

港湾設計業務シリーズ

# 鋼管式防波堤4

Ver 1.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
2. 機能説明	2
2-1. 波圧式について	2
波長の算定	2
波圧算定方法について	3
合田式	6
黒田／広井式	8
黒田／広井式（砕波の場合）	10
沿い波	10
波圧の形状	11
2-2. 揚圧力について	14
2-3. 動水圧について	14
2-4. 断面性能について	15
2-5. 杭の反力について	17
変位法	17
各杭の等価節点力（杭軸座標系）	21
原点に作用する等価節点力（全体座標系）	21
原点変位（全体座標系）	22
各杭頭の変位（杭軸座標系）	22
各杭頭の断面力（杭軸座標系）	22
フレーム計算	23
チャンの方法	24
港研方式	26
杭の軸方向バネ定数	29
平成24年道路橋示方書	29
平成29年道路橋示方書【変位法】	31
平成29年道路橋示方書【フレーム計算】	32
水平方向地盤反力係数の算定方法	33
2-6. 杭の応力について	35
杭の応力照査【漁港基準、港湾基準(H11)】	35
杭の応力照査【港湾基準(H30)】	36
2-7. 補強・補修について	37
コンクリート被覆【許容応力度法】	37
スタッドの設計【許容応力度法】	38
コンクリート被覆【限界状態設計法】	39
スタッドの設計【限界状態設計法】	41
鉄板被覆の検討（応力照査）【漁港基準、港湾基準(H11)】	42
溶接強度の設定【漁港基準、港湾基準(H11)】	42
鉄板被覆の検討（応力照査）【港湾基準(H30)】	43
溶接強度の設定【港湾基準(H30)】	44
2-8. 根入れ長の検討	45
地盤が一様とみなせる場合	45
地盤の性質が著しく変化する場合	45
2-9. 支持力について	46
打込鋼管	47
中堀鋼管（平成24年道路橋示方書）	49
中堀鋼管（平成29年道路橋示方書）	52
埋込み杭	54

## 目次

2-10. 負の周面摩擦について	55
安定検討【漁港基準、港湾基準(H11)】	55
安定検討【港湾基準(H30)】	55
打込鋼管	56
中掘鋼管	57
埋込み杭	58
2-11. 杭頭部の結合計算について	59
許容応力度法	59
押抜きせん断／引抜きせん断に対する照査	59
軸方向力に対する照査	60
杭頭モーメントに対する照査	60
水平力及びモーメントに対する照査	60
限界状態設計法	61
押抜きせん断／引抜きせん断に対する照査	61
軸方向力に対する照査【港湾基準(H11)】	62
軸方向力に対する照査【港湾基準(H30)】	63
杭頭モーメントに対する照査【港湾基準H11】	64
杭頭モーメントに対する照査【港湾基準H30】	64
水平方向による押し抜きせん断に対する照査【港湾基準H11】	65
水平方向による押し抜きせん断に対する照査【港湾基準H30】	65
2-12. カーテン版の断面計算について	66
カーテン版断面計算【許容応力度法】	66
カーテン版断面計算【限界状態設計法】	67
カーテン版-終局限界状態	67
カーテン版-使用限界状態	68
カーテン版-疲労限界状態	69
杭継手溶接部【限界状態設計法】	72
杭継手溶接部-疲労限界状態	72
2-13. 設計震度の算定	73
加速度応答スペクトルの算定	74
固有周期の算定	75
2-14. H30年港湾基準の照査方法について	76
杭の応力照査	76
杭の支持力照査	76
杭の負の周面摩擦照査	76
3. 補足資料	77
3-1. 参考文献	77

# 1. 概要

## 1-1. システムの特長

本システムは、港湾構造物の中の1つである「カーテンウォール式防波堤」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。

計算外力として、波圧、揚圧力、動水圧、上部工自重／浮力、カーテン版重量が考慮でき、杭の反力／応力、支持力、負の周面摩擦、杭頭部の結合計算、カーテン版の断面計算が可能です。

本システムには以下のような特長があります。

- ・ 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。
- ・ 地震波形から加速度応答スペクトルを算出し、栈橋の固有周期から設計震度を算定します。
- ・ 検討潮位は最大4潮位扱えます。(H.W.L、L.W.L、H.H.W.L、任意潮位)
- ・ 波圧式は、合田式、黒田／広井式(重複波、碎波)の選択が可能です。また、引き波時の検討も可能です。
- ・ 潮位毎に揚圧力の計算が可能です。
- ・ 上部工は断面形状が任意のものを扱えます。
- ・ 上部工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。
- ・ 杭基礎の計算は変位法またはフレーム計算を用いています。斜杭の場合、斜角によるK値の補正は自動的に行います。
- ・ 自立鋼管式防波堤で単杭を計算する場合はチャンの方法または港研方式(C型地盤、S型地盤)も計算できます。
- ・ 杭計算には還元法(伝達マトリクス法)を使用しているため、地層変化による影響、有限長の計算を正しく行います。
- ・ 腐食速度と耐用年数から腐食後の断面性能を自動計算します。また、地中部の防食も考慮できます。
- ・ 杭の断面変化(継手)を考慮できます。
- ・ 地盤反力係数(Kh)を指定したN値から自動計算します。また、直接入力も可能です。
- ・ 杭の支持力計算(打込鋼管、中掘鋼管、埋込み杭)、負の周面摩擦の計算が可能です。
- ・ 杭頭部の結合計算、カーテン版の断面計算ができます。
- ・ 報告書の印刷イメージを画面表示し確認することができます。
- ・ 報告書の一括印刷、章別の印刷、指定ページの印刷ができます。文字サイズの変更も可能です。

## 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
- ・ 上部工構成点数最大20点
- ・ その他外力データ数波圧時、地震時各1つ

## 2. 機能説明

### 2-1. 波圧式について

#### 波長の算定

本システムでは、波長を計算で求めるか、あるいは直接入力するか選択できるようになっています。計算で波長を求める場合、入力データとして与えられた周期と水深から波長を計算します。波長を求める水深は、プログラムのスイッチにより選択可能となっています。

波長を計算する式は以下のようになっています。

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L}$$

ここに

$L$  : 波長 (m)

$T$  : 周期 (s)

$h$  : 水深 (m)

$g$  : 重力加速度 ( $m/s^2$ )

解法

$$L_0 = T\sqrt{gh}$$

$$L_{n+1} = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L_n}$$

$L_{n+1} \doteq L_n$ となったときが解となる

※土木学会，水理公式集（平成11年版 P458）

## 波圧算定方法について

### 1) 波高

合田式

最高波高が砕波の影響を受けない場合

$$H_D = H_{\max} = 1.8H_{1/3}$$

ここに

$H_{1/3}$  : 直立壁前面水深における進行波としての有義波高 (m)

最高波高が砕波の影響を受ける場合

$$H_D = (\text{不規則波の砕波変形を考慮した } H_{\max})$$

ただし、この場合の最高波高は直立壁前面から $H_{1/3}$ だけ沖側に離れた地点での水深  $h_b$ に対する値を用いる

黒田式／広井式（森平式）

検討スイッチで黒田式／広井式（森平式）を選択した場合、重複波・砕波の判定はプログラム内部で行います。漁港基準に関しては、波高の区別がされていませんが、本プログラムでは、有義波高の項目の値を使用します。その場合に使用する波高は以下の通りです。

（港湾基準）  $H_{1/3}$  : 直立壁前面水深における進行波としての有義波高 (m)

（漁港基準）  $H$  : 堤体前面の波高 (m)

設計計算に使用する波高は以下の通りです。本システムでは、波高の項目の値を使用します。

（港湾基準） [黒田式]  $H_D$  : 壁体設置位置における進行波としての有義波高 (m)

[広井式]  $H_D$  : 壁体設置位置における進行波としての有義波高 (m)

（漁港基準） [黒田式]  $H$  : 壁体設置位置における進行波としての有義波高 (m)

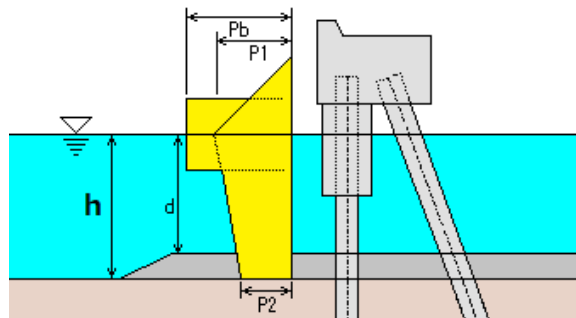
[広井式]  $H$  : 直立壁前面から5波高分沖までの区間の最大波高 (m)

沿い波

検討スイッチで沿い波を選択した場合、沿い波の検討を行いますが、引き波を作用させた場合、波の谷の検討は黒田／広井式（森平式）になります。

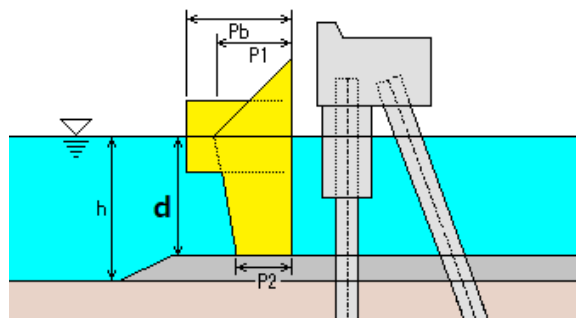
## 2) 水深

マウンドを無視、仮想海底面まで作用



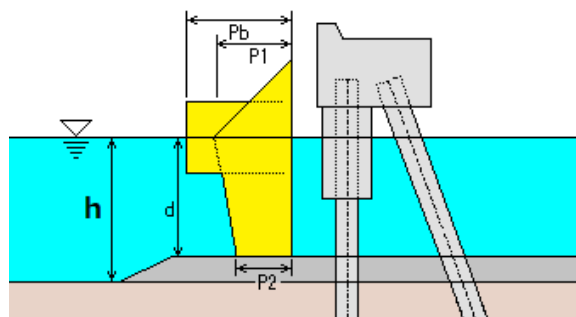
波長の計算、波圧算定式 → 水深  $h$  を使用

マウンド天端上まで作用（水深  $d$  を使用）



波長の計算、波圧算定式 → 水深  $d$  を使用

マウンド天端上まで作用（水深  $h$  を使用）



波長の計算、波圧算定式 → 水深  $h$  を使用

選択される構造物に対して波圧作用範囲は次のようになります。

波圧算定式	カーテンウォール式防波堤	自立鋼管式防波堤
合田式	波圧作用範囲の変更はありません	マウンドを無視、仮想海底面まで作用 マウンド天端上まで作用（水深 $h$ を使用）
黒田/ 広井式	マウンドを無視、仮想海底面まで作用 マウンド天端上まで作用（水深 $d$ を使用）	マウンドを無視、仮想海底面まで作用 マウンド天端上まで作用（水深 $d$ を使用） マウンド天端上まで作用（水深 $h$ を使用）
沿い波	波圧作用範囲の変更はありません	マウンドを無視、仮想海底面まで作用 マウンド天端上まで作用（水深 $h$ を使用）



### 3) 波圧算定式

波圧算定式として、黒田／広井式を選択した場合、重複波/碎波の判定は自動で行います。

(港湾基準)  $d/H_{1/3} \geq 2$  : 重複波の場合 黒田式を使用

$d/H_{1/3} < 2$  : 碎波の場合 広井式を使用

(漁港基準)  $h > 2H$  : 重複波の場合 黒田式を使用

$h \leq 2H$  : 碎波の場合 広井式を使用

## 合田式

波の山の場合

港湾基準

$$\eta^* = 0.75(1 + \cos \beta) \lambda_1 H_D$$

$$p_1 = 0.5(1 + \cos \beta) (\alpha_1 \lambda_1 + \alpha_2 \lambda_2 \cos^2 \beta) \rho_0 g H_D$$

$$p_2 = \frac{p_1}{\cosh(2\pi h/L)}$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1$$

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[ \frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right]^2$$

$$\alpha_2 = \min \left[ \frac{h_b - d}{3h_b} \left( \frac{H_D}{d} \right), \frac{2d}{H_D} \right]$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left[ 1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \right]$$

漁港基準

$$\eta^* = 0.75(1 + \cos \beta) \lambda_1 \lambda_0 H$$

$$p_1 = 0.5(1 + \cos \beta) (\alpha_1 \lambda_1 + \alpha_2 \lambda_2 \cos^2 \beta) \rho_0 g \lambda_0 H$$

$$p_2 = \frac{p_1}{\cosh(2\pi h/L)}$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1$$

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[ \frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right]^2$$

$$\alpha_2 = \min \left[ \frac{h_b - d}{3h_b} \left( \frac{\lambda_0 H}{d} \right), \frac{2d}{\lambda_0 H} \right]$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left[ 1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \right]$$

ここに

- $\eta^*$  : 静水面上波圧強度が0となる高さ (m)
- $p_1$  : 静水面における波圧強度 (kN/m<sup>2</sup>)
- $p_2$  : 海底面における波圧強度 (kN/m<sup>2</sup>)
- $p_3$  : 直立壁底面における波圧強度 (kN/m<sup>2</sup>)
- $h$  : 直立壁前面における水深 (m)
- $h_b$  : 直立壁前面から沖側へ有義波高の5倍だけ離れた地点での水深 (m)
- $d$  : 根固め工またはマウンド被覆工天端のいずれか小さい方の水深 (m)
- $\rho_0$  : 海水の密度
- $g$  : 重力加速度(9.8m/s<sup>2</sup>)
- $H_D, H$  : 設計計算に用いる波高 (m)
- $L$  : 水深 $h$ における設計計算に用いる波長 (m)
- $\beta$  : 直立壁法面の垂線と波の主方向から±15°の範囲で最も危険な方向となす角度 (度)
- $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$  : 波圧の補正係数

波の谷の場合

港湾基準

$$p = 0.5 \rho_0 g H_D$$

ここに

- $p$  : 一様分布における波圧強度 (kN/m<sup>2</sup>)
- $\rho_0$  : 海水の密度(=1.03t/m<sup>3</sup>)
- $g$  : 重力加速度(=9.81m/s<sup>2</sup>)
- $H_D, H$  : 設計計算に用いる波高 (m)

漁港基準

$$p = 0.5 \rho_0 g \lambda_0 H$$

## 漁港基準

水深 $h$ 、換算沖波波高 $H_0'$ より求められる補正係数 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ を用いることができる。

$$\lambda_1 = \begin{cases} 0.4(h/H_0') + 1.0 & (0 \leq h/H_0' \leq 1.0) \\ -0.4(h/H_0') + 1.8 & (1.0 \leq h/H_0' \leq 2.0) \\ 1.0 & (h/H_0' > 2.0) \end{cases}$$
$$\lambda_2 = 1.0$$

消波ブロックを十分に被覆した場合、直立壁に作用する波力の波圧式を用い、以下の補正係数 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ を用いることができる。

$$\lambda_1 = \begin{cases} 1.0 & (0 \leq h/H_0' \leq 1.0) \\ -0.2(h/H_0') + 1.2 & (1.0 \leq h/H_0' \leq 2.0) \\ 0.8 & (2.0 \leq h/H_0' \leq 3.0) \\ 0.08(h/H_0') + 0.56 & (3.0 \leq h/H_0' \leq 5.5) \\ 1.0 & (h/H_0' > 5.5) \end{cases}$$
$$\lambda_2 = 0.0$$

※日本港湾協会、港湾の施設の技術上の基準・同解説 上巻（平成30年5月 P189～194）  
※全国漁港漁場協会、漁港・漁場の施設の設計参考図書（2015年版 P84～P87）

## 黒田／広井式

### 1) 港湾基準

静水面の上下  $0 \sim H_D/2$  の範囲

$$p_b = 1.5w_0H_D \cos^2 \beta$$

ここに

$p_b$  : 砕波による波圧強度  $(kN/m^2)$

$w_0$  : 海水の単位体積重量  $(kN/m^3)$

$H_D$  : 設計計算に用いる波高  $(m)$

$\beta$  : 構造物法線と波の主方向から  $\pm 15^\circ$  の範囲内で最も危険な方向となす角度 (度)

静水面上  $H_D/2$  以上及び静水面下  $H_D/2$  以下の範囲

$$p_1 = (p_2 + w_0h) \left( \frac{H_D + \delta_0}{h + H_D + \delta_0} \right)$$

$$p_2 = \frac{w_0H_D}{\cosh(2\pi h/L)}$$

$$\delta_0 = \frac{\pi H_D^2}{L} \coth \frac{2\pi h}{L}$$

ここに

$p_1$  : 壁面に波の峰があるときの静水面における波圧強度  $(kN/m^2)$

$p_2$  : 壁体下端における波圧強度  $(kN/m^2)$

$w_0$  : 海水の単位体積重量  $(kN/m^3)$

$\delta_0$  : 砕壁面における波高中分面の静水面上の高さ  $(m)$

$h$  : 壁体前面の水深  $(m)$

$H_D$  : 設計計算に用いる波高  $(m)$

$L$  : 水深  $h$  における波長  $(m)$

※日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成元年6月 P123）

## 2) 漁港基準

静水面の上下  $0 \sim H_0/2$  の範囲

$$p_b = 1.5wH$$

ここに

$$p_b : \text{砕波による波圧強度} \quad (kN/m^2)$$

$$w : \text{海水の単位体積重量} \quad (kN/m^3)$$

$$H : \text{壁体設置位置における進行波としての波高} \quad (m)$$

静水面上  $H_0/2$  以上及び静水面下  $H_0/2$  以下の範囲

$$p_1 = (p_2 + wh) \left( \frac{H + \delta_0}{h + H + \delta_0} \right)$$

$$p_2 = \frac{wH}{\cosh(2\pi h/L)}$$

$$\delta_0 = \frac{\pi H^2}{L} \coth \frac{2\pi h}{L}$$

ここに

$$p_1 : \text{壁面に波の峰があるときの静水面における波圧強度} \quad (kN/m^2)$$

$$p_2 : \text{壁体下端における波圧強度} \quad (kN/m^2)$$

$$w : \text{海水の単位体積重量} \quad (kN/m^3)$$

$$\delta_0 : \text{砕壁面における波高中分面の静水面上の高さ} \quad (m)$$

$$h : \text{壁体前面の水深} \quad (m)$$

$$H : \text{壁体設置位置における進行波としての波高} \quad (m)$$

$$L : \text{水深}h\text{における波長} \quad (m)$$

※全国漁港漁場協会、漁港・漁場の施設の設計の手引 [上] (2003年版 P60)

## 黒田／広井式（碎波の場合）

### 1) 港湾基準

$$p_b = 1.5w_0H_D \cos^2 \beta$$

ここに

$p_b$  : 碎波による波圧強度 (kN/m<sup>2</sup>)

$w_0$  : 海水の単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)

$H_D$  : 壁体設置位置における進行波としての波高 (m)

$\beta$  : 構造物法線と波の主方向から±15°の範囲内で最も危険な方向となす角度 (度)

### 2) 漁港基準

$$p_b = 1.5wH \cos^2 \beta \quad (\beta < 45^\circ \text{の場合})$$

$$p_b = 0.75wH \quad (\beta \geq 45^\circ \text{の場合})$$

ここに

$p_b$  : 碎波による波圧強度 (kN/m<sup>2</sup>)

$w$  : 海水の単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)

$H$  : 直立壁前面から5波高分沖までの区間の最大波高 (m)

$\beta$  : 波の主方向と直立壁の法線の垂直となす角度±15°の範囲において直立壁に最も危険な波圧を与える角度 (度)

※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 P123）

※全国漁港漁場協会、漁港・漁場の施設の設計の手引〔上〕（2003年版 P62）

## 沿い波

$$p = 1.0wH$$

ここに

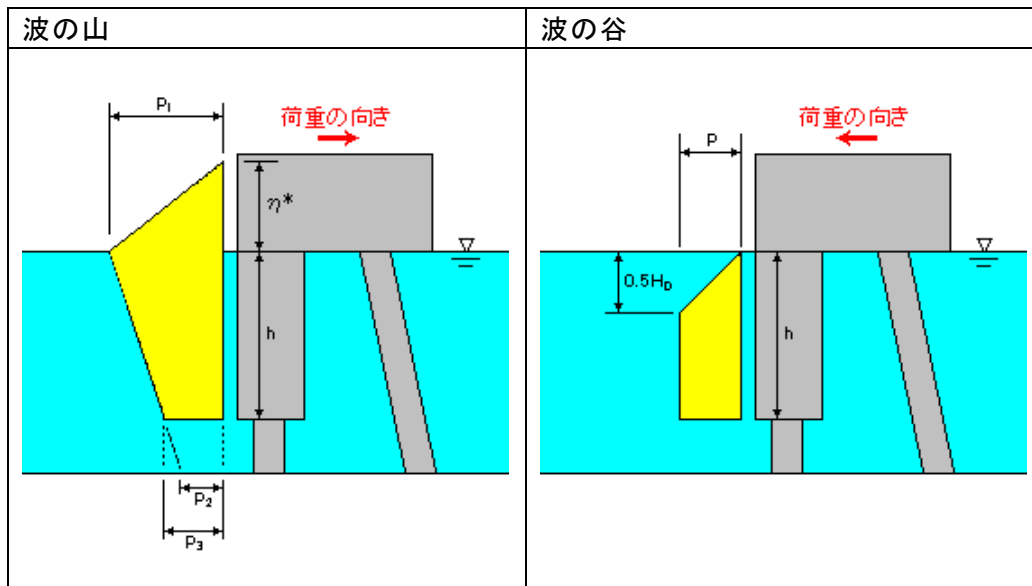
$p$  : 壁体に作用する沿い波の波圧強度 (kN/m<sup>2</sup>)

$w$  : 海水の単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)

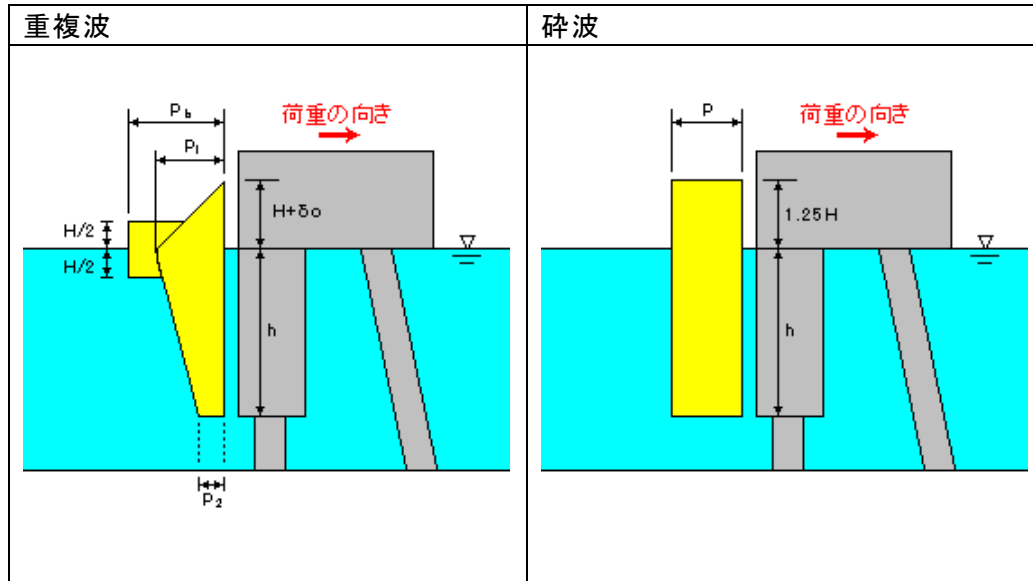
$H$  : 壁体前面における波高 (m)

## 波圧の形状

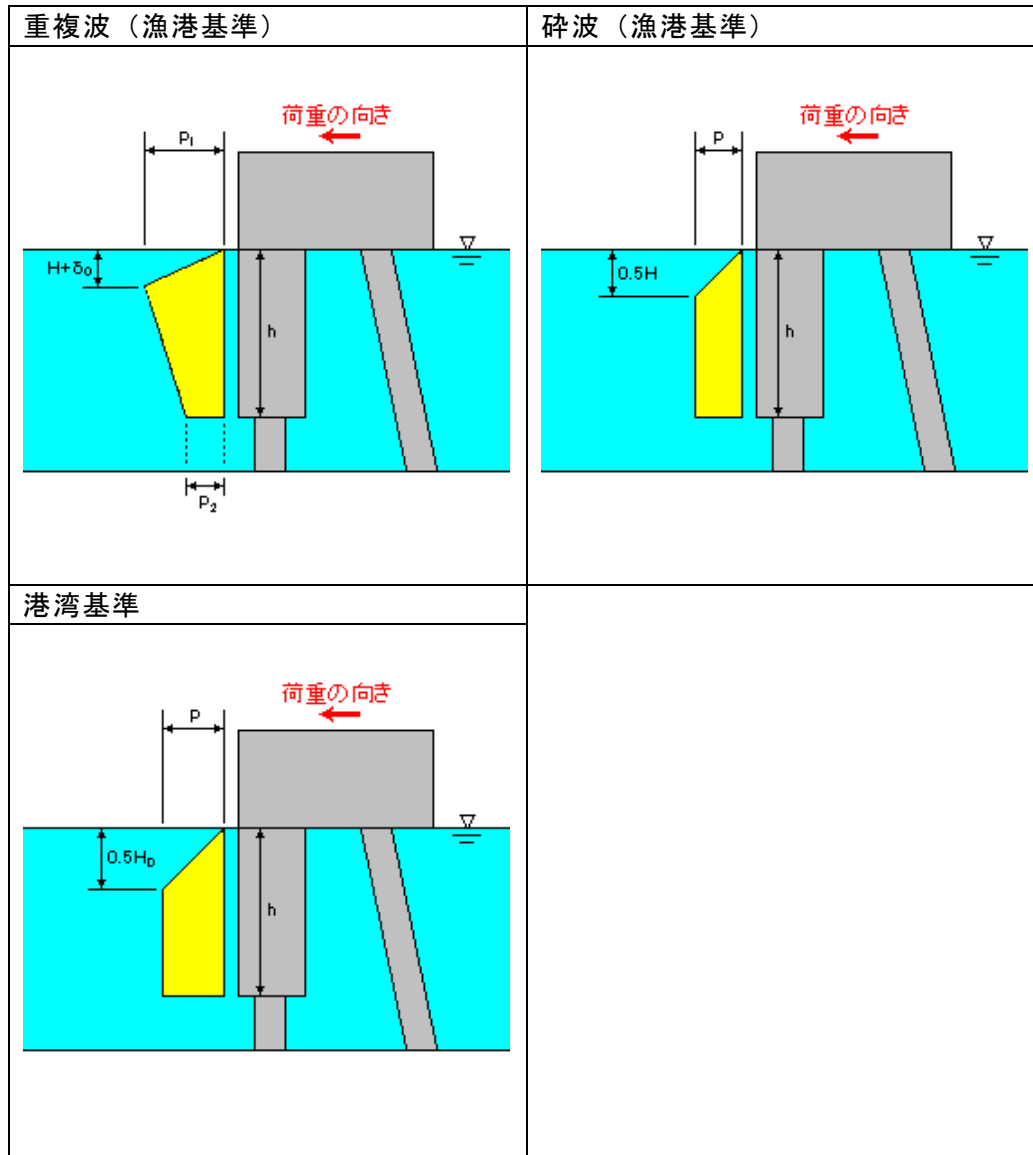
合田式



黒田/広井式（波の山）

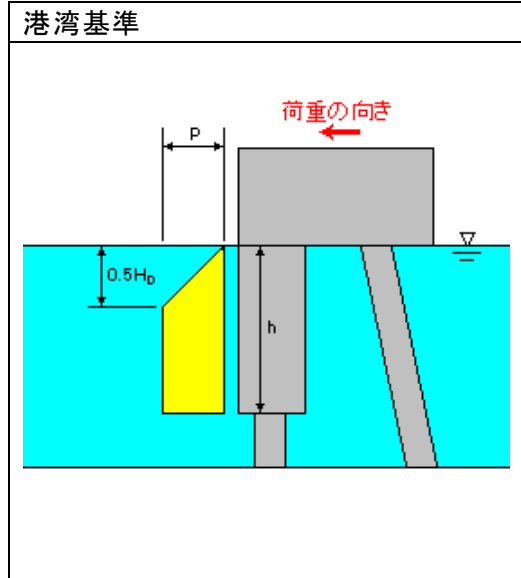


黒田/広井式（波の谷）

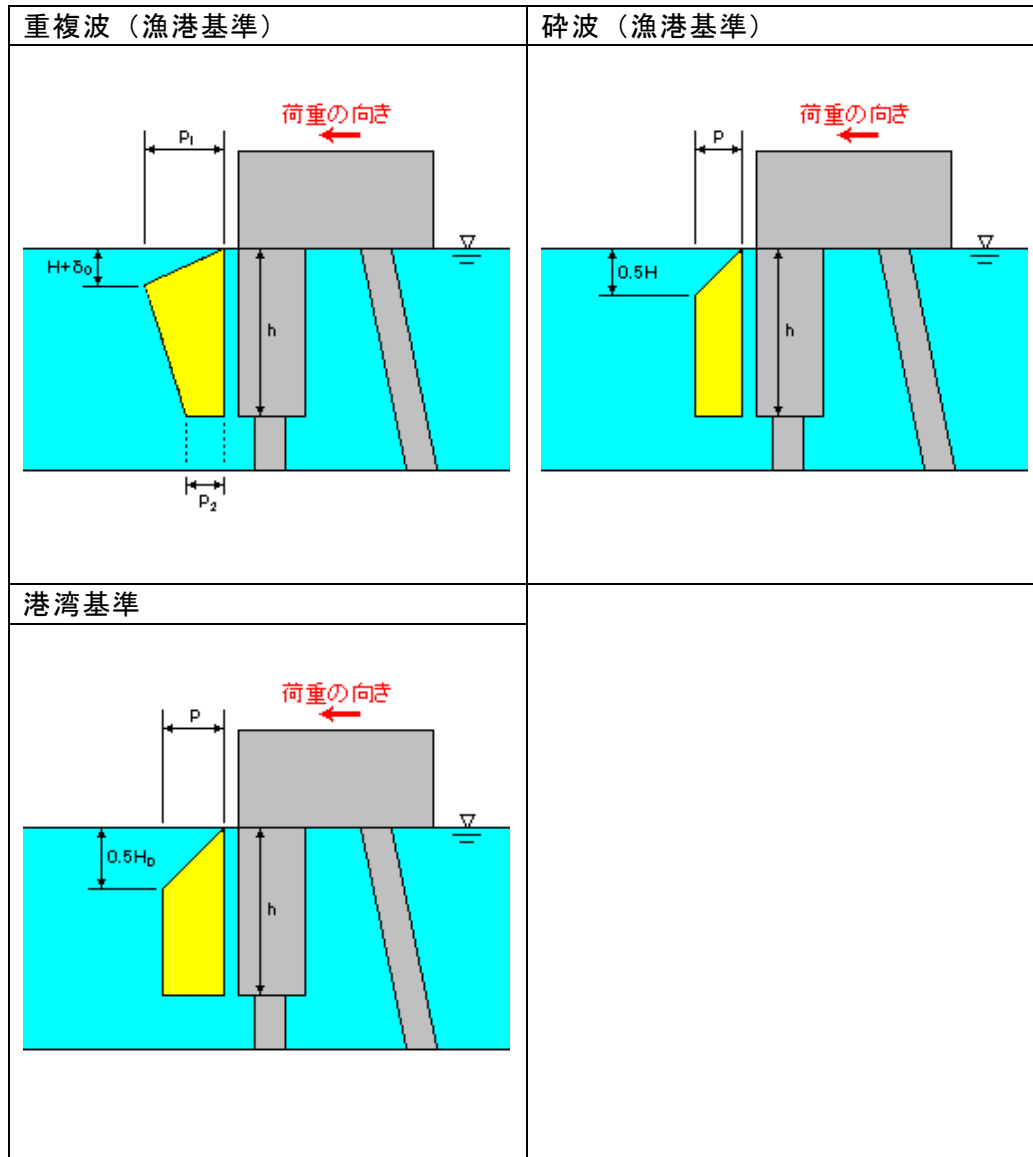




沿い波（波の山）



沿い波（波の谷）



## 2-2. 揚圧力について

本システムでは、港内側からの波による波圧作用時(引き波時)に、揚圧力の検討を行うかどうか選択できます。算定式は次式を使用しています。

$$p_u = 4wH \quad (\text{背後に反射壁がある場合})$$

$$p_u = 2wH \quad (\text{背後に反射壁がない場合})$$

ここに

$$p_u : \text{揚圧力} \quad (kN/m^2)$$

$$w : \text{海水の単位体積重量} \quad (kN/m^3)$$

$$H : \text{入射波高} \quad (m)$$

※全国漁港漁場協会、漁港・漁場の施設の設計の手引 [上] (2003年版 P353、P462)

※日本港湾協会、港湾の施設の技術上の基準・同解説 上巻 (平成30年5月 P236)

## 2-3. 動水圧について

本システムでは、地震時に作用する外力として動水圧を考慮しています。

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

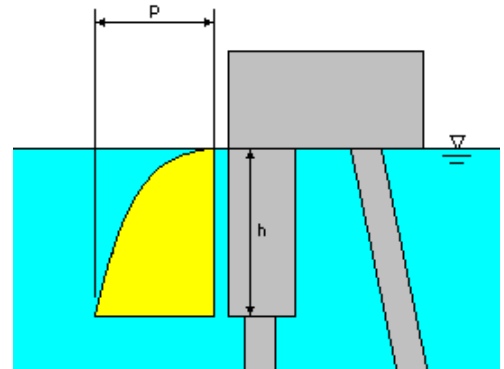
$$p_{dw} : \text{動水圧} \quad (kN/m^2)$$

$$k : \text{設計震度}$$

$$\gamma_w : \text{海水の単位体積重量} \quad (kN/m^3)$$

$$y : \text{水面から動水圧を求める点までの深さ} \quad (m)$$

$$H : \text{直立壁前面における水深} \quad (m)$$



(動水圧合力及び作用点位置)

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

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

ここに

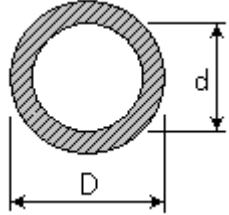
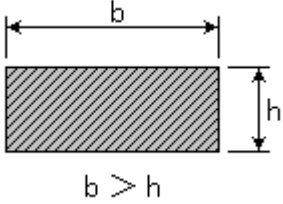
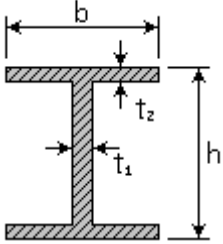
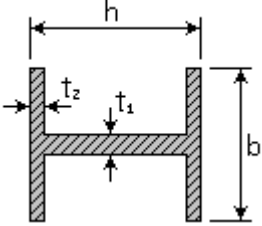
$$p_{dw} : \text{動水圧の合力} \quad (kN/m)$$

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

※日本港湾協会、港湾の施設の技術上の基準・同解説 上巻 (平成30年5月 P359)

## 2-4. 断面性能について

本システムでは骨組構造解析で用いる断面性能については次式を使用しています。

断面形状	断面積 A	断面二次 モーメント I
	$\frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}$	$\frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}$
	$bh$	$\frac{bh^3}{12}$
	$(h - 2t_2)t_1 + 2bt_2$	$2 \left\{ \frac{bt_2^3}{12} + bt_2 \left( \frac{h}{2} - \frac{t_2}{2} \right)^2 \right\} + \frac{t_1(h - 2t_2)^3}{12}$
	$(h - 2t_2)t_1 + 2bt_2$	$\frac{(h - 2t_2)t_1^3}{12} + \frac{t_2b^3}{6}$

鋼管矢板の継手有効間隔Bは直接入力もできますが以下の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)

※土木学会、構造力学公式集(昭和49年12月 P44~P46)

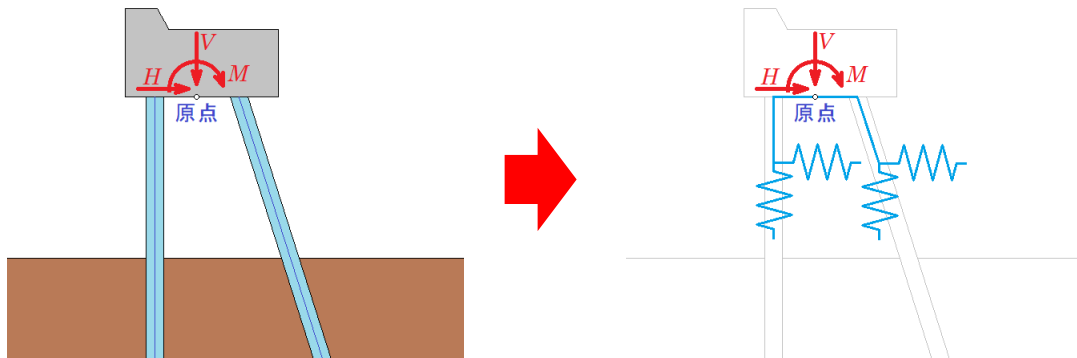
※鋼管杭協会、鋼管杭・鋼管矢板の附属品の標準化(平成14年3月 P22)

## 2-5. 杭の反力について

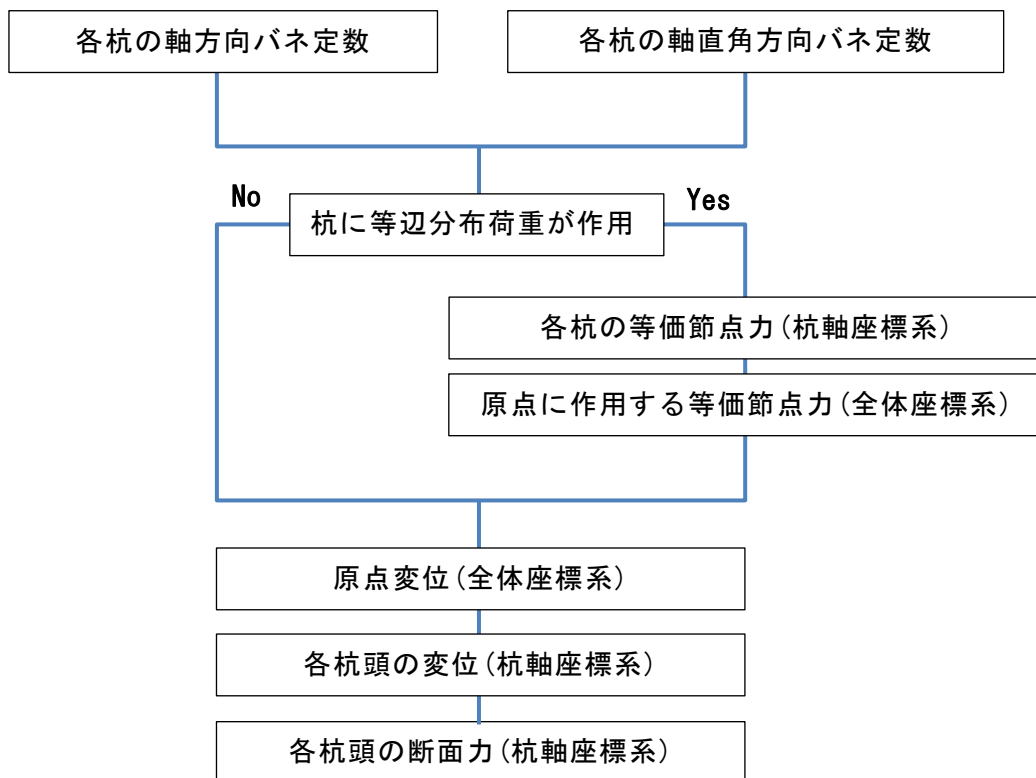
本システムではカーテン式防波堤を選択した場合、「[変位法](#)」「[フレーム計算](#)」から自立鋼管式防波堤を選択した場合、「[変位法](#)」「[フレーム計算](#)」「[チャンの方法](#)」「[C型地盤](#)」「[S型地盤](#)」から計算方法を選択できます。

### 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。



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

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

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

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

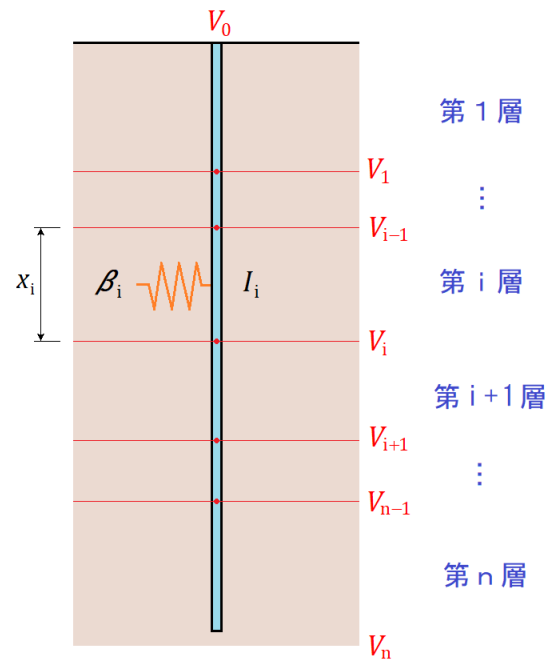
$$\mathfrak{I}_3(\beta_i x_i) = \frac{\sinh \beta_i x_i \sin \beta_i x_i}{2}$$

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

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

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

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



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 ( $kN/m^2$ )

※土木学会, 杭基礎設計便覧 (平成4年10月 P202~P203)

## 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。

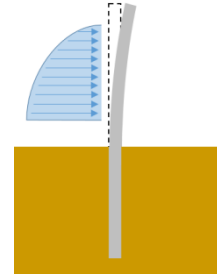
※土木学会，杭基礎設計便覧（平成4年10月 P204）



## 各杭の等価節点力(杭軸座標系)

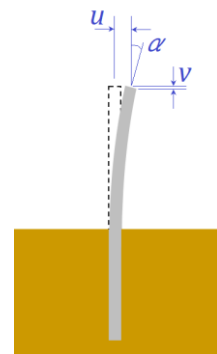
変位法の計算過程において、杭に作用する等辺分布荷重を杭頭に作用する集中荷重(等価節点力)に変換して計算しています。

- ① 杭に作用する等辺分布荷重を材端力に換算



- ② 材端力をもとに杭頭変位を計算

$v_i$ :  $i$ 番目の杭の材端力による杭頭のy軸での変位量 (m)  
 $u_i$ :  $i$ 番目の杭の材端力による杭頭のx軸での変位量 (m)  
 $\alpha_i$ :  $i$ 番目の杭の材端力による回転角 (rad)

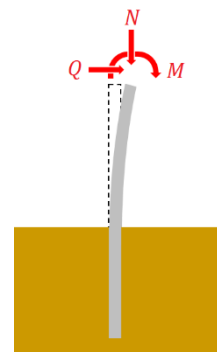


- ③ 軸方向バネ定数と軸直角方向バネ定数と杭頭変位から、杭頭に作用する等価節点力を計算

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

ここに

$N_i^*$ :  $i$ 番目の杭の等価節点力による杭頭の軸方向力 (kN)  
 $Q_i^*$ :  $i$ 番目の杭の等価節点力による杭頭の軸直角方向力 (kN)  
 $M_i^*$ :  $i$ 番目の杭の等価節点力による回転角 (kN・m)

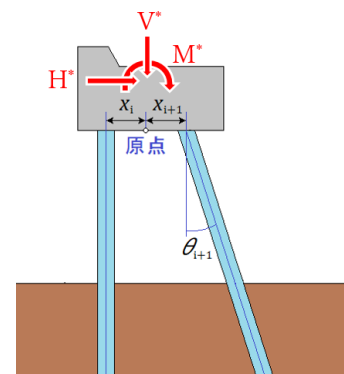


## 原点に作用する等価節点力(全体座標系)

$$\begin{bmatrix} H^* \\ V^* \\ M^* \end{bmatrix} = \sum \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & x_i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i & 0 \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_i^* \\ N_i^* \\ M_i^* \end{bmatrix}$$

ここに

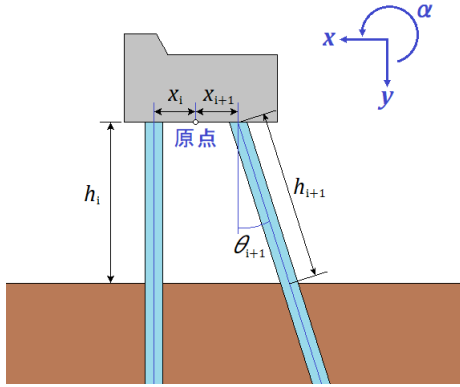
$H^*$ : 各杭の等価節点力による原点に作用する鉛直荷重 (kN)  
 $V^*$ : 各杭の等価節点力による原点に作用する水平荷重 (kN)  
 $M^*$ : 各杭の等価節点力による原点に作用するモーメント (kN・m)  
 $x_i$ :  $i$ 番目の杭の原点を基準とした座標 (m)  
 $\theta_i$ :  $i$ 番目の杭の杭軸が鉛直軸となす角度 (rad)



※全国漁港漁場協会、漁港・漁場の施設の設計の手引き (1999年版 P804~808)

※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 P382)

### 原点変位(全体座標系)



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

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

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)

### 各杭頭の変位(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

- $u_i$ : i番目の杭頭の軸直角方向変位量 (m)
- $v_i$ : i番目の杭頭の軸方向変位量 (m)
- $\alpha_i$ : i番目の杭頭の回転角 (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)

### 各杭頭の断面力(杭軸座標系)

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

ここに

- $N_i$ : i番目の杭頭の軸方向力 (kN)
- $Q_i$ : i番目の杭頭の軸直角方向力 (kN)
- $M_i$ : i番目の杭頭の軸に作用する外力としてのモーメント (kN・m)

## フレーム計算

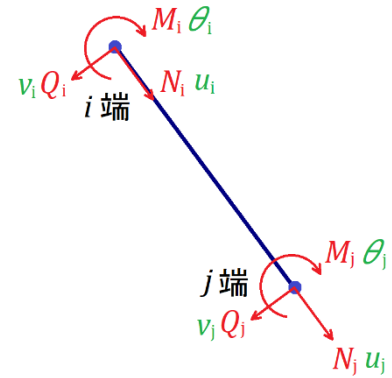
$$F = K\delta$$

XY平面

$$F = (N_i, Q_i, M_i, N_j, Q_j, M_j)^T$$

$$\delta = (u_i, v_i, \theta_i, u_j, v_j, \theta_j)^T$$

$$K = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & 0 & -\frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} & 0 & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} \\ -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} & 0 & \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} & 0 & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} \end{bmatrix}$$



ここに

$F$  : 部材力

$\delta$  : 変位

$K$  : 剛性マトリックス

$N_i, N_j$  : 部材 i 端, j 端に作用する軸力

$Q_i, Q_j$  : 部材 i 端, j 端に作用するせん断力

$M_i, M_j$  : 部材 i 端, j 端に作用する (z 軸回りの) モーメント

$u_i, u_j$  : 部材 i 端, j 端の x 方向の変位

$v_i, v_j$  : 部材 i 端, j 端の y 方向の変位

$\theta_i, \theta_j$  : 部材 i 端, j 端の (z 軸の) 回転角

$E$  : 部材のヤング係数

$A$  : 部材の断面積

$I$  : 部材の断面二次モーメント

$l$  : 部材長

杭が突出部の場合にこの計算方法を用います。

杭が地中部の場合、[杭の軸直角方向のバネ定数](#)を用いて計算を行います。

[杭の軸方向のバネ定数](#)は地中部の軸方向バネ定数を用います。

※土木学会, 構造力学公式集 (昭和49年12月 P73~P93)

## チャンの方法

地上部分： $EI \frac{d^4 y}{dx^4} = 0$  ， 地中部分： $EI \frac{d^4 y}{dx^4} + Dk_h y = 0$

ここに

$EI$  : 杭の曲げ剛性 ( $kN \cdot m^2$ )

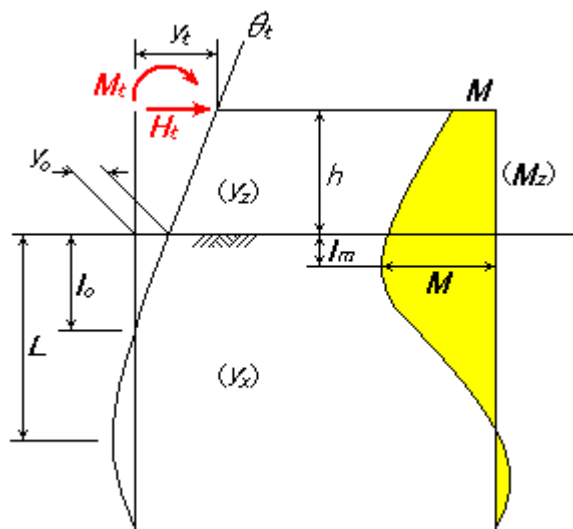
$x$  : 地表面からの深さ ( $m$ )

$y$  : 深さ $x$ における杭の変位 ( $m$ )

$D$  : 杭径 ( $m$ )

$k_h$  : 水平方向地盤反力係数 ( $kN/m^3$ )

$k_h$  = 一定の場合の半無限長の杭の計算



$H_t$  : 杭頭の軸直角方向力 ( $kN$ )

$M_t$  : 杭頭の外力モーメント ( $kN \cdot m$ )

$D$  : 杭径 ( $m$ )

$EI$  : 杭の曲げ剛性 ( $kN/m^2$ )

$k_h$  : 杭の水平方向地盤反力係数 ( $kN/m^3$ )

$h$  : 杭の突出長 ( $m$ )

$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_h D}{4EI}}$  ( $m^{-1}$ )

$h_0 = h + \frac{M_t}{H_t}$  ( $m$ )

たわみ曲線	$y_z = y_t - \theta_t z + \frac{M_t}{2EI} z^2 + \frac{H_t}{6EI} z^3$ $y_x = \frac{H_t}{2EI \beta^3} e^{-\beta x} \{ (1 + \beta h_0) \cos \beta x - \beta h_0 \sin \beta x \}$
杭頭変位	$y_t = \frac{(1 + \beta h)^3 + 1/2}{3EI \beta^3} H_t + \frac{(1 + \beta h)^2}{2EI \beta^2} M_t$
地表面変位	$y_0 = \frac{1 + \beta h_0}{2EI \beta^3} H_t$
杭各部の曲げモーメント	$M_z = -M_t - H_t (x + h)$ $M_x = -\frac{H_t}{\beta} e^{-\beta x} \{ \beta h_0 \cos \beta x + (1 + \beta h_0) \sin \beta x \}$
地中部最大曲げモーメント	$M_{\max} = -\frac{H_t}{2\beta} \sqrt{(1 + 2\beta h_0)^2 + 1} \cdot \exp(-\beta l_m)$
地中部最大曲げモーメントの生じる深さ	$l_m = \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \frac{1}{1 + 2\beta h_0}$

※日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 中巻（平成30年5月 P704～709）

※日本道路協会，道路橋示方書・同解説 I共通編 IV下部構造編（平成24年3月 P630、631）

変位置

本システムでは次の2式より選択ができます

$$1. \quad \delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$$

$$\delta_1 = \frac{(1 + \beta h_0) H_0}{2EI\beta^3} \quad \delta_2 = \frac{(1 + 2\beta h_0) H_0 R_h}{2EI\beta^2} \quad \delta_3 = \frac{R_h}{EI} Q$$

ここに

$\delta$ : 矢板の変位量	(m)
$\delta_1$ : 仮想地表面における矢板の変位量	(m)
$\delta_2$ : 仮想海底面のたわみ角による点より上の矢板の回転角のために生じる矢板天端の変位量	(m)
$\delta_3$ : 地上部を片持ち梁とした際の頭部の変位量	(m)
$\beta$ : 特性値	(m <sup>-1</sup> )
$h_0$ : 合力作用高さ	(m)
$H_0$ : 水平力	(kN)
$R_h$ : 矢板の変位量仮想海底面から天端までの高さ	(m)
$EI$ : 杭の曲げ剛性	(kN・m <sup>2</sup> )
$Q$ : 変形係数	(kN/m)

変形係数Qは次のように表される

$$Q = \sum \frac{H_i}{6} (3 - d_i) d_i^2, \quad d_i = \frac{h_i}{R_h}$$

$H_i$ : 各集中荷重 (kN/m)

$h_i$ : 仮想海底面より各集中荷重の作用高 (m)

※全国漁港漁場協会、漁港・漁場の施設の設計参考図書（2015年版 P538～P539）

$$2. \quad y_{top} = y_1 + l\theta_1$$

$$y_1 = \frac{2(1 + \beta h)^3 + 1}{6EI\beta^3} H \quad \theta_1 = \frac{(1 + \beta h)^2}{2EI\beta^2} H$$

ここに

$y_{top}$ : 杭頭変位	(m)
$l$ : 波圧合力作用位置から杭頭までの長さ	(m)
$y_1$ : 波圧合力作用位置での水平変位	(m)
$\beta$ : チャンの方法による特性値	(m <sup>-1</sup> )
$h$ : 天端面から波圧合力作用点までの高さ	(m)
$H$ : 波圧合力の大きさ	(kN)
$EI$ : 杭の曲げ剛性	(kN・m <sup>2</sup> )
$\theta_1$ : 波圧合力作用位置でのたわみ角	

※全国漁港漁場協会、漁港・漁場の施設の設計参考図書（2015年版 P404～P405）

## 港研方式

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = -P = -pB$$

C型地盤

$$p = k_c xy^{0.5} \quad k_c = 540N^{0.648}$$

S型地盤

$$p = k_s xy^{0.5} \quad k_s = 592\bar{N}^{-0.654}$$

ここに

$EI$ : 杭の曲げ剛性 (kN・m<sup>2</sup>)

$x$ : 地表面からの深さ (m)

$y$ : 深さ $x$ における杭の変位 (m)

$P$ : 深さ $x$ における杭の単位長さ当たりの地盤反力 (kN/m)

$p$ : 深さ $x$ における杭の単位面積当たりの地盤反力 (kN/m<sup>2</sup>)

$B$ : 杭幅 (m)

$E_s$ : 地盤の弾性係数 (kN/m<sup>2</sup>)

$k_c$ : C型地盤の横抵抗係数 (kN/m<sup>2.5</sup>)

$k_s$ : S型地盤の横抵抗係数 (kN/m<sup>3.5</sup>)

$N$ : 平均 $N$ 値

$\bar{N}$ :  $N$ 値の増加率

港研方式ではある杭（原型杭＝ $p$ 杭）の挙動を推定するのに一定の基準杭（ $s$ 杭）について求めた基準曲線を換算係数を用いて換算するという方法をとります  
計算手順は以下の通りになります

### a. 基準杭の諸元

載荷高さ		$h = 1 (m)$
曲げ剛性		$EI = 10^4 (kN \cdot m^2)$
横抵抗定数	S型地盤	$Bk_s = 0.5(m) \times 2000(kN/m^{3.5}) = 1000(kN/m^{2.5})$
	C型地盤	$Bk_c = 0.5(m) \times 2000(kN/m^{2.5}) = 1000(kN/m^{1.5})$

### b. 換算係数の計算

$$R_x = R_h = \frac{(h_0)_p}{(h)_s} \quad R_{EI} = \frac{(EI)_p}{(EI)_s}$$

$$R_{BK} = \frac{(Bk_c)_p}{(Bk_c)_s} : \text{C型地盤} \quad R_{BK} = \frac{(Bk_s)_p}{(Bk_s)_s} : \text{S型地盤}$$

(C型地盤)

$$\begin{aligned} \log R_T &= \log R_s &= 5(\log R_x) &- (\log R_{EI}) &+ 2(\log R_{BK}) \\ &\log R_M &= 6(\log R_x) &- (\log R_{EI}) &+ 2(\log R_{BK}) \\ &\log R_i &= 7(\log R_x) &- 2(\log R_{EI}) &+ 2(\log R_{BK}) \\ &\log R_y &= 8(\log R_x) &- 2(\log R_{EI}) &+ 2(\log R_{BK}) \end{aligned}$$

(S型地盤)

$$\begin{aligned}\log R_T = \log R_s &= 7(\log R_x) - (\log R_{EI}) + 2(\log R_{BK}) \\ \log R_M &= 8(\log R_x) - (\log R_{EI}) + 2(\log R_{BK}) \\ \log R_i &= 9(\log R_x) - 2(\log R_{EI}) + 2(\log R_{BK}) \\ \log R_y &= 10(\log R_x) - 2(\log R_{EI}) + 2(\log R_{BK})\end{aligned}$$

c. 基準杭の荷重の計算

$$\log T_s = \log T_p - \log R_T$$

d. 基準杭の諸量

上記の  $\log T_s$  より基準曲線表を用いて各諸量を比例配分により求める

e. 鋼矢板壁の諸量

$$\begin{aligned}\log M_{\max} &= \log(M_{\max})_s + \log R_M \\ \log l_{m1} &= \log(l_{m1})_s \\ \log y_0 &= \log(y_0)_s + \log R_y \\ \log i_0 &= \log(i_0)_s + \log R_i\end{aligned}$$

ここに

$$\begin{aligned}M_{\max} &: \text{鋼矢板壁の最大曲げモーメント} && (kN \cdot m) \\ l_{m1} &: \text{鋼矢板壁の曲げモーメント第一零点深さ} && (m) \\ y_0 &: \text{鋼矢板壁の仮想地表面変位} && (m) \\ i_0 &: \text{鋼矢板壁の仮想地表面のたわみ角} && (rad)\end{aligned}$$

変位置量

$$\begin{aligned}\delta &= \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 \\ \delta_1 &= y_0 \quad \delta_2 = \frac{QR_h^3}{EI} \quad \delta_3 = i_0 \cdot R_h\end{aligned}$$

ここに

$$\begin{aligned}\delta &: \text{矢板の変位置量} && (m) \\ \delta_1 &: \text{仮想地表面における矢板の変位置量} && (m) \\ \delta_2 &: \text{地上部を片持ち梁とした際の頭部の変位置量} && (m) \\ \delta_3 &: \text{仮想海底面のたわみ角による点より上の矢板の} && \\ & \quad \text{回転角のために生じる矢板天端の変位置量} && (m) \\ y_0 &: \text{仮想海底面での矢板の変位置量} && (m) \\ i_0 &: \text{仮想海底面での矢板のたわみ角} && (rad) \\ R_h &: \text{矢板の変位置量仮想海底面から天端までの高さ} && (m) \\ EI &: \text{杭の曲げ剛性} && (kN \cdot m^2) \\ Q &: \text{変形係数} && (kN / m)\end{aligned}$$

変形係数Qは次のように表される

$$Q = \sum \frac{H_i}{6} (3 - d_i) d_i^2$$

$$d_i = \frac{h_i}{R_h}$$

ここに

$H_i$  : 各集中荷重 (kN/m)

$h_i$  : 仮想海底面より各集中荷重の作用高 (m)

※日本港湾協会、港湾の施設の技術上の基準・同解説 中巻（平成30年5月 P711～723）

※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



## 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

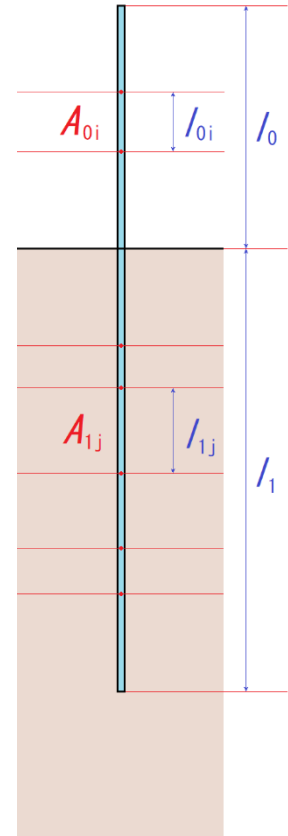
### 平成8年道路橋示方書 平成24年道路橋示方書【変位法】

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

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

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 (打撃工法)  $a = 0.014l_1 / D + 0.78$   
 打込鋼管 (バイブロハンマ工法)  $a = 0.017l_1 / D - 0.014$   
 中掘鋼管  $a = 0.009l_1 / D + 0.39$

( $l_1 / D \geq 10.0$ )

※日本道路協会, 道路橋示方書・同解説 I 共通編IV下部構造編 (平成8年3月 P346)

#### 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)  $a = 0.017l_1 / D - 0.014$   
 中掘鋼管  $a = 0.010l_1 / D + 0.36$

( $l_1 / D \geq 10.0$ )

※日本道路協会, 道路橋示方書・同解説IV下部構造編 (平成24年3月 P407)

平成8年道路橋示方書 平成24年道路橋示方書【フレーム計算】

$$K_V = \frac{1}{\delta_1}$$

$$\delta_1 = \frac{1}{K_{V1}}$$

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

ここに

- $\delta_1$ : 地中部での杭の軸方向変位 (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>)
- $A_{1j}$ : 地中部j部材での杭の純断面積 (m<sup>2</sup>)
- $l_1$ : 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（打撃工法）

$$a = 0.014l_1 / D + 0.78$$

打込鋼管（バイブロハンマ工法）

$$a = 0.017l_1 / D - 0.014$$

中掘鋼管

$$a = 0.009l_1 / D + 0.39$$

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

※日本道路協会，道路橋示方書・同解説 I 共通編IV下部構造編（平成8年3月 P346）

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）

$$a = 0.017l_1 / D - 0.014$$

中掘鋼管

$$a = 0.010l_1 / D + 0.36$$

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

※日本道路協会，道路橋示方書・同解説IV下部構造編（平成24年3月 P407）

平成29年道路橋示方書【変位法】

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

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

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

ここに

$K_v$ : 杭の軸方向バネ定数

$\delta_0$ : 突出部での杭の軸方向変位

$\delta_1$ : 地中部での杭の軸方向変位

$\delta_2$ : 杭先端での杭の軸方向変位

$K_{V0}$ : 突出部での杭の軸方向バネ定数

$K_{V1}$ : 地中部での杭の軸方向バネ定数

$K_{V2}$ : 杭先端での杭の軸方向バネ定数

$k_v$ : 杭先端での杭の軸方向地盤反力係数

$E$ : 杭のヤング定数

$A_{0i}$ : 突出部*i*部材での杭の純断面積

$A_{1j}$ : 地中部*j*部材での杭の純断面積

$A_p$ : 杭の先端断面積

$D$ : 杭径

$\alpha$ : 地盤反力係数の換算係数

$l_0$ : 杭の突出長(=  $\sum l_{0i}$ )

$l_1$ : 杭の根入長(=  $\sum l_{1j}$ )

$E_0$ : 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

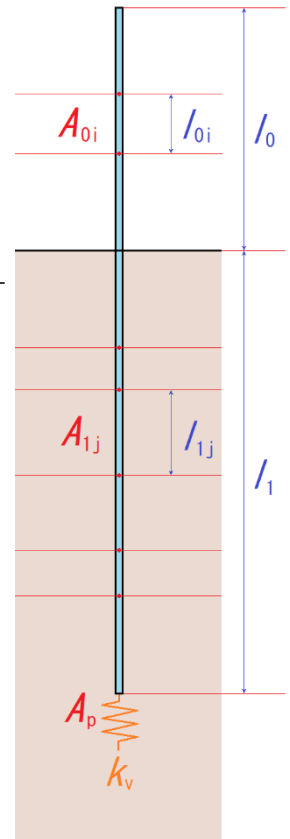
$\gamma_u$ : 軸方向押込力の杭先端への伝達率の推定値(=  $R_p / R_u$ )

$R_p$ : 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



(kN/m)  
(m)  
(m)  
(m)  
(kN/m)  
(kN/m)  
(kN/m)  
(kN/m<sup>3</sup>)  
(kN/m<sup>2</sup>)  
(m<sup>2</sup>)  
(m<sup>2</sup>)  
(m<sup>2</sup>)  
(m)

$\alpha$ は次のように設定します。

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）

平成29年道路橋示方書【フレーム計算】

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

$$\delta_1 = \frac{1}{K_{v1}}, \quad \delta_2 = \frac{1}{K_{v2}}$$

$$K_{v1} = \frac{2}{1 + \gamma_y - \zeta_e} \left( \frac{1}{\sum \frac{l_{1j}}{EA_j}} \right), \quad K_{v2} = \frac{k_v A_p}{\gamma_y \zeta_d}$$

ここに

$K_v$ : 杭の軸方向バネ定数

$\delta_1$ : 地中部での杭の軸方向変位

$\delta_2$ : 杭先端での杭の軸方向変位

$K_{v1}$ : 地中部での杭の軸方向バネ定数

$K_{v2}$ : 杭先端での杭の軸方向バネ定数

$k_v$ : 杭先端での杭の軸方向地盤反力係数

$E$ : 杭のヤング定数

$A_{1j}$ : 地中部j部材での杭の純断面積

$A_p$ : 杭の先端断面積

$D$ : 杭径

$\alpha$ : 地盤反力係数の換算係数

$l_1$ : 杭の根入長(=  $\sum l_{1j}$ )

$E_0$ : 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

$R_u$ : 杭の極限支持力の推定値

$\zeta_e$ : 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

(kN/m)

(m)

(m)

(kN/m)

(kN/m)

(kN/m<sup>3</sup>)

(kN/m<sup>2</sup>)

(m<sup>2</sup>)

(m<sup>2</sup>)

(m)

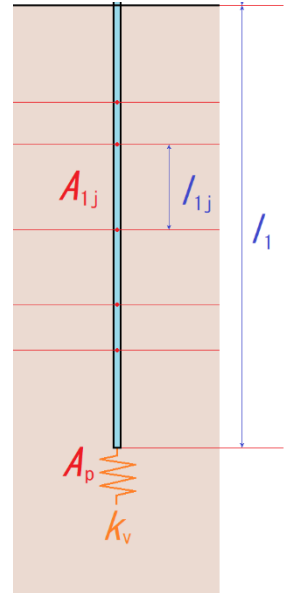
(m)

$\alpha$ は次のように設定します。

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



## 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6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

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

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

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 $E_0$ 値→K値

算定式は4) 道路橋N値→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  $q_u$ →N値→K値

粘性土でN値がない場合は $q_u$ →N値でK値を算出します。

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

$$q_u = N / X$$

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

7) 相関式

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

斜角によるK値の補正

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 P628, P629)

※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

## 2-6. 杭の応力について

### 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
$S_k = \frac{\sigma_{ck}}{red} + \sigma_{bck} \quad , \quad R_k = \sigma_{byk}$	$S_k = \sigma_{tk} + \sigma_{btik} \quad , \quad R_k = \sigma_{tyk}$ $S_k = -\sigma_{tk} + \sigma_{btik} \quad , \quad R_k = \sigma_{tyk}$

ここに

*red*: 軸方向圧縮降伏応力度を降伏応力度で除した値として定義される係数

$\sigma_t, \sigma_c$ : 軸方向引張力による引張応力度及び軸方向圧縮力による圧縮応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{bt}, \sigma_{bc}$ : 杭の曲げモーメントによる最大引張応力度及び最大圧縮応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{ty}, \sigma_{cy}$ : 軸方向引張降伏応力度及び軸方向圧縮降伏応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{by}$ : 曲げ圧縮降伏応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$R_k$ : 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>)

$\gamma_R$ : 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

*A*: 断面積 (mm<sup>2</sup>)

*Z*: 断面係数 (mm<sup>3</sup>)

*l*: 有効座屈長 (m)

*r*: 断面二次半径 (m)

鋼種 応力	SKK400 SHK400M	SKK490 SHK490M	SM490Y	SM570
曲げ方向 降伏応力度	235	315	355	450
軸方向引張 降伏応力度	235	315	355	450
軸方向圧縮 降伏応力度	$l/r \leq 19$ 235 $19 < l/r \leq 93$ $235 - 1.40 \left( \frac{l}{r} - 19 \right)$ $l/r > 93$ $\frac{2,000,000}{6,700 + \left( \frac{l}{r} \right)^2}$	$l/r \leq 16$ 315 $16 < l/r \leq 80$ $315 - 2.10 \left( \frac{l}{r} - 16 \right)$ $l/r > 80$ $\frac{2,000,000}{5,000 + \left( \frac{l}{r} \right)^2}$	$l/r \leq 15$ 355 $15 < l/r \leq 76$ $355 - 2.60 \left( \frac{l}{r} - 15 \right)$ $l/r > 76$ $\frac{2,000,000}{4,400 + \left( \frac{l}{r} \right)^2}$	$l/r \leq 13$ 450 $13 < l/r \leq 67$ $450 - 3.70 \left( \frac{l}{r} - 13 \right)$ $l/r > 67$ $\frac{2,000,000}{3,500 + \left( \frac{l}{r} \right)^2}$

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



## 2-7. 補強・補修について

本システムではコンクリート被覆、鉄板被覆での照査を行います

### コンクリート被覆【許容応力度法】

軸力及び曲げモーメントが作用する鉄筋コンクリート被覆工法による補強・補修断面の計算は次式を用いることができる

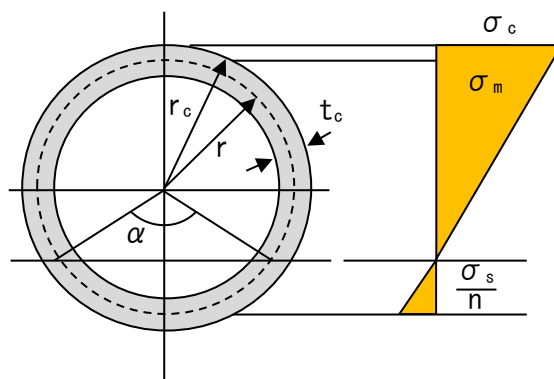
$$\sigma_c \leq \sigma_{cl} \quad , \quad \sigma_s \leq \sigma_{sa}$$

$$\frac{e}{r} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sin \alpha \cos \alpha + \pi(1+np) - \alpha}{\sin \alpha + [\pi(1+np) - \alpha] \cos \alpha}$$

$$\sigma_m = \frac{N}{A_c} \cdot \frac{\pi(1 + \cos \alpha)}{\sin \alpha + [\pi(1+np) - \alpha] \cos \alpha}$$

$$\sigma_c = \frac{(\gamma_c/\gamma) + \cos \alpha}{1 + \cos \alpha} \sigma_m$$

$$\sigma_s = \frac{1 - \cos \alpha}{1 + \cos \alpha} \cdot n \cdot \sigma_m$$



ここに

$e$ : 偏心量

( $m$ )

$n$ : 鉄筋とコンクリートとのヤング係数比

$p$ : 鉄筋比

$r$ : 被覆コンクリートの肉厚中心半径

( $m$ )

$t_c$ : 被覆コンクリートの厚さ

( $m$ )

$A_s$ : 鉄筋総断面積

( $m^2$ )

$A_c$ : コンクリート総断面積

( $m^2$ )

$r_c$ : コンクリート外縁半径

( $m$ )

$\sigma_m$ : 半径 $r$ 上のコンクリート最大圧縮応力度

$\sigma_c$ : コンクリートの絶対最大圧縮応力度

$\sigma_s$ : 鉄筋の最大引張応力度

$\sigma_{cl}$ : 被覆コンクリートの許容応力度(=  $\sigma_{ca} (1 - 4A_p/D_c^2)$ )

$\sigma_{sa}$ : 鉄筋の許容応力度

$\sigma_{ca}$ : コンクリートの許容圧縮応力度

$D_c$ : 被覆コンクリートの外径

( $m$ )

$A_p$ : 鋼管杭の断面積

( $m^2$ )

特殊な場合として補強・補修断面に引張力と曲げモーメント、あるいは曲げモーメントのみが作用する場合 ( $e/r = \infty$ ) は以下の式により抵抗モーメントを計算する

$$M_R = \min \{ M_{RC}, M_{RS} \}$$

$$M_{RC} = \frac{\pi(1+np) - \alpha + 1/2 \sin 2\alpha}{r_c/r + \cos \alpha} t_c r^2 \sigma_{ca}$$

$$M_{RS} = \frac{\pi(1+np) - \alpha + 1/2 \sin 2\alpha}{1 - \cos \alpha} t_c r^2 \sigma_{sa} / n$$

※沿岸開発技術研究センター，港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（平成9年 P199～P201）

## スタッドの設計【許容応力度法】

スタッドの所要本数はスタッド1本当たりの許容せん断力をもとに定める

$$\frac{N}{n_{st}} + \frac{M}{0.5n_{st}r_p} < Q_a$$

ここに

$N$ :スタッドが受け持つ全軸力 (kN)

$M$ :スタッドが受け持つ全曲げモーメント (kN・m)

$n_{st}$ : $N, M$ に抵抗させるスタッドの全本数

$r_p$ :鋼管杭の外縁半径 (m)

$Q_a$ :スタッド1本当たりの許容せん断力 (kN/本)

スタッドの許容せん断力はせん断強度の1/3とする  
スタッドのせん断強度は以下のように定める

スタッドの寸法 直径(mm)×高さ(mm)	コンクリートの設計基準強度(N/mm <sup>2</sup> )			
	177	266	355	444
25×100	142	157	172	187
22×100	114	129	142	156
19×100	92	102	111	121
19×75	80	89	98	107
16×75	67	76	84	92
13×65	43	48	53	58

※沿岸開発技術研究センター，港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（平成9年 P198～P212）

## コンクリート被覆【限界状態設計法】

終局限界状態の検討

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

ここに

$M_{ud}$  : 曲げ耐力の設計用値 ( $M_{ud} = M_u / \gamma_b$ ) (kN・m)

$\gamma_b$  : 部材係数

$M_u$  : 曲げ耐力 ( $M_u = N_u \cdot e$ ) (kN・m)

$e$  : 曲げモーメントと軸力による偏心量 ( $e = M/N$ ) (m)

$N_u$  : 軸方向耐力 (kN)

$A_c$  : 中立軸からの圧縮域でコンクリートの断面積

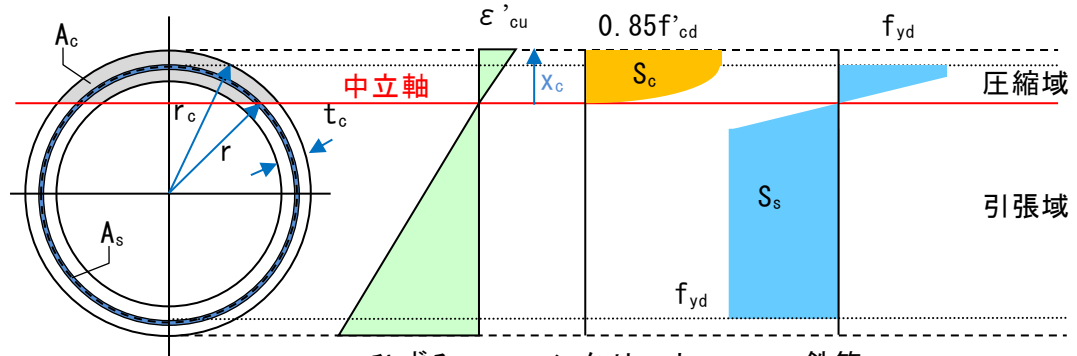
$A_s$  : 鉄筋の断面積

$f'_{cd}$  : コンクリートの設計圧縮強度 (応力-ひずみ曲線より算定)

$f_{yd}$  : 鉄筋の設計圧縮強度 (応力-ひずみ曲線より算定)

中立軸について

コンクリートの圧縮域におけるモーメントと鉄筋によるモーメントが等しくなるような位置を計算します。尚、鉄筋の断面積は半径  $r$  による円周  $2\pi r$  と仮定しています。



$M_c = M_s$  ,  $N_d = N_c + N_s$     ひずみ    コンクリート    鉄筋

$$M_c = 0.85 \int A_{ci} f'_{cdx} (x-e) dx \quad , \quad N_c = 0.85 \int A_{ci} f'_{cdx} dx$$

$$M_s = \int A_{si} f_{ydx} (x-e) dx \quad , \quad N_s = \int A_{si} f_{ydx} dx$$

ここに

$x_c$  : 中立軸から杭外径までの長さ (m)

$M_c$  : コンクリートの圧縮域によるモーメント (kN・m)

$M_s$  : 鉄筋によるモーメント (kN・m)

$A_c$  : 中立軸からの圧縮域でコンクリートの断面積  $A_c = \int A_{ci} dx$  (m<sup>2</sup>)

$A_{ci}$  :  $x_c$  を細分化したコンクリートの圧縮域の断面積 (m<sup>2</sup>)

$f'_{cdx}$  :  $x_c$  を細分化した位置でのコンクリートの設計圧縮強度 (kN/m<sup>2</sup>)

$A_s$  : 鉄筋の断面積  $A_s = \int A_{si} dx$  (m<sup>2</sup>)

$A_{si}$  : 円周  $2\pi r$  を細分化した鉄筋の断面積 (m<sup>2</sup>)

$f_{ydx}$  : 円周  $2\pi r$  を細分化した位置での鉄筋の引張降伏強度 (kN/m<sup>2</sup>)

※沿岸技術研究センター，港湾構造物防食・補修マニュアル（2009年版 付4-12～14）

使用限界状態の検討

曲げひび割れ幅の検討は、次式のひび割れ幅と許容ひび割れ幅の比較により行う。

$$w \leq w_{\text{lim}}$$

平成8年制定  
コンクリート示方書

$$w = k_1 \cdot [4 \cdot c + 0.7(c_\phi - \phi)] \cdot \left( \frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon_\phi \right)$$

2002年制定  
コンクリート示方書

$$w = 1.1 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot [4 \cdot c + 0.7(c_\phi - \phi)] \cdot \left( \frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon_\phi \right)$$

$$w_{\text{lim}} = (0.0035 \text{ or } 0.004) \cdot C$$

ここに

$w$ : ひび割れ幅

$w_{\text{lim}}$ : 許容ひび割れ幅

$k_1$ : 鉄筋の付着性状を表す係数 異径鉄筋の場合に1.0、普通鉄筋の場合に1.3

$k_2$ : コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数

$$k_2 = 15 / (f'_c + 20) + 0.7$$

$f'_c$ : コンクリートの圧縮強度 一般に設計圧縮強度を用いてよい

$k_3$ : 引張鋼材の段数を表す係数

$$k_3 = 5(n+2) / (7n+8)$$

$n$ : 引張鋼材の段数 当システムでは1.0にしています

$c$ : 鉄筋のかぶり

$c_\phi$ : 鉄筋の中心間隔

$\phi$ : 鉄筋径

$\sigma_{se}$ : 鉄筋の増加引張応力度

$E_s$ : 鉄筋のヤング係数

$\varepsilon_\phi$ : コンクリートの乾燥収縮及びクリープによるひび割れを考慮するための数値(=0.0)

鉄筋の強度  $\sigma_s$  は、コンクリートと鉄筋の断面に用いる強度  $\sigma_c$  とした場合、 $\sigma_s = n \times \sigma_c$  となり、コンクリートと鉄筋は弾性体と仮定して、コンクリートの圧縮域におけるモーメントと鉄筋によるモーメントが等しくなり、かつ、コンクリートの圧縮域における軸力と鉄筋による軸力が使用限界状態での軸力と等しくなるような中立軸  $x$  と強度  $\sigma_c$  を収束計算して求めます。

$$\sigma_{se} = n \cdot \sigma_c (r_c + r - x)$$

$$\begin{cases} M_c = M_s \\ N_c + N_s - N_d = 0 \end{cases}$$

$$N_c = \int \sigma_c A_{ci} dx, \quad M_c = \int \sigma_c A_{ci} (x - e) dx$$

$$N_s = n \cdot \sigma_c A_s (x_c - r), \quad M_s = n \cdot \sigma_c A_s \{0.5r^2 + (x_c - r)e\}$$

ここに

$n$ : 鉄筋とコンクリートのヤング係数比 ( $n = E_s / E_c$ )

$e$ : 曲げモーメントと軸力による偏心量 ( $e = M / N$ ) (m)

※沿岸技術研究センター，港湾構造物防食・補修マニュアル（2009年版 P303～P304）

## スタッドの設計【限界状態設計法】

鋼管杭のスタッドの本数は以下の式によって設定する

$$\gamma_a \left( \frac{N_d}{n_{st}} + \frac{M_d}{0.5n_{st}r_p} \right) \leq Q_{yd}$$

ここに

$N_d$  : 断面に作用する軸力のうちスタッドが受け持つ軸力の設計用値

$M_d$  : 断面に作用する曲げモーメントのうちスタッドが受け持つ曲げモーメントの設計用値

$n_{st}$  : スタッドの本数

$r_p$  : 鋼管杭の外縁半径

$Q_{yd}$  : スタッド1本当たりの設計せん断耐力

$\gamma_a$  : 構造解析係数

スタッド1本当たりの設計せん断耐力は次式により求める

$$Q_{yd} = \min \{ Q_{yd_1}, Q_{yd_2} \}$$

$$Q_{yd_1} = \left( 31A_{ss} \sqrt{\left( \frac{h_{ss}}{d_{ss}} \right) f_{cd}} + 10000 \right) / \gamma_b$$

$$Q_{yd_2} = A_{ss} f_{ssud} / \gamma_b$$

ここに

$A_{ss}$  : スタッドの断面積

$d_{ss}$  : スタッドの軸径 (mm)

$h_{ss}$  : スタッドの高さ (mm)

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

$f_{ssud}$  : スタッドの引張強度の設計用値 ( $N/mm^2$ )

$\gamma_b$  : 部材係数(=1.3)

※沿岸技術研究センター，港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（2009年版 P301～P302）

## 鉄板被覆の検討（応力照査）【漁港基準、港湾基準(H11)】

鋼材の許容応力度

鋼種	SM400	SM490	SM520
軸方向引張応力度 $\sigma_{ta}$	140	185	210
軸方向圧縮応力度 $\sigma_{ca}$	140	185	210
曲げ引張応力度 $\sigma_{bt}$	140	185	210
曲げ圧縮応力度 $\sigma_{ba}$	140	185	210

軸力に対して  $\sigma_c = \frac{N}{A_r}$

曲げに対して  $\sigma_b = \frac{M}{Z_r}$

照査  $\frac{\sigma_c}{\sigma_{ca}} + \frac{\sigma_b}{\sigma_{ca}} \leq 1.0$

ここに

- $N$ : 補修断面の受け持つ軸力 ( $N/mm^2$ )
- $M$ : 補修断面の受け持つ曲げモーメント ( $N/mm^2$ )
- $A_r$ : 補修部材の断面積 ( $mm^2$ )
- $Z_r$ : 補修部材の断面係数 ( $mm^3$ )
- $\sigma_{ca}$ : 鋼材の許容圧縮応力度 ( $N/mm^2$ )
- $\sigma_{bc}, \sigma_c$ : 補修部材の応力度 ( $N/mm^2$ )

※沿岸開発技術研究センター，港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（平成9年4月 P319）

## 溶接強度の設定【漁港基準、港湾基準(H11)】

$$\tau = \frac{N}{\sum al} + \frac{M}{Z} \leq \tau_a$$

ここに

- $N$ : 溶接部を受け持つ軸力 ( $kN$ )
- $M$ : 溶接部を受け持つ曲げモーメント ( $kN \cdot m$ )
- $a$ : 溶接のど厚 ( $m$ )
- $l$ : 有効溶接長 ( $m$ )
- $Z$ : 有効のど断面の断面係数 ( $m^3$ )
- $\tau_a$ : 溶接部の許容応力度 ( $N/mm^2$ )

※沿岸開発技術研究センター，港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（平成9年4月 P210）

**鉄板被覆の検討（応力照査）【港灣基準(H30)】**

鋼材の降伏応力度

鋼種	SM400	SM490	SM520
軸方向引張応力度 $\sigma_{ty}$	235 (245)	315 (325)	355 (365)
軸方向圧縮応力度 $\sigma_{cy}$	235 (245)	315 (325)	355 (365)
曲げ圧縮応力度 $\sigma_{ba}$	235 (245)	315 (325)	355 (365)

※ ( ) 内の値は肉厚16mm未満の場合に採用されます

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

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

ここに

*red*: 軸方向圧縮応力度の低減係数

$\sigma_t, \sigma_c$ : 軸方向引張力による引張応力度及び軸方向圧縮力による圧縮応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{bt}, \sigma_{bc}$ : 杭の曲げモーメントによる最大引張応力度及び最大圧縮応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{ty}, \sigma_{cy}$ : 軸方向引張降伏応力度及び軸方向圧縮降伏応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{by}$ : 曲げ圧縮降伏応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$R_k$ : 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>)

$\gamma_R$ : 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

*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)

### 溶接強度の設定【港湾基準(H30)】

$$\tau_d = \gamma_a \left( \frac{N_d}{\sum al} + \frac{M_d}{Z} \right) \leq \tau_{yd}$$

ここに

$\tau_d$ : 溶接部のせん断応力度の設計用値	( $N/mm^2$ )
$N_d$ : 溶接部に生じる軸力の設計用値	( $N$ )
$M_d$ : 溶接部に生じる曲げモーメントの設計用値	( $N \cdot mm$ )
$a$ : 溶接のど厚	( $mm$ )
$l$ : 有効溶接長	( $mm$ )
$Z$ : 有効のど断面の断面係数	( $mm^3$ )
$\tau_{yd}$ : 溶接部のせん断降伏応力度の設計用値	( $N/mm^2$ )
$\gamma_a$ : 構造解析係数	



## 2-8. 根入れ長の検討

本システムでは計算方法で「[変位法](#)」「[フレーム計算](#)」「[チャンの方法](#)」を選択した場合、次の根入れ長の検討方法を選択できます。

### 地盤が一様とみなせる場合

$$L \geq 3.0 / \beta \quad , \quad \beta = \sqrt[4]{\frac{k_H D}{4EI}} \quad , \quad k_H = \frac{\sum k_{hi} l_i}{l_i}$$

ここに

$\beta$	: $1/\beta$ の平均特性値	( $m^{-1}$ )
$l$	: 根入れ長	( $m$ )
$k_H$	: $1/\beta$ の平均横方向地盤反力係数	( $kN/m^3$ )
$l_i$	: 第 <i>i</i> 層地盤の層厚	( $m$ )
$k_{hi}$	: 第 <i>i</i> 層地盤の横方向地盤反力係数	( $kN/m^3$ )
$D$	: 杭径	( $m$ )
$E$	: 杭の弾性係数	( $kN/m^2$ )
$I$	: 杭の断面二次モーメント	( $m^4$ )

### 地盤の性質が著しく変化する場合

$$\beta_1 l_1 + \beta_2 l_2 + \dots + \beta_n l_n \geq 3.0 \quad , \quad \beta_n = \sqrt[4]{\frac{k_n D}{4EI_n}}$$

ここに

$\beta_n$	: 第 <i>n</i> 層地盤の特性値	( $m^{-1}$ )
$l_n$	: 第 <i>n</i> 層地盤の層厚	( $m$ )
$k_n$	: 第 <i>n</i> 層地盤の横方向地盤反力係数	( $kN/m^3$ )
$D$	: 杭径	( $m$ )
$E$	: 杭の弾性係数	( $kN/m^2$ )
$I_n$	: 第 <i>n</i> 層地盤の杭の断面二次モーメント	( $m^4$ )

計算方法で「[C型地盤](#)」「[S型地盤](#)」を選択した場合、港研方式で計算した根入れ長の1.5倍以上とします。

※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）

※日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 中巻（平成30年5月 P705）

## 2-9. 支持力について

本システムでは支持力の検討を3つの工法（打込鋼管、中掘鋼管、埋込み杭）から選択できます。ただし、中掘鋼管、埋込み杭は漁港基準、港湾基準（H11）での選択となります

### 【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、中掘鋼管、埋込み杭）から選択できます。

ただし、中掘鋼管、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<sup>2</sup>)

$A_s$  : 杭の周表面積  $A_s = U \cdot L_i$  (m<sup>2</sup>)

$U$  : 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

$F$  : 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<sup>2</sup>)

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

$L$  : 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）

## 【港湾基準 (H30)】

### 1) 杭の先端抵抗力

[支持層：砂質土地盤]

$$R_{pk} = 300N\alpha A_p$$

[支持層：粘性土地盤]

$$R_{pk} = 6C_p\alpha A_p$$

ここに

$R_{pk}$  : 杭の先端抵抗力の特性値 (kN)

$\alpha$  : 杭の閉塞率

$A_p$  : 杭先端の有効面積 (m<sup>2</sup>)

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

$N_1$  : 杭先端地盤のN値 ( $N_1 \leq 50$ )

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

$B$  : 杭の直径 (m)

$C_p$  : 杭先端位置での粘着力 (kN/m<sup>2</sup>)

### 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

$R_{fk}$  : 杭周面抵抗力の特性値 (kN)

$A_s$  : 杭の周面積 (m<sup>2</sup>)

$L_i$  : 層の厚さ (m)

$U$  : 杭の周長 (m)

$N_i$  : 層の平均N値

$C_{ai}$  : 層の平均付着力 (kN/m<sup>2</sup>)

ここで $C_{ai}$ は次のようにする

$c \leq 100\text{kN/m}^2$  の場合  $C_{ai} = c$

$c > 100\text{kN/m}^2$  の場合  $C_{ai} = 100\text{kN/m}^2$

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

## 中堀鋼管（平成24年道路橋示方書）

### 【漁港基準、港湾基準(H11)】

#### 1) 軸方向押込み力

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

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

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( $N_i \leq 50$ )

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

$F$ : 安全率

#### 2) 軸方向引抜き力

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

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

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

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

$R_{pk}$  : 杭の先端抵抗力の特性値 (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>)

#### 2) 杭の周面抵抗力

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

$A_s$  : 杭の周表面積 (m<sup>2</sup>)

$U$  : 杭の周長  $U = \pi \cdot D$  (m)

$D$  : 杭径 (m)

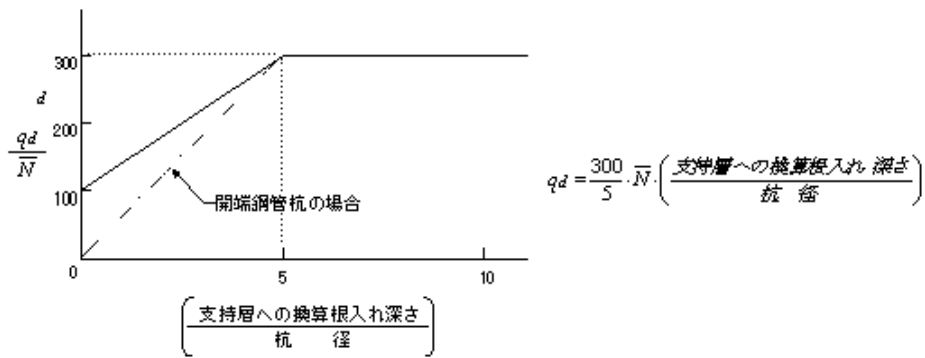
$L_i$  : 層の厚さ (m)

$N_i$  : 砂質土層内の平均N値 ( $N_i \leq 50$ )

$C_{ai}$  : 粘性土層内の平均付着力 ( $0.8C_{ai} \leq 100$ ) (kN/m<sup>2</sup>)

$q_d$  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24年 3月 P383~P395)

【漁港基準、港湾基準(H11)】

1) 軸方向押込み力

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

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 ( $N_i \leq 50$ )

$C_{ai}$ : 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

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

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

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

$R_{pk}$  : 杭の先端抵抗力の特性値 (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>)

### 2) 杭の周面抵抗力

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

$A_s$  : 杭の周表面積 (m<sup>2</sup>)

$U$  : 杭の周長  $U = \pi \cdot D$  (m)

$D$  : 杭径 (m)

$L_i$  : 層の厚さ (m)

$N_i$  : 砂質土層内の平均N値 ( $N_i \leq 50.0$ )

$C_{ai}$  : 粘性土層内の平均付着力 ( $0.8C_{ai} \leq 70$ ) (kN/m<sup>2</sup>)

$q_d$  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)

$\eta$ : 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

$N_s$ : 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）

## 2-10. 負の周面摩擦について

### 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)】

$$m_1 \frac{S_{d1}}{R_{d1}} = m_1 \frac{\gamma_{S1} \cdot S_{k1}}{\gamma_{R1} \cdot R_{k1}} \leq m_1 \frac{m_0 (R_{pk} + R_{fk}) + R_{nf,\max}}{R_p} \leq 1.0$$

$$m_2 \frac{S_{d2}}{R_{d2}} = m_2 \frac{\gamma_{S2} \cdot S_{k2}}{\gamma_{R2} \cdot R_{k2}} \leq m_2 \frac{\{m_0 (R_{pk} + R_{fk}) + R_{nf,\max}\} / A_e}{\sigma_f} \leq 1.0$$

ここに

$R_{pk}$  : 杭の先端支持力 (kN)

$R_{fk}$  : 杭の周面支持力 (kN)

$R_p$  : 杭の先端支持力(極限值) (kN)

$R_{nf,\max}$  : 負の周面摩擦の最大値 (kN)

$\sigma_f$  : 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>)

$m_0$  : 支持力(波圧作用時-押込)の調整係数の逆数

$m_1$  : 極限支持力照査での調整係数

$m_2$  : 降伏応力度照査での調整係数

$\gamma_{S1}, \gamma_{S2}$  : 荷重項にかかる係数 (=1.00)

$\gamma_{R1}, \gamma_{R2}$  : 抵抗項にかかる係数 (=1.00)

$S_{k1}, S_{k2}$  : 荷重項の特性値

$R_{k1}, R_{k2}$  : 抵抗項の特性値

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 中巻(平成30年5月 P727~P730)

## 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 中巻 (平成30年5月 P695~700, 728)

## 中堀鋼管

《負の周面摩擦の最大値》

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

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

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]  $R_p = q_d \cdot A_s + N_s \cdot L \cdot U$  一道路橋示方書 平成8年

$R_p = q_d \cdot A_s + 2N_s \cdot L \cdot U$  一道路橋示方書 平成14年

[支持層 : 粘性土地盤]  $R_p = q_d \cdot A_s + 0.5C_s \cdot L \cdot U$  一道路橋示方書 平成8年

$R_p = q_d \cdot A_s + 0.8C_s \cdot L \cdot U$  一道路橋示方書 平成14年

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>)

$A_s$  : 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 $4$ 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)

$\eta$  : 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 $\sim 4.0d$ 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 $4$ とする

$\psi$  : 杭の周長

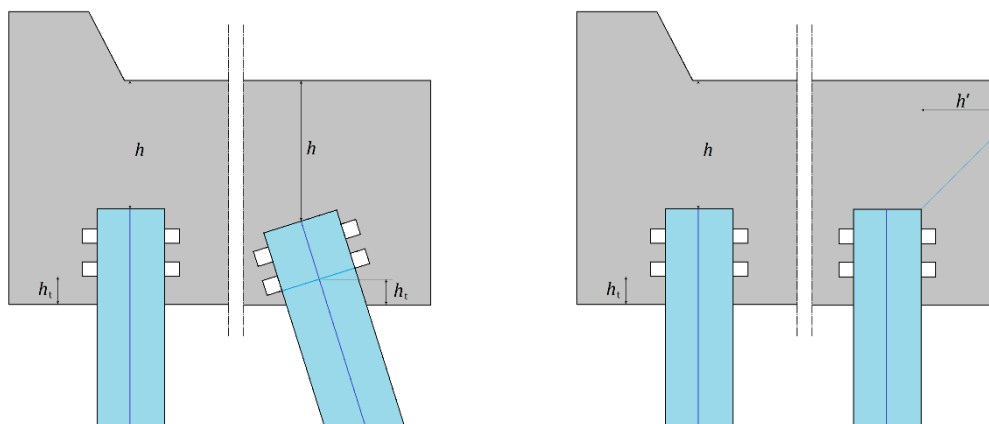
※全国漁港協会，漁港構造物の設計ガイド（平成6年度版 P66）

## 2-11. 杭頭部の結合計算について

本システムでは杭頭部の結合計算を許容応力度法、限界状態設計法の2つの方法から選択できます

### 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



### 押抜きせん断／引抜きせん断に対する照査

#### 1) 押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<sup>2</sup>)

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

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

$\tau_{vt}$  : 垂直方向の引き抜きせん断応力度 (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>)

$\tau_{at}$  : コンクリートの許容引き抜きせん断応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$P$  : 軸方向押込み力 (N)

$P_t$  : 軸方向引抜き力 (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)

### 軸方向力に対する照査

$$l = \frac{P}{U\tau_0}$$

ここに

$l$ : 埋め込み長 (m)

$P$ : 杭の軸方向力 (N)

$\tau_0$ : 杭とコンクリートの付着強度の設計用値 (N/mm<sup>2</sup>)

$$\tau_0 = 0.11\sigma_{ck}^{2/3}$$

$\sigma_{ck}$ : コンクリートの設計基準強度

$U$ : 杭の外周長 (mm)

### 杭頭モーメントに対する照査

$$l = \sqrt{\frac{6M}{D \cdot \sigma_{ca}}}$$

ここに

$l$ : 埋め込み長 (m)

$M$ : 杭頭モーメント (kN・m)

$D$ : 杭径 (m)

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

### 水平力及びモーメントに対する照査

a. 上部コンクリートの水平支圧応力度

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

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

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

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)

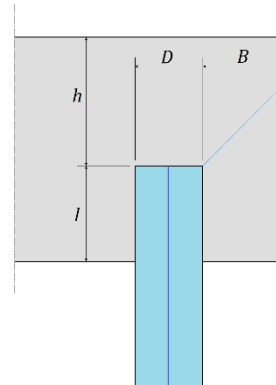
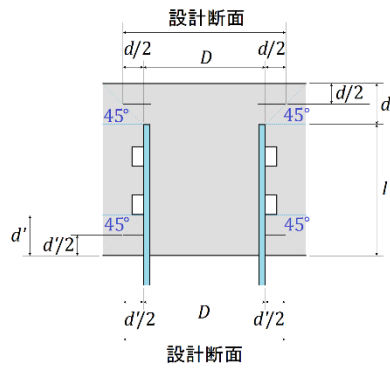
$h'$ : 引き抜きせん断に抵抗する上部工の有効厚さ (mm)

※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



### 押抜きせん断／引抜きせん断に対する照査

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

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

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

$$\beta_d = (1/d)^{1/4} \quad \text{ただし } \beta_d > 1.5 \text{ となる場合は } 1.5 \text{ とする}$$

$\beta_p$ : せん断耐力の鉄筋比に関する係数

$$\beta_p = (100p)^{1/3} \quad \text{ただし } \beta_p > 1.5 \text{ となる場合は } 1.5 \text{ とする}$$

$\beta_r$ : せん断耐力の載荷面の周長に対する係数

$$\beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u/d)$$

$u$ : 載荷面の周長

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

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

$$u_p: \text{設計断面の周長} \quad (m)$$

最下面から  $d/2$  離れた位置で算定するものとする

$d$ : 二方向の鉄筋に対する平均有効高さ

$p$ : 二方向の鉄筋に対する平均鉄筋比

$\gamma_b$ : 部材係数

※土木学会，コンクリート標準示方書[構造性能照査編]（2002年制定 P73）

## 軸方向力に対する照査【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  $\phi \doteq 2A + 4B$  (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>)

$f_{vcd}$ : 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）

## 軸方向力に対する照査【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）

※沿岸技術研究センター，港湾構造物設計事例集（平成30年12月 17-37）

### 杭頭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）

### 杭頭モーメントに対する照査【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19年7月 P1129）

※沿岸技術研究センター，港湾構造物設計事例集（平成30年12月 17-37）

### 水平方向による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）

### 水平方向による押し抜きせん断に対する照査【港湾基準H30】

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

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

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 ( $N/mm^2$ )

$\beta_d$ :  $(1/d)^{\frac{1}{4}}$  ただし、 $\beta_d > 1.5$ となる場合は1.5とする

$\beta_p$ :  $(100p)^{\frac{1}{3}}$  ただし、 $\beta_p > 1.5$ となる場合は1.5とする

$\beta_r$ : 1.0

$d$ : 法線平行方向、法線直角方向の有効高さの平均値 (m)

$p_w$ : 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 ( $mm^2$ )

$\gamma_b$ : 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）

## 2-12. カーテン版の断面計算について

本システムでは、カーテン版の断面計算を許容応力度法、限界状態設計法の2つの方法から選択できます。

### カーテン版断面計算【許容応力度法】

カーテン版に作用する最大波圧よりD13～D32まで段階的に許容値内に収まるようにトライアル計算を行います。

1) 最大曲げモーメント

$$M = \frac{Wl^2}{2}$$

2) 最大せん断力

$$S = Wl$$

3) コンクリートの圧縮応力度

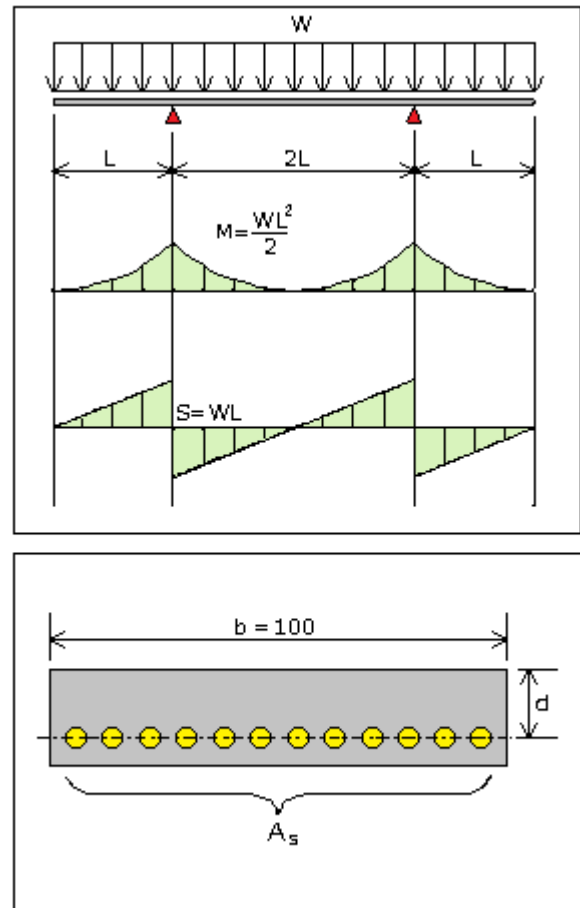
$$\sigma_c = \frac{2M}{kjb d^2}$$

4) 鉄筋のせん断応力度

$$\sigma_s = \frac{M}{A_s j d}$$

5) コンクリートのせん断応力度

$$\tau = \frac{S}{bjd}$$



$p, k, j$ は以下の式により求める

$$p = \frac{A_s}{bd}$$

$$k = \sqrt{2np + (np)^2} - np$$

$$j = 1 - \frac{k}{3}$$

$A_s$ : 1 m当たりの鉄筋量

## カーテン版断面計算【限界状態設計法】

限界状態設計法では最大波圧カーテン版に作用する終局/使用/疲労の限界状態について検討を行います。疲労の限界状態は杭継手溶接部も検討する。

### カーテン版-終局限界状態

#### i) 曲げモーメントに対する検討

曲げモーメントに対する検討は次式の断面耐力と断面力の比較より行う。

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

$$M_{ud} = A_s \cdot f_{yd} \cdot d \cdot \left( 1 - \frac{p_w}{1.7} \cdot \frac{f_{yd}}{f'_{cd}} \right) / \gamma_b$$

ここに

$M_d$  : 曲げモーメント

$M_{ud}$  : 設計断面耐力

$\gamma_i$  : 構造物係数

$A_s$  : 鉄筋量

$f_{yd}$  : 鉄筋の設計引張降伏強度  $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_{ms}$

$f'_{cd}$  : コンクリートの設計圧縮強度  $f'_{cd} = f'_{ck} / \gamma_{mc}$

$p_w$  : 鉄筋比  $p_w = A_s / (b_w d)$

$d$  : 有効高さ

$\gamma_b$  : 部材係数

#### ii) せん断力に対する検討

せん断力に対する検討は、次式のせん断耐力と断面力の比較により行う。

$$\gamma_i \cdot V_d / V_{yd} \leq 1.0$$

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd}$$

ここに

$V_{cd}$  : せん断補強筋を用いない部材のせん断耐力の設計用値

$$V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$$

$f_{vcd}$  :  $0.2 \cdot (f'_{cd})^{1/3}$

$\beta_d$  : せん断耐力の有効高さに関する係数  $(= (100/d)^{1/4})$

$\beta_p$  : せん断耐力の軸方向鉄筋比に関する係数  $(= (100 \cdot p_w)^{1/3})$

$\beta_n$  :  $1 + M_o / M_d$  ( $= 1.0$ )

$M_d$  : 設計曲げモーメント

$M_o$  : 引張縁において軸方向力によって発生する応力を打ち消すのに必要な曲げモーメント ( $= 0.0$ )

$b_w$  : 腹部の幅

$d$  : 有効高さ

$\gamma_b$  : 部材係数

$V_{sd}$  : せん断補強筋により受け持たれるせん断耐力の設計用値 ( $= 0.0$ )

## カーテン版-使用限界状態

### i) 曲げモーメントによるひび割れ幅の検討

ひび割れ幅の検討は、次式のひび割れ幅と許容ひび割れ幅の比較により行う。

$$w \leq w_{\text{lim}}$$

平成 8 年制定

コンクリート示方書

$$w = k_1 \cdot [4 \cdot c + 0.7(c_\phi - \phi)] \cdot \left( \frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon_\phi \right)$$

2002 年制定

コンクリート示方書

$$w = 1.1 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot [4 \cdot c + 0.7(c_\phi - \phi)] \cdot \left( \frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon_\phi \right)$$

$$w_{\text{lim}} = (0.0035 \text{ or } 0.004) \cdot C$$

ここに

$w$ : ひび割れ幅

$w_{\text{lim}}$ : 許容ひび割れ幅

$k_1$ : 鉄筋の付着性状を表す係数 異径鉄筋の場合に1.0、普通鉄筋の場合に1.3

$k_2$ : コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数

$$k_2 = 15 / (f'_c + 20) + 0.7$$

$f'_c$ : コンクリートの圧縮強度 一般に設計圧縮強度を用いてよい

$k_3$ : 引張鋼材の段数を表す係数

$$k_3 = 5(n+2) / (7n+8)$$

$n$ : 引張鋼材の段数 当システムでは1.0にしています

$c$ : 鉄筋のかぶり

$c_\phi$ : 鉄筋の中心間隔

$\phi$ : 鉄筋径

$\sigma_{se}$ : 鉄筋応力度の中心間隔 ( $\sigma_{se} = M / (A_s j d)$ )

$E_s$ : 鉄筋のヤング係数

$\varepsilon_\phi$ : コンクリートの乾燥収縮及びクリープによるひび割れを考慮するための数値 (= 0.0)

$M$ : 使用限界状態の曲げモーメント

$A_s$ : 鉄筋量

$j$ : 応力間距離 ( $j = 1 - k/3$ )

$k$ : 中立軸比

$$k = \sqrt{2np_w + (np_w)^2} - np_w$$

$p_w$ : 鉄筋比 ( $p_w = A_s / (b_w d)$ )

$n$ : ヤング係数比 ( $E_s / E_c$ )

### ii) せん断力によるひび割れ幅の検討

せん断力が材料係数、部材係数を1.0とした場合のせん断耐力の70%より小さい場合は検討を省略できる。



## カーテン版-疲労限界状態

### i) 曲げモーメントによる疲労検討

部材の検討は複鉄筋断面として計算する

①各波高でのモーメントより変動応力度(コンクリート、引張鉄筋、圧縮鉄筋)を計算する。

$$P = \frac{A_s}{bd} \quad P' = \frac{A'_s}{bd} \quad \begin{array}{l} P: \text{引張側鉄筋の鉄筋比} \\ P': \text{圧縮側鉄筋の鉄筋比} \end{array}$$

$$k = \sqrt{n^2(P+P')^2 + 2n\left(P+P'\frac{d'}{d}\right) - n(P+P')} \quad k: \text{中立軸比}$$

$$\sigma_c = \frac{M}{bd^2} \cdot \frac{1}{\frac{k}{2}\left(1-\frac{k}{3}\right) + \frac{nP'}{k}\left(k-\frac{d'}{d}\right)\left(1-\frac{d'}{d}\right)} \quad \sigma_c: \text{コンクリートの圧縮応力度}$$

$$\sigma'_c = \frac{3}{4}\sigma_c \quad \sigma'_c: \text{コンクリートの等価換算応力度}$$

$$\sigma_s = n\sigma_c \frac{1-k}{k} \quad \sigma_s: \text{鉄筋の引張応力度}$$

$$\sigma'_s = n\sigma_c \left(1 - \frac{d'}{kd}\right) \quad \sigma'_s: \text{鉄筋の圧縮応力度}$$

②コンクリート/鉄筋の変動応力度より疲労寿命を計算する。

コンクリート設計疲労強度  $f_{rd}$

$$f_{rd} = k_1 \cdot f_d \cdot \left(1 - \frac{\sigma_p}{f_d}\right) \left(1 - \frac{\log N}{K}\right)$$

$k_1$ : 0.85 (圧縮、曲げ圧縮の場合)、1.0 (引張、曲げ引張の場合)

$f_d$ : コンクリートの設計圧縮強度

$\sigma_p$ : 永久荷重時の応力度

$K$ : 10 (普通コンクリートで水に飽和される場合)

上式より疲労強度を変動応力度に等置し疲労寿命を計算する

$$N_i = 10^a$$

$$a = K - \frac{K\sigma_{rd}}{k_1(f_d - \sigma_p)}$$

鉄筋設計疲労強度  $f_{rd}(f_{srd})$

$$f_{rd} = f_{srd} = 190 \cdot \frac{10^\alpha}{N^k} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{sp}}{f_{ud}}\right) / \gamma_s$$

$\alpha$ :  $k_0 \cdot (0.81 - 0.003\phi)$

$k$ : 0.12       $k_0$ : 1.0

$\phi$ : 鉄筋公称直径 (異径鉄筋を交互に配置している場合、小さい径を採用する)

$\sigma_{sp}$ : 永久荷重時の応力度

$f_{ud}$ : 鉄筋の設計引張強度

$\gamma_s$ : 材料係数 (疲労限界状態 = 1.05)

上式より疲労寿命を求めるには次式を使用する

$$N_i = \left\{ 190 \cdot \frac{10^\alpha}{\sigma_{rd}} \left(1 - \frac{\sigma_{sp}}{f_{ud}}\right) / \gamma_s \right\}^{1/k}$$

③疲労限界状態の検討について

②で求めたコンクリート／鉄筋のそれぞれの疲労寿命が $2 \times 10^6$ 回を超えている場合は疲労破壊しないとして検討を省略できる。

④疲労寿命が $2 \times 10^6$ 回を超えない場合

$2 \times 10^6$ 回を超えない波高を対象とし、設計変動応力度に対する等価繰り返し回数を次式により計算する。

a) コンクリート

$$N = \sum_{i=1}^m n_i \cdot 10^{B(\sigma_{ri} - \sigma_{rd})}$$

$\sigma_{ri}$  : 各波高における変動応力度

$\sigma_{rd}$  : 設計変動応力度

$$B = \frac{K}{k_1 \cdot f_d \cdot \left(1 - \frac{\sigma_p}{f_d}\right)}$$

(各波高における最大変動応力度としてよい)

$K$  : 10 (普通コンクリートで水に飽和される場合)

$k_1$  : 0.85 (圧縮、曲げ圧縮の場合)

$f_d$  : コンクリートの設計圧縮強度

$\sigma_p$  : 永久荷重時の応力度

$n_i$  : 各波高の発生回数

b) 鉄筋

$$N = \sum_{i=1}^m n_i \cdot \left(\frac{\sigma_{ri}}{\sigma_{rd}}\right)^{1/k}$$

$\sigma_{ri}$  : 各波高における変動応力度

$\sigma_{rd}$  : 設計変動応力度

(各波高における最大変動応力度としてよい)

$n_i$  : 各波高の発生回数

$k$  : 0.12

各波高の設計変動応力度  $\sigma_{rd}$  に対する等価繰り返し回数の総和  $N$  をコンクリート／鉄筋それぞれの疲労強度算定式に入力し、疲労強度  $f_{rd}$  を計算する。疲労強度  $f_{rd}$  と設計変動応力度  $\sigma_{rd}$  の関係が以下の式になれば疲労に対して安全となる。

$$\frac{\gamma_i \cdot \sigma_{rd}}{f_{rd} / \gamma_b} \leq 1.0$$

ii) せん断力による疲労検討

せん断補強筋のない部材の設計疲労耐力  $V_{rcd}$

$$V_{rcd} = V_{cd} \cdot \left(1 - \frac{V_{pd}}{V_{cd}}\right) \left(1 - \frac{\log N}{11}\right)$$

ここに

$V_{rcd}$  : せん断補強筋のない部材の設計疲労耐力

$V_{cd}$  : せん断補強鋼材を用いない棒部材の設計せん断耐力

$V_{pd}$  : 永久荷重作用時における設計せん断力

$N$  : 疲労寿命

せん断補強鋼材を用いない棒部材の設計せん断耐力  $V_{cd}$  は次式による

$$V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$$

疲労寿命  $N_i$

$$N_i = 10^a$$

$$a = 11 \left(1 - \frac{V_{rd}}{V_{cd} \left(1 - V_{pd} / V_{cd}\right)}\right)$$

$V_{pd}$

$$a = 11 \left(1 - V_{rd} / V_{cd}\right) = \frac{11(V_{cd} - V_{rd})}{V_{cd}}$$

曲げモーメント時と同様、疲労強度  $N_i$  が  $2.0 \times 10^6$  回を上回る波高は無視する。 $2.0 \times 10^6$  回を超えない場合は設計変動せん断応力度に対する各波高の等価繰り返し回数を計算し、設計せん断疲労耐力  $V_{rcd}$  と  $V_{rd}$  の比で安全性を計算する。

等価繰り返し回数

$$N_i = \sum_{i=1}^m n_i \cdot 10^a \quad \begin{array}{l} k_1: 1.0 \\ K: 11 \end{array}$$

$$a = \frac{K}{k_1 \cdot V_{cd}} (V_{ri} - V_{rd})$$

$$\frac{\gamma_i \cdot V_{rd}}{V_{rcd} / \gamma_b} \leq 1.0$$

※沿岸技術研究センター 港湾構造物設計事例集 (平成19年 改訂版 6-4~6-7)

## 杭継手溶接部【限界状態設計法】

### 杭継手溶接部-疲労限界状態

#### i) 杭継手溶接部の疲労検討

①各波高で繰り返し作用する波力(波の山、波の谷)から直応力範囲を計算する。

$$\Delta\sigma = \max(\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2) \quad \Delta\sigma: \text{直応力範囲} \quad (N/mm^2)$$

$$\Delta\sigma_1: M(+)\text{での直応力範囲} \quad (N/mm^2)$$

$$\Delta\sigma_1 = |\text{①} - \text{①}'| \quad \Delta\sigma_2: M(-)\text{での直応力範囲} \quad (N/mm^2)$$

$$\Delta\sigma_2 = |\text{②} - \text{②}'| \quad \sigma_{cm}: \text{波の山での軸方向応力度} \quad (N/mm^2)$$

$$\sigma_{bcm}: \text{波の谷での最大曲げモーメント} \quad (N/mm^2)$$

$$\text{①} = \sigma_{cm} + \sigma_{bcm} \quad \text{による応力度}$$

$$\text{②} = \sigma_{cm} - \sigma_{bcm} \quad \sigma_{cv}: \text{波の谷での軸方向応力度} \quad (N/mm^2)$$

$$\text{①}' = \sigma_{cv} + \sigma_{bcv} \quad \sigma_{bcv}: \text{波の谷での最大曲げモーメント} \quad (N/mm^2)$$

$$\text{②}' = \sigma_{cv} - \sigma_{bcv} \quad \text{による応力度}$$

$$M_m: \text{波の谷の最大曲げモーメント} \quad (kN \cdot m)$$

$$\sigma_{cm} = V_m / A \quad V_m: \text{波の山の軸方向力} \quad (kN)$$

$$\sigma_{bcm} = M_m / Z \quad M_v: \text{波の谷の最大曲げモーメント} \quad (kN \cdot m)$$

$$\sigma_{cv} = V_v / A \quad V_v: \text{波の谷の軸方向力} \quad (kN)$$

$$\sigma_{bcv} = M_v / Z \quad A: \text{鋼材の断面積} \quad (cm^2)$$

$$Z: \text{鋼材の断面係数} \quad (cm^3)$$

②直応力範囲の許容回数を計算する。

$$N = C_0 / \Delta\sigma^m \quad N: \text{直応力範囲}\Delta\sigma\text{により損傷率が} \quad (N/mm^2)$$

$$C_0 = (2 \times 10^6) \Delta\sigma_f^m \quad 1\text{に達する許容回数}$$

$$C_0: \text{疲労設計曲線を表すための定数}$$

$$m: \text{疲労設計曲線の傾きを表すための係数}$$

$$\text{直応力を受ける継手}(m=3)$$

$$\Delta\sigma_f: \text{直応力に対する} 2 \times 10^6 \text{回の} \quad (N/mm^2)$$

$$\text{基本許容応力範囲}$$

③直応力範囲の許容回数を計算する。

累積損傷率に基づく照査を行う

ただし、波高階級毎での杭継手溶接部の直応力範囲( $\Delta\sigma_k$ )と一定振幅応力に対する打ち切り限界としての直応力範囲( $\Delta\sigma_{ce}$ )との比 $\Delta\sigma_k / \Delta\sigma_{ce} \leq 1.000$ となる場合は照査対象外とする

$$\sum (n/N)_k \leq 1.000 \quad \Delta\sigma_{ce}: \text{一定振幅応力に対する} \quad (N/mm^2)$$

$$\text{打ち切り限界としての直応力範囲}$$

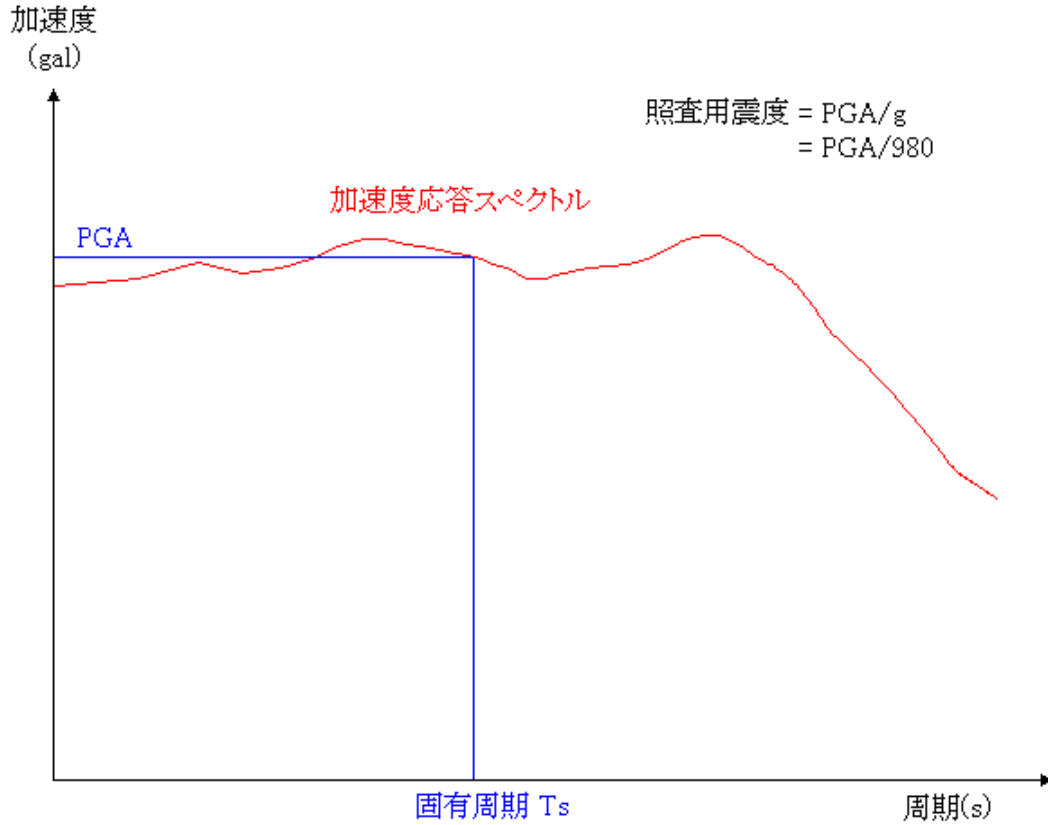
$$n/N: \text{鋼材の継手溶接部が受ける損傷率}$$

$$n: \text{設計期間中に作用する波の発生回数}$$

$$k: \text{波高階級番号}$$

### 2-13. 設計震度の算定

設計震度の特性値は1次元の地震応答解析により得られた仮想地表面から  $1/\beta$  の位置での加速度から求めた加速度応答スペクトルを構造物の固有周期に対応する応答加速度を重力加速度で除した値で算定されます。



## 加速度応答スペクトルの算定

$$\left. \begin{aligned}
 t = 0 \quad & \left. \begin{aligned}
 x_1 &= 0 \\
 x'_1 &= -y\Delta t \\
 (x'' + y'')_1 &= 2h\omega y\Delta t
 \end{aligned} \right\} \\
 t \neq 0 \quad & \left. \begin{aligned}
 x_{i+1} &= A_{11}x_i + A_{12}x'_i + B_{11}y''_i + B_{12}y'_{i+1} \\
 x'_{i+1} &= A_{21}x_i + A_{22}x'_i + B_{21}y''_i + B_{22}y'_{i+1} \\
 (x'' + y'')_{i+1} &= -(2h\omega x'_{i+1} + \omega^2 x_{i+1})
 \end{aligned} \right\}
 \end{aligned}$$

ここに

$$A_{11} = e^{-h\omega\Delta t} \left( \cos \omega_d \Delta t + \frac{h\omega}{\omega_d} \sin \omega_d \Delta t \right)$$

$$A_{12} = e^{-h\omega\Delta t} \frac{1}{\omega_d} \sin \omega_d \Delta t$$

$$A_{21} = e^{-h\omega\Delta t} \frac{\omega^2}{\omega_d} \sin \omega_d \Delta t$$

$$A_{22} = e^{-h\omega\Delta t} \left( \cos \omega_d \Delta t - \frac{h\omega}{\omega_d} \sin \omega_d \Delta t \right)$$

$$B_{11} = e^{-h\omega\Delta t} \left[ \left( \frac{1}{\omega^2} + \frac{2h}{\omega^3 \Delta t} \right) \cos \omega_d \Delta t + \left( \frac{h}{\omega\omega_d} - \frac{1-2h^2}{\omega^2 \omega_d \Delta t} \right) \sin \omega_d \Delta t \right] - \frac{2h}{\omega^3 \Delta t}$$

$$B_{12} = e^{-h\omega\Delta t} \left[ -\frac{2h}{\omega^3 \Delta t} \cos \omega_d \Delta t + \frac{1-2h^2}{\omega^2 \omega_d \Delta t} \sin \omega_d \Delta t \right] - \frac{1}{\omega^2} + \frac{2h}{\omega^3 \Delta t}$$

$$B_{21} = e^{-h\omega\Delta t} \left[ -\frac{1}{\omega^2 \Delta t} \cos \omega_d \Delta t - \left( \frac{h}{\omega\omega_d \Delta t} + \frac{1}{\omega_d} \right) \sin \omega_d \Delta t \right] + \frac{1}{\omega^2 \Delta t}$$

$$B_{22} = e^{-h\omega\Delta t} \left[ \frac{1}{\omega^2 \Delta t} \cos \omega_d \Delta t + \frac{h}{\omega\omega_d \Delta t} \sin \omega_d \Delta t \right] - \frac{1}{\omega^2 \Delta t}$$

$x$ : 質点の地面に対する相対変位

$y''$ : 地動の加速度時刻歴 (gal)

$(x'' + y'')$ : 絶対加速度応答 (gal)

$\omega$ : 質点固有円振動数

$$\omega_d : \omega_d = \omega \sqrt{1-h^2}$$

$h$ : 減衰定数

$\Delta t$ : 時間間隔 (s)

※鹿島出版会, 新・地震動のスペクトル解析入門 (P243~P244, P251~P254)

## 固有周期の算定

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{W}{gK}}$$

$$K = P_H / \delta$$

ここに

$T_s$  : 固有周期 (s)

$W$  : 構造物の自重及び地震時の上乗荷重 (kN)

$g$  : 重力加速度 (= 9.8m/s<sup>2</sup>)

$K$  : 構造物のバネ定数 (kN/m)

$P_H$  : 水平荷重 (kN)

$\delta$  : 水平荷重が作用した際の鋼管式防波堤の水平変位 (m)

※日本港湾協会、港湾の施設の技術上の基準・同解説 中巻（平成30年5月 P1209）

## 2-14. H30年港湾基準の照査方法について

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（部分係数を用いた設計用値による性能照査式）（以下、部分係数法）に変更となっています。

この度のH30年版では、部分係数の与え方が荷重抵抗係数アプローチによるものに変更となりました。

部分係数法での、各外力を求める方法は許容応力度法の場合と同じです。一般に、部分係数（ $\gamma$ ）が乗じられていない値を部分係数法では特性値と呼び、部分係数（ $\gamma$ ）が乗じられた値を設計用値と呼びます。

※ 基準書には、応力照査に用いる部分係数を除いて鋼管防波堤の標準的な部分係数は示されていません。しかし、「性能照査に用いる調整係数は、過去設計法等に基づく許容応力度を参考として、適切に設定する。」と記述があるため、全ての部分係数を便宜上1.0とした上で、調整係数を用いて照査することを前提として初期値を設定しています。

参照：『港湾の施設の技術上の基準・同解説 上巻 平成30年5月』P.27～

参照：『港湾の施設の技術上の基準・同解説 中巻 平成30年5月』P.964

### 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
波圧作用時	— (1.00)	— (1.00)	1.67
レベル1地震動、揚圧力作用時	— (1.00)	— (1.00)	1.12

参考：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
波圧作用時	引抜杭	1.00	1.00	3.00
	押込杭	1.00	1.00	2.50
レベル1地震動、揚圧力作用時	引抜杭	1.00	1.00	2.50
	押込杭	1.00	1.00	1.50

参考：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）

### 杭の負の周面摩擦照査

照査対象	抵抗項に 乗じる 部分係数 $\gamma_R$	荷重項に 乗じる 部分係数 $\gamma_S$	調整係数 m
$m \cdot \frac{\gamma_S(R_{ak} + R_{nf,max})}{\gamma_R R_{pk}} \leq 1.0$	— (1.00)	— (1.00)	1.20
$m \cdot \frac{\gamma_S[(R_{ak} + R_{nf,max})/A_e]}{\gamma_R \sigma_{fk}} \leq 1.0$	— (1.00)	— (1.00)	1.00

参考：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 P729）



### 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 元年 6月 | 日本港湾協会         |
|                            | 平成11年 4月 | 日本港湾協会         |
|                            | 平成30年 5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   |
|                            | 平成19年 3月 | 沿岸技術研究センター     |
|                            | 平成30年12月 | 沿岸技術研究センター     |
| ・ 漁港の設計指針                  | 1999年版   | 全国漁港協会         |
| ・ 漁港・漁場の施設の設計の手引き          | 2003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   | 全国漁港協会         |
| ・ 漁港構造物の設計ガイド              | 平成 7年 2月 | 全国漁港協会         |
| ・ 鋼矢板 設計から施工まで             | 平成10年 5月 | 鋼管杭協会・鋼矢板技術委員会 |
| ・ 鋼管杭—その設計と施工—             | 平成12年 4月 | 鋼管杭協会          |
| ・ 鋼管杭・鋼管矢板の附属品の標準化         | 平成14年 3月 | 鋼管杭協会          |
| ・ 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 3月 | 日本道路協会         |
|                            | 平成29年12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         |
| ・ 構造力学公式集                  | 昭和49年12月 | 土木学会           |
| ・ コンクリート標準示方書 設計編          | 平成 8年制定  | 土木学会           |
| ・ コンクリート標準示方書[構造性能照査編]     | 2002年制定  | 土木学会           |
| ・ 水理公式集                    | 平成11年度版  | 土木学会           |
| ・ 新・新・地震動のスペクトル解析入門        |          | 鹿島出版会          |
| ・ 杭軸直角方向地盤反力係数の推定方法に関する一提案 |          | 第41回地盤工学研究発表会  |
| ・ 港湾鋼構造物防食・補修マニュアル         | 2009年版   | 沿岸技術研究センター     |