 $l$ )				—————	