

港湾設計業務シリーズ

横棧橋設計計算3

Ver 2.X.X

商 品 概 説 書

目次

1. 概要	1
1-1. システムの特長	1
1-2. システムの制限事項	1
2. 機能説明	2
2-1. 揚圧力について	2
2-2. 断面性能について	3
2-3. 杭の反力について	4
骨組構造解析	4
水平方向地盤反力係数の算定方法	8
杭軸方向バネ定数の算定方法	10
平成29年道路橋示方書	10
平成24年道路橋示方書	12
2-4. 栈橋ブロックの回転を考慮した水平力	13
直杭式横栈橋	13
斜組杭式横栈橋	14
2-5. 杭の応力について	15
杭の応力照査【漁港基準、港湾基準(H11)】	15
杭の応力照査【港湾基準(H30)】	16
2-6. 補強・補修について	17
コンクリート被覆【許容応力度法】	17
スタッドの設計【許容応力度法】	18
コンクリート被覆【限界状態設計法】	19
スタッドの設計【限界状態設計法】	22
鉄板被覆の検討（応力照査）【漁港基準、港湾基準(H11)】	23
溶接強度の設定【漁港基準、港湾基準(H11)】	23
鉄板被覆の検討（応力照査）【港湾基準(H30)】	24
溶接強度の設定【港湾基準(H30)】	25
2-7. 根入れ長の検討について	26
地盤が一様とみなせる場合	26
地盤の性質が著しく変化する場合	26
2-8. 支持力について	27
打込鋼管【漁港基準、港湾基準(H11)】	28
打込鋼管【港湾基準(H30)】	29
中堀鋼管（平成24年道路橋示方書）	30
中堀鋼管（平成29年道路橋示方書）	32
埋込み杭	33
2-9. 負の周面摩擦について	34
安定検討【漁港基準、港湾基準(H11)】	34
安定検討【港湾基準(H30)】	34
打込鋼管	35
中堀鋼管	36
埋込み杭	37
2-10. 杭頭部の検討について	38
許容応力度法	38
押込み力／引き抜き力に対する照査	38
軸方向力に対する照査	39
杭頭モーメントに対する照査	39
水平力及びモーメントに対する照査	39
限界状態設計法	40

目次

押抜きせん断／引抜きせん断に対する照査	40
軸方向力に対する照査【港湾基準(H11)】	41
軸方向力に対する照査【港湾基準(H30)】	41
杭頭モーメントに対する照査【港湾基準(H11)】	42
杭頭モーメントに対する照査【港湾基準(H30)】	42
杭による押し抜きせん断に対する照査【港湾基準(H11)】	43
杭による押し抜きせん断に対する照査【港湾基準(H30)】	43
2-11. 設計震度の算定	44
加速度応答スペクトルの算定	45
固有周期の算定	46
2-12. 性能照査に用いる諸定数(許容応力度法)	47
栈橋杭の発生応力の照査に伴う許容応力度の割増	47
杭の支持力に関する性能照査	47
2-13. 性能照査に用いる部分係数(H30港湾基準)	48
栈橋杭の発生応力の照査	48
許容応力度と調整係数との比較	48
杭の支持力に関する性能照査	49
3. 補足資料	50
3-1. 参考文献	50

1. 概要

1-1. システムの特長

本システムは、港湾・漁港構造物の中の1つである「横棧橋」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。

計算外力として上部工自重、上載荷重、クレーン荷重、水平地震力、牽引力、接岸力の考慮ができ、杭の反力/応力、根入れ長、支持力、負の周面摩擦、杭頭部の検討が可能です。

本システムには以下のような特長があります。

- ・ 許容応力度法、平成11年港湾基準、平成30年港湾基準（部分係数法）に準拠しております。
- ・ 地震波形から加速度応答スペクトルを算出し、棧橋の固有周期から設計震度を算定します。
- ・ 最大20列×20列の杭の設置が可能です。
- ・ RC横棧橋、PC横棧橋の計算が可能です。
- ・ PC横棧橋のホロー桁は「PC棧橋技術マニュアル」の規格に対応しています。
- ・ 棧橋の計算は骨組構造解析を用いています。斜杭の場合、斜角によるK値の補正は自動的に行います。
- ・ 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。
- ・ 偏心を考慮した牽引力、接岸力の計算が可能です。
- ・ 地盤反力係数(K値)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。
- ・ 打込鋼管、中掘鋼管、埋込み杭での支持力計算、負の周面摩擦の計算が可能です。(埋込み杭は許容応力度法、平成11年港湾基準でのみ使用できます)
- ・ 許容応力度法、限界状態設計法での杭頭部の検討の計算が可能です。
- ・ 充填材、コンクリート・鉄板被覆による補強材を用いた断面諸元で断面力の計算ができます。補強材の照査も行います。
- ・ 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 | 20層 |
| ・ 杭本数 | 各方向最大 | 20本 |

2. 機能説明

2-1. 揚圧力について

本システムでは常時のみ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。

参照：「港湾技術研究所報告，棧橋に作用する波の揚圧力」 第6巻4号

$$p_u = 2 \cdot w \cdot H \quad (\text{進行波})$$

$$p_u = 4 \cdot w \cdot H \quad (\text{重複波})$$

$$p_u = k \cdot w \cdot H \quad (\text{任意指定})$$

ここに

$$p_u : \text{揚圧力} \quad (kN/m^2)$$

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

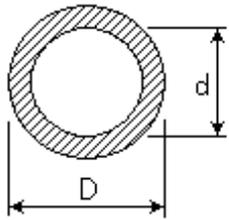
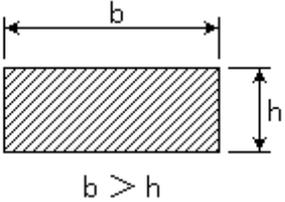
$$H : \text{入射波高} \quad (m)$$

k : 上部工の各スパンでの揚圧力係数

2-2. 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。

参照：「土木学会，構造力学公式集 昭和49年12月」 P44～P46

断面形状	断面積 A	断面二次 モーメント I	ねじり定数 J
	$\frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}$	$\frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}$	$\frac{\pi(D^4 - d^4)}{32}$
	bh	$\frac{bh^3}{12}$	kbh^3

長方形断面のねじり剛性を算定する際に使用する k 値

b/h	k
1.0	0.1406
1.1	0.1540
1.2	0.1661
1.3	0.1771
1.4	0.1869
1.5	0.1958
1.6	0.2037
1.7	0.2108
1.8	0.2174
1.9	0.2231
2.0	0.2287
2.5	0.2494
3.0	0.2633
3.5	0.2733
4.0	0.2808
5.0	0.2913
6.0	0.2983
7.0	0.3033
8.0	0.3071
9.0	0.3100
10.0	0.3123
∞	0.3333

2-3. 杭の反力について

骨組構造解析

参照：「土木学会，構造力学公式集 昭和49年12月」 P73～P93

面内方向（x y 平面）の骨組構造解析は次のようになります。

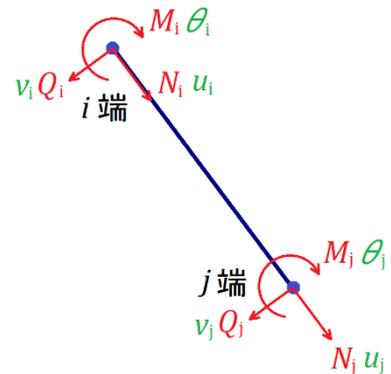
$$F = K\delta$$

XY平面

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

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

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



ここに

F : 部材力

δ : 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

θ_i, θ_j : 部材*i*端,*j*端の(z軸の)回転角

E : 部材のヤング係数

K_v : 部材の軸方向バネ定数

I : 部材の断面二次モーメント

l : 部材長

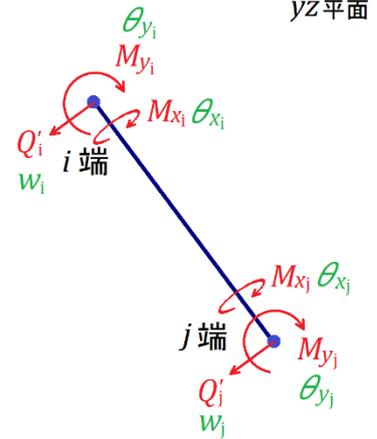
面外方向（y z 平面）の骨組構造解析は次のようになります。

$$F' = K' \delta'$$

$$F' = (Mx_i, Q'_i, My_i, Mx_j, Q'_j, My_j)^T$$

$$\delta' = (\theta x_i, w_i, \theta y_i, \theta x_j, w_j, \theta y_j)^T$$

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



ここに

Mx_i, Mx_j : 部材*i*端,*j*端に作用するx軸回りのモーメント(ねじりモーメント)

Q'_i, Q'_j : 部材*i*端,*j*端に作用するz軸方向のせん断力

My_i, My_j : 部材*i*端,*j*端に作用するy軸回りのモーメント

$\theta x_i, \theta x_j$: 部材*i*端,*j*端のx軸の回転角(ねじれ角)

w_i, w_j : 部材*i*端,*j*端のz方向の変位

$\theta y_i, \theta y_j$: 部材*i*端,*j*端のy軸の回転角

G : 部材のせん断弾性係数

J : 部材のねじり定数

I : 部材のyz平面での断面二次モーメント

分布するバネにより部材軸に鉛直に支持される場合の剛性マトリックスは、次のようになります。

参照：「日本道路協会，杭基礎設計便覧 平成4年10月」 P196

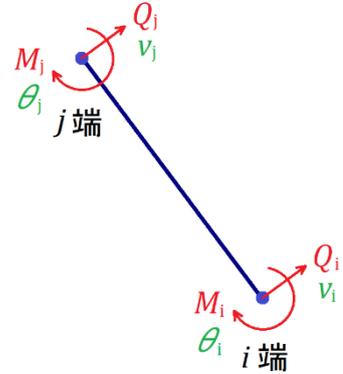
面内

$$F'' = K'' \delta''$$

$$F'' = (N_i, Q_i, M_i, N_j, Q_j, M_j)^T$$

$$\delta'' = (u_i, v_i, \theta_i, u_j, v_j, \theta_j)^T$$

$$K'' = \begin{bmatrix} K_v & 0 & 0 & -K_v & 0 & 0 \\ 0 & A_{11} & A_{12} & 0 & A_{13} & A_{14} \\ 0 & A_{21} & A_{22} & 0 & A_{23} & A_{24} \\ -K_v & 0 & 0 & K_v & 0 & 0 \\ 0 & A_{31} & A_{32} & 0 & A_{33} & A_{34} \\ 0 & A_{41} & A_{42} & 0 & A_{43} & A_{44} \end{bmatrix}$$



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

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

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

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

$$A_{23} = A_{32} = -A_{14}$$

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

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

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

ここに

$$\beta: \text{特性値} \quad \beta = \sqrt[4]{\frac{K_H D}{4EI}}$$

K_H : 部材に作用する水平方向地盤反力係数

D : 杭径

EI : 曲げ剛性

l : 部材長

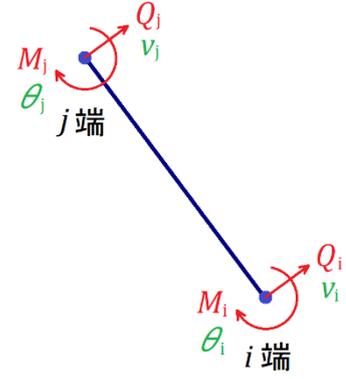
面外

$$F'' = K'' \delta''$$

$$F'' = (Mx_i, Q'_i, My_i, Mx_j, Q'_j, My_j)^T$$

$$\delta'' = (\theta x_i, w_i, \theta y_i, \theta x_j, w_j, \theta y_j)^T$$

$$K'' = \begin{bmatrix} \frac{GJ}{l} & 0 & 0 & -\frac{GJ}{l} & 0 & 0 \\ 0 & A_{11} & A_{12} & 0 & A_{13} & A_{14} \\ 0 & A_{21} & A_{22} & 0 & A_{23} & A_{24} \\ -\frac{GJ}{l} & 0 & 0 & \frac{GJ}{l} & 0 & 0 \\ 0 & A_{31} & A_{32} & 0 & A_{33} & A_{34} \\ 0 & A_{41} & A_{42} & 0 & A_{43} & A_{44} \end{bmatrix}$$



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

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

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

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

$$A_{23} = A_{32} = -A_{14}$$

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

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

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

ここに

$$\beta: \text{特性値} \quad \beta = \sqrt[4]{\frac{K_H D}{4EI}}$$

K_H : 部材に作用する水平方向地盤反力係数

D : 杭径

EI : 曲げ剛性

l : 部材長

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 6 種類を用意しています。

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成19年7月」 P628, P629)

参照：「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)

参照：「鋼管杭協会，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」

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

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

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

ここに

D : 杭径

(m)

EI : 曲げ剛性

($kN \cdot m^2$)

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

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

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、 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 : ポーリング孔内で測定した変形係数(入力値)

6) 相関式

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

尚、粘性土でN値がない場合は $q_u \rightarrow N$ 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

斜角によるK値の補正

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

杭軸方向バネ定数の算定方法

杭の軸方向バネ定数 K_v 値 (kN/m) は次式により算定します。

平成29年道路橋示方書

参照：「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」 P259～263

$$\begin{cases} K_v = \frac{AE}{l} & \text{突出部} \\ K_v = a_0 \frac{AE}{l} & \text{地中部} \\ K_v = a_1 k_v A_p & \text{杭先端} \end{cases}$$

ここに

- K_v : 杭の軸方向バネ定数 (kN/m)
- k_v : 杭先端の杭軸方向地盤反力定数 (kN/m³)
- A : 杭の純断面積 (m²)
- A_p : 杭の断面積 (中空部分を含む) (m²)
- E : 杭のヤング係数 (kN/m²)
- l : 杭長 (m)
- a_0 : 係数
- a_1 : 係数

杭先端の杭軸方向地盤反力定数 k_v は次式で算定されます。

$$k_v = \frac{1}{0.3} \alpha E_0 \left(\frac{D}{0.3} \right)^{-\frac{3}{4}}$$

ここに

- E_0 : 土層の変形係数
- D : 杭径 (m)

α は次のように設定します。(常時・地震時共通)

変形係数 E_0	$E_0=2800\text{N}$	E_0 =入力値
α	1	4

係数 a_0 は次式で算定されます。

$$a_0 = \frac{2}{1 + \gamma_y - \zeta_e}$$

係数 a_1 は次式で算定されます。

$$a_1 = \frac{1}{\gamma_y \zeta_d}$$

ここに

$$\gamma_y = \lambda_{yu} \gamma_u \quad (0 \leq \gamma_y \leq 1)$$

$$\gamma_u = R_p / R_u$$

γ_y : 杭の降伏支持力に達した時の杭頭部に作用する軸方向押込力の杭先端への伝達率の推定値

γ_u : 杭の極限支持力に達した時の杭頭部に作用する軸方向押込力の杭先端への伝達率の推定値

R_p : 杭先端の極限支持力の特性値

R_u : 杭の極限支持力の特性値

λ_{yu} : 杭の先端伝達率算出のための補正係数

ζ_e : 杭体収縮量に関する補正係数

ζ_d : 杭の先端変位量に関する補正係数

以下、補正係数は次のようになります。

	λ_{yu}	ζ_e	ζ_d
中掘杭工法	0.66	0.07	0.42

杭の極限支持力の特性値及び杭先端の極限支持力の特性値は次式で計算する。

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

$$R_p = q_d \cdot A_p$$

ここに

q_d : 杭先端で支持する単位面積当たりの極限支持力度

A_p : 杭の先端面積

U : 杭の周長

L_i : 層の厚さ

N_i : 砂質土層内の平均N値

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

平成24年道路橋示方書

参照：「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」 P373

$$\begin{cases} K_v = \frac{AE}{l} & \text{突出部} \\ K_v = a \frac{AE}{l} & \text{地中部} \end{cases}$$

ここに

K_v ：杭の軸方向バネ定数 (kN/m)

A ：杭の純断面積 (m^2)

E ：杭のヤング係数 (kN/m^2)

l ：杭長 (m)

a ：係数

係数 a は杭の打設工法から次式で算定されます。

打込鋼管(打撃工法) $a = 0.014(L/D) + 0.720$

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

中堀鋼管 $a = 0.010(L/D) + 0.360$

ここに

L ：杭の埋め込み長

D ：杭径(最小径)

2-4. 栈橋ブロックの回転を考慮した水平力

直杭式横栈橋

$$H_p = \frac{\sum_i K_{H_{ip}}}{\sum_{ij} K_{H_{ij}}} H + \frac{\sum_i K_{H_{ip}} x_{ip}}{\sum_{ij} K_{H_{ij}} x_{ij}} eH$$

ここに

H_p : 杭列に分配される水平力 (kN)

H : 栈橋ブロックに作用する水平力 (kN)

$K_{H_{ij}}$: 杭の横方向のバネ定数 (kN/m)

$$K_{H_{ij}} = \frac{12EI_{ij}}{(h_{ij} + 1/\beta_{ij})^3}$$

EI_{ij} : 杭の曲げ剛性 (kN·m²)

β : 仮想地表面から仮想固定点までの距離の逆数 (m⁻¹)

x_{ij} : 栈橋ブロックの対称軸から杭までの距離 (m)

e : 栈橋ブロックの対称軸と水平力の作用点までの距離 (m)

i : 法線直角方向*i*番目の杭に関する添字

j : 法線平行方向*j*番目の杭に関する添字

p : 検討対象となる法線平行方向*p*番目の杭に関する添字

斜組杭式横棧橋

$$H_p = \frac{\sum_i C_{ip}}{\sum_{ij} C_{ij}} H + \frac{\sum_i C_{ip} x_{ip}}{\sum_{ij} C_{ij} x_{ij}} eH$$

$$C_{ij} = \frac{\sin^2(\theta_{ij1} + \theta_{ij2})}{\frac{l_{ij1}}{A_{ij1} E_{ij1}} \cos^2 \theta_{ij2} + \frac{l_{ij2}}{A_{ij2} E_{ij2}} \cos^2 \theta_{ij1}} \quad (N/m)$$

ここに

H_p : 杭列に分配される水平力 (kN)

H : 棧橋ブロックに作用する水平力 (kN)

e : 棧橋ブロックの対称軸と水平力の作用点までの距離 (m)

x_{ij} : 杭棧橋ブロックの対称軸から杭までの距離 (m)

A_{ij} : 杭の断面積 (m²)

E_{ij} : 杭の弾性係数 (kN/m²)

$\theta_{ij1}, \theta_{ij2}$: 各杭の鉛直方向となす角 (度)

l_{ij} : 支持杭・杭全長 (m)

摩擦杭－砂質土の場合

l_{ij} の代わりに $\frac{2L_{ij} + \lambda_{ij}}{3}$ を用いる

摩擦杭－粘性土の場合

l_{ij} の代わりに $\frac{L_{ij} + \lambda_{ij}}{2}$ を用いる

L_{ij} : 杭全長 (m)

λ_{ij} : 周面摩擦力が働かない部分の長さ (m)

i : 法線直角方向*i*番目の杭に関する添字

j : 法線平行方向*j*番目の杭に関する添字

p : 検討対象となる法線平行方向*p*番目の杭に関する添字

2-5. 杭の応力について

杭の応力照査【漁港基準、港湾基準(H11)】

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成11年4月」 P318

参照：「日本道路協会，道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編 平成14年3月」 P126

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

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

ここに

σ_c : 杭の軸方向力による圧縮応力度 (N/mm²)

σ_t : 杭の軸方向力による引張応力度 (N/mm²)

σ_b, σ_{bt} : 杭の曲げモーメントによる応力度 (N/mm²)

A : 杭の断面積 (mm²)

Z : 杭の断面係数 (mm³)

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 $18 < l/r \leq 92$ $140 - 0.82 \left(\frac{l}{r} - 18 \right)$ $l/r > 92$ $\frac{1,200,000}{6,700 + \left(\frac{l}{r} \right)^2}$	$l/r \leq 16$ 185 $16 < l/r \leq 79$ $185 - 1.20 \left(\frac{l}{r} - 16 \right)$ $l/r > 79$ $\frac{1,200,000}{5,000 + \left(\frac{l}{r} \right)^2}$
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 $15 < l/r \leq 75$ $210 - 1.50 \left(\frac{l}{r} - 15 \right)$ $l/r > 75$ $\frac{1,200,000}{4,400 + \left(\frac{l}{r} \right)^2}$	$l/r \leq 13$ 255 $13 < l/r \leq 67$ $255 - 2.10 \left(\frac{l}{r} - 13 \right)$ $l/r > 67$ $\frac{1,200,000}{3,500 + \left(\frac{l}{r} \right)^2}$
曲げ引張応力度 σ_{bt}	210	255
曲げ圧縮応力度 σ_{ba}	210	255

杭の応力照査【港湾基準(H30)】

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成30年5月」 P1210～1212

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

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

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)
- σ_c : 杭の軸方向力による圧縮応力度 (N/mm²)
- σ_i : 杭の軸方向力による引張応力度 (N/mm²)
- σ_b, σ_{bt} : 杭の曲げモーメントによる応力度 (N/mm²)
- A : 杭の断面積 (mm²)
- Z : 杭の断面係数 (mm³)
- l : 杭の有効座屈長 (m)
- r : 杭の断面二次半径 (m)
- 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
- red : 軸方向圧縮応力度を降伏応力度で除した値として定義される係数

鋼管杭の降伏応力度

SKK400	SKK490	SM490Y	SM570
235	315	355	450

鋼管杭の軸方向降伏応力度

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

2-6. 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】

参照：「沿岸開発技術研究センター，港湾構造物の維持・補修マニュアル 平成11年6月」 P199～P201

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

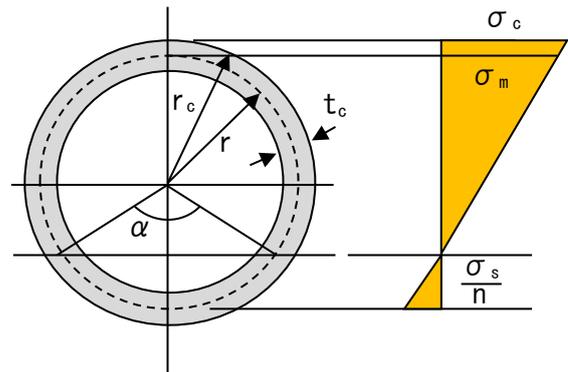
$$\sigma_c \leq \sigma_{cl} \quad , \quad \sigma_s \leq \sigma_{sa}$$

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

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

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

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



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 (m²)

A_c : コンクリート総断面積 (m²)

r_c : コンクリート外縁半径 (m)

σ_m : 半径 r 上のコンクリート最大圧縮応力度

σ_c : コンクリートの絶対最大圧縮応力度

σ_s : 鉄筋の最大引張応力度

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

σ_{sa} : 鉄筋の許容応力度

σ_{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 (m²)

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

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

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

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

スタッドの設計【許容応力度法】

参照：「沿岸開発技術研究センター，港湾構造物防食・補修マニュアル 平成11年6月」 P198～P212

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 ²)			
	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 × 75	43	48	53	58

コンクリート被覆【限界状態設計法】

参照：「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

安全性(断面破壊)/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)

γ_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

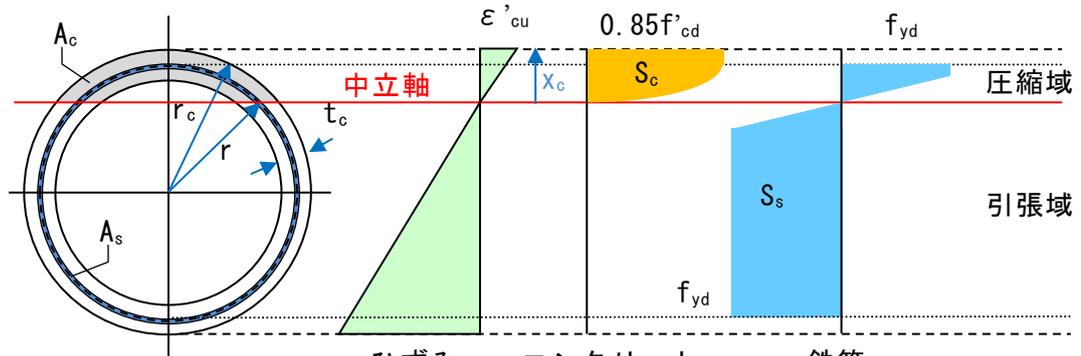
A_s : 鉄筋の断面積

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。



$$M_c = M_s, \quad N_d = N_c + N_s \quad \text{ひずみ} \quad \text{コンクリート} \quad \text{鉄筋}$$

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

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

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 $A_c = \int A_{ci} dx$ (m²)

A_{ci} : x_c を細分化したコンクリートの圧縮域の断面積 (m²)

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/m²)

A_s : 鉄筋の断面積 $A_s = \int A_{si} dx$ (m²)

A_{si} : 円周 $2\pi r$ を細分化した鉄筋の断面積 (m²)

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/m²)

使用性/使用限界状態の検討

参照：「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

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_{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_ϕ : 鉄筋の中心間隔

ϕ : 鉄筋径

σ_{se} : 鉄筋の増加引張応力度

E_s : 鉄筋のヤング係数

ε_ϕ : 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 σ_s は、コンクリートと鉄筋の断面に用いる強度 σ_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性/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 σ_c を収束計算して求めます。

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

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

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

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

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)

スタッドの設計【限界状態設計法】

参照：「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」 P301～P302

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

γ_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)

γ_b ：部材係数(=1.3)

鉄板被覆の検討（応力照査）【漁港基準、港湾基準(H11)】

参照：「沿岸開発技術研究センター，港湾構造物の維持・補修マニュアル 平成11年6月」 P319

鋼材の許容応力度

鋼種	SM400	SM490	SM520	SM570
軸方向引張応力度 σ_{ta}	140	185	210	255
軸方向圧縮応力度 σ_{ca}	140	185	210	255
曲げ引張応力度 σ_{bt}	140	185	210	255
曲げ圧縮応力度 σ_{ba}	140	185	210	255

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)

M ：補修断面の受け持つ曲げモーメント ($N \cdot mm^2$)

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)

σ_{ca} ：鋼材の許容圧縮応力度 (N/mm^2)

σ_{bc}, σ_c ：補修部材の応力度 (N/mm^2)

溶接強度の設定【漁港基準、港湾基準(H11)】

参照：「沿岸開発技術研究センター，港湾構造物の維持・補修マニュアル 平成11年6月」 P210

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

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)

τ_a ：溶接部の許容応力度 (N/mm^2)

鉄板被覆の検討（応力照査）【港灣基準(H30)】

参照：「沿岸技術研究センター，港灣構造物防食・補修マニュアル 2009年版」 P321

鋼材の降伏応力度

鋼種	SM400	SM490	SM520	SM570
軸方向引張応力度 σ_{ty}	235 (245)	315 (325)	355 (365)	450
軸方向圧縮応力度 σ_{cy}	235 (245)	315 (325)	355 (365)	450
曲げ圧縮応力度 σ_{ba}	235 (245)	315 (325)	355 (365)	450

※ ()内の値は肉厚16mm未満の場合に採用されます。

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

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

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

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

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

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

ここに

- σ_c : 補強・補修部材の軸方向力による圧縮応力度 (N/mm^2)
- σ_t : 補強・補修部材の軸方向力による引張応力度 (N/mm^2)
- σ_{bc}, σ_{bt} : 補強・補修部材の曲げモーメントによる応力度 (N/mm^2)
- N_d : 補強・補修部材の軸方向力の設計用値 (N)
- M_d : 補強・補修部材の曲げモーメントの設計用値 ($N \cdot mm$)
- A : 補強・補修部材の断面積 (mm^2)
- Z : 補強・補修部材の断面係数 (mm^3)
- 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 $\sigma_{tyd} = \sigma_{byd}$ $\sigma_{bid} = \sigma_{bcd}$ $\sigma_{td} + \sigma_{bid} < -\sigma_{td} + \sigma_{bcd}$ より

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

溶接強度の設定【港湾基準(H30)】

参照：「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」 P323

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

ここに

τ_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)
τ_{yd} : 溶接部のせん断降伏応力度の設計用値	(N/mm^2)
γ_a : 構造解析係数	

2-7. 根入れ長の検討について

参照：「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

参照：「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」 P564～P565

地盤が一様とみなせる場合

$$L \geq 3.0 / \beta$$

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

ここに

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

$$l: \text{根入れ長} \quad (m)$$

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

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

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

$$D: \text{杭径} \quad (m)$$

$$E: \text{杭の弾性係数} \quad (kN/m^2)$$

$$I: \text{杭の断面二次モーメント} \quad (m^4)$$

地盤の性質が著しく変化する場合

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

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

ここに

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

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

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

$$D: \text{杭径} \quad (m)$$

$$E: \text{杭の弾性係数} \quad (kN/m^2)$$

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

杭の断面変化位置の設定

$$L' \geq l_m$$

ここに

$$L': \text{杭の断面変化位置までの根入れ長} \quad (m)$$

$$l_m: \text{地中部の最大曲げモーメント}1/2\text{発生位置までの根入れ長} \quad (m)$$

2-8. 支持力について

【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)】

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

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

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

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

ただし、中堀鋼管、埋込み杭は漁港基準、港湾基準（H11）での選択となります

打込鋼管【漁港基準、港湾基準(H11)】

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成11年4月」 P436～P443

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)

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 ($C_{ai} \leq 100$)

F ：安全率

N_1 ：杭先端地盤でのN値

N_2 ：杭先端より上方へ4×杭径での範囲内の平均N値

[支持層：粘性土地盤]

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

ここに

C_p ：杭先端位置での粘着力

2) 軸方向引き抜き力

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

ここに

w ：杭の自重 $w = A \cdot \gamma \cdot L$

A ：杭の断面積 (m²)

γ ：杭の単位体積重量 (kN/m³)

L ：杭の長さ (m)

打込鋼管【港湾基準(H30)】

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

1) 杭の先端抵抗力

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

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

ここに

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

$$\alpha : \text{杭の閉塞率}$$

$$A_p : \text{杭先端の有効面積} \quad (m^2)$$

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

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

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

$$B : \text{杭の直径} \quad (m)$$

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

2) 杭の周面抵抗力

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

ここに

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

$$A_s : \text{杭の周面積} \quad (m^2)$$

$$L_i : \text{層の厚さ} \quad (m)$$

$$U : \text{杭の周長} \quad (m)$$

$$N_i : \text{層の平均}N\text{値}$$

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

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

中堀鋼管（平成24年道路橋示方書）

参照：「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)

参照：「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)

許容応力度法

1) 軸方向押込み力

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

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

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

ここに

q_d : 杭先端で支持する単位面積当たりの極限支持力度

A_p : 杭の先端面積

U : 杭の周長

L_i : 層の厚さ

N_i : 砂質土層内の平均 N 値

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

F : 安全率

2) 軸方向引抜き力

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

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

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

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

港湾基準 (H30)

1) 杭の先端抵抗力

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

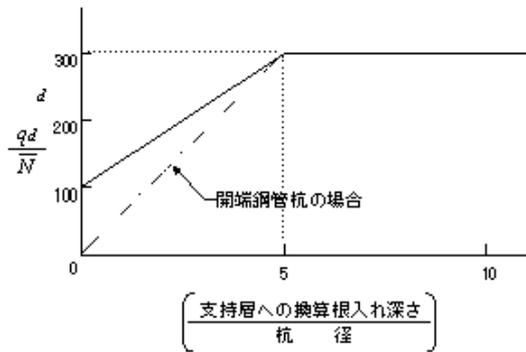
2) 杭の周面抵抗力

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

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

q_d は以下の項目より算定します

1 : 最終打撃工法



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

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 : 一軸圧縮強度 (kN/m^2)

中堀鋼管（平成29年道路橋示方書）

参照：「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

許容応力度法

1) 軸方向押込み力

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

ここに

q_d : 杭先端で支持する単位面積当たりの極限支持力度

A_p : 杭の先端面積

U : 杭の周長

L_i : 層の厚さ

N_i : 砂質土層内の平均 N 値

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

F : 安全率

2) 軸方向引抜き力

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

ここに

w : 杭の自重 $w = A \cdot \gamma \cdot L$

A : 杭の断面積

γ : 杭の単位体積重量

L : 杭の長さ

港湾基準 (H30)

1) 杭の先端抵抗力

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

2) 杭の周面抵抗力

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

q_d は以下の項目より算定します

1 : 最終打撃方式（先端粘性土層） $q_d = 90 \cdot N$

2 : 最終打撃方式（先端砂層及び砂礫層） $q_d = 130 \cdot N$

3 : セメントミルク噴出攪拌方式（先端砂層） $q_d = 220 \cdot N$

4 : セメントミルク噴出攪拌方式（先端砂礫層） $q_d = 250 \cdot N$

埋込み杭

参照：「全国漁港協会，漁港構造物の設計ガイド 平成6年度版」 P66

1) 軸方向押込み力

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

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(杭先端より下へ $1.0d$ ～上へ $4.0d$ の間の実測N値の平均)

A_p ：杭先端の全断面積

N_s ：杭周地盤中、砂質部分の実測N値の平均

N_c ：杭周地盤中、粘土部分の実測N値の平均

ただし、実測値のうち $N = 0$ は 0.5 とみなし、またその上限は 4 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

2-9. 負の周面摩擦について

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成11年4月」 P446～P447

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成30年5月」 P727～P729

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

R_p : 杭の先端支持力

$R_{nf, \max}$: 負の周面摩擦の最大値

σ_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

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

B : 腐食後の杭径

B' : 杭の内径

安定検討【港湾基準(H30)】

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

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

ここに

R_{ad} : 軸方向支持力(常時) (kN)

$m_1 := 1.2$

R_{pk} : 杭の先端抵抗力(極限值) (kN)

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

$m_2 := 1.0$

σ_f : 杭の圧縮降伏応力度の特性値 (kN / m²)

A_e : 杭の有効断面積 (m²)

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。

打込鋼管

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成11年4月」 P446～P447
参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成30年5月」 P727～P729

《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/m²)

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)

α ：杭の閉塞率

A_s ：杭の先端面積 (m²)

N ：杭先端地盤のN値

C_p ：杭先端地盤の粘着力 (kN/m²)

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/m²)

U ：杭の周長 (m)

中堀鋼管

参照：「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)

参照：「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)

≪負の周面摩擦の最大値≫

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

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

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

ここに

$R_{nf,max}$: 負の周面摩擦の最大値 (kN)

N_{si} : 層内での平均N値

C_{ai} : 層内での平均粘着力 (kN / m²)

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]

$$R_p = q_d \cdot A_s + N_s \cdot L \cdot U \quad \text{平成8年道路橋示方書}$$

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

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

[支持層：粘性土地盤]

$$R_p = q_d \cdot A_s + 0.5 C_s \cdot L \cdot U \quad \text{平成8年道路橋示方書}$$

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

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

ここに

R_p : 杭の先端支持力 (kN)

q_d : 杭先端で支持する単位面積当たりの極限支持力度 (kN / m²)

A_p : 杭の先端面積 (m²)

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 / m²)

U : 杭の周長 (m)

埋込み杭

参照：「全国漁港協会，漁港構造物の設計ガイド 平成6年度版」 P66

《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

ψ ：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)

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 $\sim 4.0d$ の間の実測N値の平均)

A_p ：杭先端の全断面積

L ：杭が支持地盤中に貫入している長さ

N_s ：L区間での平均N値

C_s ：L区間での平均粘着力

ただし、実測値のうち $N=0$ は0.5とみなし、またその上限は4とする

ψ ：杭の周長

2-10. 杭頭部の検討について

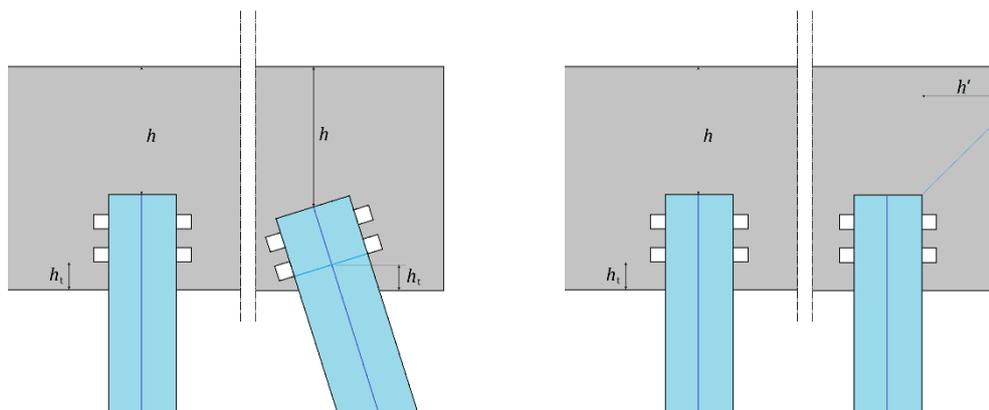
本システムでは杭頭部の結合計算を許容応力度法、限界状態設計法の2つの方法から選択できます

許容応力度法

参照：「日本道路協会，杭基礎設計便覧 平成19年1月」 P294～P299

参照：「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

斜杭の場合、 h' は直杭と同様の計算をします



押込み力／引き抜き力に対する照査

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

σ_{cv} : 垂直支圧応力度 (N/mm²)

σ_{ca} : コンクリートの許容支圧応力度 (N/mm²)

τ_v : 垂直方向の押し抜きせん断応力度 (N/mm²)

τ_{vt} : 垂直方向の引き抜きせん断応力度 (N/mm²)

τ_a : コンクリートの許容押し抜きせん断応力度 (N/mm²)

τ_{at} : コンクリートの許容引き抜きせん断応力度 (N/mm²)

P : 軸方向押込み力 (N)

P_t : 軸方向引き抜き力 (N)

h : 垂直方向の押し抜きせん断に抵抗する上部工の有効厚さ (mm)

h_t : 引き抜きせん断に抵抗する上部工の有効厚さ (mm)

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)

τ_0 : 杭とコンクリートの付着強度の設計用値 (N/mm²)

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

σ_{ck} : コンクリートの設計基準強度 (N/mm²)

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)

σ_{ca} : 上部コンクリートの許容支圧応力度 (kN/m²)

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

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

ここに

σ_{ch} : 水平支圧応力度 (N/mm²)

σ_{ca} : コンクリートの許容支圧応力度 (N/mm²)

τ_h : 水平方向の押し抜きせん断応力度 (N/mm²)

τ_a : コンクリートの許容押し抜きせん断応力度 (N/mm²)

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)

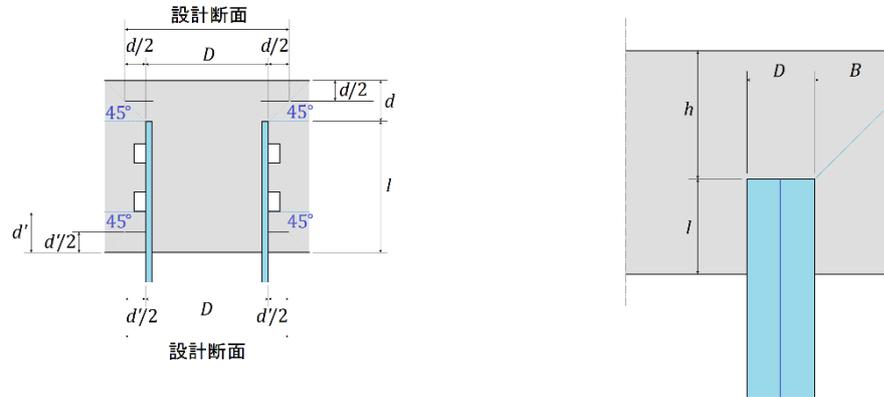
h : 垂直方向の押し抜きせん断に抵抗する上部工の有効厚さ (mm)

h' : 引き抜きせん断に抵抗する上部工の有効厚さ (mm)

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

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



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

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

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

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

ここに

γ_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)

β_d : せん断耐力の有効高さに関する係数

β_p : せん断耐力の鉄筋比に関する係数

β_r : せん断耐力の載荷面の周長に対する係数

u : 載荷面の周長 (m)

f'_{cd} : コンクリートの圧縮強度の設計用値 (N/mm²)

u_p : 設計断面の周長 (m)

最下面から $d/2$ 離れた位置で算定 (m)

d : 二方向の鉄筋に対する平均有効高さ (m)

p : 二方向の鉄筋に対する平均鉄筋比

γ_b : 部材係数

軸方向力に対する照査【港湾基準(H11)】

参照：「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

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

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)

ψ : 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/m²)

γ_b : 部材係数

軸方向力に対する照査【港湾基準(H30)】

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成30年5月」 P1218

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

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

ここに

γ_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)

ϕ : 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

γ_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 (m²)

γ_b : 部材係数(=1.3)

杭頭モーメントに対する照査【港湾基準(H11)】

参照：「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

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

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

γ_b :部材係数

γ_i :構造物係数

杭頭モーメントに対する照査【港湾基準(H30)】

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成30年5月」 P1218

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

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

ここに

γ_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

γ_b :部材係数

杭による押し抜きせん断に対する照査【港湾基準(H11)】

参照：「日本道路協会，杭基礎設計便覧 平成19年1月」 P298～P299

参照：「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

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

ここに

τ_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)

γ_b ：部材係数

杭による押し抜きせん断に対する照査【港湾基準(H30)】

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成19年7月」 P1129

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

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

ここに

γ_i ：構造物係数

V_d ：せん断力の設計用値 (kN)

V_{pcd} ：水平方向の押し抜きせん断耐力の設計用値 (kN)

f'_{cd} ：コンクリートの設計圧縮強度

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

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

$\beta_r : 1.0$

d ：法線平行方向、法線直角方向の有効高さの平均値

p_w ：法線平行方向、法線直角方向の鉄筋比の平均値

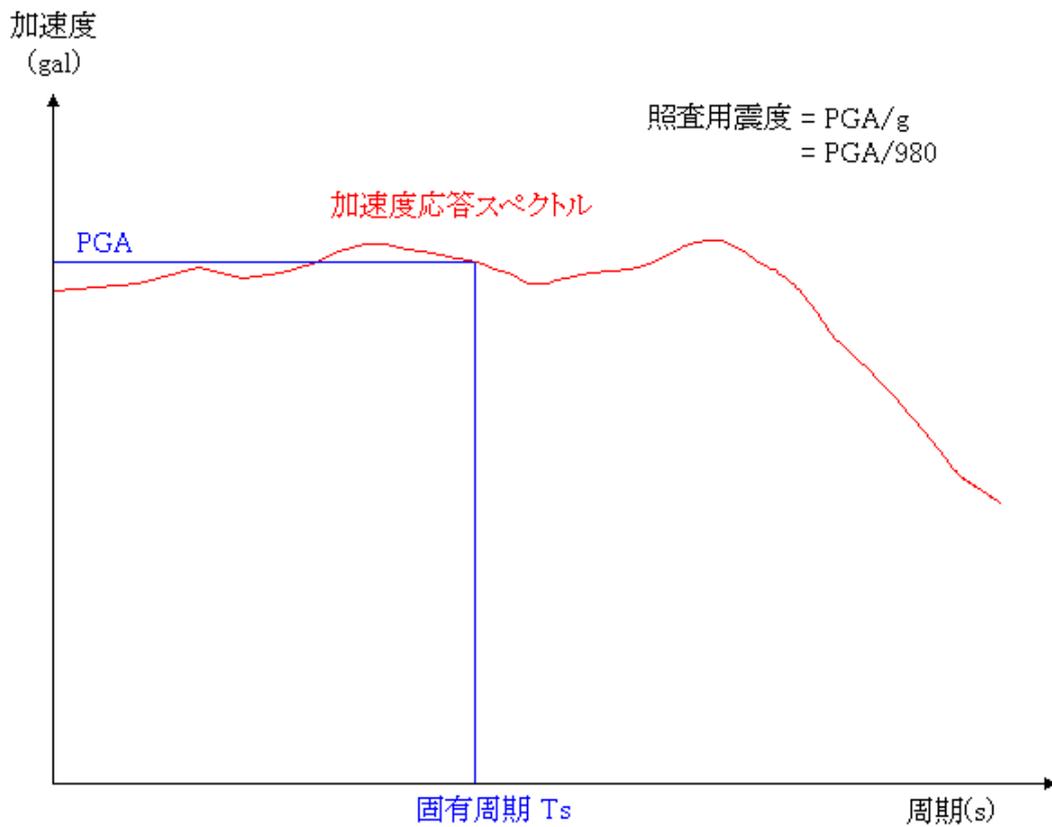
A_τ ：せん断抵抗面積

γ_b ：部材係数

2-11. 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栈橋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。

参照：「日本港湾協会、港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成30年5月」 P1208～1210



加速度応答スペクトルの算定

参照：「鹿島出版会，新・地震動のスペクトル解析入門」 P243～P244、P251～P254

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

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)

ω : 質点固有円振動数

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

h : 減衰定数

Δt : 時間間隔 (s)

固有周期の算定

参照：「日本港湾協会、港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成30年5月」 P1209

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

$$K = P_H / \delta$$

ここに

T_s : 固有周期 (s)

W : 栈橋の自重及び地震時の上載荷重 (kN)

g : 重力加速度 (= 9.8m/s²)

K : 栈橋のバネ定数 (kN/m)

P_H : 水平荷重 (kN)

δ : 水平荷重が作用した際の栈橋の水平変位 (m)

2-12. 性能照査に用いる諸定数（許容応力度法）

許容応力度法では、各照査に伴う諸定数は次ようになります。

棧橋杭の発生応力の照査に伴う許容応力度の割増

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成11年4月」 P321

照査対象	割増係数
異常時	1.5

杭の支持力に関する性能照査

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成11年4月」 P437、451

照査対象	杭状態	安全率
常時	引抜杭	3.00
	押込杭	2.50
異常時	引抜杭	2.50
	押込杭 (支持杭)	1.50
	押込杭 (摩擦杭)	2.00

2-13. 性能照査に用いる部分係数 (H30港湾基準)

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

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

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成30年5月」 P27、1124

棧橋杭の発生応力の照査

照査対象	水深	抵抗項に 乗じる 部分係数 γ_R	荷重項に 乗じる 部分係数 γ_S	調整係数 m
棧橋杭の発生応力 (載荷重(作業時)による変動作用)	全ての水深	— (1.00)	— (1.00)	1.67
棧橋杭の発生応力 (載荷重(暴風時)による変動作用)	全ての水深	— (1.00)	— (1.00)	1.12
棧橋杭の発生応力 (船舶牽引力による変動作用)	全ての水深	— (1.00)	— (1.00)	1.67
棧橋杭の発生圧縮応力 (船舶接岸力による変動作用)	12.0m 未満	0.97	1.34	— (1.00)
	12.0m 以上	1.01	1.29	
棧橋杭の発生引張応力 (船舶接岸力による変動作用)	全ての水深	— (1.00)	— (1.00)	1.67
棧橋杭の発生応力 (レベル1地震動による変動作用)	全ての水深	— (1.00)	— (1.00)	1.12

斜め組杭式横棧橋における船舶接岸時による変動状態

照査対象	水深	抵抗項に 乗じる 部分係数 γ_R	荷重項に 乗じる 部分係数 γ_S	調整係数 m
棧橋杭の発生圧縮応力 (船舶接岸力による変動作用)	全ての水深	— (1.00)	— (1.00)	1.67

許容応力度と調整係数との比較

常時 (永続状態)	SKK400	SKK490	SM490Y	SM570
許容応力度①	140	185	210	255
降伏応力度②	235	315	355	450
②÷①	1.679	1.703	1.690	1.764

異常時 (変動状態)	SKK400	SKK490	SM490Y	SM570
許容応力度①	210	277.5	315	382.5
降伏応力度②	235	315	355	450
②÷①	1.119	1.135	1.127	1.176

杭の支持力に関する性能照査

照査対象	杭状態	抵抗項に 乗じる 部分係数 γ_R	荷重項に 乗じる 部分係数 γ_S	調整係数 m
直杭式横棧橋の支持力 (船舶作用時、変動作用による 変動作用)	引抜杭	— (1.00)	— (1.00)	3.00
	押込杭	— (1.00)	— (1.00)	2.50
直杭式横棧橋の支持力 (暴風時、波浪時 レベル1地震動による 変動作用)	引抜杭	— (1.00)	— (1.00)	2.50
	押込杭 (支持杭)	— (1.00)	— (1.00)	1.50
	押込杭 (摩擦杭)	— (1.00)	— (1.00)	2.00

3. 補足資料

3-1. 参考文献

準拠基準及び参考文献は以下の通りです。

- | | | |
|----------------------------|-------------------|--------------|
| ・ 港湾の施設の技術上の基準・同解説 | 平成30年 5月 | 日本港湾協会 |
| | 平成11年 4月 | 日本港湾協会 |
| | 平成 元年 6月 | 日本港湾協会 |
| ・ 港湾構造物設計事例集 | 平成19年 3月 | 沿岸開発技術研究センター |
| | 平成11年 4月 | 沿岸開発技術研究センター |
| ・ PC 棧橋技術マニュアル | 平成15年10月 | 沿岸開発技術研究センター |
| ・ PC 棧橋の設計に関する技術資料（詳細設計例） | 平成 元年 4月 | 沿岸開発技術研究センター |
| ・ 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年度版 | 全国漁港協会 |
| ・ 漁港・漁場構造物設計計算例 | 平成16年新刊 | 全国漁港漁場協会 |
| ・ 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 | 平成14年 3月 | 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 | 日本道路協会 |
| | 平成24年 9月 | 日本道路協会 |
| | 平成29年11月 | 日本道路協会 |
| ・ 杭基礎設計便覧 | 平成 4年10月 | 日本道路協会 |
| ・ コンクリート標準示方書[設計編] | 2017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 |
| ・ 構造力学公式集 | 昭和49年12月 | 土木学会 |
| ・ 鋼管杭—その設計と施工— | 2009年度版 | 鋼管杭・鋼矢板技術協会 |
| ・ 鋼矢板—設計から施工まで— | 2000年度版 | 鋼管杭協会 |
| ・ 新・地震動のスペクトル解析入門 | | 鹿島出版会 |
| ・ 棧橋に作用する波の揚圧力 | 港湾空港技術研究所報告 第6巻4号 | |
| ・ 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 | |
| ・ 港湾構造物の維持・補修マニュアル | 平成11年 6月 | 沿岸開発技術研究センター |
| ・ 港湾構造物防食・補修マニュアル | 2009年版 | 沿岸技術研究センター |