

杭設計計算

- 骨組解析(自動計算)の設計計算 -

地区名	抑止杭 Version3
測線名	
備考	サンプルデータ(骨組解析)

計算条件		項目	記号	単位	数	値
杭材	杭	鋼材の種類	—	—	鋼管	
		材質	—	—	490材相当品	
		外径	d	mm	250.0	
		肉厚	t	mm	23.0	
設計条件	設	部材数	—	—	15	
		根入れ地盤深度	l_e	m	10.00	
		杭間隔	D	m	1.5	
		水平負担力	H_u	kN/m	173.2	
		地すべり力の鉛直成分	V_u	kN/m	100.0	
		杭にかかる初期軸力	N_{f1}	kN	0.0	
		アンカーによる軸力	—	—	考慮する	
許容値	許容応力度 (短期)	曲げ	s_a	N/mm ²	279	
		せん断	s_a	N/mm ²	162	
地盤	地	粘着力	C_e, C_r	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	F_s	—	1.2	

計算結果

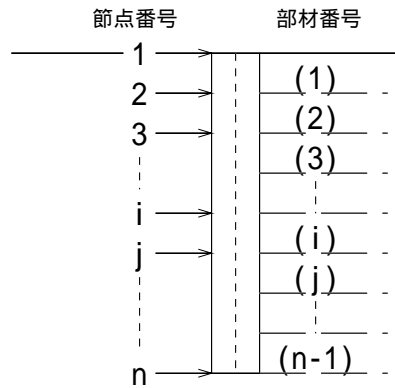
杭頭：x=0

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	226.58		
	発 生 位 置	X_M	m	1.00		
	最大せん断力	S_{max}	kN	150.5		
	発 生 位 置	X_S	m	10.00		
	杭 頭 変 位	Y	mm	0.1		
	発 生 位 置	X_Y	m	0.00		
応 力 度	曲 げ 応 力 度	s	kN/m ²	278311		
	せん断応力度	s	kN/m ²	18354		
	曲げ応力度照査	—	kN/m ²	278311	279000・・・OK	
	せん断応力度照査	—	kN/m ²	18354	162000・・・OK	
杭 長	必 要 根 入 長	l_r'	m	5.07		
	根 入 長	l_r	m	5.50		
	杭 全 長	l_p	m	15.50		
降 伏 破 壊	水 平 負 担 力	H	kN	259.8		
	受働土圧	移動層	Q_{pe}	kN	1582.2	
		不動層	Q_{pr}	kN	3894.8	
	地盤降伏・破壊の検討	—	kN	259.8	1582.2	・・・OK
—		kN	259.8	3894.8	・・・OK	

1. 解析手法

解析手法は任意平面骨組解析とし、基本的な考えは次の通りである。

抑止杭断面の地盤がバネとして地すべりに抵抗すると考え、杭と地盤の関係を次図の通り仮定して、杭の断面力を求めるものである。



多層系地盤のモーメント杭模式断面図(例)

この解析法は杭を適当な個数に分割し、各節点間ごとに荷重条件、バネ定数を入力し杭の剛性を与えると、杭に発生するせん断力、曲げモーメント及び変位を計算することができる。このため変化に富んだ複雑な地盤に対しても適用が可能である。

また、杭頭にアンカーを設置する場合は、アンカー位置を固定支持点（地盤のバネ支点を設ける）として、支点反力を求めることによりアンカー力などの諸元を求めればよい。

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。

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

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

$f(x)$: 杭に作用する荷重

(等分布又は三角形・台形分布で $f(x) = ax + b$ とする)

a : 分布荷重の勾配

b : $x=0$ における荷重強度

EI : 杭の曲げ剛性

Es : 地盤の変形係数

上記の微分方程式を用いて一般解を得る。

2.2 一般式

杭の変位を y 、たわみ角を i 、曲げモーメントを M 、せん断力を S とすると一般式は次のようになる。

< $E_s \neq 0$ (地盤反力を期待する) の場合 >

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

$$i = \frac{dy}{dx} = \left\{ e^{-\lambda x} \left[A \cdot (\cos x - \sin x) + B \cdot (\cos x + \sin x) \right] + e^{-\lambda x} \left[-C \cdot (\cos x + \sin x) + D \cdot (\cos x - \sin x) \right] \right\} + \frac{a}{E_s}$$

$$M = -EI \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} = -2EI \cdot \lambda^2 \left[e^{-\lambda x} (-A \cdot \sin x + B \cdot \cos x) + e^{-\lambda x} (C \cdot \sin x - D \cdot \cos x) \right]$$

$$S = -EI \cdot \frac{d^3 y}{dx^3} = -2EI \cdot \lambda^3 \left\{ e^{-\lambda x} \left[-A \cdot (\cos x + \sin x) + B \cdot (\cos x - \sin x) \right] + e^{-\lambda x} \left[C \cdot (\cos x - \sin x) + D \cdot (\cos x + \sin x) \right] \right\}$$

< $E_s = 0$ (地盤反力を期待しない) の場合 >

$$y = \frac{a}{120EI} \cdot x^5 + \frac{b}{24EI} \cdot x^4 + A \cdot x^3 + B \cdot x^2 + C \cdot x + D$$

$$i = \frac{dy}{dx} = \frac{a}{24EI} \cdot x^4 + \frac{b}{6EI} \cdot x^3 + 3A \cdot x^2 + 2B \cdot x + C$$

$$M = -EI \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{a}{6} \cdot x^3 - \frac{b}{2} \cdot x^2 - 6A \cdot EI \cdot x - 2B \cdot EI$$

$$S = -EI \cdot \frac{d^3 y}{dx^3} = -\frac{a}{2} \cdot x^2 - b \cdot x - 6A \cdot EI$$

ここで、

$$\lambda : \text{杭の特性値} = \sqrt[4]{E_s / 4EI}$$

E_s : 地盤の変形係数

EI : 杭の曲げ剛性

A, B, C, D : 積分定数

a : 分布荷重の勾配

b : $x=0$ における荷重強度

以上の一般式に境界条件を与え、連立方程式を解き、積分定数 A, B, C, D を決定する。

<境界条件>

各節点に外部から作用するモーメント荷重を Mz 、せん断荷重を Sz とする。
また、 h は各部材の部材長である。

杭頭（節点0 = 部材1の上端）

変位	自由	自由	拘束	拘束
回転	自由	拘束	自由	拘束
境界条件	$M_1(0) = -Mz_0$ $S_1(0) = -Sz_0$	$i_1(0) = 0$ $S_1(0) = -Sz_0$	$y_1(0) = 0$ $M_1(0) = -Mz_0$	$y_1(0) = 0$ $i_1(0) = 0$

部材間（節点n = 部材n+1の間）

状態	荷重位置	アンカー位置	回転拘束	変位・回転拘束
境界条件	$y_n(h_n) = y_{n+1}(0)$	$y_n(h_n) = 0$	$y_n(h_n) = y_{n+1}(0)$	$y_n(h_n) = 0$
	$i_n(h_n) = i_{n+1}(0)$	$y_{n+1}(0) = 0$	$i_n(h_n) = 0$	$y_{n+1}(0) = 0$
	$M_n(h_n) - Mz_n = M_{n+1}(0)$	$i_n(h_n) = i_{n+1}(0)$	$i_{n+1}(0) = 0$	$i_n(h_n) = 0$
	$S_n(h_n) - Sz_n = S_{n+1}(0)$	$M_n(h_n) = M_{n+1}(0)$	$S_n(h_n) = S_{n+1}(0)$	$i_{n+1}(0) = 0$

杭末端（節点n = 部材nの下端）

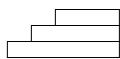
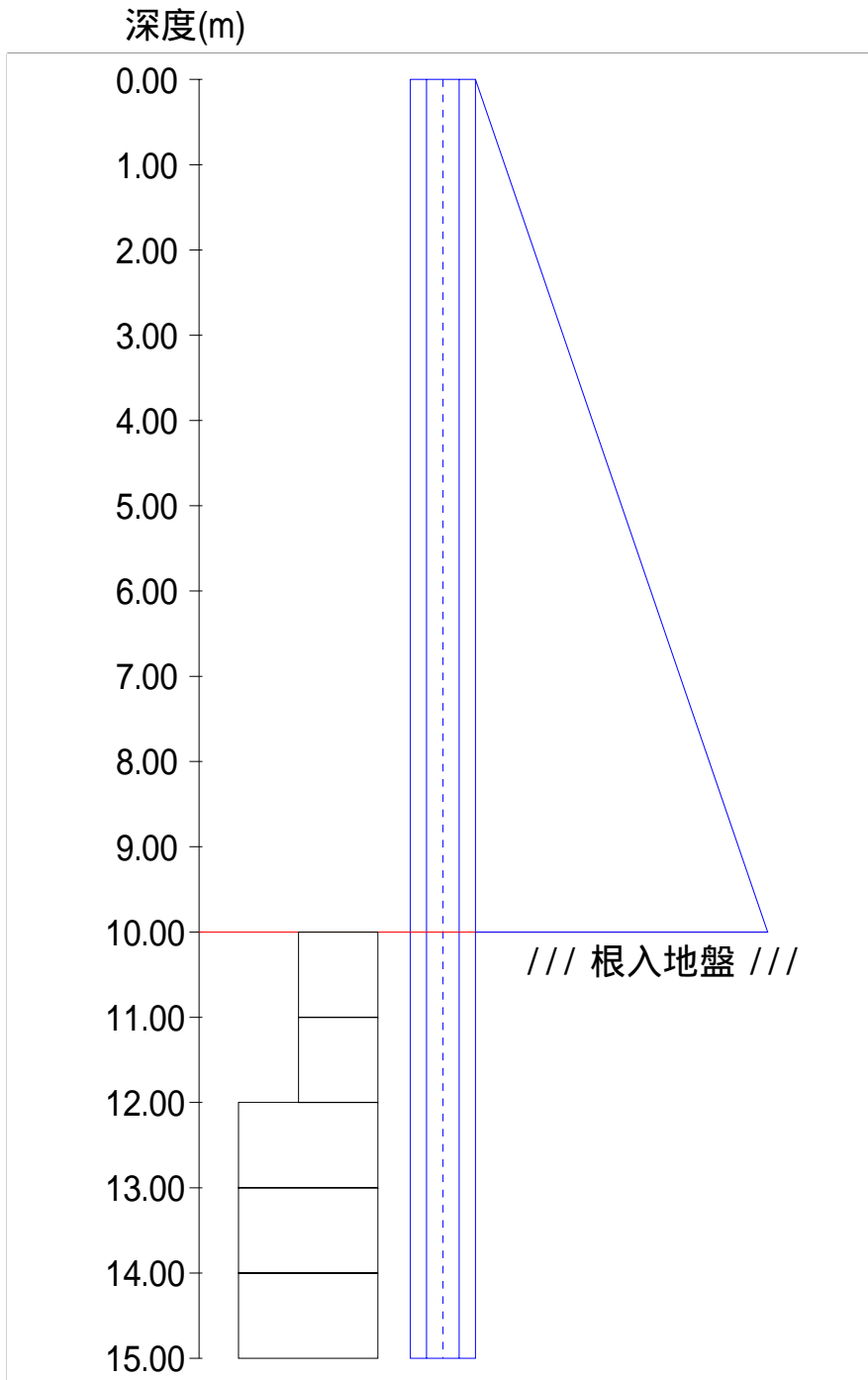
根入れ無限長の場合

$$A_n = 0$$

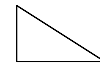
$$B_n = 0$$

3. 設計条件

3.1 荷重・拘束・地盤条件図



: 地盤反力



: 分布荷重

: 変位拘束 + 回転拘束

: モーメント荷重 + せん断荷重

: 変位拘束

: モーメント荷重

: 回転拘束

: せん断荷重

3.2 荷重に関する条件

荷重条件は以下の通りである。

部材数		15	
根入れ地盤深度	$l_e =$	10.00	(m)
杭間隔	$D =$	1.5	(m)
水平負担力	$Hu =$	173.2	(kN/m)
地すべり力の鉛直成分	$Vu =$	100.0	(kN/m)
杭にかかる初期軸力	$Nf_1 =$	0.0	(kN)

分布荷重

荷重種別	上深度 (m)	荷重強度 Pr_1 (kN/m)	下深度 (m)	荷重強度 Pr_2 (kN/m)	必要抑止力 Pr (kN/m)
分布荷重1	0.00	0.00	10.00	34.64	173.2

各部材に作用する分布荷重の勾配と部材上端における荷重強度

部材 番号	深度 (m)	勾配 a (kN/m ²)	荷重強度 b (kN/m)
1	0.00 ~ 1.00	5.1960	0.0
2	1.00 ~ 2.00	5.1960	5.1960
3	2.00 ~ 3.00	5.1960	1.0392×10^1
4	3.00 ~ 4.00	5.1960	1.5588×10^1
5	4.00 ~ 5.00	5.1960	2.0784×10^1
6	5.00 ~ 6.00	5.1960	2.5980×10^1
7	6.00 ~ 7.00	5.1960	3.1176×10^1
8	7.00 ~ 8.00	5.1960	3.6372×10^1
9	8.00 ~ 9.00	5.1960	4.1568×10^1
10	9.00 ~ 10.00	5.1960	4.6764×10^1

節点に作用するモーメント荷重、せん断荷重および拘束条件

深 度 (m)	モーメント荷重 (kN・m/m)	せん断荷重 (kN/m)	変位	回転
1.00			拘束	拘束

3.3 杭材に関する条件

3.3.1 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 ²)
許容せん断応力度(短期)	$s_a =$	162	(N/mm ²)

3.3.2 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	$t =$	23.0	(mm)
断面積	$A =$	1.640×10^{-2}	(m ²)
断面二次モーメント	$I =$	1.070×10^{-4}	(m ⁴)
断面係数	$Z =$	8.540×10^{-4}	(m ³)
杭の弾性係数	$E =$	2.0×10^8	(kN/m ²)
杭の曲げ剛性	$EI = E \cdot I$		
		$= 2.0 \times 10^8 \times 1.070 \times 10^{-4}$	
		$= 2.140 \times 10^4$	(kN・m ²)

3.4 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 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	

3.5 地盤に関する条件

地盤条件は以下の通りである。

部材 番号	深度 (m)	杭外径 (mm)	算 出 式	等分布荷重方式			等変位方式		1	道路橋示方書		Kh (kN/m ³)	Es (kN/m ²)
				r (m)	Kl (kN/m ³)	Kk (kN/m ³)	B (m)	N	E_0 (kN/m ²)				
1 ~ 10	0.00 ~ 10.00	250.0	Es	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
10 ~ 12	10.00 ~ 12.00	250.0	(5)	-	-	-	-	30	-	-	179688	44922	
12 ~ 15	12.00 ~ 15.00	250.0	(5)	-	-	-	-	50	-	-	315732	78933	

1 標準貫入試験による N 値

上記の地盤変形係数 Es は次式にて算出する。

$$Es = Kh \cdot d$$

Es : 地盤変形係数 (kN/m²)
 Kh : 杭の横地盤反力係数 (kN/m³)
 d : 杭の外径 (m)

また、横方向地盤反力係数 K_h は次式にて算出する。

(1) 等分布荷重方式

$$K_h = (1 + \nu) \cdot r \cdot K_l / d$$

：ポアソン比

K_l : 等分布荷重方式によるK値 (kN/m³)

d : 杭の外径 (m)

r : 載荷試験時の載荷半径 (m)

(2) 等変位方式

$$K_h = K_k \cdot B^{-3/4}$$

K_k : 等変位方式によるK値 (kN/m³)

B : 等変位方式試験における載荷幅 (m)

(3) 港研式

$$K_h = 2000 N$$

N : 標準貫入試験におけるN値

(4) 林野庁・長野県

$$K_h = 1550 N^{1.441}$$

N : 標準貫入試験におけるN値

(5) 道路橋示方書下部構造編 (N値による方法)

$$K_h = 0.3^{24/29} \cdot (4EI)^{-3/29} \cdot d^{-9/29} \cdot \left(\frac{2800 N}{0.3} \right)^{32/29}$$

EI : 杭の曲げ剛性 (kN・m²)

d : 杭の外径 (m)

N : 標準貫入試験におけるN値

(6) 道路橋示方書下部構造編 (E_0 による方法)

$$K_h = 0.3^{24/29} \cdot (4EI)^{-3/29} \cdot d^{-9/29} \cdot \left(\frac{\cdot E_0}{0.3} \right)^{32/29}$$

EI : 杭の曲げ剛性 (kN・m²)

d : 杭の外径 (m)

：地盤反力係数の推定に用いる係数

E_0 : 設計対象の位置での変形係数 (kN/m²)

3.6 杭の曲げ剛性・特性値

杭の曲げ剛性・特性値は以下の通りである。

部材 番号	深 度 (m)	杭外径 (mm)	杭肉厚 (mm)	杭の曲げ剛性 EI ($\text{kN}\cdot\text{m}^2$)	杭の特性値 (m^{-1})
1 ~ 10	0.00 ~ 10.00	250.0	23.0	2.140×10^4	-
10 ~ 12	10.00 ~ 12.00	250.0	23.0	2.140×10^4	0.8511
12 ~ 15	12.00 ~ 15.00	250.0	23.0	2.140×10^4	0.9799

ここに、

$$= \sqrt[4]{\frac{Es}{4EI}}$$

: 杭の特性値

Es : 地盤に関する条件参照

EI : 杭の曲げ剛性

4. 計算結果

4.1 連立方程式の解

荷重、地盤、杭の各々の条件により、求められた各部材の積分定数は以下の通りである。

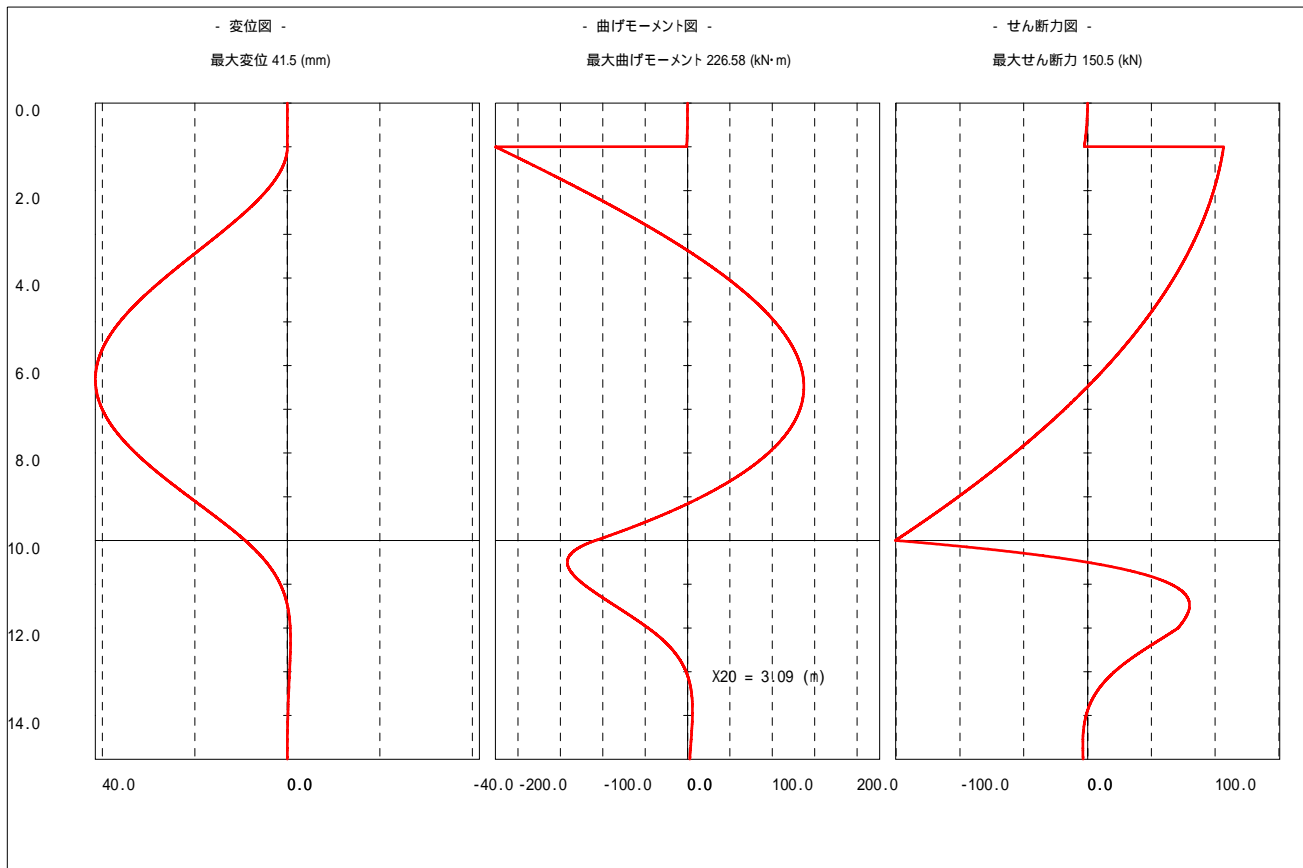
部材 番号	深 度 (m)	積 分 定 数			
		A	B	C	D
1	0.00 ~ 1.00	0.0	0.0	-1.0117×10^{-5}	8.0935×10^{-6}
2	1.00 ~ 2.00	-8.3063×10^{-4}	5.2940×10^{-3}	0.0	0.0
3	2.00 ~ 3.00	-7.6993×10^{-4}	2.8830×10^{-3}	8.1467×10^{-3}	4.4755×10^{-3}
4	3.00 ~ 4.00	-6.6876×10^{-4}	7.1488×10^{-4}	1.1694×10^{-2}	1.4758×10^{-2}
5	4.00 ~ 5.00	-5.2713×10^{-4}	-1.0891×10^{-3}	1.1249×10^{-2}	2.6530×10^{-2}
6	5.00 ~ 6.00	-3.4502×10^{-4}	-2.4074×10^{-3}	7.6615×10^{-3}	3.6205×10^{-2}
7	6.00 ~ 7.00	-1.2245×10^{-4}	-3.1187×10^{-3}	2.0240×10^{-3}	4.1167×10^{-2}
8	7.00 ~ 8.00	1.4058×10^{-4}	-3.1017×10^{-3}	-4.3279×10^{-3}	4.0013×10^{-2}
9	8.00 ~ 9.00	4.4409×10^{-4}	-2.2348×10^{-3}	-9.8161×10^{-3}	3.2796×10^{-2}
10	9.00 ~ 10.00	7.8806×10^{-4}	-3.9667×10^{-4}	-1.2620×10^{-2}	2.1273×10^{-2}
11	10.00 ~ 11.00	6.9369×10^{-6}	4.0051×10^{-5}	9.1306×10^{-3}	-3.4582×10^{-3}
12	11.00 ~ 12.00	8.1254×10^{-5}	4.9616×10^{-5}	1.4592×10^{-3}	-3.9047×10^{-3}
13	12.00 ~ 13.00	-7.7521×10^{-21}	-2.5815×10^{-21}	-6.3017×10^{-4}	-1.1323×10^{-3}
14	13.00 ~ 14.00	1.5680×10^{-22}	-4.3994×10^{-21}	-4.8470×10^{-4}	-4.0337×10^{-5}
15	14.00 ~ 15.00	0.0	0.0	-1.1393×10^{-4}	1.4265×10^{-4}

4.2 応力解析結果一覧表

部材 番号	深 度 (m)	変 位 γ (mm)	タワミ角 i (rad)	曲げモーメント M (kN・m)	せん断力 S (kN)	回転支点反力 T_m (kN・m)	水平支点反力 T_n (kN)																																																																																																																																																																																			
1	0.00	0.1	-0.00001	0.00	0.0	225.71	109.30																																																																																																																																																																																			
	1.00	-0.1	0.00000	-0.87	-2.6			2	1.00	0.0	0.00000	-226.58	106.7	0.00	0.00	2.00	4.5	0.00815	-123.39	98.9	3	2.00	4.5	0.00815	-123.39	98.9	0.00	0.00	3.00	14.8	0.01169	-30.60	85.9	4	3.00	14.8	0.01169	-30.60	85.9	0.00	0.00	4.00	26.6	0.01125	46.61	67.7	5	4.00	26.6	0.01125	46.61	67.7	0.00	0.00	5.00	36.3	0.00766	103.04	44.3	6	5.00	36.3	0.00766	103.04	44.3	0.00	0.00	6.00	41.2	0.00202	133.48	15.7	7	6.00	41.2	0.00202	133.48	15.7	0.00	0.00	7.00	40.1	-0.00433	132.75	-18.1	8	7.00	40.1	-0.00433	132.75	-18.1	0.00	0.00	8.00	32.8	-0.00982	95.65	-57.0	9	8.00	32.8	-0.00982	95.65	-57.0	0.00	0.00	9.00	21.3	-0.01262	16.98	-101.2	10	9.00	21.3	-0.01262	16.98	-101.2	0.00	0.00	10.00	9.2	-0.01067	-108.46	-150.5	11	10.00	9.2	-0.01067	-108.46	-150.5	0.00	0.00	11.00	1.6	-0.00445	-122.60	65.4	12	11.00	1.6	-0.00445	-122.60	65.4	0.00	0.00	12.00	-0.7	-0.00049	-46.53	71.0	13	12.00	-0.7	-0.00049	-46.53	71.0	0.00	0.00	13.00	-0.5	0.00044	-1.66	21.1	14	13.00	-0.5	0.00044	-1.66	21.1	0.00	0.00	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2	15	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2			15.00	0.1
2	1.00	0.0	0.00000	-226.58	106.7	0.00	0.00																																																																																																																																																																																			
	2.00	4.5	0.00815	-123.39	98.9			3	2.00	4.5	0.00815	-123.39	98.9	0.00	0.00	3.00	14.8	0.01169	-30.60	85.9	4	3.00	14.8	0.01169	-30.60	85.9	0.00	0.00	4.00	26.6	0.01125	46.61	67.7	5	4.00	26.6	0.01125	46.61	67.7	0.00	0.00	5.00	36.3	0.00766	103.04	44.3	6	5.00	36.3	0.00766	103.04	44.3	0.00	0.00	6.00	41.2	0.00202	133.48	15.7	7	6.00	41.2	0.00202	133.48	15.7	0.00	0.00	7.00	40.1	-0.00433	132.75	-18.1	8	7.00	40.1	-0.00433	132.75	-18.1	0.00	0.00	8.00	32.8	-0.00982	95.65	-57.0	9	8.00	32.8	-0.00982	95.65	-57.0	0.00	0.00	9.00	21.3	-0.01262	16.98	-101.2	10	9.00	21.3	-0.01262	16.98	-101.2	0.00	0.00	10.00	9.2	-0.01067	-108.46	-150.5	11	10.00	9.2	-0.01067	-108.46	-150.5	0.00	0.00	11.00	1.6	-0.00445	-122.60	65.4	12	11.00	1.6	-0.00445	-122.60	65.4	0.00	0.00	12.00	-0.7	-0.00049	-46.53	71.0	13	12.00	-0.7	-0.00049	-46.53	71.0	0.00	0.00	13.00	-0.5	0.00044	-1.66	21.1	14	13.00	-0.5	0.00044	-1.66	21.1	0.00	0.00	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2	15	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2			15.00	0.1	0.00004	2.69	-3.5										
3	2.00	4.5	0.00815	-123.39	98.9	0.00	0.00																																																																																																																																																																																			
	3.00	14.8	0.01169	-30.60	85.9			4	3.00	14.8	0.01169	-30.60	85.9	0.00	0.00	4.00	26.6	0.01125	46.61	67.7	5	4.00	26.6	0.01125	46.61	67.7	0.00	0.00	5.00	36.3	0.00766	103.04	44.3	6	5.00	36.3	0.00766	103.04	44.3	0.00	0.00	6.00	41.2	0.00202	133.48	15.7	7	6.00	41.2	0.00202	133.48	15.7	0.00	0.00	7.00	40.1	-0.00433	132.75	-18.1	8	7.00	40.1	-0.00433	132.75	-18.1	0.00	0.00	8.00	32.8	-0.00982	95.65	-57.0	9	8.00	32.8	-0.00982	95.65	-57.0	0.00	0.00	9.00	21.3	-0.01262	16.98	-101.2	10	9.00	21.3	-0.01262	16.98	-101.2	0.00	0.00	10.00	9.2	-0.01067	-108.46	-150.5	11	10.00	9.2	-0.01067	-108.46	-150.5	0.00	0.00	11.00	1.6	-0.00445	-122.60	65.4	12	11.00	1.6	-0.00445	-122.60	65.4	0.00	0.00	12.00	-0.7	-0.00049	-46.53	71.0	13	12.00	-0.7	-0.00049	-46.53	71.0	0.00	0.00	13.00	-0.5	0.00044	-1.66	21.1	14	13.00	-0.5	0.00044	-1.66	21.1	0.00	0.00	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2	15	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2			15.00	0.1	0.00004	2.69	-3.5																							
4	3.00	14.8	0.01169	-30.60	85.9	0.00	0.00																																																																																																																																																																																			
	4.00	26.6	0.01125	46.61	67.7			5	4.00	26.6	0.01125	46.61	67.7	0.00	0.00	5.00	36.3	0.00766	103.04	44.3	6	5.00	36.3	0.00766	103.04	44.3	0.00	0.00	6.00	41.2	0.00202	133.48	15.7	7	6.00	41.2	0.00202	133.48	15.7	0.00	0.00	7.00	40.1	-0.00433	132.75	-18.1	8	7.00	40.1	-0.00433	132.75	-18.1	0.00	0.00	8.00	32.8	-0.00982	95.65	-57.0	9	8.00	32.8	-0.00982	95.65	-57.0	0.00	0.00	9.00	21.3	-0.01262	16.98	-101.2	10	9.00	21.3	-0.01262	16.98	-101.2	0.00	0.00	10.00	9.2	-0.01067	-108.46	-150.5	11	10.00	9.2	-0.01067	-108.46	-150.5	0.00	0.00	11.00	1.6	-0.00445	-122.60	65.4	12	11.00	1.6	-0.00445	-122.60	65.4	0.00	0.00	12.00	-0.7	-0.00049	-46.53	71.0	13	12.00	-0.7	-0.00049	-46.53	71.0	0.00	0.00	13.00	-0.5	0.00044	-1.66	21.1	14	13.00	-0.5	0.00044	-1.66	21.1	0.00	0.00	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2	15	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2			15.00	0.1	0.00004	2.69	-3.5																																				
5	4.00	26.6	0.01125	46.61	67.7	0.00	0.00																																																																																																																																																																																			
	5.00	36.3	0.00766	103.04	44.3			6	5.00	36.3	0.00766	103.04	44.3	0.00	0.00	6.00	41.2	0.00202	133.48	15.7	7	6.00	41.2	0.00202	133.48	15.7	0.00	0.00	7.00	40.1	-0.00433	132.75	-18.1	8	7.00	40.1	-0.00433	132.75	-18.1	0.00	0.00	8.00	32.8	-0.00982	95.65	-57.0	9	8.00	32.8	-0.00982	95.65	-57.0	0.00	0.00	9.00	21.3	-0.01262	16.98	-101.2	10	9.00	21.3	-0.01262	16.98	-101.2	0.00	0.00	10.00	9.2	-0.01067	-108.46	-150.5	11	10.00	9.2	-0.01067	-108.46	-150.5	0.00	0.00	11.00	1.6	-0.00445	-122.60	65.4	12	11.00	1.6	-0.00445	-122.60	65.4	0.00	0.00	12.00	-0.7	-0.00049	-46.53	71.0	13	12.00	-0.7	-0.00049	-46.53	71.0	0.00	0.00	13.00	-0.5	0.00044	-1.66	21.1	14	13.00	-0.5	0.00044	-1.66	21.1	0.00	0.00	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2	15	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2			15.00	0.1	0.00004	2.69	-3.5																																																	
6	5.00	36.3	0.00766	103.04	44.3	0.00	0.00																																																																																																																																																																																			
	6.00	41.2	0.00202	133.48	15.7			7	6.00	41.2	0.00202	133.48	15.7	0.00	0.00	7.00	40.1	-0.00433	132.75	-18.1	8	7.00	40.1	-0.00433	132.75	-18.1	0.00	0.00	8.00	32.8	-0.00982	95.65	-57.0	9	8.00	32.8	-0.00982	95.65	-57.0	0.00	0.00	9.00	21.3	-0.01262	16.98	-101.2	10	9.00	21.3	-0.01262	16.98	-101.2	0.00	0.00	10.00	9.2	-0.01067	-108.46	-150.5	11	10.00	9.2	-0.01067	-108.46	-150.5	0.00	0.00	11.00	1.6	-0.00445	-122.60	65.4	12	11.00	1.6	-0.00445	-122.60	65.4	0.00	0.00	12.00	-0.7	-0.00049	-46.53	71.0	13	12.00	-0.7	-0.00049	-46.53	71.0	0.00	0.00	13.00	-0.5	0.00044	-1.66	21.1	14	13.00	-0.5	0.00044	-1.66	21.1	0.00	0.00	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2	15	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2			15.00	0.1	0.00004	2.69	-3.5																																																														
7	6.00	41.2	0.00202	133.48	15.7	0.00	0.00																																																																																																																																																																																			
	7.00	40.1	-0.00433	132.75	-18.1			8	7.00	40.1	-0.00433	132.75	-18.1	0.00	0.00	8.00	32.8	-0.00982	95.65	-57.0	9	8.00	32.8	-0.00982	95.65	-57.0	0.00	0.00	9.00	21.3	-0.01262	16.98	-101.2	10	9.00	21.3	-0.01262	16.98	-101.2	0.00	0.00	10.00	9.2	-0.01067	-108.46	-150.5	11	10.00	9.2	-0.01067	-108.46	-150.5	0.00	0.00	11.00	1.6	-0.00445	-122.60	65.4	12	11.00	1.6	-0.00445	-122.60	65.4	0.00	0.00	12.00	-0.7	-0.00049	-46.53	71.0	13	12.00	-0.7	-0.00049	-46.53	71.0	0.00	0.00	13.00	-0.5	0.00044	-1.66	21.1	14	13.00	-0.5	0.00044	-1.66	21.1	0.00	0.00	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2	15	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2			15.00	0.1	0.00004	2.69	-3.5																																																																											
8	7.00	40.1	-0.00433	132.75	-18.1	0.00	0.00																																																																																																																																																																																			
	8.00	32.8	-0.00982	95.65	-57.0			9	8.00	32.8	-0.00982	95.65	-57.0	0.00	0.00	9.00	21.3	-0.01262	16.98	-101.2	10	9.00	21.3	-0.01262	16.98	-101.2	0.00	0.00	10.00	9.2	-0.01067	-108.46	-150.5	11	10.00	9.2	-0.01067	-108.46	-150.5	0.00	0.00	11.00	1.6	-0.00445	-122.60	65.4	12	11.00	1.6	-0.00445	-122.60	65.4	0.00	0.00	12.00	-0.7	-0.00049	-46.53	71.0	13	12.00	-0.7	-0.00049	-46.53	71.0	0.00	0.00	13.00	-0.5	0.00044	-1.66	21.1	14	13.00	-0.5	0.00044	-1.66	21.1	0.00	0.00	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2	15	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2			15.00	0.1	0.00004	2.69	-3.5																																																																																								
9	8.00	32.8	-0.00982	95.65	-57.0	0.00	0.00																																																																																																																																																																																			
	9.00	21.3	-0.01262	16.98	-101.2			10	9.00	21.3	-0.01262	16.98	-101.2	0.00	0.00	10.00	9.2	-0.01067	-108.46	-150.5	11	10.00	9.2	-0.01067	-108.46	-150.5	0.00	0.00	11.00	1.6	-0.00445	-122.60	65.4	12	11.00	1.6	-0.00445	-122.60	65.4	0.00	0.00	12.00	-0.7	-0.00049	-46.53	71.0	13	12.00	-0.7	-0.00049	-46.53	71.0	0.00	0.00	13.00	-0.5	0.00044	-1.66	21.1	14	13.00	-0.5	0.00044	-1.66	21.1	0.00	0.00	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2	15	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2			15.00	0.1	0.00004	2.69	-3.5																																																																																																					
10	9.00	21.3	-0.01262	16.98	-101.2	0.00	0.00																																																																																																																																																																																			
	10.00	9.2	-0.01067	-108.46	-150.5			11	10.00	9.2	-0.01067	-108.46	-150.5	0.00	0.00	11.00	1.6	-0.00445	-122.60	65.4	12	11.00	1.6	-0.00445	-122.60	65.4	0.00	0.00	12.00	-0.7	-0.00049	-46.53	71.0	13	12.00	-0.7	-0.00049	-46.53	71.0	0.00	0.00	13.00	-0.5	0.00044	-1.66	21.1	14	13.00	-0.5	0.00044	-1.66	21.1	0.00	0.00	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2	15	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2			15.00	0.1	0.00004	2.69	-3.5																																																																																																																		
11	10.00	9.2	-0.01067	-108.46	-150.5	0.00	0.00																																																																																																																																																																																			
	11.00	1.6	-0.00445	-122.60	65.4			12	11.00	1.6	-0.00445	-122.60	65.4	0.00	0.00	12.00	-0.7	-0.00049	-46.53	71.0	13	12.00	-0.7	-0.00049	-46.53	71.0	0.00	0.00	13.00	-0.5	0.00044	-1.66	21.1	14	13.00	-0.5	0.00044	-1.66	21.1	0.00	0.00	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2	15	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2			15.00	0.1	0.00004	2.69	-3.5																																																																																																																															
12	11.00	1.6	-0.00445	-122.60	65.4	0.00	0.00																																																																																																																																																																																			
	12.00	-0.7	-0.00049	-46.53	71.0			13	12.00	-0.7	-0.00049	-46.53	71.0	0.00	0.00	13.00	-0.5	0.00044	-1.66	21.1	14	13.00	-0.5	0.00044	-1.66	21.1	0.00	0.00	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2	15	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2			15.00	0.1	0.00004	2.69	-3.5																																																																																																																																												
13	12.00	-0.7	-0.00049	-46.53	71.0	0.00	0.00																																																																																																																																																																																			
	13.00	-0.5	0.00044	-1.66	21.1			14	13.00	-0.5	0.00044	-1.66	21.1	0.00	0.00	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2	15	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2			15.00	0.1	0.00004	2.69	-3.5																																																																																																																																																									
14	13.00	-0.5	0.00044	-1.66	21.1	0.00	0.00																																																																																																																																																																																			
	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2			15	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2			15.00	0.1	0.00004	2.69	-3.5																																																																																																																																																																						
15	14.00	-0.2	0.00025	5.86	-1.2																																																																																																																																																																																					
	15.00	0.1	0.00004	2.69	-3.5																																																																																																																																																																																					

4.3 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。



4.4 応力最大値一覧表

項目	杭頭変位	最大曲げモーメント	最大せん断力
杭頭を0とする発生位置の深さ	X_Y (m) 0.0	X_M (m) 1.00	X_S (m) 10.00
発生位置の部材番号	1	2	11
部材上端を0とする発生位置の深さ	x (m) 0.0	x (m) 0.00	x (m) 0.00
最大値	Y (mm) 0.1	M_{max} (kN·m) 226.58	S_{max} (kN) 150.5

前述の応力解析結果一覧表を参照

5. 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

$$Nf_2 = V = 150.0 \quad (\text{kN})$$

杭1本当たりにかかるアンカー力の鉛直成分

$$\begin{aligned} Nf_3 &= Th \cdot \tan a \\ &= 109.30 \times \tan(30.0) \\ &= 63.1 \quad (\text{kN}) \end{aligned}$$

ここで、

Th : 変位拘束点における水平支点反力の和

a : アンカー傾角

したがって、杭1本にかかる軸力 Nf は、

$$\begin{aligned} Nf &= Nf_2 + Nf_3 \\ &= 213.1 \quad (\text{kN}) \end{aligned}$$

6. 断面強度の照査

杭に生じる曲げ応力度 s を照査する。

$$\begin{aligned} s &= \frac{M_{max}}{Z} + \frac{Nf}{A} = \frac{226.58}{8.540 \times 10^{-4}} + \frac{213.1}{1.640 \times 10^{-2}} \\ &= 278311 \quad (\text{kN/m}^2) \quad s_a = 279000 \quad (\text{kN/m}^2) \dots \dots \text{OK} \end{aligned}$$

杭に生じるせん断応力度 s を照査する。

$$\begin{aligned} s &= \sigma \cdot \frac{S_{max}}{A} = 2.000 \times \frac{150.5}{1.640 \times 10^{-2}} \\ &= 18354 \quad (\text{kN/m}^2) \quad s_a = 162000 \quad (\text{kN/m}^2) \dots \dots \text{OK} \end{aligned}$$

σ : 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。

7. 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。

8. 根入長

杭の根入長は、 l_r の 1.5 倍以上を確保するが、不動層が多層の場合は以下のように計算する。

$$l_r' = \frac{l_r}{r} \cdot 1.5$$

$$l_r' \cdot r = l_r \cdot 1.5$$

よって、

$$\sum_n l_n \cdot 1.5 = 4.7124 \quad (n: \text{すべり面以下の各根入層})$$

部材番号	層厚 l (m)	特性値 (m^{-1})	$l \cdot$	$\cdot 1.5 - l \cdot$	必要長 $l' (m)$
10 ~ 12	2.00	0.8511	1.7022	3.0102	2.00
12 ~ 15	3.00	0.9799	2.9397	0.0705	3.07
必要根入長 $l_r' =$					5.07

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 $10.00 + 5.07 = 15.07 \rightarrow 15.50$ m となり、

根入長は $15.50 - 10.00 = 5.50$ m となる。

9. 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。

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

$$\begin{aligned}
 \text{＜不動層＞ } Qp_r &= 3d \left\{ \left(\frac{1}{2} \gamma_r l_r^2 + \gamma_r l_e l_r \right) Kp_r + 2 c_r l_r \sqrt{Kp_r} \right\} \frac{1}{F_s} \\
 &= 3 \times 0.2500 \times \left\{ \left(\frac{1}{2} \times 20.0 \times 5.50^2 + 20.0 \times 10.00 \times 5.50 \right) \right. \\
 &\quad \left. \times 3.690 + 2 \times 50.0 \times 5.50 \times \sqrt{3.690} \right\} \times \frac{1}{1.2} \\
 &= 3894.8 \quad (\text{ kN })
 \end{aligned}$$

ここで、

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

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

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。

$$\begin{aligned}
 H &= Hu \cdot D \\
 &= 173.2 \times 1.5 \\
 &= 259.8 \quad (\text{ kN })
 \end{aligned}$$

$$H = 259.8 \quad (\text{ kN }) \quad Qp_e = 1582.2 \quad (\text{ kN }) \quad \dots \dots \text{OK}$$

$$H = 259.8 \quad (\text{ kN }) \quad Qp_r = 3894.8 \quad (\text{ kN }) \quad \dots \dots \text{OK}$$

以上から、地盤の降伏・破壊に対して安全である。