

# 杭設計計算

- 曲げ抑え杭の設計計算 -

地区名	検討02-01
測線名	
備考	ア付き抑え杭 Ver5-常時・地震時 考慮

## 計算条件

項目		記号	単位	数値	
杭材	鋼材の種類	—	—	鋼管	
	材質	—	—	570材相当品	
	外径	$d$	mm	350.0	
	肉厚	$t$	mm	24.0	
設計条件	部材数	—	—	15	
	根入れ地盤深度	$l_e$	m	8.50	
	杭間隔	$D$	m	2.0	
	水平負担力	$H_u$	kN/m	(常時) 349.8	(地震時) 438.6
	地すべり力の鉛直成分	$V_u$	kN/m	0.0	0.0
	杭にかかる初期軸力	$N_{f1}$	kN	0.0	0.0
	アンカーによる軸力	—	—	考慮する	
許容値	許容応力度 (長期)	曲げ	$s_a$	N/mm <sup>2</sup>	(常時) 255 (地震時) 380
		せん断	$s_a$	N/mm <sup>2</sup>	145 220

## 計算結果

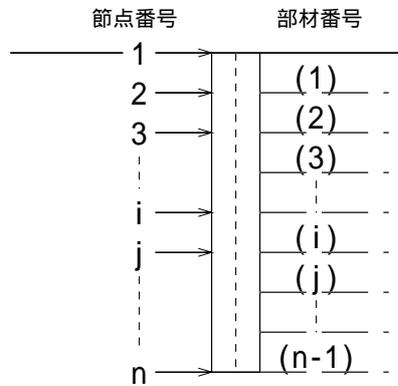
杭頭: x=0

項目		記号	単位	常時の数値		地震時の数値	
発生応力	最大曲げモーメント	$M_{max}$	kN・m	469.30		636.86	
	発生位置	$X_M$	m	8.91		8.79	
	最大せん断力	$S_{max}$	kN	486.1		629.5	
	発生位置	$X_S$	m	8.50		8.50	
	杭頭変位	$Y$	mm	17.0		20.5	
	発生位置	$X_Y$	m	0.00		0.00	
応力度	曲げ応力度	$s$	kN/m <sup>2</sup>	254644		345265	
	せん断応力度	$s$	kN/m <sup>2</sup>	39553		51221	
	曲げ応力度照査	—	kN/m <sup>2</sup>	254644	255000	345265	380000
	せん断応力度照査	—	kN/m <sup>2</sup>	39553	145000	51221	220000
杭長	必要根入長	$l_{r'}$	m	5.01			
	根入長	$l_r$	m	5.50			
	杭全長	$l_p$	m	14.00			

# 1. 常時の解析手法

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. 常時の設計式

### 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）

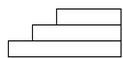
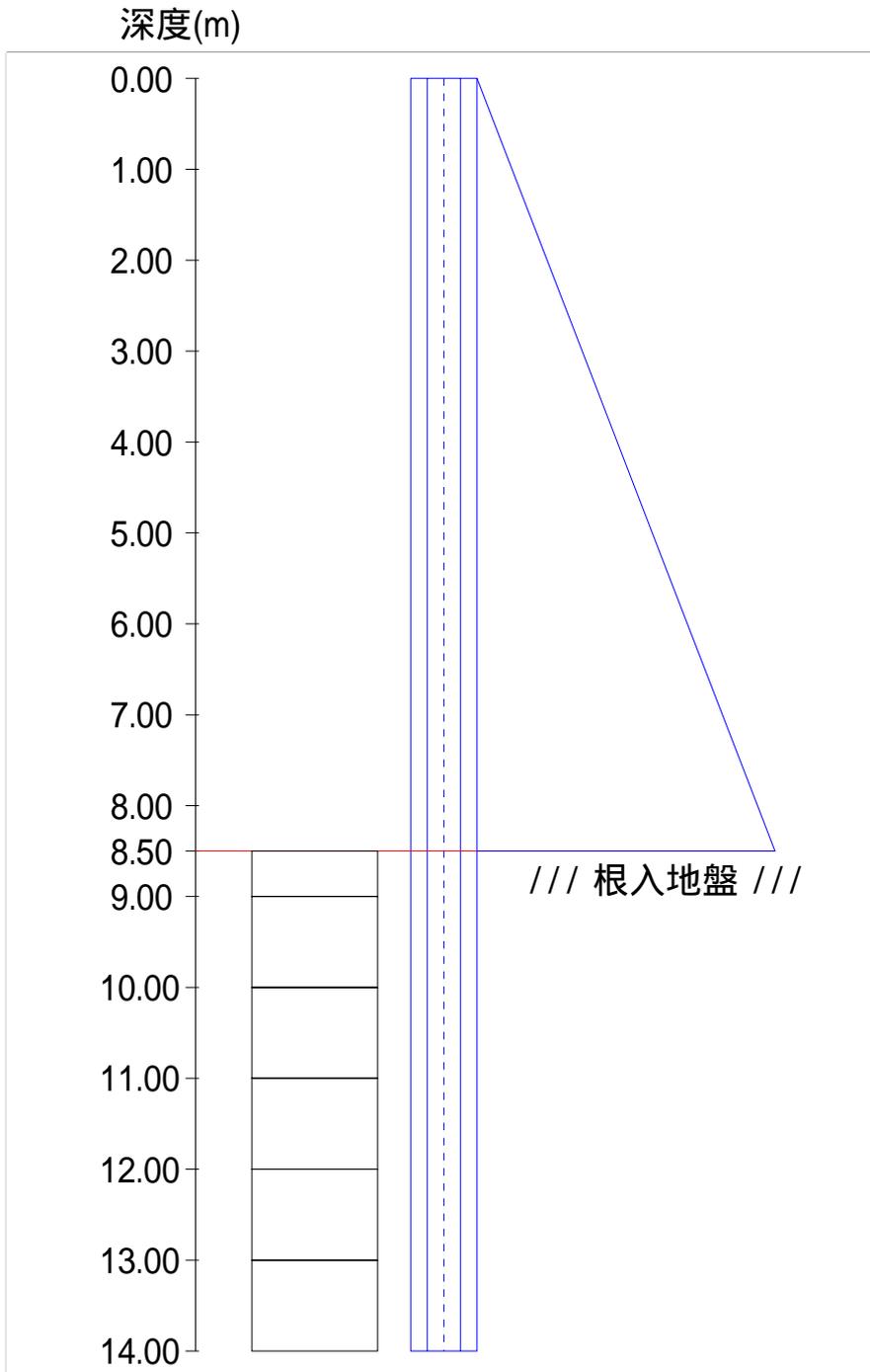
根入れ無限長の場合

$$A_n = 0$$

$$B_n = 0$$

### 3. 常時の設計条件

#### 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	$l_e =$	8.50	( m )
杭間隔	$D =$	2.0	( m )
水平負担力	$Hu =$	349.8	( kN/m )
地すべり力の鉛直成分	$Vu =$	0.0	( 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 <sup>2</sup> )	下深度 ( m )	荷重強度 $Pr_2$ ( kN/m <sup>2</sup> )	必要抑止力 $Pr$ ( kN/m )
分布荷重1	0.00	0.00	8.50	82.31	349.8

#### 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 <sup>2</sup> )	荷重強度 b ( kN/m )
1	0.00 ~ 1.00	$1.9367 \times 10^1$	0.0
2	1.00 ~ 2.00	$1.9367 \times 10^1$	$1.9367 \times 10^1$
3	2.00 ~ 3.00	$1.9367 \times 10^1$	$3.8734 \times 10^1$
4	3.00 ~ 4.00	$1.9367 \times 10^1$	$5.8101 \times 10^1$
5	4.00 ~ 5.00	$1.9367 \times 10^1$	$7.7468 \times 10^1$
6	5.00 ~ 6.00	$1.9367 \times 10^1$	$9.6835 \times 10^1$
7	6.00 ~ 7.00	$1.9367 \times 10^1$	$1.1620 \times 10^2$
8	7.00 ~ 8.00	$1.9367 \times 10^1$	$1.3557 \times 10^2$
9	8.00 ~ 8.50	$1.9367 \times 10^1$	$1.5494 \times 10^2$

8  
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	

### 3.3 杭材に関する条件

#### 3.3.1 設計強度

当地区の杭は打設位置及び移動土塊の特性上、常時設計外力が作用する杭と判断できる。従って長期強度を用いて設計する。

杭の材質	570材相当品		
許容曲げ応力度 ( 長期 )	$s_a =$	255	( N/mm <sup>2</sup> )
許容せん断応力度( 長期 )	$s_a =$	145	( N/mm <sup>2</sup> )

#### 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	$d =$	350.0	( mm )
肉厚	$t =$	24.0	( mm )
断面積	$A =$	$2.458 \times 10^{-2}$	( m <sup>2</sup> )
断面二次モーメント	$I =$	$3.280 \times 10^{-4}$	( m <sup>4</sup> )
断面係数	$Z =$	$1.880 \times 10^{-3}$	( 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	$EI = E \cdot I$		
		$= 2.0 \times 10^8 \times 3.280 \times 10^{-4}$	
		$= 6.560 \times 10^4$	( kN・m <sup>2</sup> )

## 3.4 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		$Kh$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$E_s$ ( $\text{kN/m}^2$ )	
				$r$ ( m )	$Kl$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$Kk$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$B$ ( m )	$N$	$E_0$ ( $\text{kN/m}^2$ )			
1 ~ 9	0.00 ~ 8.50	350.0	(6)	-	-	-	-	-	-	-	0	0
9 ~ 15	8.50 ~ 14.00	350.0	(6)	-	-	-	-	-	1	300000	587322	205563

1 標準貫入試験による  $N$  値

前表の地盤変形係数  $E_s$  は次式にて算出する。

$$E_{s_i} = K h_i \cdot d$$

$K h$  は道路橋示方書下部構造編によるものであり、以下のように求められる。

$$K h_i = K h_{0i} \cdot \left( \frac{B h}{0.3} \right)^{(-3/4)}$$

ここで、

$$K h_{0i} = \frac{1}{0.3} \cdot i \cdot E_{0i}$$

$i$  :  $E_0$  の求め方に対応する係数

$i$  : 部材番号

$E_0$  : 下表に示す調査試験方法で求めた地盤の変形係数 (  $\text{kN/m}^2$  )

地盤の変形係数 $E_0$	常時の
直径30cmの剛体円盤による平板載荷試験の繰り返し曲線から求めた変形係数の1/2	1
ボーリング孔内で測定した地盤の変形係数	4
1軸または3軸圧縮試験から求めた変形係数	4
標準貫入試験の $N$ 値から $E_0 = 2800 N$ で推定した変形係数	1

表 .  $E_0$  と の関係

道路橋示方書・同解説 下部構造編 より抜粋

$B h$  : 繰り返し計算によって算出された換算載荷幅

$$B h = \sqrt{\frac{d}{0.9407}} = \sqrt{\frac{0.3500}{0.9407}}$$

$$= 0.6099 \quad ( \text{ m } )$$

$$\text{杭の外径} \quad d = 0.3500 \quad ( \text{ m } )$$

$$\text{杭の特性値} = 0.9407 \quad ( \text{ m}^{-1} )$$

$$\text{水平抵抗深} \quad 1 / = 1.06 \quad ( \text{ m } )$$

$$\text{平均} \quad \cdot E_0 = 300000 \quad ( \text{ kN/m}^2 )$$

### 3.5 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 ( $\text{m}^{-1}$ )
1 ~ 9	0.00 ~ 8.50	350.0	24.0	$6.560 \times 10^4$	-
9 ~ 15	8.50 ~ 14.00	350.0	24.0	$6.560 \times 10^4$	0.9408

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. 常時の計算結果

### 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。

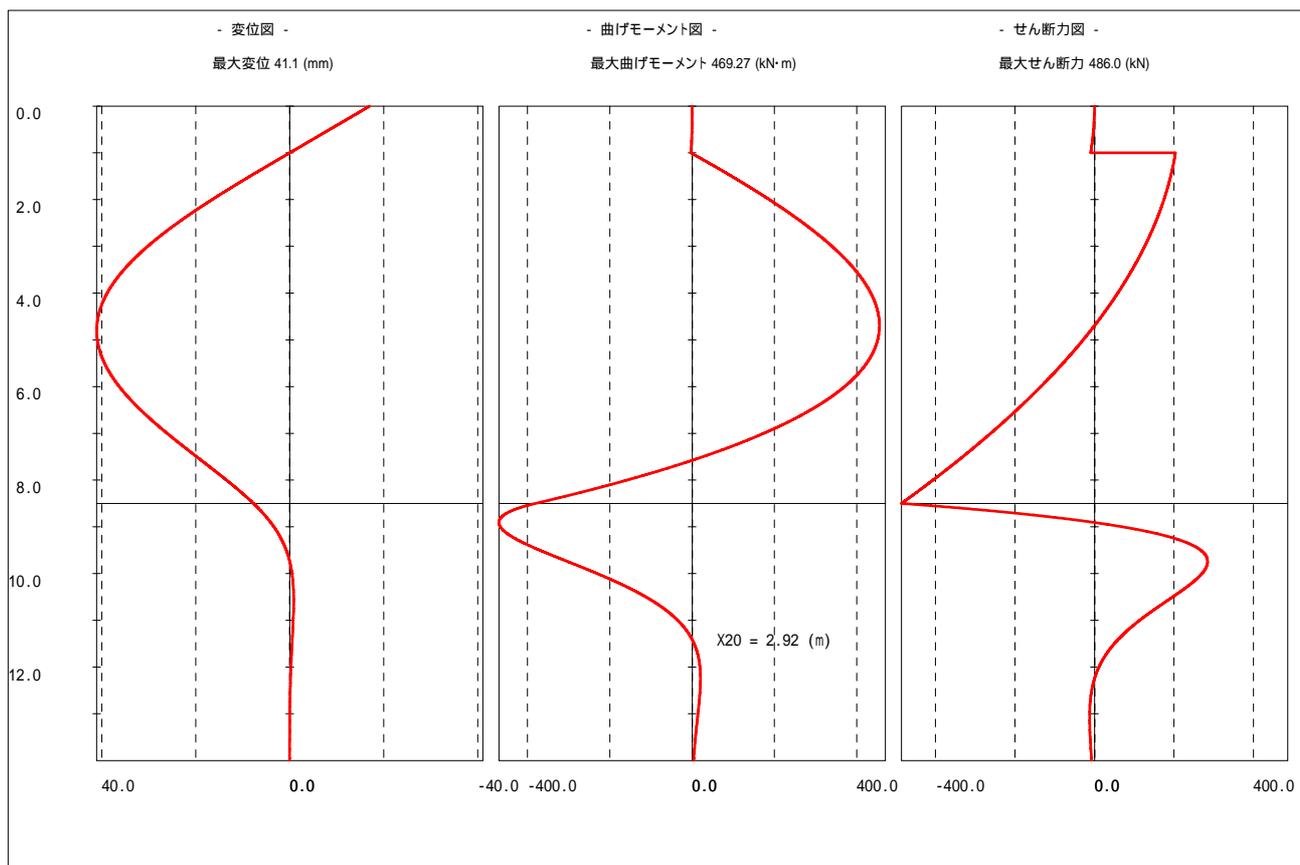
部材 番号	深 度 ( m )	積 分 定 数			
		A	B	C	D
1	0.00 ~ 1.00	0.0	0.0	$1.6996 \times 10^{-2}$	$-1.6999 \times 10^{-2}$
2	1.00 ~ 2.00	$-5.1798 \times 10^{-4}$	$2.4602 \times 10^{-5}$	$1.7008 \times 10^{-2}$	0.0
3	2.00 ~ 3.00	$-4.4418 \times 10^{-4}$	$-1.4309 \times 10^{-3}$	$1.5565 \times 10^{-2}$	$1.6530 \times 10^{-2}$
4	3.00 ~ 4.00	$-3.2117 \times 10^{-4}$	$-2.5913 \times 10^{-3}$	$1.1481 \times 10^{-2}$	$3.0247 \times 10^{-2}$
5	4.00 ~ 5.00	$-1.4895 \times 10^{-4}$	$-3.3087 \times 10^{-3}$	$5.4953 \times 10^{-3}$	$3.8855 \times 10^{-2}$
6	5.00 ~ 6.00	$7.2474 \times 10^{-5}$	$-3.4357 \times 10^{-3}$	$-1.3599 \times 10^{-3}$	$4.0944 \times 10^{-2}$
7	6.00 ~ 7.00	$3.4310 \times 10^{-4}$	$-2.8247 \times 10^{-3}$	$-7.7556 \times 10^{-3}$	$3.6285 \times 10^{-2}$
8	7.00 ~ 8.00	$6.6293 \times 10^{-4}$	$-1.3279 \times 10^{-3}$	$-1.2068 \times 10^{-2}$	$2.6124 \times 10^{-2}$
9	8.00 ~ 8.50	$1.0320 \times 10^{-3}$	$1.2021 \times 10^{-3}$	$-1.2378 \times 10^{-2}$	$1.3480 \times 10^{-2}$
10	8.50 ~ 9.00	$-8.9305 \times 10^{-20}$	$-1.6774 \times 10^{-21}$	$7.7265 \times 10^{-3}$	$-3.2773 \times 10^{-3}$
11	9.00 ~ 10.00	$4.1492 \times 10^{-20}$	$1.7060 \times 10^{-20}$	$3.3748 \times 10^{-3}$	$-4.0130 \times 10^{-3}$
12	10.00 ~ 11.00	$-1.1744 \times 10^{-20}$	$6.1949 \times 10^{-21}$	$-4.8960 \times 10^{-4}$	$-1.9872 \times 10^{-3}$
13	11.00 ~ 12.00	$-1.0096 \times 10^{-21}$	$3.9420 \times 10^{-21}$	$-7.3931 \times 10^{-4}$	$-3.0254 \times 10^{-4}$
14	12.00 ~ 13.00	$-2.9085 \times 10^{-21}$	$9.5949 \times 10^{-22}$	$-2.6542 \times 10^{-4}$	$1.6360 \times 10^{-4}$
15	13.00 ~ 14.00	0.0	0.0	$-9.4369 \times 10^{-6}$	$1.2133 \times 10^{-4}$

## 4.2 応力解析結果一覧表

部材 番号	深 度 ( m )	変 位 $\gamma$ ( 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	-17.0	0.01700	0.00	0.0	0.00	213.60
	1.00	-0.1	0.01701	-3.23	-9.7		
2	1.00	0.0	0.01701	-3.23	203.9	0.01	0.00
	2.00	16.6	0.01556	187.74	174.8		
3	2.00	16.6	0.01557	187.73	174.8	0.01	0.00
	3.00	30.3	0.01148	339.97	126.4		
4	3.00	30.3	0.01148	339.98	126.4	0.01	0.00
	4.00	38.9	0.00549	434.11	58.6		
5	4.00	38.9	0.00550	434.10	58.6	0.01	0.00
	5.00	41.0	-0.00136	450.77	-28.5		
6	5.00	41.0	-0.00136	450.76	-28.5	0.01	0.00
	6.00	36.3	-0.00776	370.59	-135.0		
7	6.00	36.3	-0.00776	370.60	-135.0	0.01	0.00
	7.00	26.2	-0.01207	174.23	-260.9		
8	7.00	26.2	-0.01207	174.22	-260.9	0.00	0.00
	8.00	13.5	-0.01238	-157.72	-406.2		
9	8.00	13.5	-0.01238	-157.72	-406.2	0.00	0.00
	8.50	7.8	-0.01035	-380.58	-486.1		
10	8.50	7.8	-0.01035	-380.58	-486.1	0.00	0.00
	9.00	3.4	-0.00695	-466.01	69.7		
11	9.00	3.4	-0.00695	-466.01	69.7	0.01	0.00
	10.00	-0.5	-0.00141	-230.76	270.6		
12	10.00	-0.5	-0.00141	-230.77	270.6	0.00	0.00
	11.00	-0.8	0.00041	-35.13	113.8		
13	11.00	-0.8	0.00041	-35.13	113.8	0.00	0.00
	12.00	-0.3	0.00040	19.00	11.1		
14	12.00	-0.3	0.00040	19.00	11.1	0.00	0.00
	13.00	-0.1	0.00012	14.09	-12.2		
15	13.00	-0.1	0.00012	14.09	-12.2		
	14.00	0.1	0.00000	3.59	-7.3		

### 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 ) 8.91	$X_S$ ( m ) 8.50
発生位置の部材番号	1	10	9
部材上端を0とする発生位置の深さ	$x$ ( m ) 0.0	$x$ ( m ) 0.41	$x$ ( m ) 0.50
最大値	$Y$ ( mm ) 17.0	$M_{max}$ ( kN·m ) 469.30	$S_{max}$ ( kN ) 486.1

前述の応力解析結果一覧表を参照

## 5. 常時の軸力の計算

軸力  $Nf$  としては以下のものがある。

杭1本当たりにかかるアンカー力の鉛直成分

$$\begin{aligned} Nf_3 &= Th \cdot \tan a \\ &= 213.60 \times \tan(30.0) \\ &= 123.3 \quad (\text{kN}) \end{aligned}$$

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、

$$\begin{aligned} Nf &= Nf_3 \\ &= 123.3 \quad (\text{kN}) \end{aligned}$$

## 6. 常時の断面強度の照査

杭に生じる曲げ応力度  $s$  を照査する。

$$\begin{aligned} s &= \frac{Mmax}{Z} + \frac{Nf}{A} = \frac{469.30}{1.880 \times 10^{-3}} + \frac{123.3}{2.458 \times 10^{-2}} \\ &= 254644 \quad (\text{kN/m}^2) \quad s_a = 255000 \quad (\text{kN/m}^2) \dots \dots \text{OK} \end{aligned}$$

杭に生じるせん断応力度  $s$  を照査する。

$$\begin{aligned} s &= \sigma \cdot \frac{Smax}{A} = 2.000 \times \frac{486.1}{2.458 \times 10^{-2}} \\ &= 39553 \quad (\text{kN/m}^2) \quad s_a = 145000 \quad (\text{kN/m}^2) \dots \dots \text{OK} \end{aligned}$$

$\sigma$  : 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. 常時の杭間隔の照査

次の規定について杭間隔を照査する。

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

設定した杭間隔  $D = 2.0 \text{ m}$  は上記の条件を満足するので問題ない。

## 8. 常時の根入長

杭の根入長は、 $r$  の 1.5 倍以上を確保する。

$$l_r' = \frac{r}{0.9408} \cdot 1.5 = \frac{r}{0.9408} \times 1.5$$

$$= 5.01 \quad (\text{ m } )$$

$r$ : 根入部最上層の を用いる

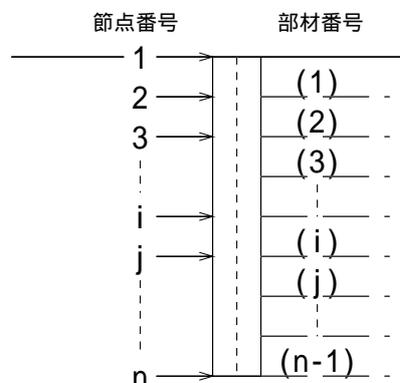
ここで、施工性を考慮し杭全長を 0.5 m 単位で丸める。

したがって、杭全長は  $8.50 + 5.01 = 13.51$  14.00 m となり、  
根入長は  $14.00 - 8.50 = 5.50$  m となる。

## 9. 地震時解析手法

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。

## 10.地震時設計式

### 10.1 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。

## 10.2 一般式

杭の変位を $y$ 、タワミ角を $i$ 、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。

## &lt;境界条件&gt;

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）

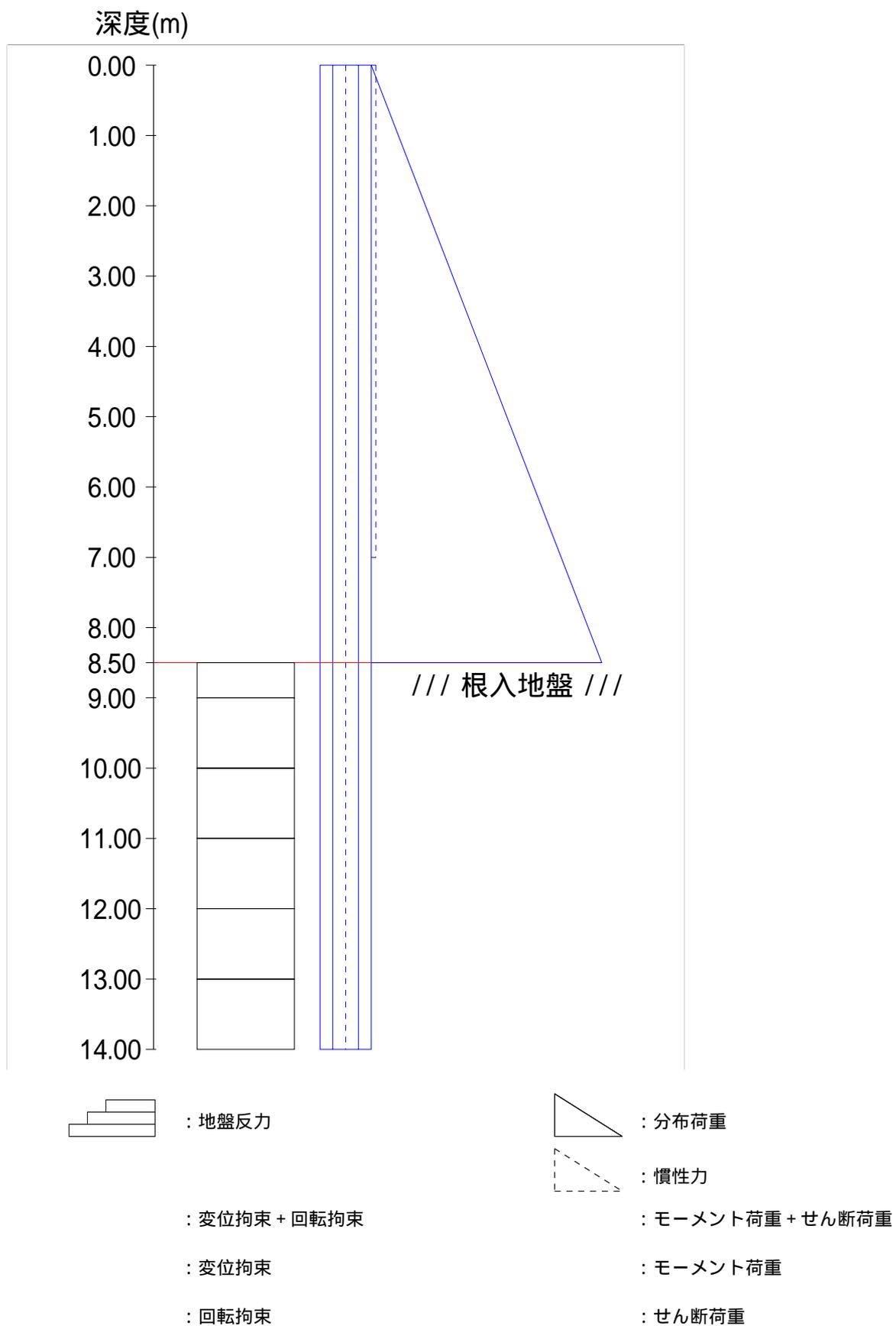
根入れ無限長の場合

$$A_n = 0$$

$$B_n = 0$$

# 11.地震時設計条件

## 11.1 荷重・拘束・地盤条件図



## 11.2 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	$l_e =$	8.50	( m )
杭間隔	$D =$	2.0	( m )
水平負担力	$Hu =$	438.6	( kN/m )
地すべり力の鉛直成分	$Vu =$	0.0	( 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 <sup>2</sup> )	下深度 ( m )	荷重強度 $Pr_2$ ( kN/m <sup>2</sup> )	必要抑止力 $Pr$ ( kN/m )
分布荷重1	0.00	0.00	8.50	103.20	438.6

### 慣性力

種別	上深度 ( m )	慣性力 $Pr_1$ ( kN/m <sup>2</sup> )	下深度 ( m )	慣性力 $Pr_2$ ( kN/m <sup>2</sup> )	慣性力 $Pr$ ( kN/m )
慣性力1	0.00	2.10	7.00	2.10	14.7

## 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 <sup>2</sup> )	荷重強度 b ( kN/m )
1	0.00 ~ 1.00	$2.4282 \times 10^1$	4.2000
2	1.00 ~ 2.00	$2.4282 \times 10^1$	$2.8482 \times 10^1$
3	2.00 ~ 3.00	$2.4282 \times 10^1$	$5.2765 \times 10^1$
4	3.00 ~ 4.00	$2.4282 \times 10^1$	$7.7047 \times 10^1$
5	4.00 ~ 5.00	$2.4282 \times 10^1$	$1.0133 \times 10^2$
6	5.00 ~ 6.00	$2.4282 \times 10^1$	$1.2561 \times 10^2$
7	6.00 ~ 7.00	$2.4282 \times 10^1$	$1.4989 \times 10^2$
8	7.00 ~ 8.00	$2.4282 \times 10^1$	$1.6998 \times 10^2$
9	8.00 ~ 8.50	$2.4282 \times 10^1$	$1.9426 \times 10^2$

## 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	

## 11.3 杭材に関する条件

### 11.3.1 設計強度

杭の材質	570材相当品		
許容曲げ応力度 (地震時)	$s_a =$	380	( N/mm <sup>2</sup> )
許容せん断応力度(地震時)	$s_a =$	220	( N/mm <sup>2</sup> )

### 11.3.2 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	$d =$	350.0	( mm )
肉厚	$t =$	24.0	( mm )
断面積	$A =$	$2.458 \times 10^{-2}$	( m <sup>2</sup> )
断面二次モーメント	$I =$	$3.280 \times 10^{-4}$	( m <sup>4</sup> )
断面係数	$Z =$	$1.880 \times 10^{-3}$	( 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	$EI = E \cdot I$		
		$= 2.0 \times 10^8 \times 3.280 \times 10^{-4}$	
		$= 6.560 \times 10^4$	( kN・m <sup>2</sup> )

## 11.4 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 <sup>3</sup> )	$E_s$ ( kN/m <sup>2</sup> )
				$r$ ( m )	$Kl$ ( kN/m <sup>3</sup> )	$Kk$ ( kN/m <sup>3</sup> )	$B$ ( m )	$N$	$E_0$ ( kN/m <sup>2</sup> )				
1 ~ 9	0.00 ~ 8.50	350.0	(6)	-	-	-	-	-	-	-	0	0	
9 ~ 15	8.50 ~ 14.00	350.0	(6)	-	-	-	-	-	2	300000	1174644	411125	

1 標準貫入試験による  $N$  値

前表の地盤変形係数  $E_s$  は次式にて算出する。

$$E_{s_i} = K h_i \cdot d$$

$K h$  は道路橋示方書下部構造編によるものであり、以下のように求められる。

$$K h_i = K h_{0i} \cdot \left( \frac{B h}{0.3} \right)^{(-3/4)}$$

ここで、

$$K h_{0i} = \frac{1}{0.3} \cdot i \cdot E_{0i}$$

$i$  :  $E_0$  の求め方に対応する係数

$i$  : 部材番号

$E_0$  : 下表に示す調査試験方法で求めた地盤の変形係数 (  $\text{kN/m}^2$  )

地盤の変形係数 $E_0$	地震時
直径30cmの剛体円盤による平板載荷試験の繰り返し曲線から求めた変形係数の1/2	2
ボーリング孔内で測定した地盤の変形係数	8
1軸または3軸圧縮試験から求めた変形係数	8
標準貫入試験の $N$ 値から $E_0 = 2800 N$ で推定した変形係数	2

表 .  $E_0$  と の関係

道路橋示方書・同解説 下部構造編 より抜粋

$B h$  : 繰り返し計算によって算出された換算載荷幅

$$B h = \sqrt{\frac{d}{0.9407}} = \sqrt{\frac{0.3500}{0.9407}}$$

$$= 0.6099 \quad ( \text{ m } )$$

$$\text{杭の外径} \quad d = 0.3500 \quad ( \text{ m } )$$

$$\text{杭の特性値} = 0.9407 \quad ( \text{ m}^{-1} )$$

$$\text{水平抵抗深} \quad 1 / = 1.06 \quad ( \text{ m } )$$

$$\text{平均} \quad \cdot E_0 = 300000 \quad ( \text{ kN/m}^2 )$$

## 11.5 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 ( $\text{m}^{-1}$ )
1 ~ 9	0.00 ~ 8.50	350.0	24.0	$6.560 \times 10^4$	-
9 ~ 15	8.50 ~ 14.00	350.0	24.0	$6.560 \times 10^4$	1.1188

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

## 12.地震時計算結果

### 12.1 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。

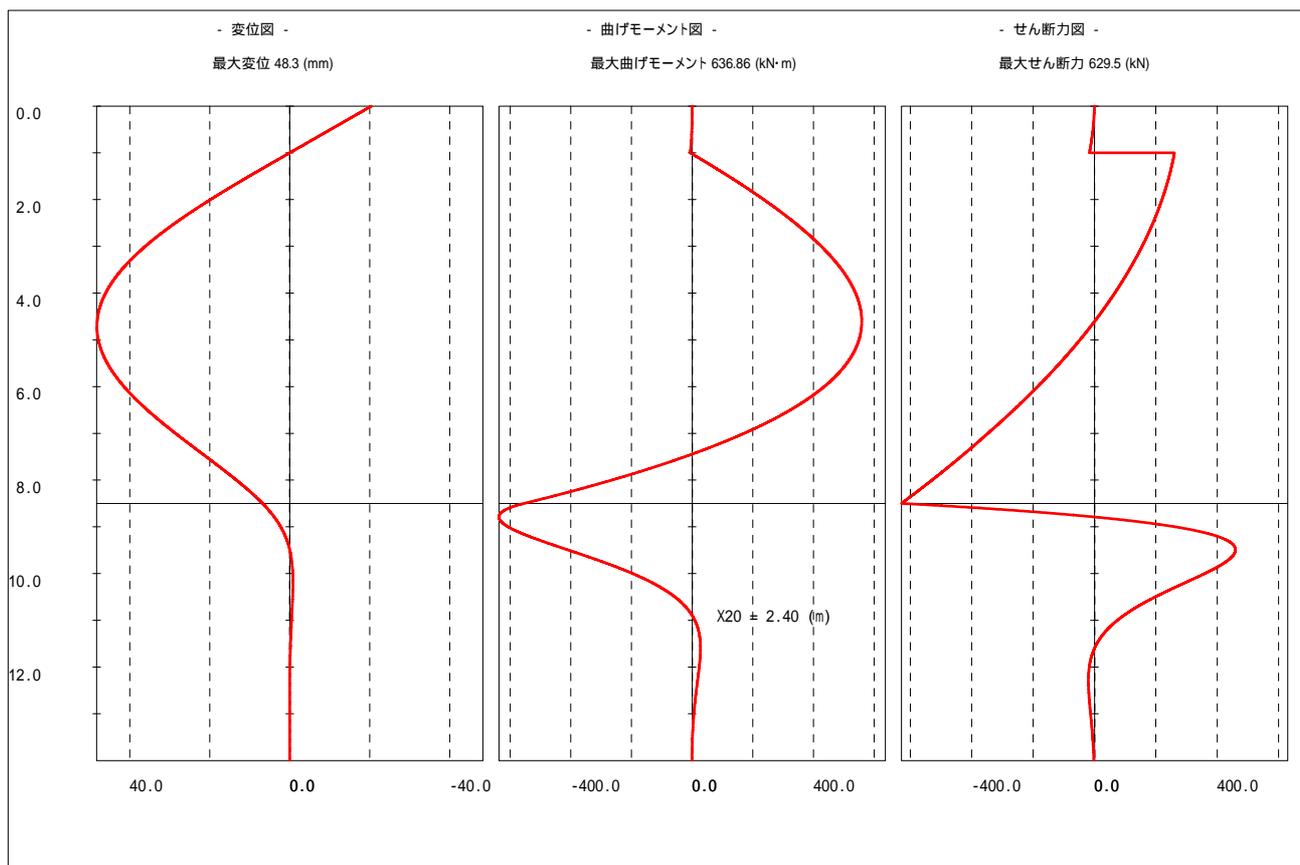
部材 番号	深 度 ( m )	積 分 定 数			
		A	B	C	D
1	0.00 ~ 1.00	0.0	0.0	$2.0409 \times 10^{-2}$	$-2.0415 \times 10^{-2}$
2	1.00 ~ 2.00	$-6.6258 \times 10^{-4}$	$4.6853 \times 10^{-5}$	$2.0435 \times 10^{-2}$	0.0
3	2.00 ~ 3.00	$-5.5937 \times 10^{-4}$	$-1.8015 \times 10^{-3}$	$1.8629 \times 10^{-2}$	$1.9840 \times 10^{-2}$
4	3.00 ~ 4.00	$-3.9447 \times 10^{-4}$	$-3.2477 \times 10^{-3}$	$1.3497 \times 10^{-2}$	$3.6145 \times 10^{-2}$
5	4.00 ~ 5.00	$-1.6787 \times 10^{-4}$	$-4.1066 \times 10^{-3}$	$6.0294 \times 10^{-3}$	$4.6052 \times 10^{-2}$
6	5.00 ~ 6.00	$1.2042 \times 10^{-4}$	$-4.1932 \times 10^{-3}$	$-2.4145 \times 10^{-3}$	$4.7874 \times 10^{-2}$
7	6.00 ~ 7.00	$4.7040 \times 10^{-4}$	$-3.3224 \times 10^{-3}$	$-1.0105 \times 10^{-2}$	$4.1470 \times 10^{-2}$
8	7.00 ~ 8.00	$8.8208 \times 10^{-4}$	$-1.3091 \times 10^{-3}$	$-1.4942 \times 10^{-2}$	$2.8611 \times 10^{-2}$
9	8.00 ~ 8.50	$1.3448 \times 10^{-3}$	$2.0158 \times 10^{-3}$	$-1.4467 \times 10^{-2}$	$1.3353 \times 10^{-2}$
10	8.50 ~ 9.00	$-5.2487 \times 10^{-20}$	$1.3710 \times 10^{-19}$	$6.7988 \times 10^{-3}$	$-3.3729 \times 10^{-3}$
11	9.00 ~ 10.00	$1.1679 \times 10^{-20}$	$-1.2389 \times 10^{-20}$	$2.2705 \times 10^{-3}$	$-3.6961 \times 10^{-3}$
12	10.00 ~ 11.00	$5.1546 \times 10^{-21}$	$-7.3707 \times 10^{-21}$	$-7.6219 \times 10^{-4}$	$-1.1946 \times 10^{-3}$
13	11.00 ~ 12.00	$-9.8960 \times 10^{-22}$	$-3.1761 \times 10^{-22}$	$-4.5980 \times 10^{-4}$	$5.3542 \times 10^{-5}$
14	12.00 ~ 13.00	$-5.5815 \times 10^{-22}$	$-1.2194 \times 10^{-21}$	$-4.9868 \times 10^{-5}$	$1.4276 \times 10^{-4}$
15	13.00 ~ 14.00	0.0	0.0	$3.4837 \times 10^{-5}$	$3.5023 \times 10^{-5}$

## 12.2 応力解析結果一覧表

部材 番号	深 度 ( m )	変 位 $\gamma$ ( 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	-20.5	0.02041	0.00	0.0	0.00	277.10
	1.00	-0.1	0.02044	-6.15	-16.3		
2	1.00	0.0	0.02044	-6.15	260.8	0.00	0.00
	2.00	19.9	0.01863	236.36	220.2		
3	2.00	19.9	0.01863	236.36	220.2	0.00	0.00
	3.00	36.2	0.01350	426.10	155.3		
4	3.00	36.2	0.01350	426.10	155.3	0.00	0.00
	4.00	46.1	0.00603	538.79	66.1		
5	4.00	46.1	0.00603	538.79	66.1	0.00	0.00
	5.00	47.9	-0.00241	550.15	-47.4		
6	5.00	47.9	-0.00241	550.15	-47.4	0.00	0.10
	6.00	41.5	-0.01011	435.90	-185.2		
7	6.00	41.5	-0.01011	435.90	-185.1	0.01	0.00
	7.00	28.7	-0.01494	171.76	-347.2		
8	7.00	28.7	-0.01494	171.75	-347.2	0.00	0.00
	8.00	13.4	-0.01447	-264.47	-529.3		
9	8.00	13.4	-0.01447	-264.47	-529.3	0.01	0.00
	8.50	6.8	-0.01138	-553.92	-629.5		
10	8.50	6.8	-0.01138	-553.91	-629.5	0.00	0.00
	9.00	2.3	-0.00668	-606.99	261.9		
11	9.00	2.3	-0.00668	-606.99	261.9	0.00	0.00
	10.00	-0.8	-0.00048	-196.18	359.5		
12	10.00	-0.8	-0.00048	-196.18	359.5	0.00	0.00
	11.00	-0.5	0.00057	8.79	74.6		
13	11.00	-0.5	0.00057	8.79	74.6	0.00	0.00
	12.00	-0.1	0.00022	23.44	-17.1		
14	12.00	-0.1	0.00022	23.44	-17.1	0.00	0.00
	13.00	0.1	0.00000	5.75	-12.8		
15	13.00	0.1	0.00000	5.75	-12.8		
	14.00	0.1	-0.00002	-0.86	-1.8		

## 12.3 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。



## 12.4 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 ) 8.79	$X_S$ ( m ) 8.50
発生位置の 部材番号	1	10	9
部材上端を0とする 発生位置の深さ	$x$ ( m ) 0.0	$x$ ( m ) 0.29	$x$ ( m ) 0.50
最大値	$Y$ ( mm ) 20.5	$M_{max}$ ( kN·m ) 636.86	$S_{max}$ ( kN ) 629.5

前述の応力解析結果一覧表を参照

### 13. 地震時軸力の計算

軸力  $Nf$  としては以下のものがある。

杭1本当たりにかかるアンカー力の鉛直成分

$$\begin{aligned} Nf_3 &= Th \cdot \tan a \\ &= 277.10 \times \tan(30.0) \\ &= 160.0 \quad (\text{kN}) \end{aligned}$$

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、

$$\begin{aligned} Nf &= Nf_3 \\ &= 160.0 \quad (\text{kN}) \end{aligned}$$

### 14. 地震時断面強度の照査

杭に生じる曲げ応力度  $s$  を照査する。

$$\begin{aligned} s &= \frac{Mmax}{Z} + \frac{Nf}{A} = \frac{636.86}{1.880 \times 10^{-3}} + \frac{160.0}{2.458 \times 10^{-2}} \\ &= 345265 \quad (\text{kN/m}^2) \quad sa = 380000 \quad (\text{kN/m}^2) \dots \dots \text{OK} \end{aligned}$$

杭に生じるせん断応力度  $s$  を照査する。

$$\begin{aligned} s &= o \cdot \frac{Smax}{A} = 2.000 \times \frac{629.5}{2.458 \times 10^{-2}} \\ &= 51221 \quad (\text{kN/m}^2) \quad sa = 220000 \quad (\text{kN/m}^2) \dots \dots \text{OK} \end{aligned}$$

$o$  : 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。

## 15.地震時杭間隔の照査

次の規定について杭間隔を照査する。

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

設定した杭間隔  $D = 2.0 \text{ m}$  は上記の条件を満足するので問題ない。