

港湾設計業務シリーズ

RC横棧橋上部工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	3
2-1. 揚圧力について	3
床版の断面力について	4
等分布荷重による断面力	4
部分等分布荷重による断面力	6
2-3. 上部工の断面力・影響線について	8
骨組構造解析	8
水平方向地盤反力係数の算定方法	10
杭軸方向バネ定数の算定方法	12
平成29年道路橋示方書	12
平成24年道路橋示方書	14
2-4. 許容応力度法	15
2-5. 限界状態設計法	16
安全性(断面破壊)/終局限界状態	17
曲げに対する検討	17
せん断に対する検討	18
床版の場合	18
梁の場合	19
使用性/使用限界状態	20
曲げひび割れに対する検討	21
せん断に対する検討	22
安全性(疲労破壊)/疲労限界状態	23
栈橋上部工疲労限界状態モデル荷重	23
曲げモーメントによる疲労検討	24
せん断力による疲労検討	27
床版の場合	27
梁の場合	28
耐久性/性能の経時変化に対する検討	30
中性化の検討	30
塩化物イオン濃度の検討	31
3. 補足資料	35
3-1. 参考文献	35

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「RC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。

本システムには以下のような特長があります。

- ・ 最大20列×20列の杭の設置が可能です。
- ・ 許容応力度法、限界状態設計法を選択できます。
- ・ 床版、梁の計算、検討を行います。
- ・ 法線平行方向、法線直角方向でそれぞれ2ケースの梁の検討を行うことができます。
- ・ 影響線の計算は骨組構造解析を用いています。
- ・ 弊社港湾設計業務シリーズ『横棧橋設計計算3』から棧橋データをインポートできます。
- ・ 経時の性能変化（中性化、塩化物イオン濃度）の検討を行います。
- ・ 斜杭の場合、斜角による K_h 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。
- ・ 地盤反力係数 K_h 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。
- ・ 杭をコンクリートまたは鉄板で補強することができます。
- ・ 充填材の設定をすることができます。
- ・ 床版、梁に作用する移動荷重の設定できます。
- ・ 梁部材を直接入力できます。
- ・ 作用力を直接入力できます。
- ・ 影響線を用いて各支点到断面力が最大値をとるように移動荷重を自動的に載荷します。
- ・ 床版、梁の支点部、支間部毎で部材断面諸元を任意に設定できます。

1-2. システムの制限事項

[データ容量]

- | | | |
|---------|-------|-----|
| ・ 層データ数 | 最大 | 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

本システムでの車両荷重による断面力は等分布荷重に換算した断面力と部分等分布荷重に換算した断面力の両方で一番大きい値を使用しております。等分布荷重による断面力は四辺固定版、三辺固定一辺自由版での係数表を基に断面力の算定を行います。

床版の断面力について

参照：「日本建築学会，鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説」（1982 P538）

本システムでは車両荷重による断面力は等分布荷重に換算した断面力と部分等分布荷重に換算した断面力の両者で一番大きい値を使用しております。等分布荷重による断面力は四辺固定版、三辺固定一辺自由版での係数表を基に断面力の算定を行います。

等分布荷重による断面力

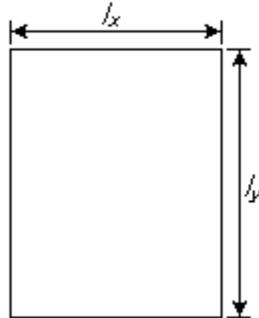
曲げモーメント

$\lambda \leq 1$ の場合

$$M_x = Xql_x^2 \quad M_y = Yql_x^2$$

$\lambda > 1$ の場合

$$M_x = Xql_y^2 \quad M_y = Yql_y^2$$



ここに

λ : 辺長比 ($\lambda = l_x/l_y$)

M_x : X方向の曲げモーメント ($kN \cdot m/m$)

M_y : Y方向の曲げモーメント ($kN \cdot m/m$)

X: X方向の曲げモーメント係数

Y: Y方向の曲げモーメント係数

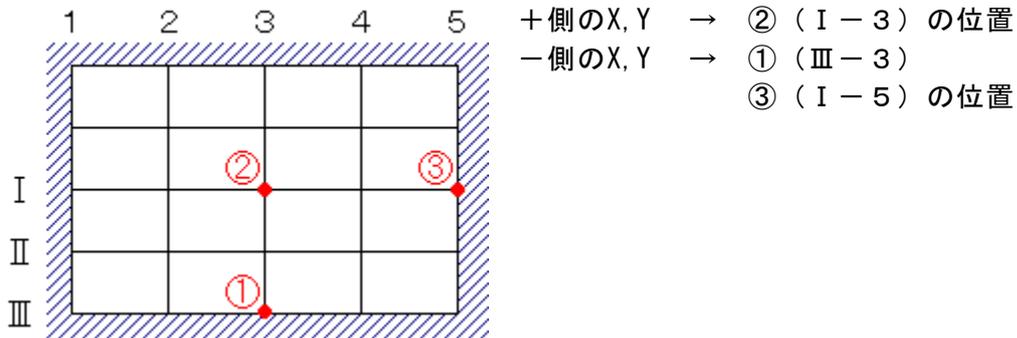
l_x : X方向の長さ

l_y : Y方向の長さ

q: 荷重強度 (kN/m^2)

係数X, Yの値の抽出について
版の形状によって次のようになります。

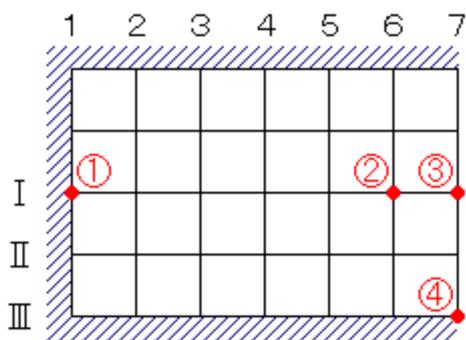
四辺固定版の場合



三辺固定一辺自由版の場合

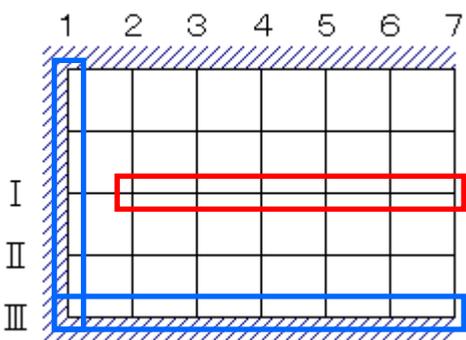
本システムでは分配係数について、以下の2種類を選択する事ができます。

1. 固定位置で設定



- +側のX → ② (I-6) の位置
- +側のY → ③ (I-7) の位置
- 側のX, Y → ① (I-1)
- ④ (III-7) の位置

2. 支点・支間での最大値で設定



- +側のX, Y → 赤枠で囲んだ箇所で分配係数が最大となる位置
- 側のX, Y → 赤枠で囲んだ箇所で分配係数が最大となる位置

せん断力

$$S = Qwl_{\min}$$

ここに

Q :せん断力係数

w :等分布荷重の荷重強度 (kN/m^2)

l_{\min} :短スパン長 (m)

片持ち梁の場合

曲げモーメント

$$M_x = -\frac{wl_x}{2}, \quad M_y = -\frac{wl_y}{2}$$

ここに

M_x :X方向の曲げモーメント ($kN \cdot m/m$)

M_y :Y方向の曲げモーメント ($kN \cdot m/m$)

S_x :X方向のせん断力 (kN/m)

S_y :Y方向のせん断力 (kN/m)

l_x :X方向の長さ

l_y :Y方向の長さ

w :荷重強度 (kN/m^2)

せん断力

$$S_x = -wl_x, \quad S_y = -wl_y$$

部分等分布荷重による断面力

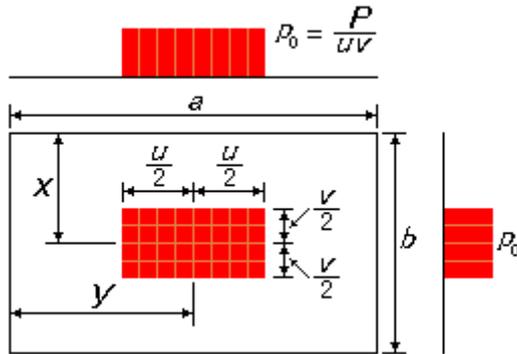
参照：「土木学会，構造力学公式集」（P328～P330）

参照：「土木学会，国鉄建造物設計標準解説 鉄筋コンクリート建造物および無筋コンクリート建造物 プレストレストコンクリート鉄道橋」第37巻 2号（P195）

参照：「港湾技術研究所報告，栈橋上部工の荷役機械荷重を考慮した疲労限界状態設計」第37巻 2号（P195）

本システムでは四辺固定版、三辺固定一辺自由版では、下記の計算により断面力を算定しております。

曲げモーメント



$$M_x = \eta(M_1 + \nu M_2)$$

$$\alpha_m = m\pi/a \quad \beta_n = n\pi/b \quad \lambda = b/a$$

$$M_y = \eta(\nu M_1 + M_2)$$

$$M_1 = \frac{a^2 \lambda^2}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda^2 m^2 a_{mn}}{(\lambda^2 m^2 + n^2)^2} \sin \alpha_m x \sin \beta_n y$$

$$\eta : \text{補正係数} \quad (0.8)$$

$$M_2 = \frac{a^2 \lambda^2}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2 a_{mn}}{(\lambda^2 m^2 + n^2)^2} \sin \alpha_m x \sin \beta_n y$$

$$\nu : \text{ポアソン比} \quad 0.15$$

$$a_{mn} = \frac{16p_0}{\pi^2 mn} \sin \frac{m\pi u}{2a} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi v}{2b} \sin \frac{n\pi y}{b}$$

せん断力

参照：「沿岸技術研究センター，港湾建造物設計事例集」（平成19年3月 第2編 3-63）

参照：「港湾技術研究所報告，栈橋上部工の荷役機械荷重を考慮した疲労限界状態設計」第37巻 2号（P195）

$u \geq v$ の場合

$$S_x = \frac{P}{2u + v} \quad S_y = \frac{P}{3u}$$

$u < v$ の場合

$$S_x = \frac{P}{3v} \quad S_y = \frac{P}{2v + u}$$

本システムでは片持ち梁では、下記の計算で断面力を算定しております。

曲げモーメント

$$M_x = -Pl_x \quad , \quad M_y = -Pl_y$$

せん断力

$$S_x = S_y = -P$$

2-3. 上部工の断面力・影響線について

本システムでは上部工の断面力及び影響線については骨組構造解析を用いて算定しております。

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

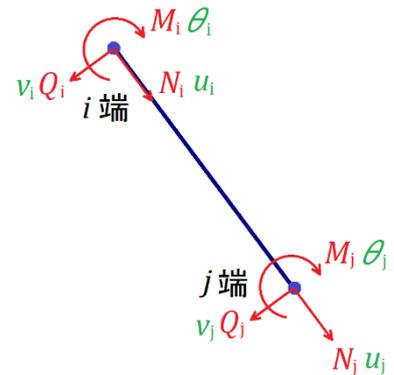
$$F = K\delta$$

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

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

A : 部材の断面積

I : 部材の断面二次モーメント

l : 部材長

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ここに

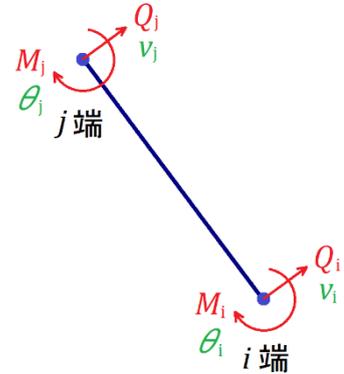
$$\beta: \text{特性値} \quad \beta = \sqrt[4]{\frac{K_H D}{4EI}}$$

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/m³) 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 : ボ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
$-30^\circ < \theta \leq -20^\circ$	$K_h' = K_h \times (-0.051\theta + 0.71)$
$-20^\circ < \theta \leq -10^\circ$	$K_h' = K_h \times (-0.039\theta + 0.95)$
$-10^\circ < \theta < 0^\circ$	$K_h' = K_h \times (-0.034\theta + 1.00)$
$0^\circ < \theta < 10^\circ$	$K_h' = K_h \times (-0.026\theta + 1.00)$
$10^\circ \leq \theta < 20^\circ$	$K_h' = K_h \times (-0.024\theta + 0.98)$
$10^\circ \leq \theta < 20^\circ$	$K_h' = K_h \times (-0.017\theta + 0.84)$

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 : 杭の純断面積 (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。

変形係数 E_0	$E_0=2800N$	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. 許容応力度法

参照：「オーム社，鉄筋コンクリートの設計 改訂2版」 P34～

参照：「全国漁港協会，漁港の防波堤・けい船岸等の設計指針と計算例 平成4年度」 P650

1) 曲げに対する検討

必要鉄筋量

$$A_{sn} = \frac{8M}{7\sigma_{sa}d}$$

鉄筋

$$\sigma_s = \frac{M}{pjbd^2} \leq \sigma_{sa}$$

コンクリート

$$\sigma_c = \frac{2M}{kjbd^2} \leq \sigma_{ca}$$

2) せん断に対する検討

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

せん断補強筋がある場合

$$A_{wn} = \frac{S}{\sigma_{sa}jd} \leq A_w$$

ここに

σ_s : 鉄筋の曲げ応力度 (N/mm^2)

σ_c : コンクリートの曲げ応力度 (N/mm^2)

σ_{sa} : 鉄筋の許容曲げ応力度 (N/mm^2)

σ_{ca} : コンクリートの許容曲げ応力度 (N/mm^2)

M : 部材に作用する曲げモーメント ($N \cdot mm$)

$$j = 1 - k/3$$

$k = \sqrt{2np + (np)^2} - np$: 中立軸比

n : 鉄筋とコンクリートのヤング係数比

$p = A_s/bd$: 鉄筋比

b : 部材幅 (mm)

d : 部材の有効高さ (mm)

A_s : 部材の使用鉄筋量 (mm^2)

τ : せん断応力度 (N/mm^2)

τ_a : 許容せん断応力度 (N/mm^2)

S : 部材に作用するせん断力 (N)

A_w : せん断補強筋の使用鉄筋量 (mm^2)

A_{wn} : せん断補強筋の必要鉄筋量 (mm^2)

2-5. 限界状態設計法

限界状態設計法では終局限界状態、使用限界状態、疲労限界状態、性能の経時変化に対する検討を行います。

性能照査について

性能照査とは性能規定が満足されることを照査する行為のことであり、その手法については特定の手法が義務づけられているものではありません。すなわち、具体的な性能照査手法や許容される破壊確率、変形量等の限界値は設計者の判断に委ねられています。よって、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」の位置づけは、性能規定化された基準が設計者に正しく理解されるための参考資料であり、性能照査手法や許容される破壊確率、変形量等の限界値の標準的な考え方や限界値の例を示しているとされています。

したがって、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に標準的な性能照査手法が掲載されているか否かに関わらず、どのような性能照査法を用いるかは、施設のおかれる状況や対象とする施設の構造特性に応じて設計者が適切に判断することになります。

以上のことから、設計に関する各種不明な点については個別に所轄機関にお問い合わせいただく必要があります。

安全性(断面破壊)/終局限界状態

曲げに対する検討

参照：「沿岸技術研究センター，港湾構造物設計事例集 平成19年3月」第1編6-4

$$\frac{\gamma_i M_d}{M_U} \leq 1.0$$
$$M_U = A_s f_{yd} d \left(1 - \frac{P_w f_{yd}}{1.7 f'_{cd}} \right), \quad A_{sn} = \frac{A_n \left(d - \sqrt{4\gamma_b \gamma_i M_d / A_n} \right)}{2 f_{yd}}$$

ここに

M_d : 断面力の設計用値	($N \cdot mm$)
M_U : 断面耐力の設計用値	($N \cdot mm$)
A_s : 使用鉄筋量	(mm^2)
A_{sn} : 必要鉄筋量	(mm^2)
d : 版の有効高さ	(mm)
γ_b : 部材係数	
γ_s : 鉄筋の材料係数	
γ_c : コンクリートの材料係数	
γ_i : 構造物係数	
$A_n : 1.7 b_w f'_{cd}$	
b_w : 部材幅	(mm)
P_w : 鉄筋比	
f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度	(N/mm^2)
f_{yd} : 引張鉄筋の設計引張降伏強度	(N/mm^2)

せん断に対する検討

床版の場合

参照：「土木学会，コンクリート標準示方書 設計編 2017年制定」P196

参照：「沿岸技術研究センター，港湾構造物設計事例集 平成19年3月」第1編6-4

i) 押し抜きせん断に対する検討

$$\frac{\gamma_f V_d}{V_{pcd}} \leq 1.0 \quad , \quad V_{pcd} = \beta_d \beta_p \beta_r f_{pcd} u_p d / \gamma_b$$

ここに

V_d : 移動荷重等の載荷重量 (kN)

V_{pcd} : 押し抜きせん断耐力の設計用値 (kN)

$$\beta_d = \sqrt[4]{100/d} \quad (\beta_d > 1.5 \text{ の場合 } \beta_d = 1.5)$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100P_w} \quad (\beta_p > 1.5 \text{ の場合 } \beta_p = 1.5)$$

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

$$f_{pcd} = 0.20 \sqrt{f'_{cd}} \quad (N/mm^2)$$

d : 法線平行方向、法線直角方向の有効高さの平均値 (mm)

P_w : 法線平行方向、法線直角方向の鉄筋比の平均値

u : 載荷面の周長 (mm)

u_p : 設計断面の周長で載荷面から $d/2$ 離れた位置で算出 (mm)

γ_b : 部材係数

γ_f : 荷重係数

ii) せん断に対する検討

$$\frac{\gamma_i V_d}{V_{cd}} \leq 1.0 \quad , \quad V_{cd} = \beta_d \beta_p \beta_n f_{vcd} b_w d / \gamma_b$$

ここに

V_d : せん断力の設計用値 (kN)

V_{cd} : コンクリートが受持つせん断耐力の設計用値 (kN)

$$f_{vcd} = 0.20 \sqrt[3]{f'_{cd}} \quad (N/mm^2)$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{100/d}$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100p_w}$$

$$\beta_n = 1.0$$

b_w : 部材の腹部幅 (mm)

d : 部材断面の有効高さ (mm)

p_w : 鉄筋比

A_s : 引張鉄筋の断面積 (mm²)

f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度 (N/mm²)

γ_i : 構造物係数

γ_b : 部材係数(1.30)

梁の場合

参照：「土木学会，コンクリート標準示方書 設計編 2017年制定」P188

参照：「沿岸技術研究センター，港湾構造物設計事例集 平成19年3月」第1編6-4

i) せん断に対する検討

$$\frac{\gamma_i V_d}{V_{yd}} \leq 1.0$$

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

$$V_{cd} = \beta_d \beta_p \beta_n f_{vcd} b_w d / \gamma_b, \quad V_{sd} = \{A_w f_{wyd} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) / S_s\} Z / \gamma_b$$

ここに

$$V_{yd} : \text{せん断耐力の設計用値} \quad (kN)$$

$$V_d : \text{せん断力の設計用値} \quad (kN)$$

$$V_{cd} : \text{コンクリートが受持つせん断耐力の設計用値} \quad (kN)$$

$$f_{vcd} = 0.20 \sqrt[3]{f'_{cd}} \quad (N/mm^2)$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{100/d}$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100 p_w}$$

$$\beta_n = 1.0$$

$$b_w : \text{部材の腹部幅} \quad (mm)$$

$$d : \text{部材断面の有効高さ} \quad (mm)$$

$$p_w : \text{鉄筋比}$$

$$A_s : \text{引張鉄筋の断面積} \quad (mm^2)$$

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

$$\gamma_i : \text{構造物係数}$$

$$\gamma_b : \text{部材係数(1.30)}$$

$$V_{sd} : \text{せん断補強筋により受持たれるせん断耐力の設計用値} \quad (kN)$$

$$A_w : \text{区間に} S_s \text{おけるせん断補強筋の総断面積} \quad (mm^2)$$

$$Z : \text{全圧縮応力の作用点から引張鉄筋断面図心までの距離} \quad (mm)$$

($d/1.15$ としてよい)

$$f_{wyd} : \text{せん断補強筋の降伏応力度の設計用値} \quad (N/mm^2)$$

$$\alpha_s : \text{せん断補強筋と部材角の成す角度}(90^\circ)$$

$$S_s : \text{せん断補強筋の配置間隔} \quad (mm)$$

$$\gamma'_b : \text{部材係数(1.10)}$$

ii) 腹部コンクリートの斜め圧縮破壊力の検討

$$\frac{\gamma_i V_d}{V_{wcd}} \leq 1.0$$

$$V_{wcd} = f_{wcd} b_w d / \gamma_b, \quad f_{wcd} = 1.25 \sqrt{f'_{cd}} \quad \text{ここに}$$

$$f_{wcd} : \text{設計斜め圧縮破壊力} \quad (kN)$$

使用性/使用限界状態

曲げ圧縮に対する検討

参照：「土木学会，コンクリート標準示方書 設計編 2022年制定」P92

$$\sigma_{sc} \leq 0.4 f'_{ck}$$

$$\sigma_{sc} = \frac{2M}{kjb d^2}$$

ここに

f'_{ck} : コンクリート設計基準強度 (N/mm^2)

σ_{sc} : 曲げ圧縮応力度 (N/mm^2)

M : コンクリートの設計用値（永続作用） (N/mm^2)

k : 中立軸比

j : $j = 1 - k/3$

b : 部材幅 (mm)

d : 有効高さ (mm)

曲げひび割れに対する検討

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」P495
 参照：「沿岸技術研究センター，港湾構造物設計事例集 平成19年3月」第1編6-5
 参照：「土木学会，コンクリート標準示方書 設計編 2017年制定」P231
 参照：「土木学会，コンクリート標準示方書に基づく設計計算例[栈橋上部工編] 2001年制定 コンクリート標準示方書[維持管理編]に基づくコンクリート構造物の維持管理事例集(案)」

$$W \leq W_{\text{lim}}$$

$$W = 1.1k_1k_2k_3 \{4C + 0.7(C_\phi - \phi)\} \times \left(\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon_\phi \right)$$

ここに

W : ひび割れ幅 (mm)

W_{lim} : 許容ひび割れ幅 (mm)

k_1 : 鉄筋の付着性状を表す係数

k_2 : コンクリートの品質がひび割れ幅に影響を表す係数 $k_2 = \frac{15}{f'_{cd} + 20} + 0.7$

k_3 : 引張鋼材の段数の影響を表す係数 $k_3 = \frac{5(m+2)}{7m+8}$

m : 引張鋼材の段数

C : 鉄筋のかぶり (mm)

C_ϕ : 鉄筋の中心間隔 (mm)

ϕ : 鉄筋の最小公称直径 (mm)

E_s : 鉄筋のヤング係数比

σ_{se} : 鉄筋の増加引張応力度 $\sigma_{se} = \frac{M_s}{A_s j d}$ (N/mm²)

M_s : 使用時設計曲げモーメント (N・mm)

$$j = 1 - k/3$$

$k = \sqrt{2np + (np)^2} - np$: 中立軸比

A_s : 使用鉄筋量 (mm²)

n : ヤング係数比

$p = A_s/bd$: 鉄筋比

b : 部材幅 (mm)

d : ひび割れ幅 (mm)

ε_ϕ : コンクリートの収縮及びクリープ等のひび割れ幅の増加を考慮する数値

f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度 (N/mm²)

$k_1 = 1.0$ (異形鉄筋)

$k_1 = 1.1$ (エポキシ樹脂塗膜)

※エポキシ樹脂塗膜を使用した場合、許容ひび割れ幅も1.1倍されます

許容ひび割れ幅

鉄筋位置	許容ひび割れ幅	最小かぶり
下側	0.0035C	70
上側	0.0040C	50

せん断に対する検討

参照：「土木学会，コンクリート標準示方書 設計編 2017年制定」P237

せん断補強筋を用いない部材として検討する

$$V_d \leq 0.7V_{cd} \quad , \quad V_{cd} = \frac{\beta_d \beta_p \beta_n f_{vcd} b_w d}{\gamma_b}$$

ここに

V_{cd} ：せん断補強筋を用いない部材のせん断耐力 (kN)

V_d ：設計せん断力 (kN)

$$f_{vcd} = 0.20 \sqrt[3]{f'_{cd}} \quad (N/mm^2)$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{100/d} \quad (\beta_d > 1.5 \text{ の場合 } \beta_d = 1.5)$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100P_w} \quad (\beta_p > 1.5 \text{ の場合 } \beta_p = 1.5)$$

$$\beta_n = 1.0$$

d ：有効高さ (mm)

b ：部材幅 (mm)

P_w ：鉄筋比

γ_b ：部材係数

設計せん断力がコンクリートのせん断耐力の70%より大きい場合、せん断補強筋の応力度が鉄筋応力度の増加量の制限値より小さいことを確認する

※本システムでは梁の検討でのみ用います。

$$\sigma_{wd} \leq \sigma_{sp} \quad , \quad \sigma_{wd} = \frac{(V_d - V_{cd} k_2) S_s}{A_w Z (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s)} \times \frac{V_{pd} + V_{cd}}{V_d + V_{cd}}$$

ここに

σ_{wd} ：せん断補強筋の応力度

σ_{sp} ：鉄筋応力度増加量の制限値

V_d ：設計せん断力

V_{cd} ：コンクリートが分担するせん断力

V_{pd} ：永久荷重作用時におけるせん断力

k_2 ：変動荷重の頻度を考慮するための係数

A_w ：1組のせん断補強筋の断面積

Z ：全圧縮応力の作用点から引張鉄筋断面の図心までの距離($d/1.15$ としてよい)

d ：部材の有効高さ

α_s ：せん断補強筋と部材角のなす角度(90°)

鉄筋応力度の限界値 σ_{sp} (N/mm²)

常時乾燥環境	乾湿繰返し環境	常時湿潤環境
140	120	140

安全性(疲労破壊)/疲労限界状態

棧橋上部工疲労限界状態モデル荷重

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」9-21
 参照：「港湾技術研究所報告，棧橋上部工の荷役機械荷重を考慮した疲労限界状態設計」第37巻 2号 (P209)

種 類			変動荷重	作用反復回数 (回/年)
トラッククレーン			$P_1 - P_2$	$\frac{\text{取扱総貨物量} \times 0.5}{\text{定格荷重} \times 0.2}$
			$P_3 - P_4$	$\frac{\text{取扱総貨物量} \times 0.5}{\text{定格荷重} \times 0.2}$
フォークリフト			最大輪荷重	$\frac{\text{取扱総貨物量}}{\text{定格荷重}} \times 0.4$
			最大輪荷重 $\times 0.9$	$\frac{\text{取扱総貨物量}}{\text{定格荷重}} \times 0.4$
			最大輪荷重 $\times 0.8$	$\frac{\text{取扱総貨物量}}{\text{定格荷重}} \times 0.4$
			最大輪荷重 $\times 0.7$	$\frac{\text{取扱総貨物量}}{\text{定格荷重}} \times 0.4$
			空荷時輪荷重	$\frac{\text{取扱総貨物量}}{\text{定格荷重}} \times 1.6$
トラック、トレーラ ー			最大輪荷重	取扱総貨物量/定格荷重
			空荷時輪荷重	取扱総貨物量/定格荷重
ガントリー クレーン	横行	海側	作業時最大輪荷重—最小輪荷重	総取扱コンテナ数
		陸側	作業時最大輪荷重—最小輪荷重	総取扱コンテナ数
	走行	海側	作業時最大輪荷重	600
		陸側	作業時最大輪荷重	600

- ※ トラッククレーンの場合、床版については変動荷重から算定された応力度に各接地荷重の割合をかけたものを使用しています。梁については変動荷重から算定された応力度をそのまま使用しています。
- ※ トラック、トレーラー、フォークリフトの場合には変動荷重から算定された応力度は最大輪荷重で計算されたものとしています。空荷時輪荷重は最大輪荷重で算定した応力度に(車両の総重量—定格荷重)／車両の総重量をかけた値で算定しております。
- ※ ガントリークレーンでは、変動荷重から算定された応力度をそのまま使用しております。

曲げモーメントによる疲労検討

参照：「港湾技術研究所報告，栈橋上部工の荷役機械荷重を考慮した疲労限界状態設計」第37巻 2号 (P182)

① 各変動荷重の中で最大値をとる変動応力度を計算する。

コンクリート、引張鉄筋、圧縮鉄筋の変動応力度を算定する

$$P = \frac{A_s}{bd} \quad P' = \frac{A'_s}{bd}$$

P : 引張側鉄筋の鉄筋比

P' : 圧縮側鉄筋の鉄筋比

k : 中立軸比

$$k = \sqrt{n^2 (P + P')^2 + 2n \left(P + P' \frac{d'}{d} \right) - n(P + P')}$$

$$\sigma_c = \frac{M}{bd^2} \cdot \frac{1}{\frac{k}{2} \left(1 - \frac{k}{3} \right) + \frac{nP'}{k} \left(k - \frac{d'}{d} \right) \left(1 - \frac{d'}{d} \right)}$$

σ_c : コンクリートの圧縮応力度

$$\sigma'_c = \frac{3}{4} \sigma_c$$

σ'_c : コンクリートの等価換算応力度

$$\sigma_s = n\sigma_c \frac{1-k}{k}$$

σ_s : 鉄筋の引張応力度

$$\sigma'_s = n\sigma_c \left(1 - \frac{d'}{kd} \right)$$

σ'_s : 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)

f_d : コンクリートの設計圧縮強度

σ_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 $f_{rd} (f_{srd})$

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

α : $k_0 \cdot (0.81 - 0.003\phi)$

k : 0.12 k_0 : 1.0

ϕ : 鉄筋公称直径

σ_{sp} : 永久荷重時の応力度

f_{ud} : 鉄筋の設計引張強度

γ_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 2×10^6 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 2×10^6 回を超えない場合

2×10^6 回を超えない回数を対象とし、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

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

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

σ_{ri} : 移動荷重の変動応力度

σ_{rd} : 設計変動応力度

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

σ_p : 永久荷重時の応力度

n_i : 移動荷重の発生回数

b) 鉄筋

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

σ_{ri} : 移動荷重の変動応力度

σ_{rd} : 設計変動応力度

n_i : 移動荷重の発生回数

k : 0.12

各波高の設計変動応力度 σ_{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 σ_{rd} の関係が以下の式になれば疲労に対して安全となる。

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

せん断力による疲労検討

床版の場合

参照：「沿岸技術研究センター，港湾構造物設計事例集 平成19年3月」第2編3-71

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

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 2.0×10^6 回を上回る回数は無視する。
 2.0×10^6 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

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

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

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

梁の場合

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」9-17

i) セン断補強筋がない場合

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

V_{rcd} : セン断補強筋のない部材の設計疲労耐力

V_{cd} : セン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 2.0×10^6 回を上回る回数は無視する。
 2.0×10^6 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

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

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

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

ii) せん断補強筋がある場合

$$\frac{\gamma_i \sigma_{wrd}}{(f_{wrd} / \gamma_b)} \leq 1.0$$

$$\sigma_{wrd} = \frac{(V_{pd} + V_{rd} - k_2 V_{cd}) S}{A_w Z (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s)} \times \frac{V_{rd}}{V_{pd} + V_{rd} + V_{cd}}$$

$$\sigma_{wpd} = \frac{(V_{pd} + V_{rd} - k_2 V_{cd}) S}{A_w Z (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s)} \times \frac{V_{pd} + V_{cd}}{V_{pd} + V_{rd} + V_{cd}}$$

$$f_{wrd} = 190 \frac{10^\alpha}{N^\kappa} \left(1 - \frac{\sigma_{wpd}}{f_{ud}} \right) / \gamma_s$$

$$N = \sum_{i=1}^m n_i \left(\frac{\sigma_{ri}}{\sigma_{rd}} \right)^{\frac{1}{\kappa}}, \quad V_{cd} = \beta_d \beta_p \beta_n f_{vcd} b_w d / \gamma_b$$

ここに

- σ_{wrd} : 変動荷重によるせん断補強筋の応力度 (N/mm²)
 σ_{wpd} : 永久荷重によるせん断補強筋の応力度 (N/mm²)
 f_{wsrd} : せん断補強筋の設計疲労強度 (N/mm²)
 V_{rd} : 変動設計変動せん断力 (kN)
 V_{pd} : 永久荷重作用時における設計せん断力 (kN)
 V_{cd} : せん断補強筋を用いない棒部材の設計せん断耐力 (kN)
 k_2 : 変動荷重の頻度の影響を考慮するための係数
 A_w : 1組のせん断補強筋の断面積 (mm²)
 S : 変動せん断補強筋の配置間隔 (mm)
 Z : 圧縮応力の合力作用位置から引張鋼材図心までの距離 (mm)
 d : 部材の有効高さ (mm)
 α_s : 変動せん断補強筋が部材軸となす角度
 N : 疲労寿命
 $\alpha = k_0(0.081 - 0.003\phi)$
 $\kappa = 0.12$
 ϕ : 鉄筋直径 (mm)
 f_{ud} : 鉄筋の設計引張応力度 (N/mm²)
 $\beta_d = \sqrt[4]{(100/d)}$
 $\beta_p = \sqrt[3]{(100p_w)}$
 $\beta_n = 1.0$
 $f_{vcd} = 0.2 \sqrt[3]{f'_{cd}}$
 p_w : 鉄筋比
 γ_b : 部材係数
 γ_i : 構造物係数
 γ_s : 鉄筋の材料係数

耐久性/性能の経時変化に対する検討

中性化の検討

参照：「土木学会，コンクリート標準示方書 設計編 2007年制定」P153～155

$$y_d / y_{\text{lim}} \leq 1.0 \quad , \quad y_d = \gamma_{cb} \alpha_d \sqrt{t}$$

$$\alpha_d = \alpha_k \beta_e \gamma_c$$

$$\alpha_k = \gamma_p \alpha_p$$

$$\alpha_p = -3.57 + 9.0(W / B)$$

ここに

y_d : 中性化深さの設計用値 (mm)

y_{lim} : 鉄筋腐食発生限界深さ (mm)

γ_{cb} : 中性化深さの設計用値のばらつきを考慮した部分係数

α_d : 中性化速度係数の設計用値 (mm / y^{-1/2})

t : 耐用年数 (y)

α_k : 中性化速度係数の特性値 (mm / y^{-1/2})

β_e : 環境作用の程度を表わす係数

γ_c : コンクリートの材料係数

α_p : コンクリートの中性化速度係数の予測値 (mm / y^{-1/2})

γ_p : コンクリートの中性化速度係数の予測値の精度に関する安全係数

W / B : 有効水結合材比

塩化物イオン濃度の検討

$$\gamma_i \frac{C_d}{C_{\text{lim}}} \leq 1.0 \quad , \quad C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left\{ 1 - \text{erf} \left(\frac{0.1c_d}{2\sqrt{D_d t}} \right) \right\} + C_i$$

ここに

- C_d : 鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計用値 (kg/m³)
- C_{lim} : 鋼材腐食発生限界濃度 (kg/m³)
- γ_i : 構造物係数
- γ_{cl} : 鋼材位置における C_d のばらつきを考慮した安全係数
- C_0 : 鋼材コンクリート表面における塩化物イオン濃度 (kg/m³)
- c_d : かぶりの設計値(H30港湾基準: $c - \Delta c_e$) (mm)
- c : かぶり (mm)
- Δc_e : かぶりの施工誤差 (mm)
- D_d : 塩化物イオン濃度に対する設計拡散係数 (cm² / y)
- t : 設計耐用年数 (y)
- C_i : 初期塩化物イオン濃度 (kg/m³)

$\text{erf}(z) = \int_0^z e^{-t^2} dt$: 誤差関数

コンクリート表面における塩化物イオン濃度 C_0 (kg/m³) は

一般に次の表で求めてよい

飛沫帯	海岸からの距離 (km)				
	汀線付近	0.1	0.25	0.5	1.0
13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5

塩化物イオン濃度に対する設計拡散係数 D_d (cm^2/y) は次の方法で計算する

【港湾基準 (H19)】

参照：「土木学会，コンクリート標準示方書[維持管理編] 2001年制定」P101～

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」P487

1. ひび割れ幅から算定する場合

$$D_d = \gamma_c D_k + \left(\frac{w}{l}\right) \left(\frac{w}{w_a}\right)^2 D_0, \quad \frac{w}{l} = 3 \left(\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon_\phi \right)$$

ここに

γ_c : コンクリートの材料係数

D_k : コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の特性値 (cm^2/y)

D_0 : コンクリート中の塩化物イオンの移動に及ぼす
ひび割れの影響を表す係数 (cm^2/y)

w : ひび割れ幅 (mm)

w_a : 許容ひび割れ幅 (mm)

l : ひび割れ間隔 (mm)

σ_{se} : 鉄筋の増加応力度 (N/mm^2)

E_s : 鉄筋のヤング係数 (N/mm^2)

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係数

コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の特性値 D_k (cm^2/y) は次式により算定することができる

$$D_k = \gamma_p \alpha D_p$$

$$\begin{cases} \text{普通ポルトランドセメントを使用する場合} \\ \log D_p = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \\ \text{高炉セメントやシリカフェームを使用する場合} \\ \log D_p = -3.0(W/C)^2 + 5.4(W/C) - 2.2 \end{cases}$$

ここに

α : 換算係数

D_p : コンクリートの拡散係数の予測値 (cm^2/y)

γ_p : D_p の精度に関する安全係数

W/C : 水セメント比

2. 水セメント比から算定する場合

$$\begin{cases} \text{普通ポルトランドセメントを使用する場合} \\ \log D_d = 4.5(W/C)^2 + 0.14(W/C) - 8.47 + \log(3.15 \times 10^7) \\ \text{高炉セメントやシリカフェームを使用する場合} \\ \log D_d = 19.5(W/C)^2 - 13.8(W/C) - 5.74 + \log(3.15 \times 10^7) \end{cases}$$

【港湾基準(H30)】

参照：「土木学会，コンクリート標準示方書 設計編 2017年制定」P156～

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」P599

1. ひび割れ幅から算定する場合

$$D_d = \gamma_c D_k + \lambda \left(\frac{w}{l} \right) D_0, \quad \frac{w}{l} = \frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon_\phi$$

ここに

γ_c : コンクリートの材料係数

D_k : コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の特性値 (cm^2 / y)

D_0 : コンクリート中の塩化物イオンの移動に及ぼす
ひび割れの影響を表す係数 (cm^2 / y)

w : ひび割れ幅 (mm)

l : ひび割れ間隔 (mm)

λ : ひび割れの存在が拡散係数に及ぼす影響を表す係数 (=1.5)

σ_{se} : 鉄筋の増加応力度 (N / mm^2)

E_s : 鉄筋のヤング係数 (N / mm^2)

ε_ϕ : コンクリートの乾燥吸収及びクリープによる
ひび割れを考慮するための係数

2. 算定式

$$D_d = D_k \gamma_c \beta_{cl}$$

ここに

β_{cl} : 初期ひび割れの影響を考慮した係数 (=1.5)

コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の特性値 D_k (cm^2 / y) は次式により算定することができる

$$\begin{cases} \text{普通ポルトランドセメントを使用する場合} \\ \log_{10} D_k = 3.4(W/C) - 1.9 & (0.35 < W/C < 0.55) \\ \text{高炉セメントやシリカフェュームを使用する場合} \\ \log_{10} D_k = 2.5(W/C) - 1.8 & (0.40 < W/C < 0.55) \end{cases}$$

エポキシ樹脂塗装鉄筋を使用した場合、 C_d は次式で算出される

参照：「土木学会，コンクリート標準示方書に基づく設計計算例[栈橋上部工編]
2001年制定 コンクリート標準示方書[維持管理編]に基づくコンクリート構造物の維持管理事例集(案)」

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1}{2\sqrt{t}} \left(\frac{c}{\sqrt{D_d}} + \frac{c_{ep}}{\sqrt{D_{epd}}} \right) \right) \right\}$$

ここに

c_{ep} ：エポキシ樹脂塗膜の厚さ (mm)

D_{epd} ：エポキシ樹脂塗膜内への塩化物イオンの侵入を
拡散現象とみなした場合の拡散係数 (cm^2 / y)

ポリマー含浸コンクリート埋設型枠を使用した場合、 C_d は次式で算出される

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1}{2\sqrt{t}} \left(\frac{c}{\sqrt{D_d}} + \frac{c_F}{\sqrt{D_{Fd}}} \right) \right) \right\}$$

ここに

c_F ：埋設型枠の厚さ (mm)

D_{Fd} ：埋設型枠内への塩化物イオンの侵入を
拡散現象とみなした場合の拡散係数 (cm^2 / y)

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19年 7月 | 日本港湾協会 |
| | 平成11年 4月 | 日本港湾協会 |
| ・ 港湾構造物設計事例集 | 平成30年 5月 | 沿岸技術研究センター |
| | 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 | 沿岸技術研究センター |
| ・ 漁港・漁場の施設の設計の手引き | 2003年度版 | 全国漁港協会 |
| ・ 漁港の防波堤・けい船岸等の設計指針と計算例 | 平成4年度改訂版 | 全国漁港協会 |
| ・ 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 |
| ・ 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— | 2004年度版 | 鋼管杭協会 |
| ・ 鋼矢板—設計から施工まで— | 2000年度版 | 鋼管杭協会 |
| ・ 鉄筋コンクリートの設計 (改訂2版) | 平成10年11月 | オーム社 |
| ・ 鉄筋コンクリート構造設計基準・同解説 | 1982年 | 日本建築学会 |
| ・ 国鉄建造物設計標準解説 | | |
| 鉄筋コンクリート構造物及び無筋コンクリート構造物 | 1983年 | 土木学会 |
| プレストレストコンクリート鉄道橋日本国有鉄道委託 | | |
| ・ 棧橋に作用する波の揚圧力 | 港湾技術研究所報告 第6巻 4号 | |
| ・ 棧橋上部工の荷役機械荷重を考慮した疲労限界状態設計 | 港湾技術研究所報告 第37巻 2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 | |
| ・ コンクリート標準示方書に基づく設計計算例[棧橋上部工編] | | |
| 2001年制定 コンクリート標準示方書[維持管理編]に基づく | | |
| コンクリート構造物の維持管理事例集(案) | 平成17年 7月 | 土木学会 |