

港湾設計業務シリーズ

係留杭設計計算

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. 船舶に作用する風荷重 | 2 |
| 浮棧橋ありの場合 | 2 |
| 浮棧橋なしの場合 | 3 |
| 2-2. 船舶に作用する波力 | 4 |
| 波長の算定 | 4 |
| 浮棧橋ありの場合 | 5 |
| 浮棧橋なしの場合 | 6 |
| 2-3. 杭に作用する波力 | 7 |
| 2-4. 船舶の接岸力 | 8 |
| 港湾基準 | 8 |
| 漁港基準 | 10 |
| 2-5. 断面性能について | 11 |
| 2-6. 杭の反力について | 12 |
| フレーム計算 | 12 |
| チャンの方法 | 14 |
| 港研方式 | 17 |
| 水平方向地盤反力係数の算定方法 | 20 |
| 2-7. 杭の応力について | 22 |
| 杭の応力照査【許容応力度法】 | 22 |
| 杭の応力照査【港湾基準(H19)】 | 23 |
| 杭の応力照査【港湾基準(H30)】 | 24 |
| 2-8. 支持力について | 25 |
| 杭の支持力照査【許容応力度法】 | 25 |
| 杭の支持力照査【港湾基準(H19)】 | 25 |
| 杭の支持力照査【港湾基準(H30)】 | 26 |
| 打込鋼管【許容応力度法】 | 27 |
| 打込鋼管【港湾基準(H19)、港湾基準(H30)】 | 28 |
| 中堀鋼管【許容応力度法】 | 29 |
| 中堀鋼管【港湾基準(H19)、港湾基準(H30)】 | 29 |
| 埋込み杭【許容応力度法】 | 31 |
| 2-9. 根入れ長の検討 | 32 |
| 地盤が一様とみなせる場合 | 32 |
| 地盤の性質が著しく変化する場合 | 32 |
| 2-10. 杭頭天端高の照査 | 33 |
| 2-11. 作用荷重一覧 | 34 |
| 2-12. H30年港湾基準の照査方法について | 35 |
| 杭の応力照査 | 35 |
| 杭の支持力照査 | 35 |
| 3. 補足資料 | 36 |
| 3-1. 参考文献 | 36 |

1. 概要

1-1. システムの特長

本システムは、「係留杭」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。

構造物モデルとして、浮棧橋のあり/なしを選択することができ、係留杭の応力度、変位量、根入れ長の検討が可能です。また、支持力の計算が可能のため、単杭としての計算が可能です。

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/19年港湾基準、許容応力度法に準拠しています。
- ・ 浮棧橋のあり/なしを選択できます。
- ・ 検討潮位は最大3潮位扱えます。(H.W.L、L.W.L、任意潮位)
- ・ 主たる外力として変動波浪もしくは船舶の接岸が選択できます。
- ・ 1回の計算で最大6ケースの検討ができます。
- ・ 杭の計算はフレーム計算、チャンの方法、港研方式(C型地盤、S型地盤)が選択できます。ただし、主たる外力として船舶の接岸を選択している場合は港研方式の選択はできません。
- ・ 杭の支持力計算(打込鋼管、中掘鋼管、埋込み杭)の計算が可能です。
- ・ 杭に作用する波力の計算方法はモリソン式、直接入力を選択できます。
- ・ 係留中船舶の諸元は最大50種類を設定できます。
- ・ 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。
- ・ 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。
- ・ 報告書の印刷イメージを画面に表示し、確認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]

| | | |
|-------------|----|-------|
| ・ 検討ケース数 | 最大 | 6 ケース |
| ・ 検討潮位 | 最大 | 3 潮位 |
| ・ 船舶諸元数 | 最大 | 50 種類 |
| ・ 土層データ数 | 最大 | 13 層 |
| ・ その他外力データ数 | 最大 | 4 |

2. 機能説明

2-1. 船舶に作用する風荷重

浮棧橋ありの場合

浮棧橋がある場合、船舶に作用する風荷重により計算される係留杭の荷重は以下①から③の順序で計算する。

- ①浮棧橋に係留される単独船舶に作用する最大風荷重を算出する。
- ②浮棧橋に係留された全船舶の風荷重の合計を算出する。
- ③風荷重の合計値を各係留杭に分配させ、係留杭1本当たりの荷重を求める。

(1) 単独船舶に作用する最大風荷重

$$F_K = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot C_K$$

$$A = 0.18L^2$$

F_K : 単独船舶に作用する最大風荷重 (kN)

C_D : 抗力係数

ρ : 空気の密度 (kg/m³)

U : 風速(10分間平均風速) (m/s)

A : 投影面積 (m²)

C_K : 割増係数

L : 船舶の全長 (m)

(2) 対象船舶に作用する最大風荷重の合計

$$F_K' = \sum_{m=1}^n (F_K \lambda)_m$$

F_K' : 対象船舶に作用する最大風荷重の合計 (kN)

F_K : 対象船舶に作用する最大風荷重 (kN)

λ : 遮へい係数

n : 対象船舶の係留中合計隻数

(3) 杭一本あたりに作用する最大風荷重

$$F_K'' = \frac{\sum_{m=1}^l (F_K')_m}{n}$$

F_K'' : 杭一本あたりに作用する最大風荷重 (kN/本)

F_K' : 対象船舶に作用する最大風荷重の合計 (kN)

l : 係留中船舶の諸元数(投影面積が異なる船舶の数)

n : 浮棧橋中の係留杭の本数 (本)

参照: 『プレジャーボート用浮棧橋設計マニュアル(平成23年改訂版)』P. 25~28

参照: 『プレジャーボート用浮棧橋設計マニュアル(平成30年改訂版)』P. 27~32

浮棧橋なしの場合

浮棧橋がない場合、船舶に作用する風荷重の計算は以下①、②の順序で実施する。

- ①係留杭に直接係留されている船舶の風荷重を求める。
- ②求めた風荷重の中から最大値を係留杭に作用する荷重として用いる。

(1) 単独船舶に作用する最大風荷重

$$F_K = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot C_K \cdot \lambda$$

$$A = 0.18L^2$$

F_K : 対象船舶に作用する最大風荷重 (kN)

C_D : 抗力係数

ρ : 空気の密度 (kg/m³)

U : 風速(10分間平均風速) (m/s)

A : 投影面積 (m²)

C_K : 割増係数

λ : 遮へい係数

L : 船舶の全長 (m)

参照：『プレジャーボート用浮棧橋設計マニュアル(平成23年改訂版)』P. 25～28

参照：『プレジャーボート用浮棧橋設計マニュアル(平成30年改訂版)』P. 27～32

2-2. 船舶に作用する波力

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

参照：『土木学会，水理公式集』（平成11年版 P458）

浮棧橋ありの場合

浮棧橋がある場合、船舶に作用する波力により計算される係留杭の荷重は以下①から③の順序で計算する。

- ①浮棧橋に係留される船舶の喫水の最大値と浮棧橋の喫水を比較して大きい方を浮体(浮棧橋 + 係留中船舶)の喫水として取得する。
- ②浮体に作用する波力を算出する。
- ③浮体に作用する波力を各係留杭に分配させ、係留杭1本当たりの荷重を求める

(1) 浮体全体に作用する波力

$$d > \frac{1}{2} \cdot H_{\max} \text{ のとき}$$

$$F_b = \rho_0 g \cdot H_{\max} \cdot L \cdot d$$

$$d \leq \frac{1}{2} \cdot H_{\max} \text{ のとき}$$

$$F_b = \frac{1}{2} \cdot \rho_0 g \cdot \left(\frac{H_{\max}}{2} + d \right)^2 \cdot L$$

F_b : 浮体全体に作用する波力 (kN)

d : 浮体の喫水 (船舶と浮棧橋で大きい方を使用) (m)

H_{\max} : 設計波高 (m)

$\rho_0 g$: 海水の単位体積重量 (kN/m³)

L : 浮体の長さ (浮棧橋の全長と全幅で大きい方を使用) (m)

(2) 杭1本あたりに作用する荷重

$$F_b' = \frac{F_b}{n}$$

F_b' : 杭1本あたりに作用する荷重 (kN/本)

n : 浮棧橋中の係留杭の本数 (本)

参照 : 『プレジャーボート用浮棧橋設計マニュアル(平成23年改訂版)』 P. 32~33)

参照 : 『プレジャーボート用浮棧橋設計マニュアル(平成30年改訂版)』 P. 37~38)

浮棧橋なしの場合

浮棧橋がない場合、船舶に作用する波力により計算される係留杭の荷重は以下①、②の順序で計算する。

- ①係留杭に直接係留されている船舶の波力を求める。
- ②求めた波力の中から最大値を係留杭に作用する荷重として用いる。

船舶の長さが半波長より長い場合

$$d > \frac{1}{2} \cdot H_{\max} \text{ のとき}$$

$$F_s = \rho_0 g \cdot H_{\max} \cdot L \cdot d$$

$$d < \frac{1}{2} \cdot H_{\max} \text{ のとき}$$

$$F_s = \frac{1}{2} \cdot \rho_0 g \cdot \left(\frac{H_{\max}}{2} + d \right)^2 \cdot L$$

F_s : 船舶に作用する波力 (kN)

d : 船舶の喫水 (m)

H_{\max} : 設計波高(最高波高) (m)

$\rho_0 g$: 海水の単位体積重量 (kN/m³)

L : 船舶の長さ (m)

船舶の長さが半波長より短い場合

$$d > \frac{1}{2} \cdot H_{\max} \text{ のとき}$$

$$F_s = 2 \cdot \rho_0 g \cdot H_{\max} \cdot L \cdot \frac{B}{L_A}$$

$$d < \frac{1}{2} \cdot H_{\max} \text{ のとき}$$

$$F_s = \rho_0 g \cdot \left(\frac{H_{\max}}{2} + d \right)^2 \cdot L \cdot \frac{B}{L_A}$$

B : 船舶の全幅 (m)

L_A : 波長 (m)

参照 : 『プレジャーボート用浮棧橋設計マニュアル(平成23年改訂版)』 P. 29~30

参照 : 『プレジャーボート用浮棧橋設計マニュアル(平成30年改訂版)』 P. 33~35

2-3. 杭に作用する波力

杭に作用する波力の計算方法で「モリソン式」を選択した場合、杭に作用する全波力の最大値を算出します。

(1) 全波力の最大値

$$(F_D)_{\max} > \frac{1}{2}(F_M)_{\max} \text{ の場合}$$

$$(F)_{\max} = (F_D)_{\max} + \frac{(F_M)_{\max}^2}{4(F_D)_{\max}}$$

$$(F_D)_{\max} \leq \frac{1}{2}(F_M)_{\max} \text{ の場合}$$

$$(F)_{\max} = (F_M)_{\max}$$

$(F)_{\max}$: 係留杭に作用する全波力の最大値 (kN)

$(F_D)_{\max}$: 全抗力の最大値 (kN)

$(F_M)_{\max}$: 全慣性力の最大値 (kN)

(2) 全抗力と全慣性力の最大値

$$(F_D)_{\max} = \rho_0 \cdot g \cdot C_D \cdot D \cdot (H_{\max})^2 \cdot K_D$$

$$(F_M)_{\max} = \rho_0 \cdot g \cdot C_M \cdot D^2 \cdot H_{\max} \cdot K_M$$

$(F_D)_{\max}$: 全抗力の最大値 (kN)

$(F_M)_{\max}$: 全慣性力の最大値 (kN)

$\rho_0 g$: 海水の単位体積重量 (kN/m³)

C_D : 鋼管杭の抗力係数

C_M : 鋼管杭の慣性力係数

D : 鋼管杭の直径 (m)

H_{\max} : 設計波高 (m)

参照 : 『プレジャーボート用浮棧橋設計マニュアル(平成23年改訂版)』 P. 34

参照 : 『プレジャーボート用浮棧橋設計マニュアル(平成30年改訂版)』 P. 38~39

2-4. 船舶の接岸力

港湾基準

(1) 接岸エネルギー

$$E_f = \frac{1}{2} \cdot M_s \cdot V_b^2 \cdot C_m \cdot C_e \cdot C_s \cdot C_c$$

E_f : 船舶の接岸エネルギー (kN・m)

M_s : 船舶の質量 (t)

V_b : 船舶の接岸速度 (m/s)

C_m : 仮想質量係数

C_e : 偏心係数

C_s : 柔軟性係数

C_c : バースの形状係数

(2) 杭に作用する水平力

$$F_f = \sqrt{\frac{12E_f EI \beta^3}{2(1 + \beta h)^3 + 1}}$$

F_f : 杭に作用する水平力 (kN)

E : 杭の弾性係数 (kN/m²)

I : 断面二次モーメント (m⁴)

β : 平均特性値 (m⁻¹)

h : 杭の突出長 (m)

(3) 仮想質量係数

$$C_m = \frac{M_s + M_w}{M_s}$$

C_m : 仮想質量係数

M_s : 船舶の重量 (kg)

M_w : 船舶周辺の水塊の重量 (kg)

(4) 偏心係数

$$C_e = \frac{1}{1 + \left(\frac{L}{r}\right)^2}$$

$$r = (0.19C_b + 0.11)L_{pp}$$

C_e : 偏心係数

L : 船舶の接触点から係留施設の法線に
平行に図った当該船舶の重心までの距離 (m)

r : 船舶の重心を通る鉛直周りの回転半径 (m)

C_b : ブロック係数

L_{pp} : 垂線間長 (m)

参照 : 『プレジャーボート用浮棧橋設計マニュアル(平成23年改訂版)』 P. 35～37

参照 : 『プレジャーボート用浮棧橋設計マニュアル(平成30年改訂版)』 P. 40～42

漁港基準

(1) 接岸エネルギー

1/2点接岸時の接岸エネルギー

$$E_f = E_0$$

1/4点接岸時の接岸エネルギー

$$E_f = 0.5E_0$$

$$E_0 = \frac{WV^2}{2g}$$

| | | |
|------------|------------|------------------|
| E_0, E_f | 船舶の接岸エネルギー | ($kN \cdot m$) |
| W | 仮想重量 | (kN) |
| g | 重量加速度 | (m/s^2) |
| V | 接岸速度 | (m/s) |

(2) 杭に作用する水平力

$$F_f = \sqrt{\frac{12E_f E I \beta^3}{2(1 + \beta h)^3 + 1}}$$

| | | |
|---------|-----------|--------------|
| F_f | 杭に作用する水平力 | (kN) |
| E | 杭の弾性係数 | (kN/m^2) |
| I | 断面二次モーメント | (m^4) |
| β | 平均特性値 | (m^{-1}) |
| h | 杭の突出長 | (m) |

(2) 仮想重量

$$W = W_0 + \frac{\pi}{4} D^2 L \gamma_w$$

| | | |
|------------|---------------------------------|--------------|
| W | 仮想重量 | (kN) |
| W_0 | 排水トン数 | (kN) |
| D | 喫水 | (m) |
| L | 横づけ接岸の場合は船舶長さ、 縦づけ接岸の場合は船舶の幅 | (m) |
| γ_w | 海水の単位体積重量 | (kN/m^3) |

参照：『漁港・漁場の施設の設計参考図書』（2015年度版 [上] P196, P197）

2-5. 断面性能について

本プログラムでは、係留杭の断面性能を以下のように算定しています。

(1) 断面二次モーメント (I)

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

I: 断面二次モーメント (cm^4)

D: 外径の直径 (cm)

d: 内径の直径 (cm)

(2) 断面係数 (Z)

$$Z = \frac{I}{y}$$

$$y = \frac{D}{2}$$

Z: 断面係数 (cm^3)

I: 断面二次モーメント (cm^4)

y: 外径の半径 (cm)

参照：『土木学会，構造力学公式集』（昭和49年12月 P44～P46）

2-6. 杭の反力について

本システムでは、変動波浪による杭の計算をする場合は「[フレーム計算](#)」「[チャンの方法](#)」「[C型地盤](#)」「[S型地盤](#)」から、船舶の接岸による杭の計算をする場合は「[フレーム計算](#)」「[チャンの方法](#)」から選択できます。

フレーム計算

部材端力と部材端変位の関係式

$$F^i = \begin{Bmatrix} Q_i^i \\ M_i^i \\ Q_j^i \\ M_j^i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}^i & A_{12}^i & A_{13}^i & A_{14}^i \\ A_{21}^i & A_{22}^i & A_{23}^i & A_{24}^i \\ A_{31}^i & A_{32}^i & A_{33}^i & A_{34}^i \\ A_{41}^i & A_{42}^i & A_{43}^i & A_{44}^i \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_i^i \\ \alpha_i^i \\ u_j^i \\ \alpha_j^i \end{Bmatrix} = A^i U^i$$

$$F = \sum_{i=1}^n A^i U^i = AU$$

F^i : 第*i*部材の部材端力のベクトル

A^i : 第*i*部材の剛性マトリクス

U^i : 第*i*部材の部材端変位ベクトル

Q_i, Q_j : 部材端*i, j*点に作用するせん断力

M_i, M_j : 部材端*i, j*点に作用するモーメント

u_i, u_j : 部材端*i, j*点の軸直角方向変位

α_i, α_j : 部材端*i, j*点の回転角

F : 節点荷重のベクトル

A : 全体の剛性マトリクス

U : 節点変位ベクトル

第 i 部材の剛性マトリックス

矢板の特性値 (β) = 0 の場合

$$\begin{aligned}A_{11} &= A_{33} = 12EI/l^3 \\A_{12} &= A_{14} = A_{21} = A_{41} = 6EI/l^2 \\A_{13} &= A_{31} = -12EI/l^3 \\A_{22} &= A_{44} = 4EI/l \\A_{23} &= A_{32} = A_{34} = A_{43} = -6EI/l^2 \\A_{24} &= A_{42} = 2EI/l\end{aligned}$$

矢板の特性値 (β) > 0 の場合

$$A_{11} = A_{33} = \frac{4EI\beta^3(\sin\beta l \cos\beta l + \sinh\beta l \cosh\beta l)}{\sinh^2\beta l - \sin^2\beta l}$$

$$A_{12} = A_{21} = \frac{2EI\beta^2(\sinh^2\beta l + \sin^2\beta l)}{\sinh^2\beta l - \sin^2\beta l}$$

$$A_{13} = A_{31} = \frac{-4EI\beta^3(\cosh\beta l \sin\beta l + \sinh\beta l \cos\beta l)}{\sinh^2\beta l - \sin^2\beta l}$$

$$A_{14} = A_{41} = -A_{32} = -A_{23} = \frac{4EI\beta^2 \sinh\beta l \sin\beta l}{\sinh^2\beta l - \sin^2\beta l}$$

$$A_{22} = A_{44} = \frac{2EI\beta(\sinh\beta l \cosh\beta l - \sin\beta l \cos\beta l)}{\sinh^2\beta l - \sin^2\beta l}$$

$$A_{24} = A_{42} = \frac{2EI\beta(\sin\beta l \cosh\beta l - \sinh\beta l \cos\beta l)}{\sinh^2\beta l - \sin^2\beta l}$$

$$A_{43} = A_{34} = -A_{12}$$

EI : 第*i*部材の曲げ剛性 ($kN \cdot m^2$)

β : 第*i*部材の特性値 (m^{-1})

l : 第*i*部材の部材長 (m)

参照: 『杭基礎設計便覧 平成27年3月』P. 471~476

チャンの方法

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

EI : 杭の曲げ剛性 ($kN \cdot m^2$)

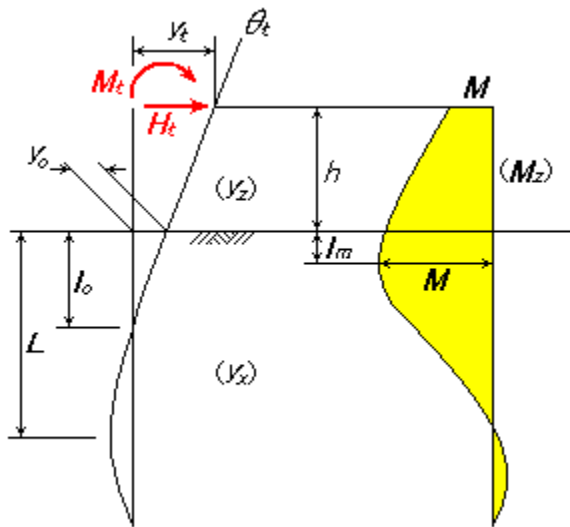
x : 地表面からの深さ (m)

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)

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

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

| | |
|--------------------|---|
| 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 | $l_m = \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \frac{1}{1 + 2\beta h_0}$ |

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 P704～709）

参照：『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

チャンの方式で計算した場合、照査用変位の計算は以下の3式から選択ができます

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

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

ここに

| | |
|--|--------------------|
| δ : 矢板の変位置 | (m) |
| δ_1 : 仮想地表面における矢板の変位置 | (m) |
| δ_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置 | (m) |
| δ_3 : 地上部を片持ち梁とした際の頭部の変位置 | (m) |
| β : 特性値 | (m^{-1}) |
| h_0 : 合力作用高さ | (m) |
| H_0 : 水平力 | (kN) |
| R_h : 矢板の変位置仮想海底面から天端までの高さ | (m) |
| EI : 杭の曲げ剛性 | ($kN \cdot m^2$) |
| Q : 変形係数 | (kN/m) |

変形係数Qは次のように表される

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

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)

参照: 『漁港・漁場の施設の設計参考図書』 (2015年版 P538~P539)

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

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

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) |
| β : チャンの方法による特性値 | (m^{-1}) |
| 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 | ($kN \cdot m^2$) |
| θ_1 : 波圧合力作用位置でのたわみ角 | |

参照: 『漁港・漁場の施設の設計参考図書』 (2015年版 P404~P405)

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

ここに

δ : 合力作用位置での水平変位 (m)

β : チャンの方法による特性値 (m^{-1})

h : 地表面から合力作用位置までの高さ (m)

H : 合力の大きさ (kN)

EI : 杭の曲げ剛性 ($kN \cdot m^2$)

参照: 『プレジャーボート用浮棧橋設計マニュアル』 (平成30年度改訂版 P68)

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 $(kN \cdot m^2)$

x : 地表面からの深さ (m)

y : 深さ x における杭の変位 (m)

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^2)

B : 杭幅 (m)

E_s : 地盤の弾性係数 (kN/m^2)

k_c : C型地盤の横抵抗係数 $(kN/m^{2.5})$

k_s : S型地盤の横抵抗係数 $(kN/m^{3.5})$

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 | | $h=1m$ |
| 曲 げ 剛 性 | | $EI=10^4kN \cdot m^2$ |
| 横 抵 抗 定 数 | S型地盤 | $Bk_s=0.5m \times 2000kN/m^{3.5}=1000kN/m^{2.5}$ |
| | C型地盤 | $Bk_c=0.5m \times 2000kN/m^{2.5}=1000kN/m^{1.5}$ |

b. 換算係数の計算

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

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

(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. 杭の諸量

$$\log M_{\max} = \log(M_{\max})_s + \log R_M$$

$$\log l_{m1} = \log(l_{m1})_s + \log R_h$$

$$\log y_0 = \log(y_0)_s + \log R_y$$

$$\log i_0 = \log(i_0)_s + \log R_i$$

M_{\max} : 杭の最大曲げモーメント (kN・m)

l_{m1} : 杭の曲げモーメント第一零点深さ (m)

y_0 : 地表面での杭の変位量 (kN・m)

i_0 : 地表面での杭のたわみ角 (rad)

変位量

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$$
$$\delta_1 = y_0 \quad \delta_2 = \frac{QR_h^3}{EI} \quad \delta_3 = i_0 R_h$$

ここに

| | |
|---|-----------------------|
| δ : 杭頭部の変位量 | (cm) |
| δ_1 : 地表面での杭の変位量 | (cm) |
| δ_2 : 地表面より上の片持ばりとしての変位量 | (cm) |
| δ_3 : 地表面のたわみ角によるこの点より上の杭の 回転角のために生ずる杭頭の変位量 | (cm) |
| y_0 : 地表面での杭の変位量 | (cm) |
| i_0 : 地表面での杭のたわみ角 | (rad) |
| R_h : 杭の突出長 | (cm) |
| E : 杭の弾性係数 | (kN/cm ²) |
| I : 杭の断面二次モーメント | (cm ⁴) |
| Q_0 : 変形係数 | (kN) |

変形係数Qは次のように表される

$$Q_0 = \sum Q = \sum \frac{H}{6} (3-d)d^2$$

$$d = \frac{h}{R_h}$$

ここに

| | |
|------------------|------|
| H : 各集中荷重 | (kN) |
| h : 各集中荷重の作用高さ | (m) |
| R_h : 杭の突出長 | (m) |

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 P711～723）

参照：『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』

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 (kN/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

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

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

ここに

- D : 杭径 (m)
 EI : 曲げ剛性 ($kN \cdot m^2$)
 α : 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 (kN/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 (α 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

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

- 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、 α 、 E_0 の内容は以下の通り

α : 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。

$$K = 1500 \cdot N$$

$$N = q_u \cdot X$$

$$q_u = 2 \cdot C$$

ここに

C : 土層の粘着力 (N/mm^2)

N : N値

X : 40~80の値を使用

q_u : 一軸圧縮強度 (N/mm^2)

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

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

参照 : 『港湾の施設の技術上の基準・同解説』 (平成19年7月 P628, P629)

参照 : 『道路橋示方書・同解説IV下部構造編』 (平成29年11月 P187、259)

参照 : 『鋼矢板 設計から施工まで』 (2000年 改定新版 P26)

参照 : 『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』

2-7. 杭の応力について

杭の応力照査【許容応力度法】

| 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

σ_c : 杭の軸方向力による圧縮応力度 (N/mm^2)

σ_t : 杭の軸方向力による引張応力度 (N/mm^2)

σ_b, σ_{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 σ_{ta} | 140 | 185 |
| 軸方向圧縮応力度 σ_{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 σ_{bt} | 140 | 185 |
| 曲げ圧縮応力度 σ_{ba} | 140 | 185 |

| 鋼種 | SM490Y | SM570 |
|------------------------|---|---|
| 軸方向引張応力度 σ_{ta} | 210 | 255 |
| 軸方向圧縮応力度 σ_{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 σ_{bt} | 210 | 255 |
| 曲げ圧縮応力度 σ_{ba} | 210 | 255 |

参照：『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(H19)】

鋼材の降伏応力度

| 鋼種 | SHK400M, SKK400, SKY400 | SHK490M, SKK490, SKY490 |
|---------------------------|---|---|
| 軸方向引張応力度 σ_{ty} | 235 | 315 |
| 軸方向圧縮応力度 σ_{cy} | $l/r \leq 18$ 235 $18 < l/r \leq 92$ $235 - 1.39 \left(\frac{l}{r} - 18 \right)$ $l/r > 92$ $\frac{2,010,000}{6,700 + \left(\frac{l}{r} \right)^2}$ | $l/r \leq 16$ 315 $16 < l/r \leq 79$ $315 - 2.04 \left(\frac{l}{r} - 16 \right)$ $l/r > 79$ $\frac{2,040,000}{5,000 + \left(\frac{l}{r} \right)^2}$ |
| 曲げ圧縮応力度 σ_{ba} | 235 | 315 |

軸力に対して
$$\sigma_{cd} = \frac{N_d}{A}$$

曲げに対して
$$\sigma_{bd} = \frac{M_d}{Z}$$

軸圧縮方向力に関する照査
$$\gamma_a \left(\frac{\sigma_{cd}}{\sigma_{cad}} + \frac{\sigma_{bd}}{\sigma_{bad}} \right) \leq 1.0$$

軸引張方向力に関する照査
$$\gamma_a (\sigma_{td} + \sigma_{btd}) \leq \sigma_{tyd}$$

 かつ
$$\gamma_a (-\sigma_{td} + \sigma_{bcd}) \leq \sigma_{byd}$$

$$\sigma_{cad} = \gamma_{\sigma_y} \sigma_{ca} \quad \sigma_{bad} = \gamma_{\sigma_y} \sigma_{ba} \quad \sigma_{tad} = \gamma_{\sigma_y} \sigma_{ta}$$

ここに

σ_c : 杭の軸方向力による圧縮応力度 (N/mm^2)

σ_t : 杭の軸方向力による引張応力度 (N/mm^2)

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

N_d : 杭の軸方向力の設計用値 (N)

M_d : 杭の曲げモーメントの設計用値 (N/mm)

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)

γ_{σ_y} : 鋼材の降伏応力度の部分係数

γ_a : 構造解析係数

本システムでは $\sigma_{tyd} = \sigma_{byd}$ $\sigma_{btd} = \sigma_{bcd}$ $\sigma_{td} + \sigma_{btd} < -\sigma_{td} + \sigma_{bcd}$ より

軸引張方向力に関する照査は $\gamma_a (-\sigma_{td} + \sigma_{bcd}) / \sigma_{bya}$ として行っています。

参照: 『港湾の施設の技術上の基準・同解説』 (平成19年7月 P1120)

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

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

σ_t, σ_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^2)

σ_{bt}, σ_{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^2)

σ_{ty}, σ_{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^2)

σ_{by} : 曲げ圧縮降伏応力度 (N/mm^2)

R_k : 抵抗項に関する特性値 (N/mm^2)

S_k : 荷重項に関する特性値 (N/mm^2)

γ_R : 抵抗項に乗じる部分係数

γ_S : 荷重項に乗じる部分係数

m : 調整係数

A : 断面積 (mm^2)

Z : 断面係数 (mm^3)

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 $13 < l/r \leq 67$ $450 - 3.70 \left(\frac{l}{r} - 13 \right)$ $l/r > 67$ $\frac{2,000,000}{3,500 + \left(\frac{l}{r} \right)^2}$ |

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 P1210～1212）

2-8. 支持力について

本システムでは支持力の検討には3つの工法（打込鋼管、中堀鋼管、埋込み杭）があります。許容応力度法は打込鋼管、中堀鋼管、埋込み杭から、港湾基準(H19)は中堀鋼管、埋込み杭から、港湾基準(H30)は打込鋼管(打設工法)の選択となります

杭の支持力照査【許容応力度法】

$$N + W \geq 0.0$$

$$R_a \geq N + W, R_a = R_u / F$$

$$N + W < 0.0$$

$$R_a \geq N, R_a = R_u / F + W$$

N : 杭の軸方向力(杭自重を含む) (kN)

R_a : 杭の許容支持力 (kN)

R_u : 杭の極限支持力 (kN)

W : 鋼材自重及びカーテン版重量 (kN)

F : 安全率

杭の作用状態に応じて以下の値を用いる

| 作用状態 | 押し込み | 引き抜き |
|------|------|------|
| 常時 | 2.5 | 3.0 |
| 異常時 | 1.5 | 2.5 |

杭の支持力照査【港湾基準(H19)】

$$N_d + W \geq 0.0$$

$$\gamma_a R_u \geq N_d + W, R_u = R_p + R_f$$

$$N_d + W < 0.0$$

$$\gamma_a R_u + W \geq N_d, R_u = R_f$$

γ_a : 構造解析係数

N_d : 杭の軸方向力(杭自重を含む) (kN)

R_u : 杭の極限支持力 (kN)

R_p : 杭の先端支持力 (kN)

R_f : 杭の周面支持力 (kN)

W : 鋼材自重及びカーテン版重量 (kN)

杭の支持力照査【港湾基準(H30)】

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

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

引抜力の場合 $S_k = V - W$, $R_k = R_{fk}$

ここに

R_k : 抵抗項に関する特性値 (N/mm²)

S_k : 荷重項に関する特性値 (N/mm²)

R_{pk} : 杭先端支持力の特性値 (N/mm²)

R_{fk} : 杭周面支持力の特性値 (N/mm²)

V : 杭の軸方向力 (kN)

W : 抵抗項杭の自重 (kN)

γ_R : 抵抗項に乗じる部分係数

γ_S : 荷重項に乗じる部分係数

m : 調整係数

打込鋼管【許容応力度法】

1) 軸方向押し込み力

[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)

α : 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 (m²)

A_s : 杭の周表面積 $A_s = U \cdot L_i$ (m²)

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 (m²)

γ : 杭の単位体積重量 (kN/m³)

L : 杭の長さ (m)

参照：『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(H19)、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)

α : 杭の閉塞率

A_p : 杭先端の有効面積 (m²)

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/m²)

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 (m²)

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/m²)

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 $C_{ai} = 100\text{kN/m}^2$

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 P691～P698）

中堀鋼管【許容応力度法】

1) 軸方向押込み力

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

$$R_u = q_d \cdot A_p + U(\sum 2 \cdot N_i \cdot L_i + \sum 0.8 \cdot C_{ai} \cdot L_i) \quad \text{—道路橋示方書 平成14年}$$

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

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

F : 安全率

2) 軸方向引抜き力

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

$$R_u = U(\sum 2 \cdot N_i \cdot L_i + \sum 0.8 \cdot C_{ai} \cdot L_i) \quad \text{—道路橋示方書 平成14年}$$

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

ここに

$$w: \text{杭の自重} \quad w = A \cdot \gamma \cdot L$$

A : 杭の断面積

γ : 杭の単位体積重量

L : 杭の長さ

中堀鋼管【港湾基準(H19)、港湾基準(H30)】

1) 杭の先端抵抗力

$$R_{pk} = q_d A_p$$

ここに

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/m²)

A_p : 杭の先端面積 (m²)

2) 杭の周面抵抗力

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

$$R_{fk} = (\sum 2 N_i L_i + \sum 0.8 C_{ai} L_i) U \quad \text{—道路橋示方書 平成14年}$$

ここに

R_{fk} : 杭の周面抵抗力の特性値 (kN)

N_i : 砂層土層内の平均N値

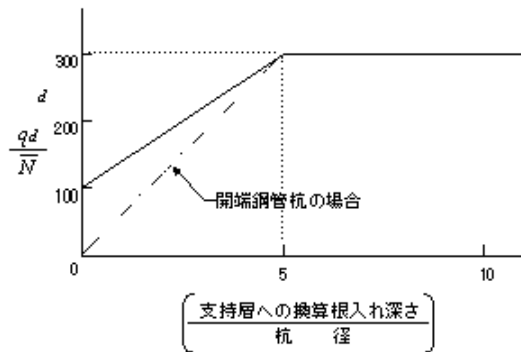
C_{ai} : 杭粘性土層内の平均粘着力 (kN/m²)

L_i : 層の厚さ (m)

U : 杭の周長 (m)

q_d は以下の項目より算定します

1 : 最終打撃工法



$$q_d = \frac{300}{5} \cdot N \cdot \left(\frac{\text{支持層への換算根入れ深さ}}{\text{杭径}} \right)$$

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)

$$q_d = 3 \cdot q_u$$

$$q_u : \text{一軸圧縮強度}(kN/m^2)$$

※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)

埋込み杭【許容応力度法】

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)

η : 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 $\sim 4.0d$ 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

ψ : 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

ψ : 杭の周長

w : 杭の自重

F : 安全率

参照：『漁港構造物の設計ガイド』（平成6年度版 P66）

2-9. 根入れ長の検討

本システムでは計算方法で「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

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

ここに

| | | |
|----------|--------------------------|--------------|
| β | : $1/\beta$ の平均特性値 | (m^{-1}) |
| l | : 根入れ長 | (m) |
| X | : 円周率(π)か入力値 | |
| k_H | : $1/\beta$ の平均横方向地盤反力係数 | (kN/m^3) |
| l_i | : 第 i 層地盤の層厚 | (m) |
| k_{hi} | : 第 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

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

ここに

| | | |
|-----------|-------------------------|--------------|
| β_n | : 第 n 層地盤の特性値 | (m^{-1}) |
| l_n | : 第 n 層地盤の層厚 | (m) |
| X | : 円周率(π)か入力値 | |
| k_n | : 第 n 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 n 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。

参照：『漁港・漁場の施設の設計参考図書』（2015年度版 [上] P268）

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 P705）

2-10. 杭頭天端高の照査

$$L_T = h + \frac{H_{\max}}{2} + \alpha \leq L$$

L_T : 杭の必要天端高の標高 (m)

h : H.H.W.L (m)

H_{\max} : 設計波高 (m)

α : 余裕高 (m)

L : 杭の天端高の標高 (m)

参照: 『プレジャーボート用浮棧橋設計マニュアル(平成23年改訂版)』 P. 66

参照: 『プレジャーボート用浮棧橋設計マニュアル(平成30年改訂版)』 P. 67

2-11. 作用荷重一覧

各計算手法で使用する荷重は次の通りとなります。

| | 船舶に作用 | | 杭に作用 | | |
|--------|-------|-----|------|------|-----|
| | 波力 | 風荷重 | 波力 | 接岸力 | 他外力 |
| フレーム計算 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| チャンの方法 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| C型地盤 | ○ | ○ | ○ | ×(※) | ○ |
| S型地盤 | ○ | ○ | ○ | ×(※) | ○ |

(※)接岸力の港研方式(C型地盤、S型地盤)計算不可の理由

理由は、チャンの方法と港研方式で土質の考え方が異なるからである。接岸力の計算式はチャンの方式の変換式であり、チャンの方式は線形型地盤に基づいた計算式である。一方、港研方式は非線形型地盤に基づいた計算式であるため、地盤の使い方が異なる。したがって計算不可としている。

2-12. 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（ γ ）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（ γ ）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、標準的な部分係数は示されていません。そのため、支持力の照査は、「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、従来から利用されてきた安全率法や許容応力度法）に準ずるものとして、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～

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 |
|---------------|---------------------|---------------------|-----------|
| 載荷重、変動波浪 | — (1.00) | — (1.00) | 1.70 |
| 船舶の接岸、レベル1地震動 | — (1.00) | — (1.00) | 1.12 |

※プレジャーボート用浮棧橋設計マニュアル(平成30年改訂版) P. 66

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 |
|---------------|------|---------------------|---------------------|-----------|
| 載荷重、変動波浪 | 引抜杭 | 1.00 | 1.00 | 3.00 |
| | 押込杭 | 1.00 | 1.00 | 2.50 |
| 船舶の接岸、レベル1地震動 | 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。

- | | | |
|----------------------------|-----------------|--------------|
| ・ プレジャーボート用浮棧橋設計マニュアル | 平成 23 年改訂版 | 日本マリーナ・ビーチ協会 |
| ・ プレジャーボート用浮棧橋設計マニュアル | 平成 30 年改訂版 | 日本マリーナ・ビーチ協会 |
| ・ 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 19 年 7 月 | 日本港湾協会 |
| | 平成 30 年 5 月 | 日本港湾協会 |
| ・ 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 |
| ・ 水理公式集 | 平成 11 年版 | 土木学会 |
| ・ 杭基礎設計便覧 | 平成 27 年版 3 月 | 日本道路協会 |
| ・ 構造力学公式集 | 昭和 49 年 12 月 | 土木学会 |
| ・ 道路橋示方書 IV 下部構造編 | 平成 14 年 4 月 | 日本道路協会 |
| ・ 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 | |
| ・ 漁港構造物の設計ガイド | 平成 7 年 2 月 | 全国漁港協会 |