

港湾設計シリーズ

# 棚式係船岸5

Ver 2. X. X

## 商 品 概 説 書



# 目次

1. 概要	1
1-1. システムの特長	1
1-2. システムの制限事項	1
1-3. データ入力・計算上の注意事項	2
2. 機能説明	3
2-1. 粘着力からN値を計算する場合	3
2-2. 見かけの震度の算定方法について	4
見かけの震度	4
二建の提案式—地表面天端より残留水位が高い位置にある場合	6
二建の提案式—設計海底面より前面水位(L.W.L.)が高い位置にある場合	6
動水圧の算定について	7
2-3. 土圧の考え方について	8
砂質土	8
粘性土	9
地震時—主働土圧の考え方	10
2-4. 残留水位の考え方について	14
2-5. 崩壊角の算定方法について	15
砂質土	15
粘性土	16
2-6. 腐食後の断面性能について	17
鋼矢板	17
鋼管矢板	18
溝形鋼	21
2-7. 前面矢板の根入れ長について	22
フリーアースサポート法	22
たわみ曲線法	23
ロウの方法	25
2-8. 矢板の応力照査	26
2-9. タイ材について	27
2-10. 腹おこし材について	28
2-11. 杭の反力について	29
仮想固定点法	29
各杭の平均特性値	29
各杭に作用する鉛直力	30
各杭に作用する水平力及び曲げモーメント	30
各杭の水平変位	30
変位法	31
各杭の軸方向バネ定数	32
各杭の軸直角方向バネ定数	34
原点変位(全体座標系)	37
各杭の変位(杭軸座標系)	37
各杭に作用する断面力(杭軸座標系)	38
水平方向地盤反力係数の算定方法	39
2-12. 杭の応力照査	41
杭の応力照査【漁港基準、港湾基準(H11)】	41
杭の応力照査【港湾基準(H30)】	42
2-13. 杭の根入れ長の検討	43
地盤が一様とみなせる場合	43
地盤の性質が著しく変化する場合	43
2-14. 杭の支持力	44

## 目 次

打込鋼管【漁港基準、港湾基準(H11)】	45
打込鋼管【港湾基準(H30)】	46
中堀鋼管(平成24年道路橋示方書)	47
中堀鋼管(平成29年道路橋示方書)	49
埋込み杭	50
2-15. 杭の負の周面摩擦	51
安定検討【漁港基準、港湾基準(H11)】	51
安定検討【港湾基準(H30)】	51
打込鋼管	52
中堀鋼管	53
埋込み杭	54
2-16. 杭とフーチングの結合計算	55
許容応力度法	55
限界状態設計法	57
2-17. 性能照査に用いる部分係数	62
矢板壁の根入れ長照査	62
矢板壁の応力照査	62
タイ材の応力照査	63
腹起しの応力照査	63
壁体の滑動の性能照査	63
壁体の転倒の性能照査	63
杭の応力照査	64
杭の支持力照査	64
3. 補足資料	65
3-1. 参考文献	65

# 1. 概要

## 1-1. システムの特長

本システムは、港湾・漁港構造物の中の1つである「棚式係船岸」の設計業務を支援するために開発されたシステムです。データは、入力画面を用いることにより比較的簡単に入力することができます。

本システムには、以下のような特徴があります。

- ・ 設計基準は、平成30年/11年港湾基準、漁港基準に準拠しています。
- ・ 前面矢板の計算には、ロウの方法、フリーアースサポート法、たわみ曲線法が選択できます。
- ・ プログラム内部に鋼矢板データを保持しており矢板断面が自動選択/任意選択できます。
- ・ 多層地盤及び、短杭の計算が行えます。
- ・ 腐食速度と耐用年数から腐食後の矢板の断面性能を自動計算します。
- ・ 横抵抗定数、地盤反力係数をN値から計算します。また、直接入力することも可能です。
- ・ フリーアースサポート法の場合、複数の仮想海底面が検出された場合に、選択が可能です。
- ・ プログラム内部にタイ材・腹おこし材を保持しており内部でトライアル計算を行います。
- ・ 棚部は断面形状が任意のものを扱えます。
- ・ 棚部の安定計算が行えるため、複合断面の検討を行うことができます。
- ・ 棚部にはその他の外力として任意の荷重を作用させることができます。
- ・ 杭とフーチングの結合計算が可能です。
- ・ 印刷イメージを画面に表示し、確認することができます。
- ・ 任意の鋼矢板データを追加・修正することができます。

## 1-2. システムの制限事項

### [データ容量]

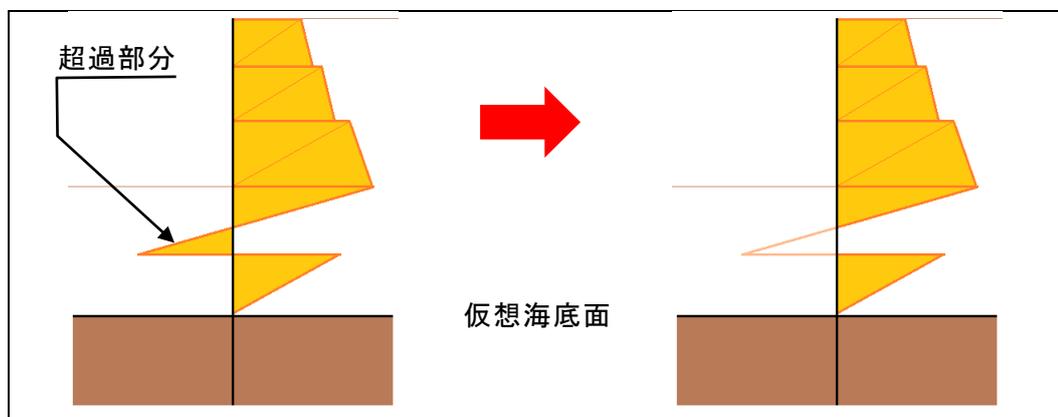
- |             |    |        |
|-------------|----|--------|
| ・ 層データ数     | 最大 | 15層    |
| ・ 鋼管矢板データ数  | 最大 | 10データ  |
| ・ 上部工座標データ  | 最大 | 100点   |
| ・ 検討点       | 最大 | 10点    |
| ・ 関連ブロック数   | 最大 | 10ブロック |
| ・ 土圧作用点     | 最大 | 10点    |
| ・ その他外力データ数 | 最大 | 3つ     |
| ・ 杭データ数     | 最大 | 30データ  |
| ・ 追加矢板データ数  | 最大 | 30件    |

### 1-3. データ入力・計算上の注意事項

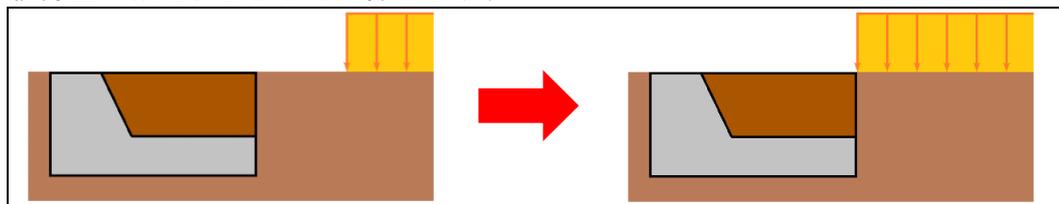
- ・ 主働側の土層開始位置は、必ず地表面天端高さと同じ高さにして下さい。
- ・ 受働側の土層開始位置は、必ず設計海底面高さと同じ高さにして下さい。
- ・ 見かけの震度を二建の提案式で求める場合、地表面天端位置・設計海底面位置の見かけの震度は、

必ず  $k' = \gamma_i / (\gamma_i - 10) \times k$  を使用します。

- ・ 見かけの震度を二建の提案式で求める場合で水位 (R. W. L. / L. W. L.) がそれぞれの天端位置より高い場合、二建の提案式で用いる土層の水に浸かっている深さ  $h_w$  は、それぞれの天端位置からの深さを使用します。
- ・ 荷重として受働土圧が主働土圧を超過する場合は、超過した部分を無視して計算を行います。



- ・ 上載荷重が地表面の途中から始まった場合でもプログラム内では、地表面全体に上載荷重が作用するとして計算します。



- ・ 検討点は、必ず1点は入力してください。複数入力した場合、入力した順番に検討点レベルの安定計算を行い、最終検討点で柵全体の検討を行います
- ・ 土圧作用面は、構造物壁面が鉛直となす角度  $\phi$  の計算の都合上、必ず上から下に設定してください。

## 2. 機能説明

### 2-1. 粘着力からN値を計算する場合

次式を使用して、N値を計算します。

$$N = 2 \cdot X \cdot C$$

$$q_u = N / X$$

ここに

$C$ : 土層の粘着力 ( $N/mm^2$ )

$q_u$ : 一軸圧縮強度 ( $N/mm^2$ )

$N$ : N値

$X$ : 40~80の値を使用

※鋼管杭協会, 鋼矢板 設計から施工まで (2000年 改定新版 P26)

## 2-2. 見かけの震度の算定方法について

### 見かけの震度

本プログラムでは、見かけの震度の計算方法を次の4つの中から選択します。直接入力以外を選択した場合は、各土層の土質定数を使用して見かけの震度を計算します。

- a. 直接入力
- b. 標準式

$$k' = \frac{\gamma_t}{\gamma_t - 10} \times k$$

ここに

$k'$ : 水中における見かけの震度

$k$ : 空気中における震度

$\gamma_t$ : 水で飽和した土の空気中における単位体積重量 ( $kN/m^3$ )

参照: 「全国漁港協会, 漁港の技術指針 1999年版」 P136

- c. 二建の提案式

$$k' = \frac{\sum \gamma h + \gamma_w h_w + w}{\sum \gamma h + w} \times k$$

ここに

$k'$ : 水中における見かけの震度

$k$ : 空気中における震度

$\gamma$ : 土の単位体積重量 ( $kN/m^3$ )

$\gamma_w$ : 海水の単位体積重量 ( $kN/m^3$ )

$h$ : 土層の厚さ ( $m$ )

$h_w$ : 土層の水に浸かっている深さ ( $m$ )

$w$ : 単位面積当たりの載荷重 ( $kN/m^2$ )

参照: 「日本港湾協会, 港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成元年6月」 P229

d. 荒井・横井の提案式

$$k' = \frac{2(\sum \gamma h + \sum \gamma_i h_j + w) + \gamma_i h}{2\{\sum \gamma h_i + \sum (\gamma_i - 10)h_j + w\} + (\gamma_i - 10)h} \times k$$

ここに

$h_i$ : 残留水位以上の土層の厚さ	(m)
$h_j$ : 残留水位以下の土圧を求めようとする層より上の層の厚さ	(m)
$h$ : 残留水位より下の土圧を求めようとする層の厚さ	(m)
$\gamma$ : 水位面上の土の単位体積重量	(kN/m <sup>3</sup> )
$\gamma_i$ : 水で飽和した土の空気中における単位体積重量	(kN/m <sup>3</sup> )
$w$ : 単位面積当たりの載荷重	(kN/m <sup>2</sup> )
$k$ : 震度	
$k'$ : 見かけの震度	

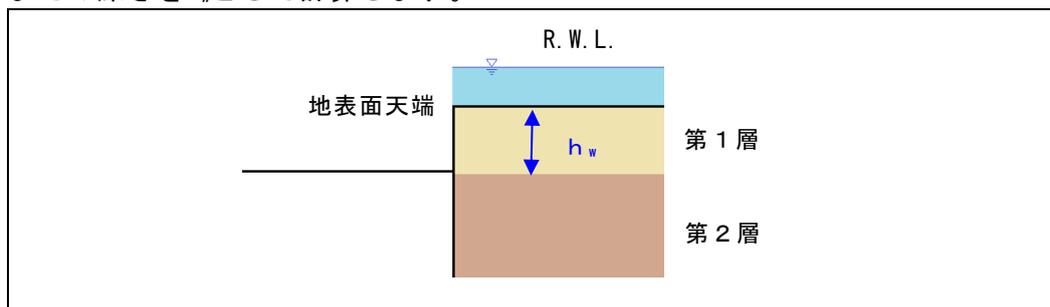
参照 : 「日本港湾協会, 港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成30年5月」P356

参照 : 「全国漁港漁場協会, 漁港・漁場の施設の設計参考書 2015年版」P154

### 二建の提案式—地表面天端より残留水位が高い位置にある場合

二建の提案式を選択した場合で、残留水位が地表面天端よりも高い位置にある場合の天端位置の見かけの震度及び、土層の水に浸かっている深さ $h_w$ を求めるための残留水位位置の考え方は以下のようになります。

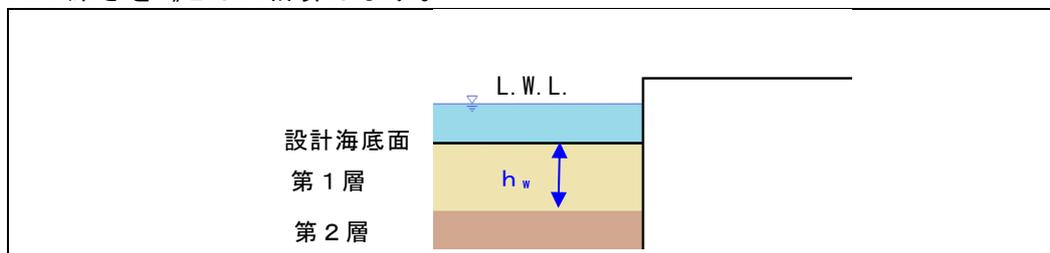
- 1) 天端位置の見かけの震度の算定方法について  
本プログラムでは、地表面天端位置の見かけの震度は、常に標準式を用いて計算を行います。
- 2)  $h_w$ を求めるための残留水位位置の考え方について  
二建の提案式では、[ $h_w$ : 土層の水につかっている深さ (m)] を使用します。本プログラムでは、地表面天端位置を残留水位位置として、その位置から現在層までの深さを $h_w$ として計算します。



### 二建の提案式—設計海底面より前面水位 (L. W. L.) が高い位置にある場合

二建の提案式を選択した場合で、設計海底面位置の見かけの震度及び、 $h_w$ を求めるためのL. W. L. 位置の考え方は以下のようになります。

- 1) 設計海底面位置の見かけの震度の算定方法について  
本プログラムでは、設計海底面位置の見かけの震度は、常に標準式を用いて計算を行います。
- 2)  $h_w$ を求めるためのL. W. L. 位置の考え方について  
二建の提案式では、[ $h_w$ : 土層の水につかっている深さ (m)] を使用します。本プログラムでは、設計海底面位置をL. W. L. 位置として、その位置から現在層までの深さを $h_w$ として計算します。



## 動水圧の算定について

本システムでは、地震時に矢板壁に、動水圧を作用することができます。一般に、見かけの震度を「荒井・横井の提案式」で計算する場合に作用します。算定式は次式を使用しています。

(動水圧)

$$p_{dw} = \pm \frac{7}{8} k \gamma_w \sqrt{Hy}$$

ここに

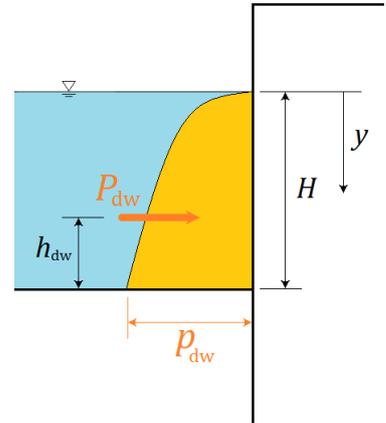
$p_{dw}$ : 動水圧  $(kN/m^2)$

$k$ : 設計震度

$\gamma_w$ : 海水の単位体積重量  $(kN/m^3)$

$y$ : 水面から動水圧を求める点までの深さ  $(m)$

$H$ : 直立壁前面における水深  $(m)$



(動水圧合力及び作用点位置)

$$P_{dw} = \frac{7}{12} k \gamma_w \sqrt{H} y^{\frac{3}{2}}$$

$$h_{dw} = \frac{2}{5} H$$

ここに

$P_{dw}$ : 動水圧の合力  $(kN/m)$

$h_{dw}$ : 動水圧を求める点から動水圧の合力の作用点までの距離  $(m)$

※日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成19年7月 P380）

## 2-3. 土圧の考え方について

### 砂質土

主働土圧強度  $p_a$  ( $kN/m^2$ )

$$p_a = K_a \cos \delta \left[ \Sigma \gamma h + \frac{w \cos \varphi}{\cos(\varphi - \beta)} \right]$$

主働土圧係数  $K_a$  ( $kN/m^2$ )

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi - \varphi)}{\cos^2 \varphi \cos(\delta + \varphi) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\cos(\delta + \varphi) \cos(\phi - \beta)}} \right]^2} \quad (\text{常時})$$

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi - \varphi - \theta)}{\cos \theta \cos^2 \varphi \cos(\delta + \varphi + \theta) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta - \theta)}{\cos(\delta + \varphi + \theta) \cos(\phi - \beta)}} \right]^2} \quad (\text{地震時})$$

受働土圧強度  $p_p$  ( $kN/m^2$ )

$$p_p = K_p \cos \delta \left[ \Sigma \gamma h + \frac{w \cos \varphi}{\cos(\varphi - \beta)} \right]$$

受働土圧係数  $K_p$  ( $kN/m^2$ )

$$K_p = \frac{\cos^2(\phi + \varphi)}{\cos^2 \varphi \cos(\delta + \varphi) \left[ 1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi - \delta) \sin(\phi + \beta)}{\cos(\delta + \varphi) \cos(\phi - \beta)}} \right]^2} \quad (\text{常時})$$

$$K_p = \frac{\cos^2(\phi + \varphi - \theta)}{\cos \theta \cos^2 \varphi \cos(\delta + \varphi - \theta) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi - \delta) \sin(\phi + \beta - \theta)}{\cos(\delta + \varphi - \theta) \cos(\phi - \beta)}} \right]^2} \quad (\text{地震時})$$

ここに

$\gamma$ : 土の単位体積重量 ( $kN/m^3$ )

$h$ : 土層厚 ( $m$ )

$\phi$ : 土の内部摩擦角 (度)

$\varphi$ : 壁面が鉛直となす角度 (度)

$\beta$ : 地表面が水平となす角度 (度)

$\delta$ : 壁面摩擦角 (度)

$\theta$ : 地震合成角 (度)

$k$ : 震度 ( $\theta = \tan^{-1} k$  または  $\theta = \tan^{-1} k'$ )

$k'$ : 見かけの震度

## 粘性土

主働土圧強度  $p_a$  ( $kN/m^2$ )

$$(式 - 1) \quad p_a = \Sigma\gamma h + w - 2c \quad (\text{常時})$$

$$(式 - 2) \quad p_a = K_c(\Sigma\gamma h + w)$$

次に示される(式-1)あるいは(式-2)のうち、構造物に危険となる土圧分布を用いるか(漁港基準)あるいは、(式-1)のみを用いるか(港湾基準)の選択がプログラムで可能になっています。また、(式-2)のみを用いることも可能です。(式-1)を使用した場合に生じる負の土圧領域は考慮せず、正の土圧が発生する深さまでは土圧を0とします。

$$(式 - 3) \quad p_a = \frac{(\Sigma\gamma h + w)\sin(\zeta + \theta)}{\cos\theta\sin\zeta} - \frac{c}{\cos\theta\sin\zeta}$$

$$(式 - 4) \quad p_a = K_c(\Sigma\gamma h + w) \quad (\text{地震時})$$

$$\zeta = \tan^{-1} \sqrt{1 - \left( \frac{\Sigma\gamma h + 2w}{2c} \right) \tan\theta}$$

(式-3)あるいは(式-4)のうち、構造物に危険となる土圧分布を用いるのか、あるいは、(式-3)のみを用いるのかの選択がプログラムで可能です。また、(式-4)のみ用いることも可能です。

(式-3、式-4)の比較を行って土圧を計算する場合で、(式-3)の $\zeta$ 算定式の $\sqrt{\quad}$ 内が負になる場合、次の4項目の選択が可能です。

1. 崩壊角規定値
2. 岡部式

$$p_a = \frac{(\Sigma\gamma h + w)\sin(\alpha + \theta)}{\cos\theta\sin\alpha} - \frac{c}{\cos\theta\sin\alpha}$$

$$\alpha = 90^\circ - \mu \quad , \quad \mu = \tan^{-1} \frac{\bar{a}}{\sqrt{\bar{b}^2 - \bar{a}^2}}$$

$$\bar{a} = \sin\theta \quad , \quad \bar{b} = \sin\theta + \frac{2c \cdot \cos\theta}{\Sigma\gamma h + w}$$

3. 常時土圧式

4.  $\Sigma\gamma h + w$

受働土圧強度  $p_p$  ( $kN/m^2$ )

$$p_p = \Sigma\gamma h + w - 2c$$

ここに

- $\gamma$ : 土の単位体積重量 ( $kN/m^3$ )
- $h$ : 土層厚 ( $m$ )
- $c$ : 粘着力 ( $kN/m^2$ )
- $K_c$ : 圧密平衡係数(=0.5)
- $w$ : 地表面単位面積当たり載荷重 ( $kN/m^2$ )
- $\alpha, \zeta$ : 崩壊面が水平となす角 (度)
- $\theta$ : 地震合成角 (度)
- $k$ : 震度( $\theta = \tan^{-1} k$  または  $\theta = \tan^{-1} k'$ )
- $k'$ : 見かけの震度

## 地震時－主働土圧の考え方

本プログラムでは、地震時粘性土主働土圧の計算方法を以下の2つの方法の中から選択します。次の文献の解釈によります。設計事例集等に使用されている方法はBの方法です。

※日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成19年7月 P377）

（3）海底面下における粘性土の地震時土圧を算出する場合、海底面においては見掛けの震度を用いて土圧を求めるが、海底面下10m以下においては震度を0として土圧を求めることができる。ただし、海底面下10mにおける土圧が海底面より小さい場合には、海底面における値を用いるべきである。

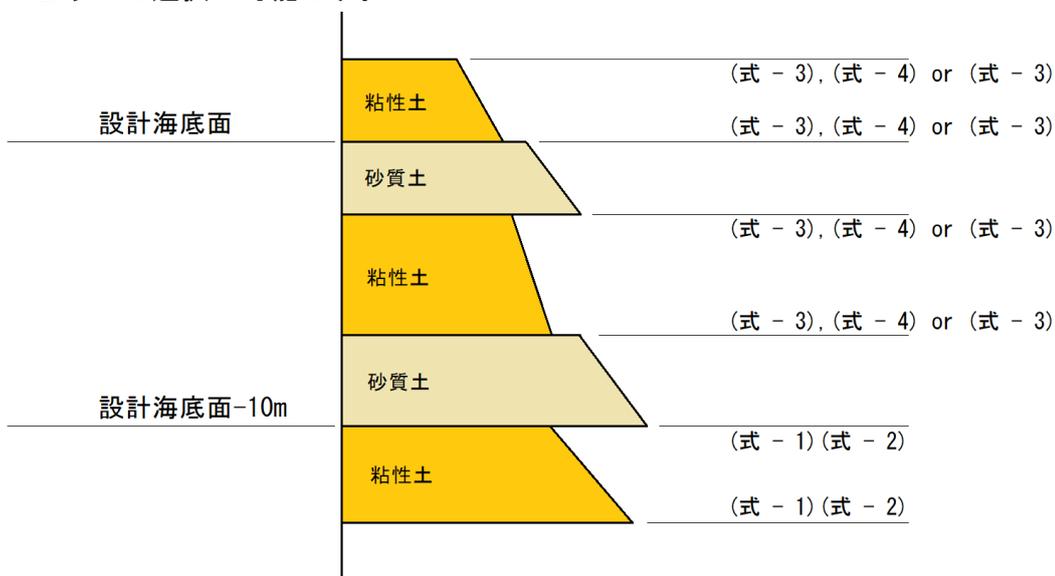
- A. 上・下共に見かけの震度を用いて土圧を計算する
- B. 海底面～海底面-10m間の土圧強度を直線補間（土層下限値のみ補間で算出）
- C. 海底面～海底面-10m間の土圧強度を直線補間（土層上・下限値共に補間で算出）
- D. 海底面～海底面-10m間の見かけの震度を直線補間

※ 上・下共に見かけの震度を用いる場合、海底面-10m以下の粘土層についてのみ、見かけの震度を0として計算します。

（Aの方法を選択した場合）

海底面～海底面－10m以内に粘土層がある場合でも、全て見かけの震度を考慮し、計算式の選択により（式-3、式-4）の構造物に危険側となる値があるいは、（式-3）・（式-4）のみで計算します。

海底面－10m以深の粘土層については、見かけの震度を0として、計算式の選択により（式-1、式-2）の構造物に危険側となる値があるいは、（式-1）・（式-2）のみで計算します。尚、層の下限値が層の上限値よりも小さくなる場合は、層の上限値を層の下限の土圧とするかどうかの選択が可能です。

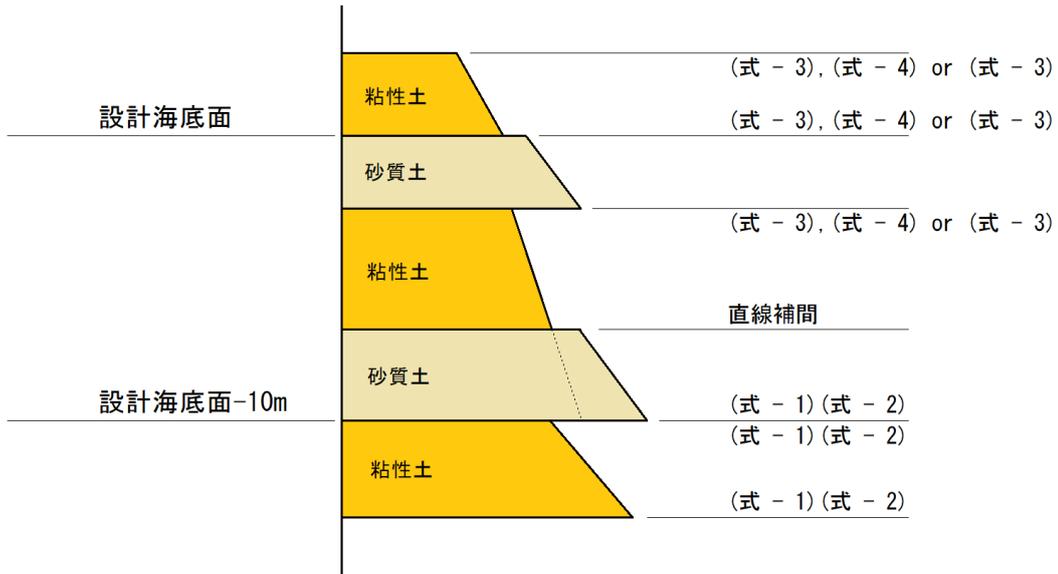


(Bの方法を選択した場合)

海底面～海底面－10m以内に粘土層がある場合に、層の上限の土圧は、見かけの震度を考慮し、計算式の選択により(式-3、式-4)の構造物に危険側となる値があるいは、(式-3)・(式-4)のみで計算します。

層の下限の土圧は、その土層が海底面－10m位置までであると仮定し、見かけの震度を0として、計算式の選択により(式-1、式-2)の構造物に危険側となる値があるいは、(式-1)・(式-2)のみで計算し、実際の層の下限位置で直線補完を行います。

海底面－10m以深の粘土層については、見かけの震度を0として、計算式の選択により(式-1、式-2)の構造物に危険側となる値があるいは、(式-1)・(式-2)のみで計算します。尚、層の下限値が層の上限値よりも小さくなる場合は、層の上限値を層の下限の土圧とするかどうかの選択が可能です。

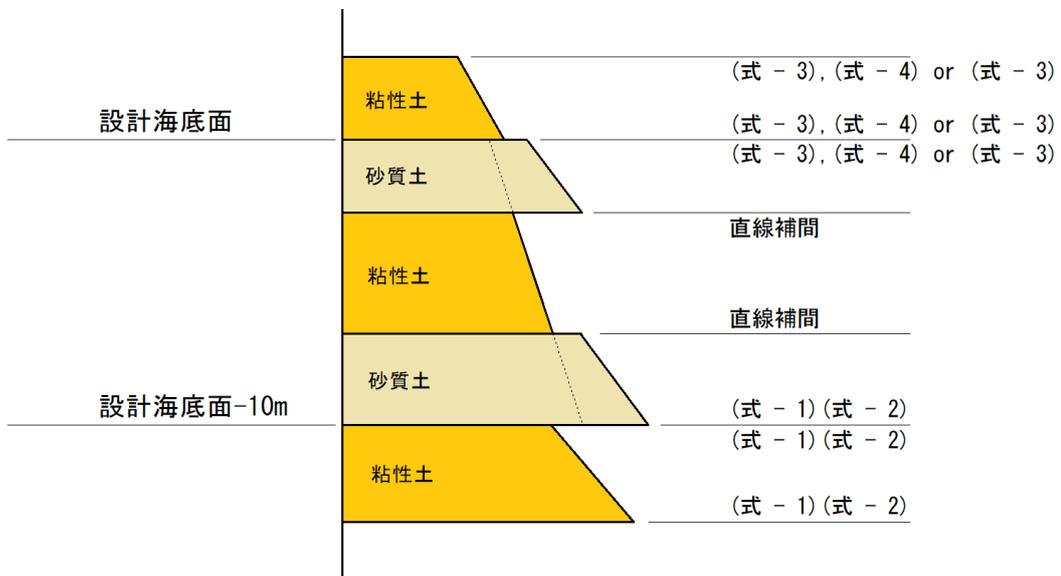


(Cの方法を選択した場合)

海底面～海底面－10m以内に粘土層がある場合に、その粘性土が一様にあるものとし、層の上限位置を海底面位置と仮定して、見かけの震度を考慮し、計算式の選択により(式-3、式-4)の構造物に危険側となる値があるいは、(式-3)・(式-4)のみで計算し、実際の層の上限位置で直線補完を行います。

層の下限の土圧は、その土層が海底面－10m位置までであると仮定し、見かけの震度を0として、計算式の選択により(式-1、式-2)の構造物に危険側となる値があるいは、(式-1)・(式-2)のみで計算し、実際の層の下限位置で直線補完を行います。尚、層の上限・下限の土圧強度が海底面位置の土圧強度よりも小さくなった場合、海底面位置の土圧強度を採用するかどうかの選択が可能です。

海底面－10m以深の粘土層については、見かけの震度を0として、計算式の選択により(式-1、式-2)の構造物に危険側となる値があるいは、(式-1)・(式-2)のみで計算します。尚、層の下限値が層の上限値よりも小さくなる場合は、層の上限値を層の下限の土圧とするかどうかの選択が可能です。



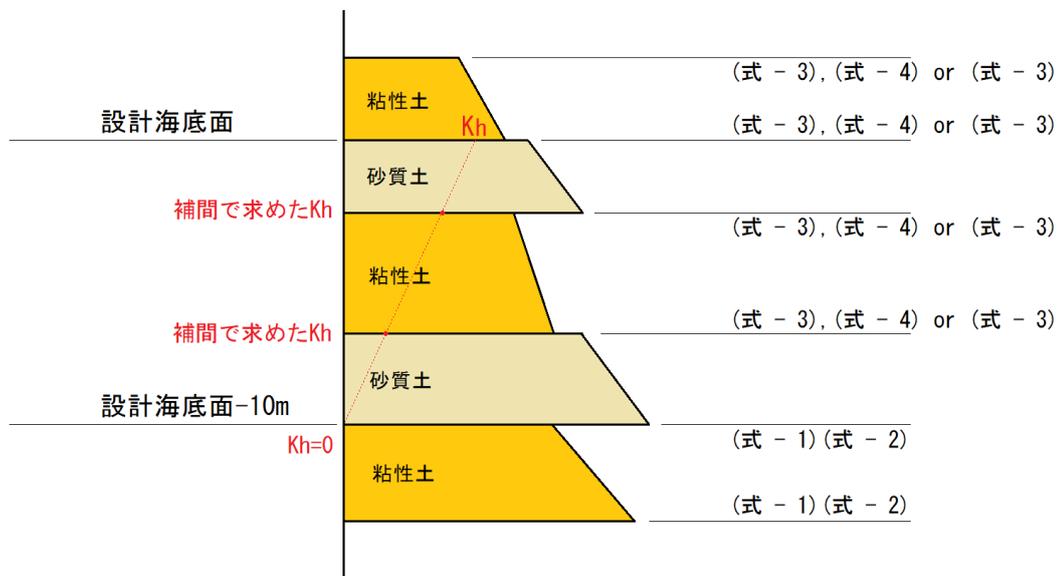
※ 粘性土が設計海底面を挟む場合、使用する見かけの震度は、実際の土層による見かけの震度です。

(Dの方法を選択した場合)

海底面～海底面－10m以内に粘土層がある場合に、実際の土層の見かけの震度を計算し、その見かけの震度を設計海底面の見かけの震度と仮定します。その見かけの震度が、海底面－10m位置で0.0になるものとして実際の土層上限・下限で直線補完を行います。求めた土層上限の見かけの震度を用いて、計算式の選択により(式-3、式-4)の構造物に危険側となる値があるいは、(式-3)・(式-4)のみで計算します。

層の下限の土圧は、求めた層の下限値の見かけの震度を用いて、計算式の選択により(式-3、式-4)の構造物に危険側となる値があるいは、(式-3)・(式-4)のみで計算します。尚、層の上限・下限の土圧強度が海底面位置の土圧強度よりも小さくなった場合、海底面位置の土圧強度を採用するかどうかの選択が可能です。

海底面－10m以深の粘土層については、見かけの震度を0として、計算式の選択により(式-1、式-2)の構造物に危険側となる値があるいは、(式-1)・(式-2)のみで計算します。尚、層の下限値が層の上限値よりも小さくなる場合は、層の上限値を層の下限の土圧とするかどうかの選択が可能です。



※ 粘性土が設計海底面を挟む場合、使用する見かけの震度は、実際の土層による見かけの震度です。

## 2-4. 残留水位の考え方について

係船岸等で裏込め又は、裏埋土内の水位と前面の水位との間に水位差が生じる場合には、設計にあたり、以下に示す残留水位が係船岸等に作用するものとします。

$$p_w = \gamma_w y \quad (0 \leq y < h_w)$$

$$p_w = \gamma_w h_w \quad (h_w \leq y)$$

ここに

$p_w$  : 残留水圧 ( $kN/m^2$ )

$h_w$  : 残留水位差, 裏込め又は裏埋土内の水位が  
前面の水位よりも高い場合でその時の最大の水位差 ( $m$ )

$y$  : 裏込め又は裏埋土内の水面から残留水位を求める点までの深さ ( $m$ )

$\gamma_w$  : 水の単位体積重量 ( $kN/m^3$ )

## 2-5. 崩壊角の算定方法について

本プログラムでは、杭の突出長を算出するために崩壊角を計算します。各土層の上限・下限値を算出し、その平均値を崩壊角とします。

### 砂質土

主働崩壊角算定式－崩壊面となす角度  $\zeta_i$  (度)

(常時)

$$\cot(\zeta_i - \beta) = -\tan(\phi_i + \delta + \varphi - \beta) + \sec(\phi_i + \delta + \varphi - \beta) \sqrt{\frac{\cos(\varphi + \delta) \sin(\phi_i + \delta)}{\cos(\varphi - \beta) \sin(\phi_i - \beta)}}$$

(地震時)

$$\cot(\zeta_i - \beta) = -\tan(\phi_i + \delta + \varphi - \beta) + \sec(\phi_i + \delta + \varphi - \beta) \sqrt{\frac{\cos(\varphi + \delta + \theta) \sin(\phi_i + \delta)}{\cos(\varphi - \beta) \sin(\phi_i - \beta - \theta)}}$$

受働崩壊角算定式－崩壊面となす角度  $\zeta_i$  (度)

(常時)

$$\cot(\zeta_i - \beta) = -\tan(\phi_i - \delta - \varphi + \beta) + \sec(\phi_i - \delta - \varphi + \beta) \sqrt{\frac{\cos(\varphi + \delta) \sin(\phi_i - \delta)}{\cos(\varphi - \beta) \sin(\phi_i + \beta)}}$$

(地震時)

$$\cot(\zeta_i - \beta) = -\tan(\phi_i - \delta - \varphi + \beta) + \sec(\phi_i - \delta - \varphi + \beta) \sqrt{\frac{\cos(\varphi + \delta - \theta) \sin(\phi_i - \delta)}{\cos(\varphi - \beta) \sin(\phi_i + \beta - \theta)}}$$

ここに

$\phi_i$ :  $i$ 層の土の内部摩擦角 (度)

$\varphi$ : 壁面が鉛直となす角度 (度)

$\beta$ : 地表面が水平となす角度 (度)

$\delta$ : 壁面摩擦角 (度)

$\theta$ : 地震合成角 (度)

$k$ : 震度 ( $\theta = \tan^{-1} k$  または  $\theta = \tan^{-1} k'$ )

$k'$ : 見かけの震度

## 粘性土

主働崩壊角算定式－崩壊面となす角度  $\zeta_i$  (度)

(常時)

常時の粘性土には、主働崩壊角を求める式が基準書等には表記されていないため、ここでは、入力値を用います

(地震時)

$$(式 - 1) \quad \zeta_i = \tan^{-1} \sqrt{1 - \left( \frac{\Sigma \gamma h + 2w}{2c} \right) \tan \theta}$$

$$(式 - 2) \quad \zeta_i = 90^\circ - \mu \quad , \quad \mu = \tan^{-1} \frac{\bar{a}}{\sqrt{\bar{b}^2 - \bar{a}^2}}$$
$$\bar{a} = \sin \theta \quad , \quad \bar{b} = \sin \theta + \frac{2c \cdot \cos \theta}{\Sigma \gamma h + w}$$

ここに

$\gamma$ : 土の単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)

$h$ : 層の厚さ

$w$ : 水平単位面積当たりの載荷重 (kN/m<sup>2</sup>)

$c$ : 土の粘着力 (kN/m<sup>2</sup>)

$\theta$ : 地震合成角 (度)

$k$ : 震度 ( $\theta = \tan^{-1} k$  または  $\theta = \tan^{-1} k'$ )

$k'$ : 見かけの震度

上記の(式 - 1)で崩壊角を計算した場合、ルートの中身が負になる場合があります。その場合、(式 - 2) [岡部式]を用いるか、あるいは崩壊角既定値を用いて計算するかをプログラムにより選択可能となっています。崩壊角既定値により、計算する場合は、以下のような処理を行います。岡部式の場合は、上限・下限値の平均値を用います。

- ① 土層の上限・下限の崩壊角が負の値の場合、入力した崩壊角既定値を層の崩壊角とします。
- ② 土層の上限の崩壊角が負の値の場合、下限の崩壊角と入力した崩壊角既定値をその土層の崩壊角とします。
- ③ 土層の下限の崩壊角が負の値の場合、上限の崩壊角と入力した崩壊角既定値をその土層の崩壊角とします。
- ④ 土層の上限・下限の崩壊角が正の値の場合、上限・下限の崩壊角の平均値をその土層の崩壊角とします。

(式 - 2)の出典は、次のようになっています。

**土圧係数図表 日本港湾協会編**

受働崩壊角算定式－崩壊面となす角度  $\zeta$  (度)

(常時)

常時の粘性土には、受働崩壊角を求める式が基準書等には表記されていないため、ここでは、入力値を用います。

(地震時)

地震時の粘性土には、受働崩壊角を求める式が基準書等には表記されていないため、ここでは、入力値を用います。

## 2-6. 腐食後の断面性能について

本プログラムでは、鋼矢板・鋼管矢板／鋼管杭・H形鋼杭の腐食後の断面性能を以下のよう  
に考えて算定しています。

鋼管杭については、 $t_1$ 、 $t_2$ の腐食代が同じ場合と考え継手有効間隔（B）は、考慮しませ  
ん。

### 鋼矢板

腐食後の断面性能の計算方法として以下の2つの内のどちらかが選択できます。

- 腐食後の断面係数を「鋼矢板の腐食後の断面係数のグラフ」から直接引用し、その値  
に鋼矢板の高さを乗じて断面二次モーメントを求めます。
- 「鋼矢板の腐食後の断面係数のグラフ」から残存断面性能率を引用し、その値をそれ  
ぞれ腐食前の断面係数、断面二次モーメントに乗じて腐食後の断面諸値を求めます。

以下に a を指定した場合の詳細について記述します。

### 断面係数

システム内部に「鋼矢板の腐食後の断面係数のグラフ」を保持しており、

$\alpha = t_2/t_1$  から腐食後の断面係数を引用します。

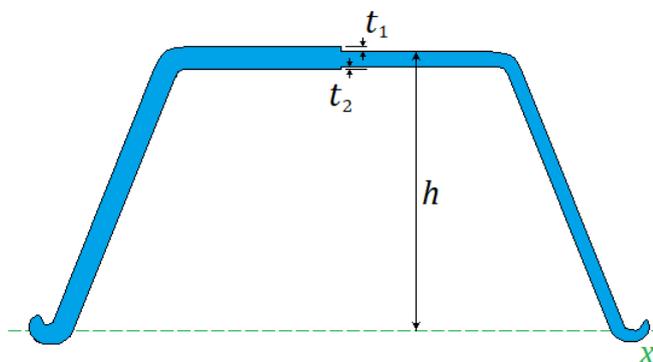
### 断面二次モーメント

次式により算出します。

$$I = Z \times [h - (t_1 + t_2) \times 0.5]$$

ここに

$I$ : 腐食後の断面二次モーメント	( $cm^4/m$ )
$Z$ : 腐食後の断面係数	( $cm^3/m$ )
$h$ : 鋼矢板の上縁までの高さ	( $cm$ )
$t_1$ : 鋼矢板の腐食代	( $cm$ )
$t_2$ : 鋼矢板の腐食代	( $cm$ )



## 鋼管矢板

### 継手有効間隔

直接入力の外、以下の5つのタイプについては継手有効間隔を自動的に算出します。

L-T型(二港湾型)L- 65 × 65 × 8

$$B = 76.0 + \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - 80^2} - \frac{D}{2}$$

L-T型(二港湾型)L- 75 × 75 × 9

$$B = 85.5 + \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - 90^2} - \frac{D}{2}$$

L-T型(二港湾型)L-100 × 75 × 10

$$B = 110 + \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - 90^2} - \frac{D}{2}$$

P-T型(パイプT型)

$$B = 180.0$$

P-P型(パイプ型)

$$B = 247.8$$

ここに

$B$ : 鋼管矢板の継手有効間隔 (mm)

$D$ : 鋼管矢板の外形 (mm)

図心軸に関する断面二次モーメント

a. 腐食がない場合、あるいは腐食代  $t_1, t_2$  が同じ値の場合

$$I_{nx} = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4)$$

ここに

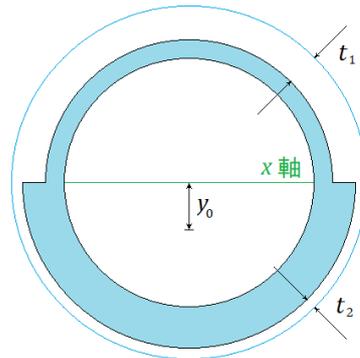
$I_{nx}$ : 図心軸に関する断面二次モーメント ( $m^4$ )  
 $D$ : 外径 ( $m$ )  
 $d$ : 内径 ( $m$ )

b. 腐食代  $t_1, t_2$  が異なる場合

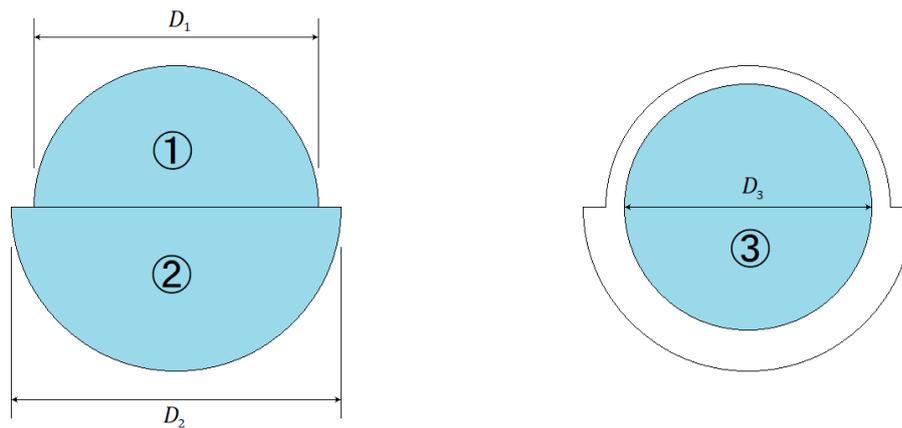
$$I_{nx} = I_x - Ay_0^2$$

ここに

$I_{nx}$ : 図心軸に関する断面二次モーメント ( $m^4$ )  
 $I_x$ :  $x$ 軸に関する断面二次モーメント ( $m^4$ )  
 $A$ : 断面積 ( $m^2$ )  
 $y_0$ :  $x$ 軸と図心軸との離れ ( $m$ )



計算過程の詳細について、次のように断面を分割して計算を行います。



	断面積 $A_i$	x 軸からの距離 $y_i$	断面二次モーメント $I_{xi}$
①	$A_1 = \frac{\pi D_1^2}{8}$	$y_1 = \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{D_1}{2}$	$I_{x1} = \frac{\pi D_1^4}{128}$
②	$A_2 = \frac{\pi D_2^2}{8}$	$y_2 = \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{D_2}{2} \times (-1)$	$I_{x2} = \frac{\pi D_2^4}{128}$
③	$A_3 = \frac{\pi D_3^2}{4} \times (-1)$	$y_3 = 0$	$I_{x3} = \frac{\pi D_3^4}{64} \times (-1)$
合計	$A_0 = \Sigma A_i$	-----	$I_{x0} = \Sigma I_{xi}$

x 軸における図心軸の距離

$$y_0 = \frac{\Sigma A_i y_i}{A_0}$$

断面二次モーメント

$$I = I_{x0} - A_0 y_0^2$$

### 断面係数

断面係数は腐食後の断面二次モーメントを用いて、次式から計算します

腐食代  $t_1, t_2$  が異なる場合、最小の断面係数を採用します。

$$Z_c = \frac{I_{nx}}{y_c} \qquad Z_t = \frac{I_{nx}}{y_t}$$

$$Z = \min(Z_c, Z_t)$$

ここに

$Z$ : 断面係数  $(m^3)$

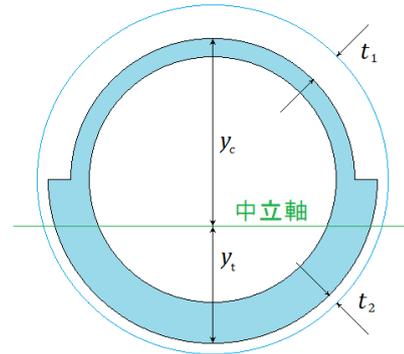
$Z_c$ : 上縁～図心軸における断面係数  $(m^3)$

$Z_t$ : 下縁～図心軸における断面係数  $(m^3)$

$I_{nx}$ : 図心軸に関する断面二次モーメント  $(m^4)$

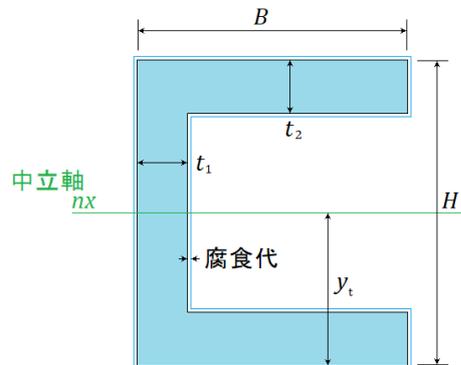
$y_c$ : 上縁と図心軸との離れ  $(m)$

$y_t$ : 下縁と図心軸との離れ  $(m)$



## 溝形鋼

本プログラムでは、溝形鋼の腐食前の断面性能は、システム内部に保持しています。腐食後の断面係数は次式により計算します。

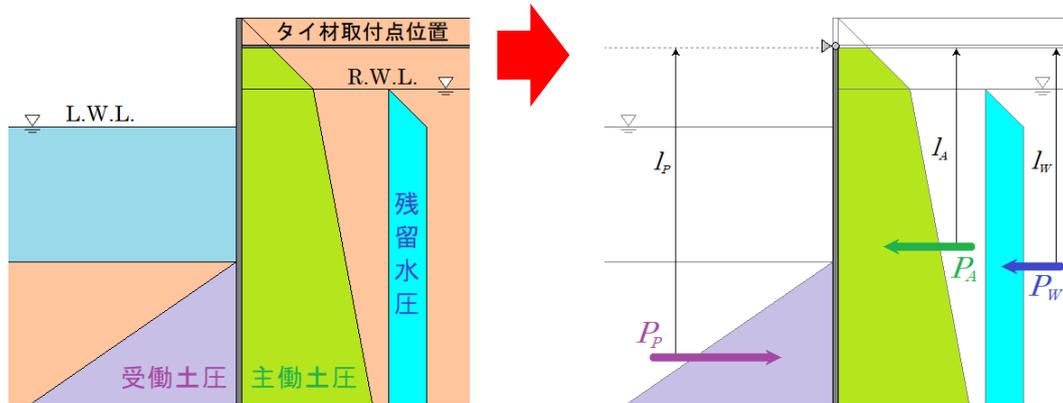


$$Z = \frac{B \cdot H^3 - (B - t_1)(H - 2t_2)^3}{6H}$$

## 2-7. 前面矢板の根入れ長について

### フリーアースサポート法

根入れ長は、以下の式を満足するように決定します。



$$M_p \geq F_s M_A$$

$$M_A = P_A \cdot l_A + P_W \cdot l_W$$

$$M_p = P_p \cdot l_p$$

ここに

$M_A$ : 主働土圧および残留水圧によるタイ材取付点まわりのモーメント (kN・m)

$P_A$ : 主働土圧の合力 (kN)

$l_A$ : タイ材取付点～主働土圧作用点までの距離 (m)

$P_W$ : 残留水圧の合力 (kN)

$l_W$ : タイ材取付点～残留水圧作用点までの距離 (m)

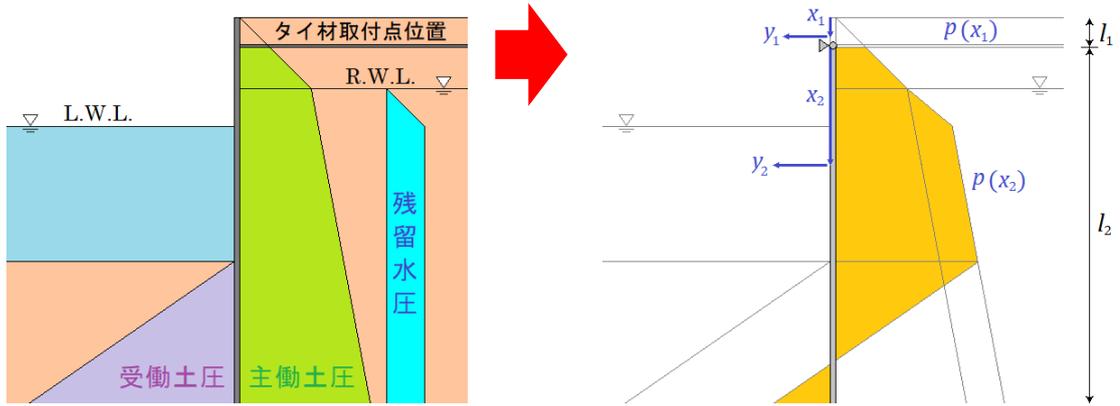
$M_p$ : 受働土圧によるタイ材取付点まわりのモーメント (kN・m)

$P_p$ : 受働土圧の合力 (kN)

$l_p$ : タイ材取付点～受働土圧作用点までの距離 (m)

$F_s$ : 安全率

## たわみ曲線法



上記のように設定した場合、

天端～タイ材取付点位置区間での支配方程式は(1)

タイ材取付点位置～矢板下端区間での支配方程式は(2)で与えられます。

$$EI \frac{d^4 y_1}{dx_1^4} = B \cdot p(x_1) \quad (1)$$

$$EI \frac{d^4 y_2}{dx_2^4} = B \cdot p(x_2) \quad (2)$$

ここに

$E$ : 矢板壁のヤング係数  $(kN/m^2)$

$I$ : 矢板壁の断面二次モーメント  $(m^4)$

$B$ : 矢板壁幅  $(m)$

$p(x)$ : 荷重関数  $(kN/m^2)$

$x_1$ : 天端位置( $x_1 = 0$ )～タイ材取付点位置( $x_1 = l_1$ )までの深さ  $(m)$

$x_2$ : タイ材取付点位置( $x_2 = 0$ )～矢板下端位置( $x_2 = l_2$ )までの深さ  $(m)$

$y_1$ : 天端位置～タイ材取付点位置区間での矢板変位  $(m)$

$y_2$ : タイ材取付点位置～矢板下端位置での矢板変位  $(m)$

式(1)および式(2)の解は式(3)および式(4)になります。

$$y_1(x_1) = a_1 + b_1 x_1 + c_1 x_1^2 + d_1 x_1^3 + \frac{B}{EI} \int \int \int \int p(x_1) (dx_1)^4 \quad (3)$$

$$y_2(x_2) = a_2 + b_2 x_2 + c_2 x_2^2 + d_2 x_2^3 + \frac{B}{EI} \int \int \int \int p(x_2) (dx_2)^4 \quad (4)$$

ここに

$a_1, b_1, c_1, d_1, a_2, b_2, c_2, d_2$ : 積分定数

式(3)および式(4)の境界条件は下記のように与えられます。

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{(i) 矢板天端における境界条件}(x_1 = 0) \\
 -EIy_1''(0) = 0 \quad , \quad -EIy_1'''(0) = 0 \\
 \text{(ii) タイ材取付点における境界条件}(x_1 = l_1 \quad , \quad x_2 = 0) \\
 y_1(l_1) = y_2(0) = 0 \quad , \quad y_1'(l_1) = y_2'(0) \\
 -EIy_1''(l_1) = -EIy_2''(0) \quad , \quad -EIy_1'''(l_1) + A_p = -EIy_2'''(0) \\
 \text{(iii) 矢板下端における境界条件}(x_2 = l_2) \\
 y_2(l_2) = 0 \quad , \quad y_2'(l_2) = 0 \quad , \quad -EIy_2''(l_2) = 0
 \end{array} \right\} \quad \text{---(5)}$$

ここに

$A_p$  : タイ材取付点反力 (kN)

支配方程式である式(3)と式(4)と、境界条件式である式(5)を比べますと、未知数が積分定数と取付点反力の9個に対して境界条件が10個であり、境界条件の方が1つ多くなっています。それ故、鋼矢板壁下端における3個の境界条件のうち2個を取出し、除いた条件式を満足するまで、順次繰り返し計算を行い根入れ長を決定します。

このようにして、根入れ長が決定されればすべての未知数(積分定数、タイロッド取付点反力)が決まります。故に、先の式(3)と式(4)より矢板壁各部の4諸量(変位、たわみ角、曲げモーメント、せん断力)は全て得られます。尚、実際の根入れ長は、先の計算により得られた根入れ長に所定の安全率もしくは調整係数をかけて決定します。

## ロウの方法

ロウの方法は、根入れ部を弾性支承上のはりとして解く方法で、基本式は以下のようになっています。

$$\frac{d^4 y}{dx^4} EI = p(x) = P_{AD} + K_{AD} \cdot \gamma \cdot x - K_0 \cdot \gamma \cdot x - \left( \frac{l_h}{D_F r_t} \right) xy$$

ここに

$E$ : 矢板のヤング係数	$(MN/m^2)$
$I$ : 矢板の単位幅当たりの断面二次モーメント	$(m^4/m)$
$P_{AD}$ : 海水面における主働土圧と残留水圧による荷重強度	$(MN/m^2/m)$
$K_{AD}$ : 矢板根入れ部の主働土圧係数	
$\gamma$ : 土の単位体積重量	$(MN/m^3)$
$K_0$ : 静止土圧係数	
$l_h$ : 矢板の地盤反力係数	$(MN/m^3)$
$D_F$ : 矢板の収束根入れ長	$(m)$
$r_t$ : 根入れ部前面の第一次の正の反力土圧の作用深さと $D_F$ との比	

本システムではフリーアースサポート法で計算した根入れ長がロウの方法による根入れ長を満足するように決定します。ここでは、値の大きくなる方の値を用いています。

$$\delta_N \geq 4.9510 \times \omega^{-0.2} - 0.2486 \quad (\text{永続状態})$$

$$\delta_S \geq 5.0916 \times \omega^{-0.2} - 0.2591 \quad (\text{地震作用時})$$

ここに

$\delta_N, \delta_S := D_F / H_T$	
$D_F$ : 矢板の根入れ長	$(m)$
$H_T$ : タイ材取付点から海底面までの高さ	$(m)$
$\omega$ : シミラリティナンバー $(= \rho \cdot l_h)$	
$\rho$ : フレキシビリティナンバー $(= H_T^4 / E / I)$	$(m^3 / MN)$
$E$ : 矢板のヤング係数	$(kN/m^2)$
$I$ : 矢板の単位幅当たりの断面二次モーメント	$(m^4/m)$
$l_h$ : 矢板の地盤反力係数	$(MN/m^3)$

最大曲げモーメント及び、タイ材取付点反力については、仮想ばり法で求めた結果を下記の式を用いて修正します。

$$\mu_N \geq 3.8625 \times \omega^{-0.2} + 0.2255 \quad (\text{永続状態})$$

$$\mu_S \geq 4.5647 \times \omega^{-0.2} + 0.1329 \quad (\text{地震作用時})$$

$$\tau_N \geq 1.8259 \times \omega^{-0.2} + 0.6232 \quad (\text{永続状態})$$

$$\tau_S \geq 2.3174 \times \omega^{-0.2} + 0.5514 \quad (\text{地震作用時})$$

ここに

$\mu_N, \mu_S := M_F / M_T$	
$M_F$ : たわみ曲線解析における収束根入れ長のときの最大曲げモーメント	
$M_T$ : タイ材取付点及び海底面を支点とした仮想ばり法により算定された最大曲げモーメント	
$\tau_N, \tau_S := T_F / T_T$	
$T_F$ : たわみ曲線解析における収束根入れ長のときのタイ材張力	
$T$ : たわみ仮想ばり法により算定されたタイ材張力	

## 2-8. 矢板の応力照査

矢板に生じる曲げモーメントで、次式により応力照査を行います。

参照：「全国漁港漁場協会，漁港・漁場の施設の設計参考書 2015年版」P345

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成30年5月」P1104

許容応力度法	信頼性設計法
$\frac{\sigma}{\sigma_a} \leq 1.0 \quad , \quad \sigma = \frac{M}{Z}$	$m \frac{S_d}{R_d} \leq 1.0 \quad , \quad R_d = \gamma_d R_k \quad , \quad S_d = \gamma_s S_k$ $R_k = \sigma_y \quad , \quad S_k = \sigma = \frac{M}{Z}$
ここに	ここに
$\sigma_a$ : 矢板の許容応力度 $(N/mm^2)$ $\sigma$ : 矢板の応力度 $(N/mm^2)$ $M$ : 矢板に生じる最大曲げモーメント $(N \cdot mm)$ $Z$ : 矢板の断面係数 $(mm^3)$	$\sigma_y$ : 矢板の降伏応力度 $(N/mm^2)$ $\sigma$ : 矢板の応力度 $(N/mm^2)$ $M$ : 矢板に生じる最大曲げモーメント $(N \cdot mm)$ $Z$ : 矢板の断面係数 $(mm^3)$ $\gamma_s$ : 荷重項に乗じる係数 $\gamma_R$ : 抵抗項に乗じる係数 $Z$ : 調整係数

## 2-9. タイ材について

参照：「全国漁港漁場協会，漁港・漁場の施設の設計参考書 2015年版」P524

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成30年5月」P1104

タイ材張力はフリーアースサポート法、たわみ曲線法、ロウの方法から算出されたタイ材取付点位置反力で、各検討条件で最大となる値から次式で算定します。

$$T = A_p L$$

ここに

$T$ :タイ材の張力 (kN/本)

$A_p$ :タイ材取付点位置反力 (kN/m)

$L$ :タイ材1本あたりの負担幅 (m/本)

本プログラムでは、タイ材データをシステム内部に保持し、照査式を満足するように断面の小さいものからトライアル計算を行い、決定します。

### タイロッド

許容応力度法	信頼性設計法
$\frac{\sigma}{\sigma_a} \leq 1.0, \quad \sigma = \frac{T}{A}$	$m \frac{S_d}{R_d} \leq 1.0, \quad R_d = \gamma_d R_k, \quad S_d = \gamma_s S_k$ $R_k = \sigma_y, \quad S_k = \sigma = \frac{T}{A}$
ここに	ここに
$T$ :タイロッドの張力 (N)	$\sigma_y$ :タイロッドの降伏応力度 (N/mm <sup>2</sup> )
$A$ :タイロッドの断面積 (mm <sup>2</sup> )	$\sigma$ :矢板の応力度 (N/mm <sup>2</sup> )
$\sigma_a$ :タイロッドの許容引張応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	$T$ :タイロッドの張力 (N・mm)
	$A$ :タイロッドの断面積 (mm <sup>2</sup> )
	$\gamma_s$ :荷重項に乗じる係数
	$\gamma_R$ :抵抗項に乗じる係数
	$Z$ :調整係数

### タイブル・タイケーブル・タイロープ

許容応力度法	信頼性設計法
$\frac{T}{T_a} \leq 1.0$	$m \frac{S_d}{R_d} \leq 1.0, \quad R_d = \gamma_d R_k, \quad S_d = \gamma_s S_k$ $R_k = T_a, \quad S_k = \sigma = T$
ここに	ここに
$T$ :タイ材張力 (kN)	$\sigma_y$ : $\left\{ \begin{array}{l} \text{タイ材のみなし降伏点荷重 (2022年以前)} \\ \text{タイ材の降伏点荷重 (2022年以降)} \end{array} \right.$ (kN)
$T_a$ :タイ材許容張力 (kN)	$\sigma$ :タイ材の張力 (kN)
	$\gamma_s$ :荷重項に乗じる係数
	$\gamma_R$ :抵抗項に乗じる係数
	$Z$ :調整係数

※ 部分係数の照査では「降伏点荷重」か、「みなし降伏点荷重（引張荷重（破断荷重×2/3））」か、を選択する事ができます。2022年以前は「みなし降伏点荷重」が標準でしたが、今後は「降伏点荷重」を用いる事が標準となります。

## 2-10. 腹おこし材について

本プログラムでは、腹起こし材データをシステム内部に保持し、照査式を満足するように断面の小さいものからトライアル計算を行い、決定します。

参照：「全国漁港漁場協会，漁港・漁場の施設の設計参考書 2015年版」P524

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成30年5月」P1107

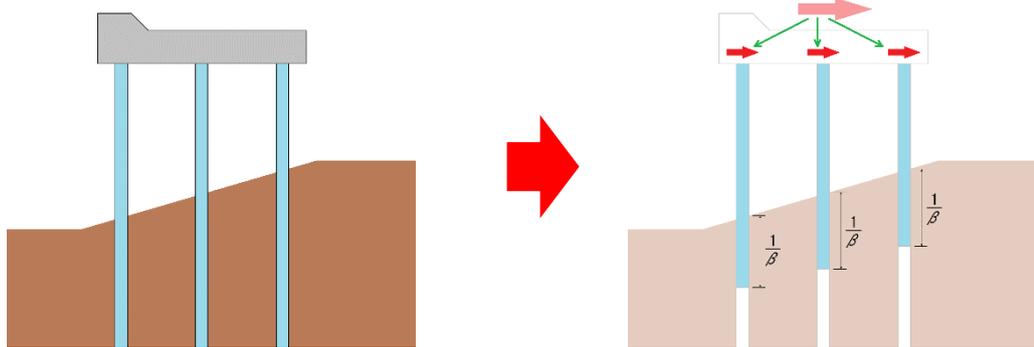
許容応力度法	信頼性設計法
$M_{\max} = \frac{TL}{10}$ $\sigma_a \geq \frac{M_{\max}}{2Z} \quad (\text{溝形鋼})$ $\sigma_a \geq \frac{M_{\max}}{Z} \quad (\text{H形鋼})$	$m \frac{S_d}{R_d} \leq 1.0$ $R_d = \gamma_d R_k, \quad S_d = \gamma_s S_k$ $R_k = \sigma_y, \quad S_k = \sigma = \frac{M_{\max}}{2Z} \quad (\text{溝形鋼})$ $M_{\max} = \frac{TL}{10}, \quad S_k = \sigma = \frac{M_{\max}}{Z} \quad (\text{H形鋼})$
<p>ここに</p> <p><math>M_{\max}</math>: 腹起こし材に作用する最大曲げモーメント (kN・m)</p> <p><math>T</math>: タイ材張力 (kN)</p> <p><math>L</math>: タイ材取付点間隔 (m)</p> <p><math>Z</math>: 腹起こし材の断面係数 (m<sup>3</sup>)</p> <p><math>\sigma_a</math>: 腹起こし材の曲げ応力度 (N/mm<sup>2</sup>)</p>	<p>ここに</p> <p><math>M_{\max}</math>: 腹起こし材に作用する最大曲げモーメント (kN・m)</p> <p><math>T</math>: タイ材張力 (kN)</p> <p><math>L</math>: タイ材取付点間隔 (m)</p> <p><math>Z</math>: 腹起こし材の断面係数 (m<sup>3</sup>)</p> <p><math>\sigma_a</math>: 腹起こし材の曲げ応力度 (N/mm<sup>2</sup>)</p>

## 2-11. 杭の反力について

このプログラムでは「設計基準の方法（仮想固定点法）」「変位法（無限長）」「変位法（有限長）」から計算方法を選択できます。

### 仮想固定点法

このプログラムで用いる仮想固定点法とは、各杭を杭頭部～地表面から  $1/\beta$  位置を固定端とする片持ち梁とし、上部工に作用する力を各杭に分担して、各杭の断面力及び水平変位を算出する手法です。直杭のみ、計算対象になります。



### 各杭の平均特性値

$$\bar{\beta} = \frac{\sum \beta_i l_i}{\sum l_i}, \quad \frac{1}{\bar{\beta}} = \sum l_i, \quad \beta_i = \sqrt[4]{\frac{k_{hi} D}{4EI_i}}$$

ここに

$\bar{\beta}$ : 平均特性値	$(m^{-1})$
$\beta_i$ : 第 <i>i</i> 層の地盤の特性値	$(m^{-1})$
$k_{hi}$ : 第 <i>i</i> 層の地盤の横方向地盤反力係数	$(kN/m^3)$
$D$ : 杭幅または杭径	$(m)$
$E$ : 杭のヤング係数	$(kN/m^2)$
$I_i$ : 第 <i>i</i> 層の地盤での杭の断面二次モーメント	$(m^4)$
$l_i$ : 第 <i>i</i> 層の地盤の層厚	$(m)$
$\sum l_i$ : 平均特性値による長さ	$(m)$

### 各杭に作用する鉛直力

$$V_i = \frac{n_i}{\sum n_i} V + \frac{n_i x_i}{\sum n_i x_i^2} eV$$

ここに

$V_i$ : $i$ 列目の杭の鉛直力	( $kN$ / 本)
$V$ : 鉛直力の合力	( $kN$ )
$e$ : 杭の重心から上部工重心までの偏心量	( $m$ )
$n_i$ : $i$ 列目の杭の本数	(本)
$x_i$ : 杭の重心から $i$ 列目の杭までの距離	( $m$ )

### 各杭に作用する水平力及び曲げモーメント

$$H_i = \frac{K_{Hi}}{\sum K_{Hi}} H \quad M_i = \frac{1}{2} \left( h_i + \frac{1}{\beta_i} \right) H_i$$

$$K_{Hi} = \frac{12EI_i}{\left( h_i + \frac{1}{\beta_i} \right)^3}$$

ここに

$H_i$ : $i$ 列目の杭の水平力	( $kN$ )
$H$ : 水平力の合力	( $kN$ )
$M_i$ : $i$ 列目の杭の曲げモーメント	( $kN \cdot m$ )
$K_{Hi}$ : $i$ 列目の杭の横方向のバネ定数	( $kN/m$ )
$h_i$ : $i$ 列目の杭の突出長	( $m$ )
$E$ : 杭のヤング係数	( $kN/m^2$ )
$I_i$ : $i$ 列目の杭の断面二次モーメント	( $m^4$ )
$\beta_i$ : $i$ 列目の杭の平均特性値	( $m^{-1}$ )

### 各杭の水平変位

$$\Delta_i = \frac{H}{K_{Hi}}$$

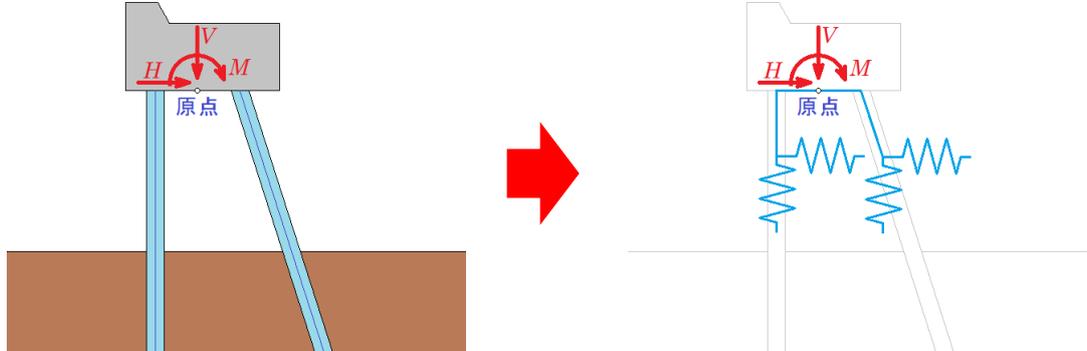
ここに

$\Delta_i$ : $i$ 列目の杭の水平変位	( $m$ )
$H$ : 水平力の合力	( $kN$ )
$K_{Hi}$ : $i$ 列目の杭の横方向のバネ定数	( $kN/m$ )

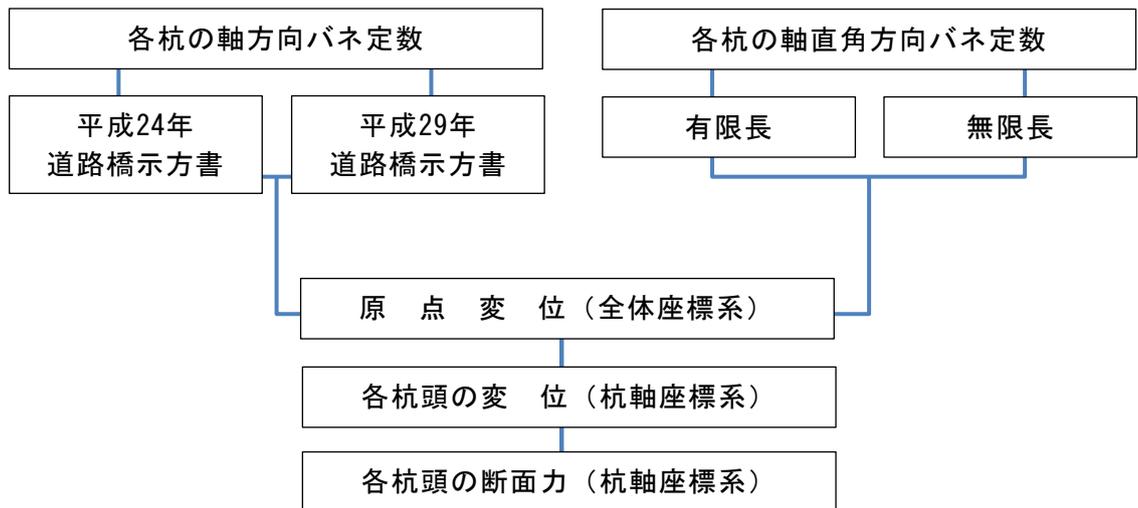
※全国漁港協会，漁港・漁場の施設の設計参考図書（2015年度版 [下] P552～554）

## 変位法

このプログラムで用いる変位法とは剛体とみなせる上部工原点と各杭頭バネを結合させたモデルにおいて、上部工の原点に作用する外力による原点変位を算出します。その後、原点変位から各杭頭の変位を算出し、その算出した杭頭変位を用いて、各杭頭の断面力を算出します。



計算の流れは次のようになります。



## 各杭の軸方向バネ定数

一般式

$$P = K_V \delta \quad (K_V: \text{一定})$$

ここに

$K_V$ : 杭の軸方向バネ定数  
 $P$ : 杭軸方向に作用する荷重  
 $\delta$ : 杭軸方向変位

## 平成24年道路橋示方書

$$K_V = \frac{1}{\delta_0 + \delta_1}, \quad \delta_0 = \frac{1}{K_{V0}}, \quad \delta_1 = \frac{1}{K_{V1}}$$

$$K_{V0} = \frac{1}{\left( \sum \frac{l_{0i}}{EA_{0i}} \right)}, \quad K_{V1} = a \frac{1}{\left( \sum \frac{l_{1j}}{EA_{1j}} \right)}$$

ここに

$\delta_0$ : 突出部での杭の軸方向変位 (m)  
 $\delta_1$ : 地中部での杭の軸方向変位 (m)  
 $K_{V0}$ : 突出部での杭の軸方向バネ定数 (kN/m)  
 $K_{V1}$ : 地中部での杭の軸方向バネ定数 (kN/m)  
 $E$ : 杭のヤング定数 (kN/m<sup>2</sup>)  
 $A_{0i}$ : 突出部*i*部材での杭の純断面積 (m<sup>2</sup>)  
 $A_{1j}$ : 地中部*j*部材での杭の純断面積 (m<sup>2</sup>)  
 $l_0$ : 杭の突出長(=  $\sum l_{0i}$ ) (m)  
 $l_1$ : 杭の根入長(=  $\sum l_{1j}$ ) (m)  
 $D$ : 杭径 (m)  
 $a$ : 次式により算定する

## 平成 8年道路橋示方書

打込鋼管  $a = 0.014l_1 / D + 0.78$

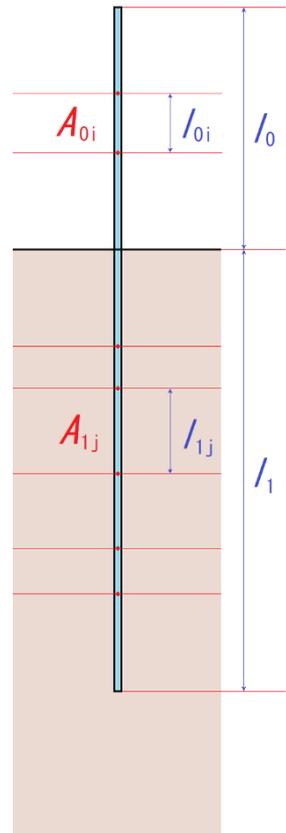
中堀鋼管  $a = 0.009l_1 / D + 0.39$

## 平成24年道路橋示方書

打込鋼管 (打撃工法)  $a = 0.014l_1 / D + 0.72$

打込鋼管 (バイブロハンマ工法)  $a = 0.017l_1 / D - 0.014$

中堀鋼管  $a = 0.010l_1 / D + 0.36$



$$(l_1 / D \geq 10.0)$$

※日本道路協会, 道路橋示方書・同解説IV下部構造編 (平成14年3月 P374)

※日本道路協会, 道路橋示方書・同解説IV下部構造編 (平成8年12月 P347)

平成29年道路橋示方書

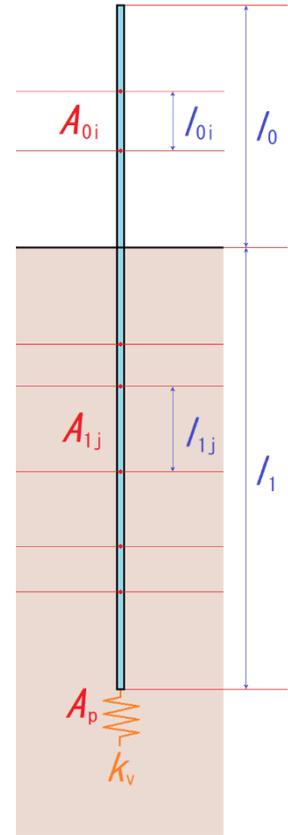
$$K_v = \frac{1}{\delta_0 + \delta_1 + \delta_2}, \quad k_v = \frac{\alpha E_0}{0.3} \left( \frac{B}{0.3} \right)^{-\frac{3}{4}}$$

$$\delta_0 = \frac{1}{K_{V0}}, \quad \delta_1 = \frac{1}{K_{V1}}, \quad \delta_2 = \frac{1}{K_{V2}}$$

$$K_{V0} = \frac{1}{\left( \sum \frac{l_{0i}}{EA_{0i}} \right)}, \quad K_{V1} = \frac{2}{1 + \gamma_y - \zeta_e} \cdot \frac{1}{\left( \sum \frac{l_{1j}}{EA_{1j}} \right)}, \quad K_{V2} = \frac{k_v A_p}{\gamma_y \zeta_d}$$

ここに

- $\delta_0$ : 突出部での杭の軸方向変位 (m)
- $\delta_1$ : 地中部での杭の軸方向変位 (m)
- $\delta_2$ : 杭先端での杭の軸方向変位 (m)
- $K_{V0}$ : 突出部での杭の軸方向バネ定数 (kN/m)
- $K_{V1}$ : 地中部での杭の軸方向バネ定数 (kN/m)
- $K_{V2}$ : 杭先端での杭の軸方向バネ定数 (kN/m)
- $E$ : 杭のヤング定数 (kN/m<sup>2</sup>)
- $A_{0i}$ : 突出部*i*部材での杭の純断面積 (m<sup>2</sup>)
- $A_{1j}$ : 地中部*j*部材での杭の純断面積 (m<sup>2</sup>)
- $A_p$ : 杭の先端断面積 (m<sup>2</sup>)
- $B$ : 杭径 (m)
- $\alpha$ : 地盤反力係数の換算係数 (m)
- $l_0$ : 杭の突出長(=  $\sum l_{0i}$ ) (m)
- $l_1$ : 杭の根入長(=  $\sum l_{1j}$ ) (m)
- $E_0$ : 杭先端地盤の弾性係数(または2800N)
- $N$ : 杭先端地盤の*N*値
- 杭の降伏支持力に達したときの杭頭部に作用する
- $\gamma_y$ : 軸方向押込力の杭先端への伝達率の推定値(=  $\lambda_{yu} \gamma_u$ )
- $\lambda_{yu}$ : 先端伝達率算出のための補正係数
- 杭の極限支持力に達したときの杭頭部に作用する
- $\gamma_u$ : 軸方向押込力の杭先端への伝達率の推定値(=  $R_p / R_u$ )
- $R_p$ : 杭先端の極限支持力の推定値 (kN)
- $R_u$ : 杭の極限支持力の推定値 (kN)
- $\zeta_e$ : 杭体収縮量に関する補正係数
- $\zeta_d$ : 杭の先端変位量に関する補正係数



$\alpha$ は次のように設定します。  
(常時・地震時共通)

変形係数	$E_0 = 2800N$	$E_0 =$ 入力値
$E_0$		
$\alpha$	1	4

以下、補正係数は次のようになります。

$\lambda_{yu}$	$\zeta_e$	$\zeta_d$
0.66	0.07	0.42

※日本道路協会，道路橋示方書・同解説IV下部構造編（平成29年11月 P187～263）

## 各杭の軸直角方向バネ定数

### 有限長

#### 1) 杭部材の伝達マトリクス

突出部

$$F_i = \begin{bmatrix} 1 & -x_i & -\frac{x_i^2}{2EI_i} & -\frac{x_i^3}{6EI_i} \\ 0 & 1 & \frac{x_i}{EI_i} & \frac{x_i^2}{2EI_i} \\ 0 & 0 & 1 & x_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

地中部

$$F_i = \begin{bmatrix} \mathfrak{I}_1(\beta_i x_i) & -\frac{1}{\beta_i} \mathfrak{I}_2(\beta_i x_i) & -\frac{1}{EI\beta_i^2} \mathfrak{I}_3(\beta_i x_i) & -\frac{1}{EI\beta_i^3} \mathfrak{I}_4(\beta_i x_i) \\ 4\beta_i \mathfrak{I}_4(\beta_i x_i) & \mathfrak{I}_1(\beta_i x_i) & \frac{1}{EI\beta_i} \mathfrak{I}_2(\beta_i x_i) & \frac{1}{EI\beta_i^2} \mathfrak{I}_3(\beta_i x_i) \\ 4EI\beta_i^2 \mathfrak{I}_3(\beta_i x_i) & -4EI\beta \mathfrak{I}_4(\beta_i x_i) & \mathfrak{I}_1(\beta_i x_i) & \frac{1}{\beta_i} \mathfrak{I}_2(\beta_i x_i) \\ 4EI\beta_i^3 \mathfrak{I}_2(\beta_i x_i) & -4EI\beta^2 \mathfrak{I}_3(\beta_i x_i) & -4\beta_i \mathfrak{I}_4(\beta_i x_i) & \mathfrak{I}_1(\beta_i x_i) \end{bmatrix}$$

$$\mathfrak{I}_1(\beta_i x_i) = \cosh \beta_i x_i \cos \beta_i x_i$$

$$\mathfrak{I}_2(\beta_i x_i) = \frac{\cosh \beta_i x_i \sin \beta_i x_i + \sinh \beta_i x_i \cos \beta_i x_i}{2}$$

$$\mathfrak{I}_3(\beta_i x_i) = \frac{\sinh \beta_i x_i \sin \beta_i x_i}{2}$$

$$\mathfrak{I}_4(\beta_i x_i) = \frac{\cosh \beta_i x_i \sin \beta_i x_i - \sinh \beta_i x_i \cos \beta_i x_i}{4}$$

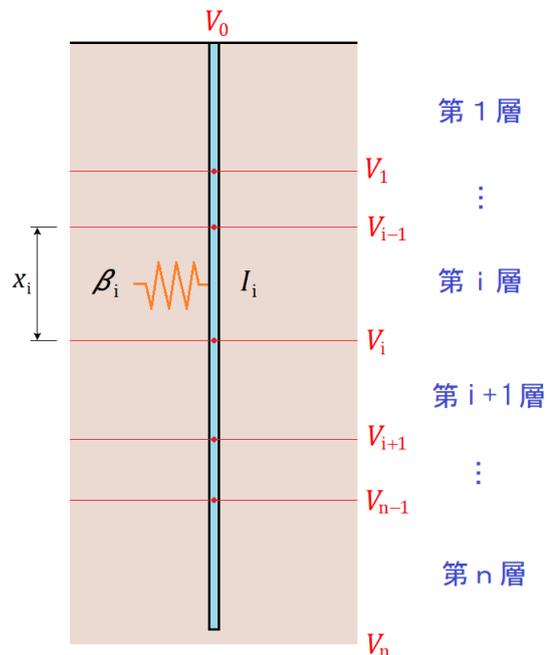
$$\cosh \beta_i x_i = \frac{e^{\beta_i x_i} + e^{-\beta_i x_i}}{2}$$

$$\sinh \beta_i x_i = \frac{e^{\beta_i x_i} - e^{-\beta_i x_i}}{2}$$

$$\beta_i = \sqrt[4]{\frac{K_{hi} D}{4EI_i}}$$

ここに

- $\beta_i$  : 第*i*層の特性値 ( $m^{-1}$ )
- $x_i$  : 第*i*層の層厚 ( $m$ )
- $K_{hi}$  : 第*i*層の地盤反力係数 ( $kN/m^3$ )
- $I_i$  : 第*i*層の断面二次モーメント ( $m^4$ )
- $D$  : 鋼材径 ( $m$ )
- $E$  : ヤング係数 ( $kN/m^2$ )



## 2) 部材の断面力・変位

$$V_i = F_i V_{i-1}$$

$$V_i = [u_i \quad \alpha_i \quad -M_i \quad -Q_i]^T$$

ここに

$u_i$ : 第*i*層端部の水平変位 (m)

$\alpha_i$ : 第*i*層端部の回転角 (rad)

$M_i$ : 第*i*層端部の曲げモーメント (kN・m)

$Q_i$ : 第*i*層端部のせん断力 (kN)

## 3) 杭の軸直角方向バネ定数の算出

$$V_i = F_i V_{i-1} \text{ より } V_n = F_n F_{n-1} \cdots F_i \cdots F_1 V_0$$

$$\text{ここで } A = F_n F_{n-1} \cdots F_i \cdots F_1 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \text{ とすると}$$

$$V_n = \begin{bmatrix} u_n \\ \alpha_n \\ -M_n \\ -Q_n \end{bmatrix} = AV_0 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ \alpha_0 \\ -M_0 \\ -Q_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)より、杭先端を自由とした場合

$$V_n = \begin{bmatrix} u_n \\ \alpha_n \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = AV_0 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ \alpha_0 \\ -M_0 \\ -Q_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

これにより

$$\begin{bmatrix} a_{31} & a_{32} \\ a_{41} & a_{42} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ \alpha_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{34} & a_{33} \\ a_{44} & a_{43} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -Q_0 \\ -M_0 \end{bmatrix} = 0 \quad \therefore \begin{bmatrix} u_0 \\ \alpha_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{HH} & f_{HM} \\ f_{OH} & f_{OM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -Q_0 \\ -M_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} f_{HH} & f_{HM} \\ f_{OH} & f_{OM} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{31} & a_{32} \\ a_{41} & a_{42} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} a_{34} & a_{33} \\ a_{44} & a_{43} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{a_{31}a_{42} - a_{32}a_{41}} \begin{bmatrix} a_{42} & -a_{32} \\ -a_{41} & a_{31} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{34} & a_{33} \\ a_{44} & a_{43} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{a_{31}a_{42} - a_{32}a_{41}} \begin{bmatrix} a_{34}a_{42} - a_{32}a_{44} & a_{33}a_{42} - a_{32}a_{43} \\ a_{31}a_{44} - a_{34}a_{41} & a_{31}a_{43} - a_{33}a_{41} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} -Q_0 \\ -M_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 & -K_2 \\ -K_3 & K_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ \alpha_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(3)(4)より

$$\therefore \begin{bmatrix} K_1 & -K_2 \\ -K_3 & K_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{HH} & f_{HM} \\ f_{OH} & f_{OM} \end{bmatrix}^{-1} \quad (5)$$

杭先端をヒンジとした場合

$$V_n = \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha_n \\ 0 \\ -Q_n \end{bmatrix} = AV_0 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ \alpha_0 \\ -M_0 \\ -Q_0 \end{bmatrix} \quad (2)'$$

として式(3)～(5)を導出します。

※土木学会，杭基礎設計便覧（平成4年10月 P204）

無限長

$$K_1 = \frac{12EI\beta^3}{(1+\beta h)^3 + 2} \quad K_2 = \frac{1}{2} \left( h + \frac{1}{\beta} \right) K_1$$

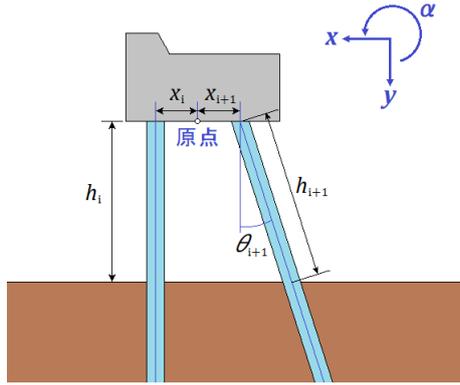
$$K_3 = K_2 \quad K_4 = \frac{4EI\beta}{1+\beta h} \cdot \frac{(1+\beta h)^3 + 0.5}{(1+\beta h)^3 + 2.0}$$

ここに

$\beta$ :  $1/\beta$ 区間の平均特性値  $(m^{-1})$   
 $E$ : 杭のヤング係数  $(kN/m^2)$   
 $I$ : 杭の断面二次モーメント  $(m^4)$   
 $h$ : 杭の突出長  $(m)$

※日本道路協会，道路橋示方書・同解説IV下部構造編（平成29年12月 P552）

### 原点変位（全体座標系）



$$\begin{aligned}
 A_{xx} &= \sum (K_{li} \cos^2 \theta_i + K_{Vi} \sin^2 \theta_i) \\
 A_{xy} &= A_{yx} = \sum (K_{Vi} - K_{li}) \sin \theta_i \cos \theta_i \\
 A_{x\alpha} &= A_{\alpha x} = \sum \{ (K_{Vi} - K_{li}) x_i \sin \theta_i \cos \theta_i - K_{2i} \cos \theta_i \} \\
 A_{yy} &= \sum (K_{Vi} \cos^2 \theta_i + K_{li} \sin^2 \theta_i) \\
 A_{y\alpha} &= A_{\alpha y} = \sum \{ (K_{Vi} \cos^2 \theta_i + K_{li} \sin^2 \theta_i) x_i + K_{2i} \sin \theta_i \} \\
 A_{\alpha\alpha} &= \sum \{ (K_{Vi} \cos^2 \theta_i + K_{li} \sin^2 \theta_i) x_i^2 + (K_{2i} + K_{3i}) x_i \sin \theta_i + K_{4i} \}
 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} & A_{x\alpha} \\ A_{yx} & A_{yy} & A_{y\alpha} \\ A_{\alpha x} & A_{\alpha y} & A_{\alpha\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_0 \\ V_0 \\ M_0 \end{bmatrix} \quad \therefore \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} & A_{x\alpha} \\ A_{yx} & A_{yy} & A_{y\alpha} \\ A_{\alpha x} & A_{\alpha y} & A_{\alpha\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} H_0 \\ V_0 \\ M_0 \end{bmatrix}$$

ここに

- $H_0$ : 原点に作用する水平荷重 (kN)
- $V_0$ : 原点に作用する鉛直荷重 (kN)
- $M_0$ : 原点に作用するモーメント (kN・m)
- $\delta_x$ : 原点のx軸での変位量 (m)
- $\delta_y$ : 原点のy軸での変位量 (m)
- $\alpha$ : 原点の回転角 (rad)
- $x_i$ : i番目の杭の原点を基準とした座標 (m)
- $\theta_i$ : i番目の杭の杭軸が鉛直軸となす角度 (rad)
- $K_{li}, K_{2i}, K_{3i}, K_{4i}$ : i番目の杭の軸直角方向バネ定数
- $K_{Vi}$ : i番目の杭の軸方向バネ定数

※日本道路協会，道路橋示方書・同解説IV下部構造編（平成29年12月 P548～549）

### 各杭の変位（杭軸座標系）

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ \alpha_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & x_i \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \alpha \end{bmatrix}$$

ここに

- $\delta_x$ : 原点のx軸での変位量 (m)
- $\delta_y$ : 原点のy軸での変位量 (m)
- $\alpha$ : 原点の回転角 (rad)
- $\theta_i$ : i番目の杭の杭軸が鉛直軸となす角度 (rad)
- $x_i$ : i番目の杭の原点を基準とした座標 (m)
- $u_i$ : i番目の杭の杭頭部の杭軸直角変位量 (m)
- $v_i$ : i番目の杭の杭頭部の杭軸変位量 (m)
- $\alpha_i$ : i番目の杭の杭頭部の回転角 (rad)

※日本道路協会，道路橋示方書・同解説IV下部構造編（平成29年12月 P550）

### 各杭に作用する断面力（杭軸座標系）

$$\begin{bmatrix} Q_i \\ N_i \\ M_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{1i} & 0 & -K_{2i} \\ 0 & K_{Vi} & 0 \\ -K_{3i} & 0 & K_{4i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ \alpha_i \end{bmatrix}$$

ここに

- $N_i$  :  $i$ 番目の杭の軸力 (kN)  
 $Q_i$  :  $i$ 番目の杭のせん断力 (kN)  
 $M_i$  :  $i$ 番目の杭の曲げモーメント (kN・m)  
 $u_i$  :  $i$ 番目の杭の杭頭部の杭軸直角変位量 (m)  
 $v_i$  :  $i$ 番目の杭の杭頭部の杭軸変位量 (m)  
 $\alpha_i$  :  $i$ 番目の杭の杭頭部の回転角 (rad)  
 $K_{1i}, K_{2i}, K_{3i}, K_{4i}$  :  $i$ 番目の杭の軸直角方向バネ定数  
 $K_{Vi}$  :  $i$ 番目の杭の軸方向バネ定数

※日本道路協会，道路橋示方書・同解説IV下部構造編（平成29年12月 P550）

## 水平方向地盤反力係数の算定方法

水平方向地盤反力係数  $K$  値 ( $\text{kN}/\text{m}^3$ ) の計算方法として以下の7種類を用意しています。

- 1)  $K$  値直接入力
- 2)  $K=1500 \cdot N$
- 3) 横山の図
- 4) 道路橋  $N$  値  $\rightarrow K$  値

$$K_H = \frac{\alpha}{0.3} \cdot E_0 \cdot \left( \frac{B_H}{0.3} \right)^{-\frac{3}{4}} \quad \text{--- ①}$$

$$B_H = \sqrt{\frac{D}{\beta}} \quad , \quad \bar{\beta} = \sqrt[4]{\frac{k_H D}{4EI}} \quad \text{--- ②, ③}$$

ここに

- $D$ : 杭径 ( $m$ )  
 $EI$ : 曲げ剛性 ( $\text{kN} \cdot \text{m}^2$ )  
 $\alpha$ : 地盤反力係数の推定に用いる係数  $\alpha = 1$ (永続状態)  $\alpha = 2$ (変動状態)  
 $E_0$ : 標準貫入試験の  $N$  値(入力値)より  $E_0 = 2800N$  で推定した変形係数  
 $B_H$ : 換算載荷幅 ( $m$ )  
 $\bar{\beta}$ : 杭の  $1/\bar{\beta}$  における平均特性値 ( $m^{-1}$ )  
 $k_H$ :  $1/\bar{\beta}$  までの深さの水平方向地盤反力係数の平均 ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )

多層地盤での対象地盤における  $\bar{\beta}$  は次のように算定しております。

- ①  $1/\bar{\beta}$  を仮定する
- ②  $1/\bar{\beta}$  までの  $\overline{\alpha E_0}$  を算出 ( $\alpha$  は常時の値を用いる)

$$\overline{\alpha E_0} = \frac{\sum \alpha_i \cdot E_{oi} \cdot l_i}{1/\bar{\beta}}$$

- ③ 式②より換算載荷幅  $B_H$  を算出
- ④  $k_{H0}$  を算出

$$k_{H0} = \frac{1}{0.3} \overline{\alpha E_0}$$

- ⑤  $k_H$  を算出

$$k_H = k_{H0} \left( \frac{B_H}{0.3} \right)^{-\frac{3}{4}}$$

- ⑥ 式③より  $\bar{\beta}$  を算出

- ⑦ ①の  $\bar{\beta}$  と比較して等しくなるまで①から計算を繰り返す

※ この手法で等しくならない場合 (2つの値で振幅する) には  
2つの値を用いて二分法で算定を行う。

5) 道路橋 $E_0 \rightarrow K$ 値

算定式は4) 道路橋 $N$ 値 $\rightarrow K$ 値の場合と同様、 $\alpha$ 、 $E_0$ の内容は以下の通り

$\alpha$  : 地盤反力係数の推定に用いる係数  $\alpha=4, 8$

$E_0$  : ボーリング孔内で測定した変形係数(入力値)

6) 粘性土 $q_u \rightarrow N \rightarrow K$ 値

$$K = 1500 \cdot N$$

$$N = 2 \cdot X \cdot C$$

$$q_u = N / X$$

ここに

$C$  : 土層の粘着力  $(N/mm^2)$

$q_u$  : 一軸圧縮強度  $(N/mm^2)$

$N$  :  $N$ 値

$X$  : 40~80の値を使用

$K$ 値の計算で使用する粘着力は次式で算出します。

$$C = C_0 + k(z_u + z_d) / 2$$

$C_0$  : 粘着力切片  $(N/mm^2)$

$k$  : 粘着力勾配  $(N/mm^3)$

$z_u$  :  $N$ 値計算対象となる土層の上限標高 (m)

$z_d$  :  $N$ 値計算対象となる土層の下限標高 (m)

7) 相関式

$$K_H = 3910 \cdot N^{0.733}$$

斜角による $K$ の補正

斜杭の傾き(度)	算定式
$-30^\circ < \theta \leq -20^\circ$	$K_h' = K_h \times (-0.051\theta + 0.71)$
$-20^\circ < \theta \leq -10^\circ$	$K_h' = K_h \times (-0.039\theta + 0.95)$
$-10^\circ < \theta < 0^\circ$	$K_h' = K_h \times (-0.034\theta + 1.00)$
$0^\circ < \theta < 10^\circ$	$K_h' = K_h \times (-0.026\theta + 1.00)$
$10^\circ \leq \theta < 20^\circ$	$K_h' = K_h \times (-0.024\theta + 0.98)$
$10^\circ \leq \theta < 20^\circ$	$K_h' = K_h \times (-0.017\theta + 0.84)$

※日本道路協会，道路橋示方書・同解説IV下部構造編（平成29年11月 P187、259）

※鋼管杭協会，鋼矢板 設計から施工まで（2000年 改定新版 P26）

※第41回地盤工学研究発表会，杭軸直角方向地盤反力係数の推定方法に関する一提案

## 2-12. 杭の応力照査

### 杭の応力照査【漁港基準、港湾基準(H11)】

杭軸圧縮方向に関する照査	杭軸引張方向に関する照査
$\frac{\sigma_c}{\sigma_{ca}} + \frac{\sigma_b}{\sigma_{ba}} \leq 1.0$	$ \sigma_t - \sigma_{bt}  \leq 1.0$

$$\sigma_c = \frac{N}{A}, \quad \sigma_b = \frac{M}{Z}$$

ここに

$\sigma_c$ : 杭の軸方向力による圧縮応力度 ( $N/mm^2$ )

$\sigma_t$ : 杭の軸方向力による引張応力度 ( $N/mm^2$ )

$\sigma_b, \sigma_{bt}$ : 杭の曲げモーメントによる応力度 ( $N/mm^2$ )

A: 杭の断面積 ( $mm^2$ )

Z: 杭の断面係数 ( $mm^3$ )

l: 杭の有効座屈長 (m)

r: 杭の断面二次半径 (m)

#### 鋼管杭の許容応力度

鋼種	SKK400	SKK490
軸方向引張応力度 $\sigma_{ta}$	140	185
軸方向圧縮応力度 $\sigma_{ca}$	$l/r \leq 18$ 140	$l/r \leq 16$ 185
	$18 < l/r \leq 92$ $140 - 0.82 \left( \frac{l}{r} - 18 \right)$	$16 < l/r \leq 79$ $185 - 1.20 \left( \frac{l}{r} - 16 \right)$
	$l/r > 92$ $\frac{1,200,000}{6,700 + \left( \frac{l}{r} \right)^2}$	$l/r > 79$ $\frac{1,200,000}{5,000 + \left( \frac{l}{r} \right)^2}$
曲げ引張応力度 $\sigma_{bt}$	140	185
曲げ圧縮応力度 $\sigma_{ba}$	140	185

鋼種	SM490Y	SM570
軸方向引張応力度 $\sigma_{ta}$	210	255
軸方向圧縮応力度 $\sigma_{ca}$	$l/r \leq 15$ 210	$l/r \leq 13$ 255
	$15 < l/r \leq 75$ $210 - 1.50 \left( \frac{l}{r} - 15 \right)$	$13 < l/r \leq 67$ $255 - 2.10 \left( \frac{l}{r} - 13 \right)$
	$l/r > 75$ $\frac{1,200,000}{4,400 + \left( \frac{l}{r} \right)^2}$	$l/r > 67$ $\frac{1,200,000}{3,500 + \left( \frac{l}{r} \right)^2}$
曲げ引張応力度 $\sigma_{bt}$	210	255
曲げ圧縮応力度 $\sigma_{ba}$	210	255

※日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成11年4月 P318）

**杭の応力照査【港湾基準 (H30)】**

$$m \frac{S_d}{R_d} \leq 1.0 \quad , \quad S_d = \gamma_S S_k \quad , \quad R_d = \gamma_R R_k \quad , \quad \sigma_c = \frac{N}{A} \quad , \quad \sigma_b = \frac{M}{Z}$$

軸方向力が圧縮の場合	軸方向力が引張の場合
$S_k = \frac{\sigma_{ck}}{red} + \sigma_{bck} \quad , \quad R_k = \sigma_{byk}$	$S_k = \sigma_{tk} + \sigma_{btk} \quad , \quad R_k = \sigma_{tyk}$ $S_k = -\sigma_{tk} + \sigma_{bck} \quad , \quad R_k = \sigma_{byk}$

ここに

- $R_k$  : 抵抗項に関する特性値 (N/mm<sup>2</sup>)
- $S_k$  : 荷重項に関する特性値 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\sigma_c$  : 杭の軸方向力による圧縮応力度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\sigma_t$  : 杭の軸方向力による引張応力度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\sigma_b, \sigma_{bt}$  : 杭の曲げモーメントによる応力度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $A$  : 杭の断面積 (mm<sup>2</sup>)
- $Z$  : 杭の断面係数 (mm<sup>3</sup>)
- $l$  : 杭の有効座屈長 (m)
- $r$  : 杭の断面二次半径 (m)
- $\gamma_R$  : 抵抗項に乗じる部分係数
- $\gamma_S$  : 荷重項に乗じる部分係数
- $m$  : 調整係数
- $red$  : 軸方向圧縮応力度を降伏応力度で除した値として定義される係数

**鋼管杭の降伏応力度**

SKK400	SKK490	SM490Y	SM570
235	315	355	450

**鋼管杭の軸方向降伏応力度**

SKK400		SKK490	
$l/r \leq 19$	235	$l/r \leq 16$	315
$19 < l/r \leq 93$	$235 - 1.40 \left( \frac{l}{r} - 19 \right)$	$16 < l/r \leq 80$	$315 - 2.10 \left( \frac{l}{r} - 16 \right)$
$l/r > 93$	$\frac{2,000,000}{6,700 + \left( \frac{l}{r} \right)^2}$	$l/r > 80$	$\frac{2,000,000}{5,000 + \left( \frac{l}{r} \right)^2}$
SM490Y		SM570	
$l/r \leq 15$	355	$l/r \leq 13$	450
$15 < l/r \leq 76$	$355 - 2.60 \left( \frac{l}{r} - 15 \right)$	$13 < l/r \leq 67$	$450 - 3.70 \left( \frac{l}{r} - 13 \right)$
$l/r > 76$	$\frac{2,000,000}{4,400 + \left( \frac{l}{r} \right)^2}$	$l/r > 67$	$\frac{2,000,000}{3,500 + \left( \frac{l}{r} \right)^2}$

※日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成30年5月 P1210～1212）

## 2-13. 杭の根入れ長の検討

### 地盤が一様とみなせる場合

$$L \geq 3.0 / \beta$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_H D}{4EI}} \quad , \quad k_H = \frac{\sum k_{hi} l_i}{l_i}$$

ここに

$$\beta : 1/\beta \text{の平均特性値} \quad (m^{-1})$$

$$l : \text{根入れ長} \quad (m)$$

$$k_H : 1/\beta \text{の平均横方向地盤反力係数} \quad (kN/m^3)$$

$$l_i : \text{第} i \text{層地盤の層厚} \quad (m)$$

$$k_{hi} : \text{第} i \text{層地盤の横方向地盤反力係数} \quad (kN/m^3)$$

$$D : \text{杭径} \quad (m)$$

$$E : \text{杭の弾性係数} \quad (kN/m^2)$$

$$I : \text{杭の断面二次モーメント} \quad (m^4)$$

### 地盤の性質が著しく変化する場合

$$\beta_1 l_1 + \beta_2 l_2 + \dots + \beta_n l_n \geq 3.0$$

$$\beta_n = \sqrt[4]{\frac{k_n D}{4EI_n}}$$

ここに

$$\beta_n : \text{第} n \text{層地盤の特性値} \quad (m^{-1})$$

$$l_n : \text{第} n \text{層地盤の層厚} \quad (m)$$

$$k_n : \text{第} n \text{層地盤の横方向地盤反力係数} \quad (kN/m^3)$$

$$D : \text{杭径} \quad (m)$$

$$E : \text{杭の弾性係数} \quad (kN/m^2)$$

$$I_n : \text{第} n \text{層地盤の杭の断面二次モーメント} \quad (m^4)$$

※全国漁港協会，漁港・漁場の施設の設計参考図書（2015年度版 [上] P268）

## 2-14. 杭の支持力

【漁港基準、港湾基準 (H11)】

$$V \leq R_a$$

ここに

$V$ : 杭の軸力 (kN)

$R_a$ : 杭の許容支持力 (kN)

【港湾基準 (H30)】

$$m \frac{S_d}{R_d} \leq 1.0, \quad S_d = \gamma_S S_k, \quad R_d = \gamma_R R_k$$

押込力の場合  $S_k = V + W$ ,  $R_k = R_{pk} + R_{fk}$

引抜き力の場合  $S_k = V - W$ ,  $R_k = R_{fk}$

ここに

$R_k$ : 抵抗項に関する特性値

$S_k$ : 荷重項に関する特性値

$R_{pk}$ : 杭先端支持力の特性値

$R_{fk}$ : 杭周面支持力の特性値

$V$ : 杭の軸力

$W$ : 抵抗項杭の自重

$\gamma_R$ : 抵抗項に乗じる部分係数

$\gamma_S$ : 荷重項に乗じる部分係数

$m$ : 調整係数

本システムでは支持力の検討を3つの工法（打込鋼管、中堀鋼管、埋込み杭）から選択できます。

ただし、中堀鋼管、埋込み杭は漁港基準、港湾基準（H11）での選択となります

## 打込鋼管【漁港基準、港湾基準(H11)】

### 1) 軸方向押込み力

[支持層：砂質土地盤]

$$R_u = 300 \cdot \alpha \cdot N \cdot A_p + \sum 2 \cdot N_i \cdot A_s + \sum C_{ai} \cdot A_s, \quad R_a = \frac{R_u}{F}$$

ここに

$R_u$  : 杭の極限支持力 (kN)

$R_a$  : 杭の許容支持力 (kN)

$\alpha$  : 杭の閉塞率

$N$  : 杭先端地盤のN値  $N = \frac{N_1 + N_2}{2}$

$A_p$  : 杭の先端面積 ( $m^2$ )

$A_s$  : 杭の周表面積  $A_s = U \cdot L_i$  ( $m^2$ )

$U$  : 杭の周長 ( $m$ )

$L_i$  : 層の厚さ ( $m$ )

$N_i$  : 砂質土層内の平均N値

$C_{ai}$  : 粘性土層内の平均付着力 ( $C_{ai} \leq 100$ )

$F$  : 安全率

$N_1$  : 杭先端地盤でのN値

$N_2$  : 杭先端より上方へ4×杭径での範囲内の平均N値

[支持層：粘性土地盤]

$$R_u = 8 \cdot \alpha \cdot C_p \cdot A_p + \sum 2 \cdot N_i \cdot A_s + \sum C_{ai} \cdot A_s, \quad R_a = \frac{R_u}{F}$$

ここに

$C_p$  : 杭先端位置での粘着力

### 2) 軸方向引き抜き力

$$R_u = \sum 2 \cdot N_i \cdot A_s + \sum C_{ai} \cdot A_s, \quad R_a = \frac{R_u}{F} + w$$

ここに

$w$  : 杭の自重  $w = A \cdot \gamma \cdot L$

$A$  : 杭の断面積 ( $m^2$ )

$\gamma$  : 杭の単位体積重量 ( $kN/m^3$ )

$L$  : 杭の長さ ( $m$ )

※日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成11年4月 P436～P443）

## 打込鋼管【港湾基準(H30)】

### 1) 杭の先端抵抗力

$$[\text{支持層: 砂質土地盤}] \quad R_{pk} = 300N\alpha A_p$$

$$[\text{支持層: 粘性土地盤}] \quad R_{pk} = 6C_p\alpha A_p$$

ここに

$$R_{pk} : \text{杭の先端抵抗力の特性値} \quad (kN)$$

$\alpha$  : 杭の閉塞率

$$A_p : \text{杭先端の有効面積} \quad (m^2)$$

$N$  : 杭先端地盤の $N$ 値

$$N = \frac{N_1 + \overline{N_2}}{2}$$

$$N_1 : \text{杭先端地盤の} N \text{値} \quad (N_1 \leq 50)$$

$$\overline{N_2} : \text{杭先端より上方} 4B \text{なる範囲内の平均の} N \text{値} \quad (\overline{N_2} \leq 50)$$

$$B : \text{杭の直径} \quad (m)$$

$$C_p : \text{杭先端位置での粘着力} \quad (kN/m^2)$$

### 2) 杭の周面抵抗力

$$\begin{aligned} R_{fk} &= \sum 2N_i A_s + \sum C_{ai} A_s \\ &= \left( \sum 2N_i L_i + \sum C_{ai} L_i \right) U \end{aligned}$$

ここに

$$R_{fk} : \text{杭周面抵抗力の特性値} \quad (kN)$$

$$A_s : \text{杭の周面積} \quad (m^2)$$

$$L_i : \text{層の厚さ} \quad (m)$$

$$U : \text{杭の周長} \quad (m)$$

$N_i$  : 層の平均 $N$ 値

$$C_{ai} : \text{層の平均付着力} \quad (kN/m^2)$$

$$\begin{cases} C_{ai} = c & (c \leq 100kN/m^2) \\ C_{ai} = 100 & (c > 100kN/m^2) \end{cases}$$

※日本港湾協会, 港湾の施設の技術上の基準・同解説(平成30年5月 P691~P698, 1214)

## 中掘鋼管（平成24年道路橋示方書）

### 許容応力度法

#### 1) 軸方向押込み力

$$R_u = q_d \cdot A_p + U(\sum N_i \cdot L_i + \sum 0.5 \cdot C_{ai} \cdot L_i) \quad \text{—道路橋示方書 平成8年}$$

$$R_u = q_d \cdot A_p + U(\sum 2 \cdot N_i \cdot L_i + \sum 0.8 \cdot C_{ai} \cdot L_i) \quad \text{—道路橋示方書 平成24年}$$

$$R_a = \frac{R_u}{F}$$

ここに

$q_d$ : 杭先端で支持する単位面積当たりの極限支持力度

$A_p$ : 杭の先端面積

$U$ : 杭の周長

$L_i$ : 層の厚さ

$N_i$ : 砂質土層内の平均 $N$ 値

$C_{ai}$ : 粘性土層内の平均付着力  $(0.5C_{ai} \leq 100)$  平成8年  
 $(0.8C_{ai} \leq 100)$  平成24年

$F$ : 安全率

#### 2) 軸方向引抜き力

$$R_u = U(\sum N_i \cdot L_i + \sum 0.5 \cdot C_{ai} \cdot L_i) \quad \text{—道路橋示方書 平成8年}$$

$$R_u = U(\sum 2 \cdot N_i \cdot L_i + \sum 0.8 \cdot C_{ai} \cdot L_i) \quad \text{—道路橋示方書 平成24年}$$

$$R_a = \frac{R_u}{F} + w$$

ここに

$w$ : 杭の自重  $w = A \cdot \gamma \cdot L$

$A$ : 杭の断面積

$\gamma$ : 杭の単位体積重量

$L$ : 杭の長さ

### 港湾基準 (H30)

#### 1) 杭の先端抵抗力

$$R_{pk} = q_d \cdot A_p$$

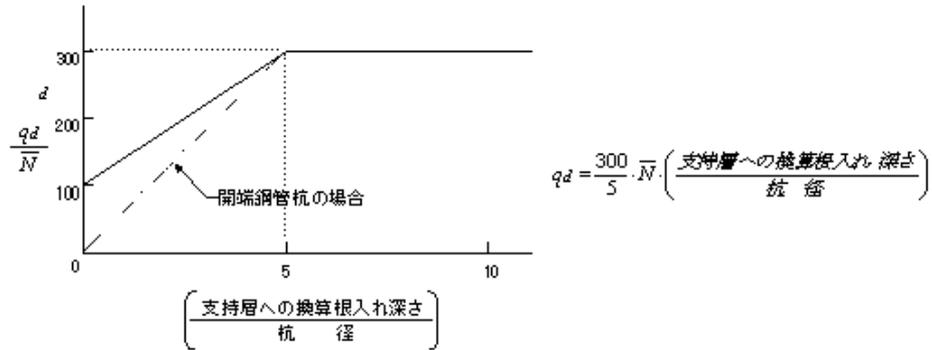
#### 2) 杭の周面抵抗力

$$R_{fk} = U(\sum N_i \cdot L_i + \sum 0.5 \cdot C_{ai} \cdot L_i) \quad \text{—道路橋示方書 平成8年}$$

$$R_{fk} = U(\sum 2 \cdot N_i \cdot L_i + \sum 0.8 \cdot C_{ai} \cdot L_i) \quad \text{—道路橋示方書 平成24年}$$

$q_d$  は以下の項目より算定します

1 : 最終打撃工法



2 : セメントミルク噴出攪拌方式 (砂層)  $q_d = 150 \cdot N$

3 : セメントミルク噴出攪拌方式 (砂礫層)  $q_d = 200 \cdot N$

4 : コンクリート打設方式 (砂礫層及び砂層)  $q_d = 3000$

5 : コンクリート打設方式 (良質な砂礫層)  $q_d = 5000$

6 : コンクリート打設方式 (硬質粘性土層)  $q_d = 3 \cdot q_u$

$q_u$  : 一軸圧縮強度 ( $kN/m^2$ )

※日本道路協会, 道路橋示方書・同解説IV下部構造編 (平成 8年12月 P330~P338)

※日本道路協会, 道路橋示方書・同解説IV下部構造編 (平成14年 3月 P355~P362)

## 中掘鋼管（平成29年道路橋示方書）

### 許容応力度法

#### 1) 軸方向押込み力

$$R_a = \frac{R_u}{F} \quad , \quad R_u = q_d \cdot A_p + U \left( \sum 2 \cdot N_i \cdot L_i + \sum 0.8 \cdot C_{ai} \cdot L_i \right)$$

ここに

$q_d$  : 杭先端で支持する単位面積当たりの極限支持力度

$A_p$  : 杭の先端面積

$U$  : 杭の周長

$L_i$  : 層の厚さ

$N_i$  : 砂質土層内の平均 $N$ 値

$C_{ai}$  : 粘性土層内の平均付着力 ( $0.8C_{ai} \leq 70$ )

$F$  : 安全率

#### 2) 軸方向引抜き力

$$R_a = \frac{R_u}{F} + w \quad , \quad R_u = U \left( \sum 2N_i \cdot L_i + \sum 0.8 \cdot C_{ai} \cdot L_i \right)$$

ここに

$w$  : 杭の自重  $w = A \cdot \gamma \cdot L$

$A$  : 杭の断面積

$\gamma$  : 杭の単位体積重量

$L$  : 杭の長さ

### 港湾基準 (H30)

#### 1) 杭の先端抵抗力

$$R_{pk} = q_d \cdot A_p$$

#### 2) 杭の周面抵抗力

$$R_{fk} = U \left( \sum 2 \cdot N_i \cdot L_i + \sum 0.8 \cdot C_{ai} \cdot L_i \right)$$

$q_d$  は以下の項目より算定します

- |                          |                     |
|--------------------------|---------------------|
| 1 : 最終打撃方式（先端粘性土層）       | $q_d = 90 \cdot N$  |
| 2 : 最終打撃方式（先端砂層及び砂礫層）    | $q_d = 130 \cdot N$ |
| 3 : セメントミルク噴出攪拌方式（先端砂層）  | $q_d = 220 \cdot N$ |
| 4 : セメントミルク噴出攪拌方式（先端砂礫層） | $q_d = 250 \cdot N$ |

※日本道路協会，道路橋示方書・同解説IV下部構造編（平成29年11月 P239）

## 埋込み杭

### 1) 軸方向押込み力

$$R_a = \frac{1}{F} \left[ 200 \cdot \eta \cdot \bar{N} \cdot A_p + \left( \sum 2 \cdot N_s \cdot L_s + \sum 10 \cdot N_c \cdot L_c \right) \cdot \psi \right] - w$$

ここに

$R_a$ : 長期許容支持力(上部構造から荷重と杭の自重の和に対して適用)

$\eta$ : 閉端杭の閉塞効力(閉端杭では $\eta = 1$ )

$\bar{N}$ : 先端抵抗N値(杭先端より下 $\sim 1.0d$ ～上 $\sim 4.0d$ の間の実測N値の平均)

$A_p$ : 杭先端の全断面積

$N_s$ : 杭周地盤中、砂質部分の実測N値の平均

$N_c$ : 杭周地盤中、粘土部分の実測N値の平均

ただし、実測値のうち $N = 0$ は $0.5$ とみなし、またその上限は $4.0$ とする

$L_s$ : 杭周地盤中、砂質部分にある杭の長さ

$L_c$ : 杭周地盤中、粘土部分にある杭の長さ

$\psi$ : 杭の周長

$w$ : 杭の自重

$F$ : 安全率

### 2) 軸方向引抜き力

$$R_a = \frac{1}{F} \left( \sum 2 \cdot N_s \cdot L_s + \sum 10 \cdot N_c \cdot L_c \right) \cdot \psi + w$$

ここに

$R_a$ : 長期許容支持力(上部構造から荷重と杭の自重の和に対して適用)

$N_s$ : 杭周地盤中、砂質部分の実測N値の平均

$N_c$ : 杭周地盤中、の粘土部分の実測N値の平均

ただし、実測値のうち $N = 0$ は $0.5$ とみなし、またその上限は $4.0$ とする

$L_s$ : 杭周地盤中、砂質部分にある杭の長さ

$L_c$ : 杭周地盤中、粘土部分にある杭の長さ

$\psi$ : 杭の周長

$w$ : 杭の自重

$F$ : 安全率

※全国漁港協会，漁港構造物の設計ガイド（平成6年度版 P66）

## 2-15. 杭の負の周面摩擦

### 安定検討【漁港基準、港湾基準(H11)】

$$R_a \leq \frac{1}{1.2} R_p - R_{nf,\max}$$

$$R_a \leq \sigma_f \cdot A_e - R_{nf,\max}$$

ここに

$R_a$  : 軸方向許容支持力 (kN)

$R_p$  : 杭の先端支持力 (kN)

$R_{nf,\max}$  : 負の周面摩擦の最大値 (kN)

$\sigma_f$  : 杭の降伏点圧縮応力度 又は 長期許容圧縮応力度の1.5倍 (kN/m<sup>2</sup>)

$A_e$  : 杭の有効断面積  $A_e = \pi/4 \cdot (B^2 - B'^2)$  (m<sup>2</sup>)

$B$  : 腐食後の杭径 (m)

$B'$  : 杭の内径 (m)

### 安定検討【港湾基準(H30)】

$$m_1 \frac{R_{ad} + R_{nf,\max}}{R_{pk}} \leq 1.0$$

$$m_2 \frac{(R_{ad} + R_{nf,\max})/A_e}{\sigma_f} \leq 1.0$$

ここに

$R_{ad}$  : 軸方向支持力(常時) (kN)

$m_1 := 1.2$

$R_{pk}$  : 杭の先端抵抗力(極限值) (kN)

$R_{nf,\max d}$  : 負の周面摩擦の最大値の設計用値 (kN)

$m_2 := 1.0$

$\sigma_f$  : 杭の圧縮降伏応力度の特性値 (kN/m<sup>2</sup>)

$A_e$  : 杭の有効断面積 (m<sup>2</sup>)

負の周面摩擦の最大値、杭の先端抵抗力の算定方法は打込鋼管から選択できます。

※日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成11年4月 P446～P447）

※日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成30年5月 P727～P729）

## 打込鋼管

《負の周面摩擦の最大値》

$$R_{nf,max} = \left( \sum 2N_{si}L_i + \sum \frac{q_{ui}L_i}{2} \right) U$$

ここに

$R_{nf,max}$  : 負の周面摩擦の最大値 (kN)

$N_{si}$  : 層内での平均N値

$q_{ui}$  : 層内での平均一軸圧縮応力度(粘性土) (kN/m<sup>2</sup>)

$L_i$  : 層の厚さ (m)

$U$  : 杭の周長 (m)

《杭の先端支持力》

[支持層 : 砂質土地盤]  $R_p = 300\alpha \cdot A_p + 2N_s \cdot L \cdot U$

[支持層 : 粘性土地盤]  $R_p = 8C_p \cdot \alpha \cdot A_p + C_s \cdot L \cdot U$  — 漁港基準、港湾基準(H11)  
 $R_p = 6C_p \cdot \alpha \cdot A_p + C_s \cdot L \cdot U$  — 港湾基準(H30)

$R_p$  : 杭の先端支持力 (kN)

$\alpha$  : 杭の閉塞率

$A_s$  : 杭の先端面積 (m<sup>2</sup>)

$N$  : 杭先端地盤のN値

$C_p$  : 杭先端地盤の粘着力 (kN/m<sup>2</sup>)

$L$  : 杭が支持地盤中に貫入している長さ

$N_s$  : L区間での平均N値 (m)

$C_s$  : L区間での平均粘着力 (kN/m<sup>2</sup>)

$U$  : 杭の周長 (m)

※日本港湾協会, 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (平成11年4月 P446~P447)

※日本港湾協会, 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (平成30年5月 P727~P729)

## 中掘鋼管

《負の周面摩擦の最大値》

$$R_{nf,max} = \left( \sum N_{si} L_i + \sum 0.5 C_{ai} L_i \right) U \quad (0.5 \cdot C_{ai} \leq 100) \quad \text{平成8年道路橋示方書}$$

$$R_{nf,max} = \left( \sum 2N_{si} L_i + \sum 0.8 C_{ai} L_i \right) U \quad (0.8 \cdot C_{ai} \leq 100) \quad \text{平成14年道路橋示方書}$$

$$R_{nf,max} = \left( \sum 2N_{si} L_i + \sum 0.8 C_{ai} L_i \right) U \quad (0.8 \cdot C_{ai} \leq 70) \quad \text{平成29年道路橋示方書}$$

ここに

$R_{nf,max}$  : 負の周面摩擦の最大値 (kN)

$N_{si}$  : 層内での平均N値

$C_{ai}$  : 層内での平均粘着力 (kN/m<sup>2</sup>)

$L_i$  : 層の厚さ (m)

$U$  : 杭の周長 (m)

《杭の先端支持力》

[支持層：砂質土地盤]  $R_p = q_d \cdot A_s + N_s \cdot L \cdot U$  平成8年道路橋示方書

$R_p = q_d \cdot A_s + 2N_s \cdot L \cdot U$  平成14年道路橋示方書

$R_p = q_d \cdot A_s + 2N_s \cdot L \cdot U$  平成29年道路橋示方書

[支持層：粘性土地盤]  $R_p = q_d \cdot A_s + 0.5 C_s \cdot L \cdot U$  平成8年道路橋示方書

$R_p = q_d \cdot A_s + 0.8 C_s \cdot L \cdot U$  平成14年道路橋示方書

$R_p = q_d \cdot A_s + 0.8 C_s \cdot L \cdot U$  平成29年道路橋示方書

ここに

$R_p$  : 杭の先端支持力 (kN)

$q_d$  : 杭先端で支持する単位面積当たりの極限支持力度 (kN/m<sup>2</sup>)

$A_p$  : 杭の先端面積 (m<sup>2</sup>)

$L$  : 杭が支持地盤中に貫入している長さ (m)

$N_s$  : L区間での平均N値

$C_s$  : L区間での平均粘着力 (kN/m<sup>2</sup>)

$U$  : 杭の周長 (m)

※日本道路協会，道路橋示方書・同解説IV下部構造編（平成 8年12月 P330～P338）

※日本道路協会，道路橋示方書・同解説IV下部構造編（平成14年 3月 P355～P362）

## 埋込み杭

### 《負の周面摩擦の最大値》

$$R_{nf,max} = \left( \sum 2 \cdot N_s \cdot L_s + \sum 10 \cdot N_c \cdot L_c \right) \cdot \psi$$

ここに

$R_{nf,max}$  : 負の周面摩擦の最大値

$N_s$  : 杭周地盤中、砂質部分の実測N値の平均

$N_c$  : 杭周地盤中、の粘土部分の実測N値の平均

ただし、実測値のうちN=0は0.5とみなし、またその上限は4.0とする

$L_s$  : 杭周地盤中、砂質部分にある杭の長さ

$L_c$  : 杭周地盤中、粘土部分にある杭の長さ

$\psi$  : 杭の周長

### 《杭の先端支持力》

[支持層：砂質土地盤]  $R_p = 200 \cdot N \cdot \alpha \cdot A_p + 2 \cdot N_s \cdot L \cdot \psi$

[支持層：粘性土地盤]  $R_p = 200 \cdot \eta \cdot \bar{N} \cdot A_p + 10 \cdot N_c \cdot L \cdot \psi$

ここに

$R_a$  : 長期許容支持力(上部構造から荷重と杭の自重の和に対して適用)

$\eta$  : 開端杭の閉塞効力(閉端杭では $\eta = 1$ )

$\bar{N}$  : 先端抵抗N値(杭先端より下 $\sim 1.0d$ ～上 $\sim 4.0d$ の間の実測N値の平均)

$A_p$  : 杭先端の全断面積

$L$  : 杭が支持地盤中に貫入している長さ

$N_s$  : L区間での平均N値

$C_s$  : L区間での平均粘着力

ただし、実測値のうちN=0は0.5とみなし、またその上限は4.0とする

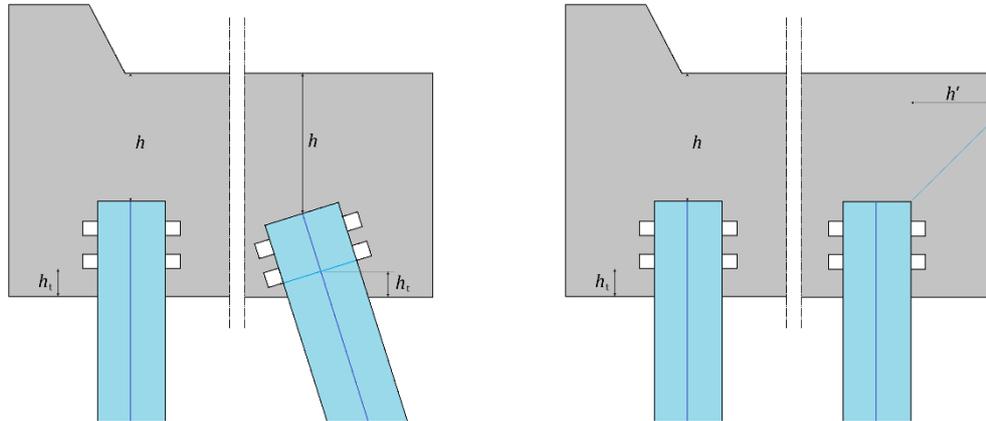
$\psi$  : 杭の周長

※全国漁港協会，漁港構造物の設計ガイド（平成6年度版 P66）

## 2-16. 杭とフーチングの結合計算

### 許容応力度法

斜杭の場合、 $h'$  は直杭と同様の計算をします



#### 1) 押し込み力に対する照査

a. 上部工コンクリートの垂直支圧応力度

$$\sigma_{cv} = \frac{P}{\pi D^2/4} \leq \sigma_{ca}$$

b. 上部工コンクリートの押し抜きせん断応力度

$$\tau_v = \frac{P}{\pi(D+h)h} \leq \tau_a$$

#### 2) 引き抜き力に対する照査

a. 上部工コンクリートの引き抜きせん断応力度

$$\tau_{vt} = \frac{P_t}{\pi(D+h_t)h_t} \leq \tau_a$$

ここに

$\sigma_{cv}$ : 垂直支圧応力度	( $N/mm^2$ )
$\sigma_{ca}$ : コンクリートの許容支圧応力度	( $N/mm^2$ )
$\tau_v$ : 垂直方向の押し抜きせん断応力度	( $N/mm^2$ )
$\tau_{vt}$ : 垂直方向の引き抜きせん断応力度	( $N/mm^2$ )
$\tau_a$ : コンクリートの許容押し抜きせん断応力度	( $N/mm^2$ )
$\tau_{at}$ : コンクリートの許容引き抜きせん断応力度	( $N/mm^2$ )
$P$ : 軸方向押し込み力	( $N$ )
$P_t$ : 軸方向引き抜き力	( $N$ )
$h$ : 垂直方向の押し抜きせん断に抵抗する上部工の有効厚さ	( $mm$ )
$h_t$ : 引き抜きせん断に抵抗する上部工の有効厚さ	( $mm$ )

水平力及びモーメントに対する照査

a. 上部工コンクリートの水平支圧応力度

$$\sigma_{ch} = \frac{H}{Dl} + \frac{6M}{Dl^2} \leq \sigma_{ca}$$

b. 上部工端部の杭に対する水平方向の押し抜きせん断応力度

$$\tau_h = \frac{H}{h'(2l + D + 2h')} \leq \tau_a$$

ここに

$\sigma_{ch}$  : 水平支圧応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{ca}$  : コンクリートの許容支圧応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\tau_h$  : 水平方向の押し抜きせん断応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\tau_a$  : コンクリートの許容押し抜きせん断応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$l$  : 杭の押込み長 (mm)

$D$  : 杭の外径 (mm)

$H$  : 軸直角方向力 (N)

$M$  : モーメント (N・mm)

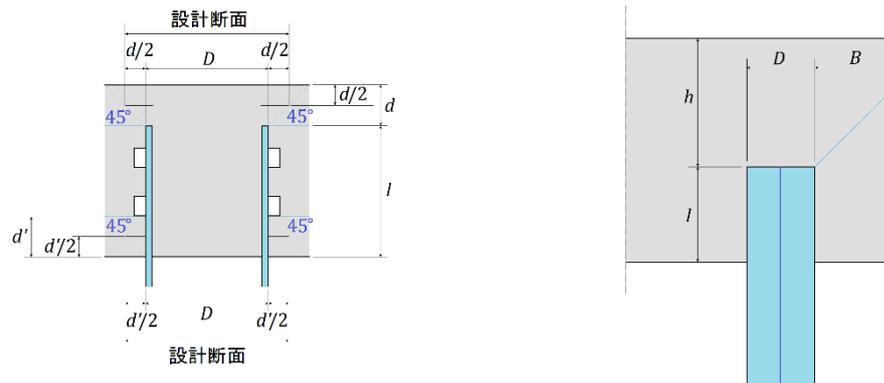
$h$  : 垂直方向の押し抜きせん断に抵抗する上部工の有効厚さ (mm)

$h_t$  : 引き抜きせん断に抵抗する上部工の有効厚さ (mm)

※日本道路協会，杭基礎設計便覧（平成19年1月 P294～P299）

※全国漁港漁場協会，漁港・漁場構造物設計計算例（平成16年 P375）

## 限界状態設計法



### 1) 押し抜き／引き抜きせん断に対する照査

$$\gamma_i \cdot S_d / V_{pcd} \leq 1.0$$

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pcd} \cdot u_p \cdot d / \gamma_b$$

$$f_{pcd} : 0.20 (f'_{cd})^{\frac{1}{2}} \quad (f_{pcd} \leq 1.2)$$

$$\beta_d = (1/d)^{\frac{1}{4}} \quad (\beta_d \leq 1.5) \quad , \quad \beta_p = (100p)^{\frac{1}{3}} \quad (\beta_p \leq 1.5) \quad , \quad \beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u/d)$$

ここに

$\gamma_i$  : 構造物係数

$S_d$  : 最大軸力の設計用値 (kN)

$V_{pcd}$  : 設計押し抜きせん断耐力 (kN)

$\beta_d$  : せん断耐力の有効高さに関する係数

$\beta_p$  : せん断耐力の鉄筋比に関する係数

$\beta_r$  : せん断耐力の載荷面の周長に対する係数

$u$  : 載荷面の周長 (m)

$f'_{cd}$  : コンクリートの圧縮強度の設計用値 ( $N/mm^2$ )

$u_p$  : 設計断面の周長 (m)

最下面から  $d/2$  離れた位置で算定 (m)

$d$  : 二方向の鉄筋に対する平均有効高さ (m)

$p$  : 二方向の鉄筋に対する平均鉄筋比

$\gamma_b$  : 部材係数

※沿岸開発技術研究センター、港湾構造物設計事例集(上巻) (平成11年4月 11-25)

## 2) 押し込み／引き抜き力に対する照査

### 【港湾基準H11】

#### 鋼管杭の場合

$$l \geq \frac{P}{\psi \cdot f_{bod}} \cdot \gamma_b$$

ここに

$l$ : 埋め込み長 (m)

$P$ : 杭に作用する軸方向力の設計用値 (kN)

$\psi$ : 杭の外周長 (m)

$f_{bod}$ : 杭材とコンクリートとの付着強度の設計用値 (kN/m<sup>2</sup>)

$\gamma_b$ : 部材係数

#### H形鋼杭の場合

次の2式を満たすものとする

$$l \geq \frac{P}{\psi \cdot f_{bod}} \cdot \gamma_b \quad (1)$$

$$l \geq \frac{P}{(A f_{vcd} + B f_{bod})} \cdot \gamma_b \quad (2)$$

ここに

$l$ : 埋め込み長 (m)

$P$ : 杭に作用する軸方向力の設計用値 (kN)

$\phi$ : H形鋼杭の外周長  $\phi = 2A + 4B$  (m)

$A$ : ウェブ (m)

$B$ : フランジ (m)

$f_{bod}$ : 杭材とコンクリートとの付着強度の設計用値 (kN/m<sup>2</sup>)

$f_{vcd}$ : 杭材とコンクリートとの付着強度の設計用値 (kN/m<sup>2</sup>)

$\gamma_b$ : 部材係数

※日本港湾協会, 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (平成11年4月 P757)

※沿岸開発技術研究センター, 港湾構造物設計事例集 (平成11年4月 4-28~30)

### 【港湾基準H30】

#### 鋼管杭の場合

$$\gamma_i P_d / P_{ud} \leq 1.0$$

$$P_{ud} = \frac{L\phi f_{bod}}{\gamma_b} + \frac{2A_p f_{bod}}{\gamma_b}$$

ここに

$\gamma_i$ : 構造物係数

$P_d$ : 軸方向力の設計用値 (kN)

$P_{ud}$ : 杭の梁内埋め込み部分で伝達できる軸力 (kN)

$L$ : 鋼管杭の埋め込み長 (m)

$\phi$ : 鋼管杭の外周 (m)

$f_{bod}$ : 杭材とコンクリートの付着強度の設計用値

$$f_{bod} = 0.11 f_{ck}' / \gamma_c$$

$f_{ck}'$ : コンクリートの圧縮強度の特性値

$\gamma_c$ : コンクリートの材料係数

$A_p$ : 縦リブのコンクリートに付着する面積 (m<sup>2</sup>)

$\gamma_b$ : 部材係数

#### H形鋼杭の場合

次の2式を満たすものとする

$$\gamma_i P_d / P_{ud} \leq 1.0$$

$$P_{ud} = \frac{L\phi f_{bod}}{\gamma_b} + \frac{2A_p f_{bod}}{\gamma_b} \quad (1)$$

$$P_{ud} = \frac{L(Af_{vcd} + Bf_{bod})}{\gamma_b} + \frac{2A_p f_{bod}}{\gamma_b} \quad (2)$$

ここに

$l$ : 埋め込み長 (m)

$P$ : 杭に作用する軸方向力の設計用値 (kN)

$\phi$ : H形鋼杭の外周長  $\phi \doteq 2A + 4B$  (m)

$A$ : ウェブ (m)

$B$ : フランジ (m)

$f_{bod}$ : 杭材とコンクリートとの付着強度の設計用値 (kN/m<sup>2</sup>)

$f_{bod}$ : 杭材とコンクリートとの付着強度の設計用値 (kN/m<sup>2</sup>)

$\gamma_b$ : 部材係数

※日本港湾協会, 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (平成19年7月 P1129)

※日本港湾協会, 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (平成11年4月 P757)

### 3) 曲げモーメントに対する照査

#### 【港湾基準H11】

$$l \geq \sqrt{\frac{6 \cdot M}{D \cdot f_{ad}}} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_i$$

ここに

$l$ : 埋め込み長 (m)

$M$ : 杭頭拘束モーメント (kN・m)

$D$ : 杭幅又は杭の直径 (m)

$f_{ad}$ : 上部工コンクリートの支圧強度の設計用値

$\gamma_b$ : 部材係数

$\gamma_i$ : 構造物係数

※沿岸開発技術研究センター，港湾構造物設計事例集（平成11年4月 4-28～30）

#### 【港湾基準H30】

$$\gamma_i M_d / M_{ud} \leq 1.0$$

$$M_{ud} = \frac{DL^2 f'_d}{6\gamma_b}$$

ここに

$\gamma_i$ : 構造物係数

$M_d$ : 曲げモーメントの設計用値 (kN・m)

$M_{ud}$ : 杭の梁内埋め込み部分で伝達できる曲げモーメント (kN・m)

$D$ : 鋼管杭の直径 (m)

$L$ : 鋼管杭の埋め込み長 (m)

$f'_d$ : 梁コンクリート強度の設計用値

$\gamma_b$ : 部材係数

※日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成30年5月 P1218）

4) フーチング端部の杭に対する水平方向の押し抜きせん断に対する照査

【港湾基準H11】

$$\tau_h = \frac{H}{B \cdot (2l + D + 2B)} \leq f_{pcd} / \gamma_b$$

ここに

$\tau_h$ : 水平方向の押し抜きせん断応力度

$f_{pcd}$ : 上部工コンクリートの押し抜きせん断強度の設計用値

$l$ : 埋め込み長 (m)

$D$ : 杭幅又は杭の直径 (m)

$B$ : 水平方向押し抜きせん断に対する有効縁端距離 (m)

$H$ : 杭軸直角方向力 (kN)

$\gamma_b$ : 部材係数

※日本道路協会, 杭基礎設計便覧 (平成19年1月 P298~P299)

※沿岸開発技術研究センター, 港湾構造物設計事例集 (平成11年4月 4-28~30)

【港湾基準H30】

$$\gamma_i V_d / V_{pcd} \leq 1.0$$

$$V_{pcd} = 0.2 (f'_{cd})^{\frac{1}{2}} \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot A_\tau / \gamma_b$$

ここに

$\gamma_i$ : 構造物係数

$V_d$ : せん断力の設計用値 (kN)

$V_{pcd}$ : 水平方向の押し抜きせん断耐力の設計用値 (kN)

$f'_{cd}$ : コンクリートの設計圧縮強度

$\beta_d$ :  $(1/d)^{\frac{1}{4}}$  ( $\beta_d \leq 1.5$ )

$\beta_p$ :  $(100p)^{\frac{1}{3}}$  ( $\beta_p \leq 1.5$ )

$\beta_r$ : 1.0

$d$ : 法線平行方向、法線直角方向の有効高さの平均値

$p_w$ : 法線平行方向、法線直角方向の鉄筋比の平均値

$A_\tau$ : せん断抵抗面積

$\gamma_b$ : 部材係数

## 2-17. 性能照査に用いる部分係数

既に港湾の施設の技術上の基準・同解説では、H19年版より構造物の照査方法が、許容応力度法によるものから材料係数アプローチによるレベル1信頼性設計法に基づく方法（以下、部分係数法）に変更となっています。

H30年版では、部分係数の考え方が荷重抵抗係数アプローチに変更になりました。一般に部分係数が作用していない値を特性値と呼び、部分係数が作用した値を設計用値と呼びます。

※ 基準には、たわみ曲線法での照査に用いる部分係数は示されていません。そのため、たわみ曲線法での矢板壁の根入れ長・応力照査については「過去の経験に基づく方法」（過去の適用事例が多く、十分に実績のある、安全率法や許容応力度法）に順ずるものとして、部分係数を便宜上1.0とした上で、調整係数を安全率等に見立てて照査することを前提として初期値を設定しています。

※日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成30年5月 P27、1124）

### 矢板壁の根入れ長照査

照査対象	土層構成	抵抗項に 乗じる 部分係数	荷重項に 乗じる 部分係数	調整係数 m
フリーアースサポート法による 矢板の根入れ長 (永続状態)	砂質土地盤	0.72	1.09	— (1.00)
	粘性土が 含まれる場合	0.77	1.11	
フリーアースサポート法による 矢板の根入れ長 (レベル1地震動に対する変動状態)	全ての 土層構成	— (1.00)	— (1.00)	1.20

※日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成30年5月 P1099）

### 矢板壁の応力照査

照査対象	抵抗項に 乗じる 部分係数	荷重項に 乗じる 部分係数	調整係数 m
矢板壁の応力 (永続状態)	0.84	1.18	— (1.00)
矢板壁の応力 (レベル1地震動に対する変動状態)	— (1.00)	— (1.00)	1.12

※日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成30年5月 P1104）

### タイ材の応力照査

照査対象	抵抗項に 乗じる 部分係数	荷重項に 乗じる 部分係数	調整係数 m
タイ材の応力 (永続状態)	0.64	1.29	— (1.00)
タイ材の応力 (レベル1地震動に対する変動状態)	— (1.00)	— (1.00)	1.67

※日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成30年5月 P1105）

### 腹起しの応力照査

照査対象	抵抗項に 乗じる 部分係数	荷重項に 乗じる 部分係数	調整係数 m
腹起しの応力 (永続状態)	— (1.00)	— (1.00)	1.67
腹起しの応力 (レベル1地震動に対する変動状態)	— (1.00)	— (1.00)	1.12

※日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成30年5月 P1107）

### 壁体の滑動の性能照査

照査対象	抵抗項に 乗じる 部分係数	荷重項に 乗じる 部分係数	調整係数 m
壁体の滑動 (永続状態)	0.87	1.06	— (1.00)
壁体の滑動 (レベル1地震動に対する変動状態)	— (1.00)	— (1.00)	1.00

※日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成30年5月 P1071）

### 壁体の転倒の性能照査

照査対象	抵抗項に 乗じる 部分係数	荷重項に 乗じる 部分係数	調整係数 m
壁体の転倒 (永続状態)	0.99	1.23	— (1.00)
壁体の転倒 (レベル1地震動に対する変動状態)	— (1.00)	— (1.00)	1.10

※日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成30年5月 P1073）

### 杭の応力照査

照査対象	抵抗項に 乗じる 部分係数	荷重項に 乗じる 部分係数	調整係数 m
杭の応力 (永続状態)	— (1.00)	— (1.00)	1.67
杭の応力 (レベル1地震動に対する変動状態)	— (1.00)	— (1.00)	1.12

※日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成30年5月 P1110）

### 杭の支持力照査

照査対象	杭の種類	抵抗項に 乗じる 部分係数	荷重項に 乗じる 部分係数	調整係数 m
杭の支持力 (永続状態)	引抜杭	1.00	1.00	3.00
	押込杭	1.00	1.00	2.50
杭の支持力 (レベル1地震動に対する変動状態)	引抜杭	1.00	1.00	2.50
	押込杭	1.00	1.00	1.50

※日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成30年5月 P1111）

### 3. 補足資料

#### 3-1. 参考文献

準拠基準及び参考文献は以下の通りです。

- |                    |          |              |
|--------------------|----------|--------------|
| ・ 港湾の施設の技術上の基準・同解説 | 平成30年 5月 | 日本港湾協会       |
|                    | 平成11年 4月 | 日本港湾協会       |
| ・ 港湾構造物設計事例集       | 平成11年 4月 | 沿岸開発技術研究センター |
| ・ 漁港の技術指針          | 1999年版   | 全国漁港協会       |
| ・ 漁港・漁場の施設の設計参考図書  | 2015年版   | 水産庁          |
| ・ 道路橋示方書 IV下部構造編   | 平成 8年12月 | 日本道路協会       |
|                    | 平成14年 4月 | 日本道路協会       |
|                    | 平成24年 9月 | 日本道路協会       |
|                    | 平成29年11月 | 日本道路協会       |
| ・ SI単位系移行に関する参考資料  | 平成10年 7月 | 日本道路協会       |
| ・ 杭基礎設計便覧          | 平成 4年10月 | 日本道路協会       |
|                    | 平成18年 1月 | 日本道路協会       |