

港湾設計業務シリーズ

# PC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	2
2-1. 揚圧力について	2
2-2. プレストレスについて	3
主桁のプレストレス力	3
(1) プレストレス導入直後のプレストレス	3
(2) 主桁連結時のプレストレス	4
(3) 有効プレストレス	5
横桁のプレストレス力	6
(1) プレストレス導入直後のプレストレス	6
(2) 有効プレストレス	7
2-3. 上部工の断面力・影響線について	8
骨組構造解析	8
曲げ剛性係数	10
ねじり剛性係数	11
SATTLERの修正理論	12
GUYON-MASSONNETの方法	13
主桁の影響線縦距	13
横桁の影響線縦距	15
二次力	17
自重による二次力	17
プレストレスによる二次力	17
横桁の曲げモーメント	18
水平方向地盤反力係数の算定方法	19
杭軸方向バネ定数の算定方法	21
平成29年道路橋示方書	21
平成24年道路橋示方書	23
2-4. 上部工の検討	24
安全性(断面破壊)/終局限界状態	24
曲げに対する検討	24
せん断に対する検討	27
使用性/使用限界状態	30
曲げひび割れに対する検討(受梁・連結部の場合)	30
曲げ及び軸力に対する検討(主桁の場合)	33
曲げ及び軸力に対する検討(横桁の場合)	35
せん断ひび割れの検討(受梁・連結部の場合)	36
せん断に対する検討(主桁の場合)	38
耐久性/性能の経時変化に対する検討	39
中性化の検討	39
塩化物イオン濃度の検討	40
安全性(疲労破壊)/疲労限界状態	44
栈橋上部工疲労限界状態モデル荷重	44
曲げモーメントによる疲労検討	45
せん断力による疲労検討	51
3. 補足資料	53
3-1. 参考文献	53

— 目 次 —



# 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「PC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。
- ・ 受梁、主桁（連結部、支間部、横桁）の検討を行います。
- ・ 影響線の計算は骨組み構造解析を用いています。
- ・ 主桁、横桁の計算ではGuyon-Massonnetの方法を用いています。
- ・ 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することができます。
- ・ ホロー桁データの新規追加、編集により形状寸法及びPC鋼材を任意に設定することができます。
- ・ 斜杭の場合、斜角によるKh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。
- ・ 地盤反力係数Kh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。
- ・ 杭頭部に作用する断面力を直接入力できます。
- ・ 影響線を用いて各支点部、支間部に断面力が最大値をとるよう移動荷重を自動的に載荷します。
- ・ 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

本システムでは揚圧力の検討を行うかどうか選択できます。算定式は次式を使用しています。

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

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

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

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

※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 P208～P209）

※港湾技術研究所報告，栈橋に作用する波の揚圧力 第6巻4号



## 2-2. プレストレスについて

### 主桁のプレストレス力

主桁に作用するプレストレスは以下の手順で算定する

- (1) プレストレス導入直後のプレストレスを計算する
- (2) 主桁連結時のプレストレスを計算する
- (3) 有効プレストレスを計算する

#### (1) プレストレス導入直後のプレストレス

$$P_t = A_p N \sigma_{pt} \quad , \quad M_{pt} = P_t e_p$$

$$\sigma_{pt} = \sigma_{pi} - \Delta\sigma_{pr1} - \Delta\sigma_{ps}$$

$$\Delta\sigma_{ps} = n_1 (\sigma_{cpt} + \sigma_{dog}) \quad \sigma_{cpt} = (\sigma_{pi} - \Delta\sigma_{pr1}) A_p N \left( \frac{1}{A_{c1}} + \frac{e_p}{W_{g1}} \right) + \frac{M_{d0}}{I_{c1}} e_p$$

$$\Delta\sigma_{pr1} = (\gamma_1 + \gamma_2) \sigma_{pi}$$

ここに

$P_t$ : プレストレス導入直後の軸圧縮力	(kN)
$M_{pt}$ : プレストレス導入直後の偏心モーメント	(kN・m)
$N$ : 桁 1 本当たりの鋼材の配置本数	(本)
$A_p$ : 鋼材 1 本当たりの断面積	(mm <sup>2</sup> )
$A_{c1}$ : 主桁のPC鋼材換算断面積	(mm <sup>2</sup> )
$e_p$ : 主桁のPC鋼材換算断面積での図心位置から鋼材図心位置までの距離	(mm)
$W_{g1}$ : 主桁のPC鋼材換算断面積での鋼材図心位置の断面係数	(mm <sup>3</sup> )
$I_{c1}$ : 主桁のPC鋼材換算断面積での鋼材図心位置の断面二次モーメント	(mm <sup>4</sup> )
$\sigma_{pt}$ : プレストレス導入直後のPC鋼材応力度	(N/mm <sup>2</sup> )
$\sigma_{pi}$ : PC鋼材の初期緊張力	(N/mm <sup>2</sup> )
$\Delta\sigma_{pr1}$ : プレストレス導入前のリラクセーションによる減少量	(N/mm <sup>2</sup> )
$\Delta\sigma_{ps}$ : コンクリートの弾性変形による減少量	(N/mm <sup>2</sup> )
$\sigma_{cpt}$ : PC鋼材図心位置におけるプレストレス力によるコンクリート応力度	(N/mm <sup>2</sup> )
$M_{d0}$ : 主桁自重による曲げモーメント	(kN・m)

$$n_1: \text{ヤング係数比} (= E_p / E_c)$$

$$E_c: \text{プレストレス導入時のコンクリートのヤング係数} \quad (kN/m^2)$$

$$E_p: \text{PC鋼材のヤング係数} \quad (kN/m^2)$$

$$\gamma_1: \text{PCプレストレス導入前のリラクセーション率}$$

$$\gamma_2: \text{高温養生の影響によるリラクセーション率}$$

## (2) 主桁連結時のプレストレス

$$P_{e1} = A_p N \sigma_{pe1} \quad , \quad M_{pe1} = P_{e1} e_p$$

$$\Delta \sigma_{pr2} = \gamma_3 \sigma_{pt} \quad \sigma_{pe1} = \sigma_{pt} - \Delta \sigma_{pr2} - \Delta \sigma_{p\phi1}$$

$$\sigma_{cpt} = P_t \left( \frac{1}{A_{c1}} + \frac{e_p}{W_{g1}} \right) \quad \Delta \sigma_{p\phi1} = \frac{n_2 \varphi_1 (\sigma_{cpt} + \sigma_{d0g} + \sigma_{d1g}) + E_p \varepsilon_{s1}}{1 + n_2 \frac{\sigma_{cpt}}{\sigma_{ptd}} \left( 1 + \frac{\varphi_1}{2} \right)}$$

$$\sigma_{d0g} = \frac{M_{d0}}{W_{g1}} \quad \sigma_{d1g} = \frac{M_{d1}}{W_{g1}}$$

ここに

- $P_t$ : 主桁連結時の軸圧縮力 (kN)
- $M_{pt}$ : 主桁連結時の偏心モーメント (kN · m)
- $\sigma_{pe1}$ : 主桁連結時のPC鋼材応力度
- $\Delta \sigma_{pr2}$ : プレストレス導入直後のリラクセーションによる減少量
- $\Delta \sigma_{p\phi1}$ : コンクリートのクリープ及び乾燥収縮による減少量
- $\sigma_{cpt}$ : PC鋼材図心位置でのプレ導入直後のプレストレスによるコンクリート応力度
- $\sigma_{d0g}$ : PC鋼材図心位置での主桁荷重によるコンクリート応力度
- $\sigma_{d1g}$ : PC鋼材図心位置での桁間荷重によるコンクリート応力度
- $n_2$ : ヤング係数比 ( $= E_p / E_c$ )
- $E_c$ : 主桁連結時のコンクリートのヤング係数
- $E_p$ : PC鋼材のヤング係数
- $\gamma_3$ : プレストレス導入直後のリラクセーション率
- $\varphi_1$ : 主桁連結時までのクリープ係数 ( $= \varphi_\infty - \varphi_{90}$ )
- $\varphi_\infty$ : クリープ係数の最終値
- $\varphi_{90}$ : 主桁連結後のクリープ係数
- $\varepsilon_{s1}$ : 主桁連結時までの乾燥収縮度 ( $= \varepsilon_{s\infty} - \varepsilon_{s90}$ )
- $\varepsilon_{s\infty}$ : 乾燥収縮度の最終値
- $\varepsilon_{s90}$ : 主桁連結後の乾燥収縮度

### (3)有効プレストレス

$$P_{e2} = A_p N \sigma_{pe2} \quad , \quad M_{pe} = P_{e2} e_p$$

$$\sigma_{pe2} = \sigma_{pt} - \Delta\sigma_{pr2} - \Delta\sigma_{p\phi2}$$

$$\Delta\sigma_{p\phi2} = \frac{n_2 \phi_2 (\sigma_{cpt} + \sigma_{d0g} + \sigma_{d1g}) + E_p \varepsilon_{s2}}{1 + n_2 \frac{\sigma_{cpt}}{\sigma_{pt}} \left(1 + \frac{\phi_2}{2}\right)} + \frac{n_2 \phi_3 \sigma_{d2g}}{1 + n_2 \frac{\sigma_{cpt}}{\sigma_{pt}} \left(1 + \frac{\phi_3}{2}\right)}$$

$$\sigma_{d0g} = \frac{M_{d0g}}{W_{g1}} \quad \sigma_{d1g} = \frac{M_{d1g}}{W_{g1}} \quad \sigma_{d2g} = \frac{M_{d2g}}{W_{g2}}$$

ここに

$P_{e2}$ : 有効プレストレスによる軸圧縮力	(kN)
$M_{pe2}$ : 有効プレストレスによる偏心モーメント	(kN・m)
$\sigma_{pe2}$ : PC鋼材の有効応力度	(N/mm <sup>2</sup> )
$\Delta\sigma_{p\phi2}$ : 連結後のコンクリートのクリープ及び乾燥収縮による減少量	(N/mm <sup>2</sup> )
$\sigma_{d0g}$ : PC鋼材図心位置における主桁自重のコンクリート応力度	(N/mm <sup>2</sup> )
$\sigma_{d1g}$ : PC鋼材図心位置における桁間自重のコンクリート応力度	(N/mm <sup>2</sup> )
$\sigma_{d2g}$ : PC鋼材図心位置における橋面工自重のコンクリート応力度	(N/mm <sup>2</sup> )
$M_{d0}$ : 主桁自重による曲げモーメント	(kN・m)
$M_{d1}$ : 桁間自重による曲げモーメント	(kN・m)
$M_{d2}$ : 橋面工自重による曲げモーメント	(kN・m)
$W_{g1}$ : PC換算断面の鋼材図心位置の断面係数	(m <sup>3</sup> )
$W_{g2}$ : 場所打ち換算断面の鋼材図心位置の断面係数	(m <sup>3</sup> )

## 横桁のプレストレス力

主桁に作用するプレストレスは以下の手順で算定する

- (1) プレストレス導入直後のプレストレスを計算する
- (2) 有効プレストレスを計算する

### (1) プレストレス導入直後のプレストレス

$$P_t = A_p N \sigma_{pt} \quad , \quad M_{pt} = P_t e_p$$

$$\sigma_{pt \max} = \sigma_{pi} - \Delta\sigma_{pm} \quad \sigma_{pt \min} = \sigma_{pi} - \Delta\sigma_{ptt}$$

$$\Delta\sigma_{pm} = \left\{ \frac{1}{2} (\Delta\sigma_{ptt} + \Delta\sigma_{pm}) X + \frac{1}{2} (\Delta\sigma_{pm} + \Delta\sigma_{ptc}) (l_p - X) \right\} / l_p$$

$$\Delta\sigma_{pm} = \Delta l \frac{E_p}{X} \quad \Delta\sigma_{ptt} = 2\Delta\sigma_{pm} \quad \Delta\sigma_{ptc} = 0.5\Delta\sigma_{pf}$$

$$X = \sqrt{\frac{\Delta l}{\Delta l'}} l_p \quad \Delta l' = \Delta\sigma_{pf} \frac{l_p}{E_p}$$

$$\Delta\sigma_{pf} = \sigma_{pi} - \sigma_{pi} e^{-\lambda l_p}$$

ここに

$P_t$ : プレストレス導入直後による軸圧縮力	(kN)
$M_{pt}$ : プレストレス導入直後による偏心モーメント	(kN・m)
$A_p$ : 横桁 1 本当たりの断面積	(m <sup>2</sup> )
$N$ : 横桁 1 本当たりの配置本数	(本)
$E_p$ : PC鋼材のヤング係数	(kN / m <sup>2</sup> )
$e_p$ : 偏心距離	(m)
$\sigma_{pt}$ : プレストレス導入直後のPC鋼材平均応力度	(N / mm <sup>2</sup> )
$\sigma_{pt \max}$ : プレストレス導入直後のPC鋼材最大応力度	(N / mm <sup>2</sup> )
$\sigma_{pt \min}$ : プレストレス導入直後のPC鋼材最小応力度	(N / mm <sup>2</sup> )
$\Delta\sigma_{pm}$ : 定着具の標準セットによる平均減少量	(N / mm <sup>2</sup> )
$\Delta\sigma_{ptc}$ : 定着具の標準セットによる中央部における減少量	(N / mm <sup>2</sup> )
$\Delta\sigma_{ptt}$ : 定着具の標準セットによる緊張端における減少量	(N / mm <sup>2</sup> )
$\Delta\sigma_{pm}$ : 定着具の標準セットによる最小減少量	(N / mm <sup>2</sup> )
$X$ : PC鋼材定着部のセットによる平均減少量	(m)
$\Delta l$ : 定着具の標準セット量	(mm)
$\Delta l'$ : 定着具のセットによる影響が固定端に達するとした仮想セット量	(mm)
$l_p$ : PC鋼材の引張端からの長さ	(m)
$\lambda$ : PC鋼材 1 本当たりの摩擦係数	
$\Delta\sigma_{pt1}$ : PC定着具の摩擦損失による応力度の減少量	(N / mm <sup>2</sup> )
$\Delta\sigma_{pf}$ : PC鋼材とシースの摩擦による減少量	(N / mm <sup>2</sup> )
$\sigma_{pi}$ : PC初期引張応力度	(N / mm <sup>2</sup> )

## (2)有効プレストレス

$$P_e = A_p N \sigma_{pe} \quad , \quad M_{pe} = P_e e_p$$

$$\sigma_{pe\max} = \sigma_{pe\min} \frac{\sigma_{pt\max}}{\sigma_{pt\min}} \quad \sigma_{pe\min} = \sigma_{pt} - \Delta\sigma_{pr} - \Delta\sigma_{p\phi}$$

$$\Delta\sigma_{p\phi} = n\varphi\sigma_{cp} + \varepsilon_s E_p \quad \sigma_{cp} = \sigma_{cpt} + M_d \frac{e_p}{I_c}$$

$$\sigma_{cpt} = \sigma_{pt} A_p N \left( \frac{1}{A_c} + \frac{e_p^2}{I_c} \right) \quad \Delta\sigma_{pr} = \gamma\sigma_{pt}$$

ここに

$P_e$  : 有効プレストレスによる軸圧縮応力 (kN)

$M_{pe}$  : 有効プレストレスによる偏心モーメント (kN・m)

$A_c$  : 横桁有効断面の断面積 (m<sup>2</sup>)

$I_c$  : 横桁有効断面の断面二次モーメント (m<sup>4</sup>)

$\sigma_{pe\min}$  : PC鋼材による最小有効応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{pe\max}$  : PC鋼材による最大有効応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\Delta\sigma_{p\phi}$  : コンクリートのクリープ及び乾燥収縮による減少量 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{cp}$  : PC鋼材図心位置における持続荷重によるコンクリート応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{cpt}$  : PC鋼材図心位置におけるプレ導入直後のプレストレスによるコンクリート応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\varepsilon_s$  : 乾燥収縮度

$\varphi$  : クリープ係数

$M_d$  : PC橋面工荷重による曲げモーメント (kN・m)

$n$  : ヤング係数比 (=  $E_p/E_c$ )

$E_c$  : 横桁で使用するコンクリートのヤング係数 (kN/m<sup>2</sup>)

$\gamma$  : リラクセーション率

$\Delta\sigma_{pr}$  : PC鋼材のリラクセーションによる減少量 (N/mm<sup>2</sup>)

## 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受梁・PC主桁の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。

PC主桁・横桁の影響線縦距に関してはGuyon-Massonnetの方法、Sattlerの修正理論を用いています。

### 骨組構造解析

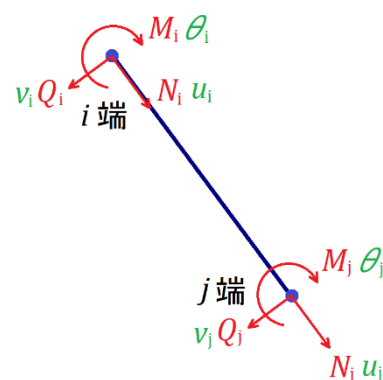
$$F = K\delta$$

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

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

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

XY平面



ここに

$F$ : 部材力

$\delta$ : 変位

$K$ : 剛性マトリックス

$N_i, N_j$ : 部材*i*端,*j*端に作用する軸力

$Q_i, Q_j$ : 部材*i*端,*j*端に作用するせん断力

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

$u_i, u_j$ : 部材*i*端,*j*端のx方向の変位

$v_i, v_j$ : 部材*i*端,*j*端のy方向の変位

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

$E$ : 部材のヤング係数

$A$ : 部材の断面積

$I$ : 部材の断面二次モーメント

$l$ : 部材長

※土木学会, 構造力学公式集 (P73~P93)

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。

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ここに

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

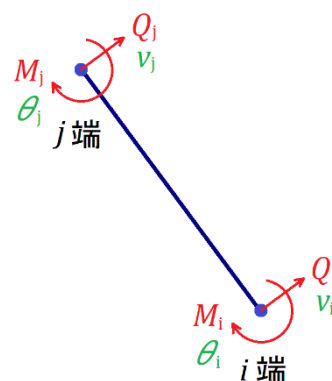
$K_H$ : 部材に作用する水平方向地盤反力係数

$D$ : 杭径

$EI$ : 曲げ剛性

$l$ : 部材長

※日本道路協会，杭基礎設計便覧（平成4年10月 P196）



## 曲げ剛性係数

曲げ剛性係数  $\theta$  は次式により求める

$$\theta = \frac{b}{l} \sqrt[4]{\frac{E_t I_{lu}}{E_l I_{lu}}}$$

ここに

$b$ : 抵抗幅の1/2 (m)

$l$ : 単純桁とした場合の支間長 (m)

$E_l$ : 主桁コンクリートのヤング係数 (kN/m<sup>2</sup>)

$E_t$ : 横桁コンクリートのヤング係数 (kN/m<sup>2</sup>)

$I_{lu}$ : 主桁単位幅(1.0m)当たりの断面二次モーメント  $\left( = \frac{N \cdot I_l}{2q} \right)$  (m<sup>4</sup>)

$I_l$ : 主桁 1 本当たりの断面二次モーメント (m<sup>4</sup>)

$N$ : 主桁本数 (本)

$I_{tu}$ : 横桁単位幅(1.0m)当たりの断面二次モーメント  $\left( = \frac{I_t}{q_t} \right)$  (m<sup>4</sup>)

$I_t$ : 横桁 1 本当たりの断面二次モーメント (m<sup>4</sup>)

$q_t$ : 横桁間隔 (m)



## ねじり剛性係数

ねじり剛性係数  $\alpha$  は次式により求める

$$\alpha = \frac{G_l J_{lu} + G_t J_{tu}}{2\sqrt{E_l \cdot I'_{lu} \cdot E_t \cdot I'_{tu}}}$$

ここに

$G_l$  : 主桁コンクリートのせん断弾性係数  $(kN/m^2)$

$E_l$  : 主桁コンクリートのヤング係数  $(kN/m^2)$

$\nu$  : ポアソン比

$G_t$  : 横桁コンクリートのせん断弾性係数  $(kN/m^2)$

$E_t$  : 横桁コンクリートのヤング係数  $(kN/m^2)$

$I'_{lu}$  : 主桁のハンチ無視の単位幅当たりの断面二次モーメント  $\left( = \frac{N \cdot I'_l}{2b} \right)$   $(m^4)$

$I'_l$  : 主桁の1本当たりのハンチ無視の断面二次モーメント  $(m^4)$

$I'_{tu}$  : 横桁のハンチ無視の単位幅当たりの断面二次モーメント  $(= I'_t)$   $(m^4)$

$I'_t$  : 横桁の1本当たりのハンチ無視の断面二次モーメント  $(m^4)$

$J_{lu}$  : 主桁の単位幅当たりのねじれ剛性  $\left( = \frac{N \cdot J_l}{2b} \right)$   $(m^3)$

$J_l$  : 主桁の1本当たりのねじれ剛性  $(m^3)$

$J_{tu}$  : 横桁の単位幅当たりのねじれ剛性  $\left( = \frac{J_t}{q_t} \right)$   $(m^3)$

$J_t$  : 中間横桁のねじれ剛性  $(m^3)$

## Sattlerの修正理論

主桁での曲げ剛性係数、ねじり剛性係数では連結桁では単純桁と比べてたわみが小さく荷重分配が減少するため、各径間のたわみ比によって修正を行う

各径間のたわみ比は次式により行う

$$K_i = \frac{\delta_0}{\delta_i}$$

ここに

$K_i$ : 第  $i$  径間でのたわみ比

$\delta_0$ : 単純桁の中央に  $P=1.0\text{kN}$  をかけた場合の中央たわみ (mm)

$\delta_i$ : 第  $i$  径間の中央に  $P=1.0\text{kN}$  をかけた場合の中央たわみ (mm)

曲げ剛性係数、ねじり剛性係数の修正は次式により行う

$$\theta' = \sqrt[4]{K} \theta$$

$$\alpha' = \frac{1}{\sqrt{K}} \alpha$$

ここに

$\theta'$ : 連結桁として修正した曲げ剛性係数

$\alpha'$ : 連結桁として修正したねじり剛性係数

## Guyon-Massonnetの方法

### 主桁の影響線縦距

主桁の影響線縦距  $K_\alpha$  は

主桁の剛性係数  $\theta$  と剛性係数  $\alpha$  によって次式により求まる

$$K_\alpha = K_0 + (K_1 - K_0)\sqrt{\alpha}$$

※ただし、 $\alpha > 1.0$  の場合には  $\alpha = 1.0$  として計算を行う

ここに

$K_\alpha$  : 任意の  $\alpha$  に対する影響線縦距

$K_0$  :  $\alpha = 0.0$  に対する影響線縦距 ( $= \lambda b [K_0]$ )

$K_1$  :  $\alpha = 1.0$  に対する影響線縦距 ( $= 0.5\sigma b [K_1]$ )

$$\lambda = \frac{\pi\theta}{\sqrt{2}b}, \quad \sigma = \frac{\pi\theta}{b}$$

$y$  : 着目点

$e$  : 載荷点

$$[K_0] = [K_0Y][K_0B][K_0E]$$

$$[K_1] = [K_1Y][K_1B][K_1E]$$

$$[K_0Y] = [\cos \lambda y \cdot \cosh \lambda y \quad \cos \lambda y \cdot \sinh \lambda y \quad \sin \lambda y \cdot \cosh \lambda y \quad \sin \lambda y \cdot \sinh \lambda y]$$

$$[K_1Y] = [\cosh \sigma y \quad \sinh \sigma y \quad \sigma y \cdot \cosh \sigma y \quad \sigma y \cdot \sinh \sigma y]$$

$$[K_0B] = \begin{bmatrix} \mp 1 & -\frac{(\cosh \lambda b)^2}{A} & \frac{(\cos \lambda b)^2}{A} & 0 \\ -\frac{(\sinh \lambda b)^2}{B} & \mp 1 & 0 & -\frac{(\cos \lambda b)^2}{B} \\ -\frac{(\sin \lambda b)^2}{B} & 0 & \mp 1 & -\frac{(\cosh \lambda b)^2}{B} \\ 0 & \frac{(\sin \lambda b)^2}{A} & -\frac{(\sinh \lambda b)^2}{A} & \mp 1 \end{bmatrix}$$

$$A = \sinh \lambda b \cdot \cosh \lambda b + \sin \lambda b \cdot \cos \lambda b$$

$$B = \sinh \lambda b \cdot \cosh \lambda b - \sin \lambda b \cdot \cos \lambda b$$

符号:  $y < e(-)$  ,  $y \geq e(+)$

$$[K_1 B] = \begin{bmatrix} \mp 1 & \frac{3(\cosh \sigma b)^2 - 1}{C} & -\frac{2 + (\sigma b)^2}{C} & 0 \\ -\frac{3(\sinh \sigma b)^2 + 1}{D} & \mp 1 & 0 & -\frac{2 + (\sigma b)^2}{D} \\ -\frac{1}{D} & 0 & \mp 1 & -\frac{3(\cosh \sigma b)^2 - 1}{D} \\ 0 & -\frac{1}{C} & \frac{3(\sinh \sigma b)^2 + 1}{C} & \mp 1 \end{bmatrix}$$

$$C = \sigma b - 3 \sinh \sigma b \cdot \cos \sigma b$$

$$D = \sigma b + 3 \sinh \sigma b \cdot \cos \sigma b$$

符号:  $y < e(-)$  ,  $y \geq e(+)$

$$[K_0 E] = \begin{bmatrix} \cos \lambda e \cdot \sinh \lambda e - \sin \lambda e \cdot \cosh \lambda e \\ \sin \lambda e \cdot \sinh \lambda e - \cos \lambda e \cdot \cosh \lambda e \\ \sin \lambda e \cdot \sinh \lambda e + \cos \lambda e \cdot \cosh \lambda e \\ -\cos \lambda e \cdot \sinh \lambda e - \sin \lambda e \cdot \cosh \lambda e \end{bmatrix}$$

$$[K_1 E] = \begin{bmatrix} \sinh \sigma e - \sigma e \cosh \sigma e \\ -\cosh \sigma e + \sigma e \sinh \sigma e \\ \cosh \sigma e \\ -\sinh \sigma e \end{bmatrix}$$

## 横桁の影響線縦距

横桁の影響線縦距  $\mu_\alpha$  は

横桁の剛性係数  $\theta$  と剛性係数  $\alpha$  によって次式により求まる

$$\mu_\alpha = \mu_0 + (\mu_1 - \mu_0)\sqrt{\alpha}$$

※ただし、 $\alpha > 1.0$  の場合には  $\alpha = 1.0$  として計算を行う

ここに

$\mu_\alpha$  : 任意の  $\alpha$  に対する影響線縦距

$$\mu_0 : \alpha = 0.0 \text{ に対する影響線縦距 } \left( = \frac{1}{4\lambda b} [M_0] \right)$$

$$\mu_1 : \alpha = 1.0 \text{ に対する影響線縦距 } \left( = -\frac{1}{4\sigma b} [M_1] \right)$$

$$\lambda = \frac{\pi\theta}{\sqrt{2b}}, \quad \sigma = \frac{\pi\theta}{b}$$

$y$  : 着目点

$e$  : 載荷点

$$[M_0] = [M_0Y][K_0B][K_0E]$$

$$[M_1] = [M_1Y][K_1B][K_1E]$$

$$[M_0Y] = [\sin \lambda y \cdot \sinh \lambda y \quad \sin \lambda y \cdot \cosh \lambda y \quad -\cos \lambda y \cdot \sinh \lambda y \quad -\cos \lambda y \cdot \cosh \lambda y]$$

$$[M_1Y] = [\cosh \sigma y \quad \sinh \sigma y \quad 2 \sinh \sigma y + \sigma y \cdot \cosh \sigma y \quad 2 \cosh \sigma y + \sigma y \cdot \sinh \sigma y]$$

$$[M_0B] = \begin{bmatrix} \mp 1 & -\frac{(\cosh \lambda b)^2}{A} & \frac{(\cos \lambda b)^2}{A} & 0 \\ -\frac{(\sinh \lambda b)^2}{B} & \mp 1 & 0 & -\frac{(\cos \lambda b)^2}{B} \\ -\frac{(\sin \lambda b)^2}{B} & 0 & \mp 1 & -\frac{(\cosh \lambda b)^2}{B} \\ 0 & \frac{(\sin \lambda b)^2}{A} & -\frac{(\sinh \lambda b)^2}{A} & \mp 1 \end{bmatrix}$$

$$A = \sinh \lambda b \cdot \cosh \lambda b + \sin \lambda b \cdot \cos \lambda b$$

$$B = \sinh \lambda b \cdot \cosh \lambda b - \sin \lambda b \cdot \cos \lambda b$$

符号 :  $y < e(-)$  ,  $y \geq e(+)$

$$[K_1B] = \begin{bmatrix} \mp 1 & \frac{3(\cosh \sigma b)^2 - 1}{C} & -\frac{2 + (\sigma b)^2}{C} & 0 \\ -\frac{3(\sinh \sigma b)^2 + 1}{D} & \mp 1 & 0 & -\frac{2 + (\sigma b)^2}{D} \\ -\frac{1}{D} & 0 & \mp 1 & -\frac{3(\cosh \sigma b)^2 - 1}{D} \\ 0 & -\frac{1}{C} & \frac{3(\sinh \sigma b)^2 + 1}{C} & \mp 1 \end{bmatrix}$$

$$C = \sigma b - 3 \sinh \sigma b \cdot \cos \sigma b$$

$$D = \sigma b + 3 \sinh \sigma b \cdot \cos \sigma b$$

符号:  $y < e(-)$  ,  $y \geq e(+)$

$$[K_0E] = \begin{bmatrix} \cos \lambda e \cdot \sinh \lambda e - \sin \lambda e \cdot \cosh \lambda e \\ \sin \lambda e \cdot \sinh \lambda e - \cos \lambda e \cdot \cosh \lambda e \\ \sin \lambda e \cdot \sinh \lambda e + \cos \lambda e \cdot \cosh \lambda e \\ -\cos \lambda e \cdot \sinh \lambda e - \sin \lambda e \cdot \cosh \lambda e \end{bmatrix}$$

$$[K_1E] = \begin{bmatrix} \sinh \sigma e - \sigma e \cosh \sigma e \\ -\cosh \sigma e + \sigma e \sinh \sigma e \\ \cosh \sigma e \\ -\sinh \sigma e \end{bmatrix}$$

## 二次力

### 自重による二次力

単純桁を架設し、連結した後のクリープの変形により生じる二次力は次式により求める

$$M_{\varphi d} = (M_{d1} - M_{d0})(1 - e^{-\varphi})$$

ここに

$M_{\varphi d}$  : クリープの変形により生じる曲げモーメント

$M_{d0}$  : 単純桁として施工した場合の曲げモーメント

$M_{d1}$  : 一体施工した場合の曲げモーメント

$\varphi$  : 主桁連結後のクリープ係数

### プレストレスによる二次力

プレストレスにより生じる二次力は次式により求める

$$M_{\varphi p} = (M_{p1} - M_{p0})(1 - e^{-\varphi})$$

ここに

$M_{\varphi p}$  : クリープの変形により生じる曲げモーメント

$M_{p0}$  : 単純桁の状態にプレストレスを与えた場合の不静定モーメント

$M_{p1}$  : 連続ラーメンの状態にプレストレスを与えた場合の不静定モーメント

$\varphi$  : 主桁連結後のクリープ係数

## 横桁の曲げモーメント

横桁の曲げモーメントは次式により求める

集中荷重による曲げモーメント

$$M_y = q \cdot b \sum \mu_\alpha \frac{2P}{l} \sin \frac{\pi d}{l} \sin \frac{\pi x}{l}$$

等分布荷重による曲げモーメント

$$M_y = q \cdot b \sum \mu_\alpha \frac{4W}{\pi} \sin \frac{\pi x}{l}$$

ここに

$q$ : 横桁間隔 (m)

$b$ : 抵抗幅の1/2 (m)

$l$ : 単純桁とした場合の支間 (m)

$d$ : 主桁支点から載荷点までの距離 (m)

$x$ : 横着目横桁の主桁支点からの距離 (m)

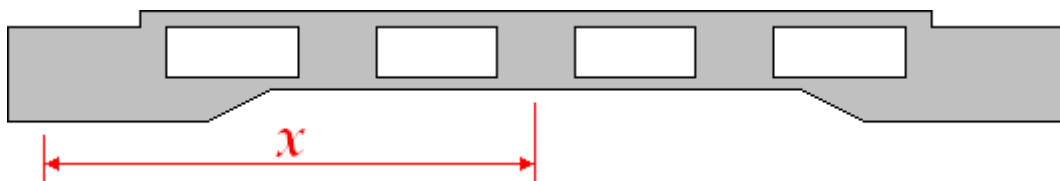
$P$ : 集中荷重

$W$ : 等分布荷重

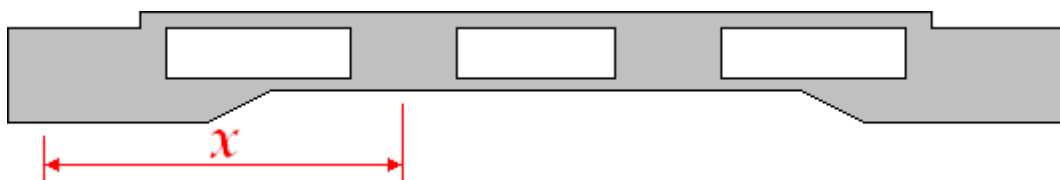
$\sum \mu_\alpha$ : 荷重分配係数

$x$ はホロー桁に設定された横桁数によって変わります。

横桁数が奇数の場合



横桁数が偶数の場合





## 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。

- 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

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

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

ここに

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

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 ( $\alpha$  は常時の値を用いる)

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

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

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

- ⑤  $k_H$  を算出

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

- 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、 $\alpha$ 、 $E_0$ の内容は以下の通り

$\alpha$  : 地盤反力係数の推定に用いる係数  $\alpha=4, 8$   
 $E_0$  : ボーリング孔内で測定した変形係数(入力値)

6) 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
$-30^\circ < \theta \leq -20^\circ$	$K_h' = K_h \times (-0.051\theta + 0.71)$
$-20^\circ < \theta \leq -10^\circ$	$K_h' = K_h \times (-0.039\theta + 0.95)$
$-10^\circ < \theta < 0^\circ$	$K_h' = K_h \times (-0.034\theta + 1.00)$
$0^\circ < \theta < 10^\circ$	$K_h' = K_h \times (-0.026\theta + 1.00)$
$10^\circ \leq \theta < 20^\circ$	$K_h' = K_h \times (-0.024\theta + 0.98)$
$10^\circ \leq \theta < 20^\circ$	$K_h' = K_h \times (-0.017\theta + 0.84)$

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

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

※鋼管杭協会, 鋼矢板 設計から施工まで(2000年 改定新版 P26)

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

## 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

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

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/m<sup>3</sup>)  
 $A$ : 杭の純断面積 (m<sup>2</sup>)  
 $A_p$ : 杭の純断面積 (m<sup>2</sup>)  
 $E$ : 杭のヤング係数 (kN/m<sup>2</sup>)  
 $l$ : 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。

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

ここに

- $E_0$ : 土層の変形係数  
 $D$ : 杭径 (m)

$\alpha$  は次のように設定します。

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

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

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

$$\gamma_u = R_p / R_u$$

$\gamma_y$  : 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

$\gamma_u$  : 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

$\lambda_{yu}$  : 杭の先端伝達率算出のための補正係数

$\zeta_e$  : 杭体収縮量に関する補正係数

$\zeta_d$  : 杭の先端変位量に関する補正係数

以下、補正係数は次のようになります。

	$\lambda_{yu}$	$\zeta_e$	$\zeta_d$
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 ( $0.8 \cdot C_{ai} \leq 70$ )

※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）

## 平成24年道路橋示方書

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

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)

※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）

## 2-4. 上部工の検討

### 安全性(断面破壊)/終局限界状態

#### 曲げに対する検討

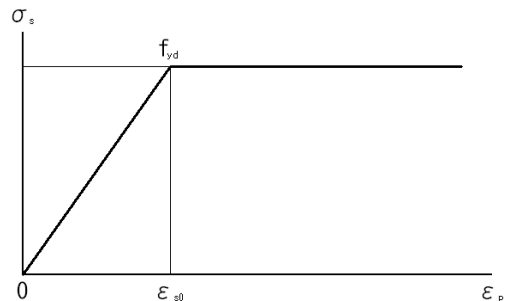
$$\gamma_i \frac{M_d}{M_{ud}} \leq 1.0$$

ここに

$M_d$  : 曲げモーメントの設計用値 (kN・m)

$M_{ud}$  : 曲げ耐力の設計用値 (kN・m)

$\gamma_i$  : 構造物係数



鋼材の応力—ひずみ曲線

この場合、中立軸位置  $x$  は

$0 < \varepsilon < \varepsilon_{s0}$  の場合       $\varepsilon \geq \varepsilon_{s0}$  の場合

$$T_s = A_s \cdot f_{yd} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{s0}}$$

$$T_s = A_s \cdot f_{yd}$$

以上の条件で

$C = T_s$  として計算を行い、 $\varepsilon$  の条件に当て

はまる  $x$  を算定する

ここに

$A_s$  : 使用鉄筋量 (mm<sup>2</sup>)

$f_{yd}$  : 引張鉄筋の設計引張降伏強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$f'_{cd}$  : 使用コンクリートの設計圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$d$  : 有効高さ (mm)

$E_s$  : PC鋼材のヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)

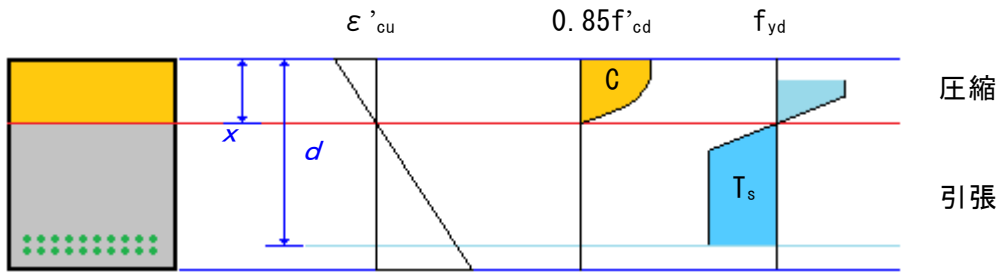
$C$  : コンクリートの圧縮応力の合力 (kN)

$\varepsilon'_{cu}$  : コンクリートの終局ひずみ

$T_s$  : 鉄筋の引張の合力 (kN)

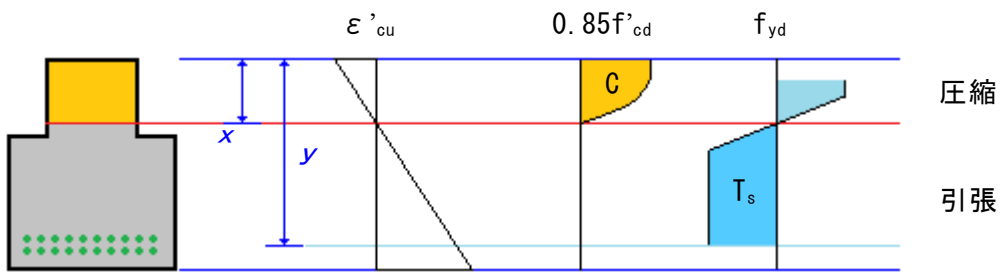
$\gamma_b$  : 部材係数

受梁(連結桁施工時)・連接部の場合



$$\varepsilon_s = \frac{d-x}{x} \varepsilon'_{cu} \quad , \quad C = 0.85 f'_{cd} \cdot b \cdot 0.8x$$

受梁(連結桁完成時)の場合



$C = T_s$  となる  $x$  を収束計算により行う

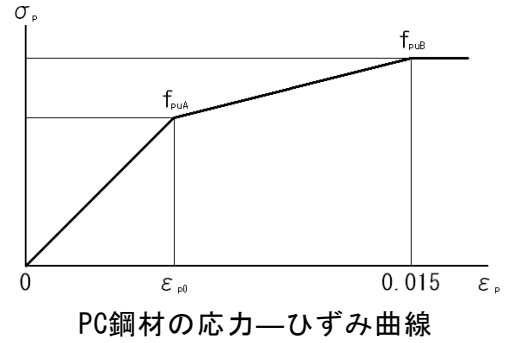
### 主桁部・横桁部の場合

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

$$M_{ud} = -T_s \frac{(d - 0.4x)}{\gamma_b}$$

$$F_{puA} = 0.84 \frac{F_{puk}}{\gamma_s} \quad F_{puB} = 0.93 \frac{F_{puk}}{\gamma_s}$$

$$\varepsilon_{p0} = 0.84 \frac{F_{puk}}{\gamma_s E_s}$$



この時、中立軸位置  $x$  は

$0 < \varepsilon < \varepsilon_{p0}$  の場合

$\varepsilon_{p0} \leq \varepsilon \leq 0.015$  の場合

$\varepsilon \geq 0.015$  の場合

$$T_s = A_s \cdot f_{puk} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{p0}}$$

$$T_s = A_s \left[ f_{puk} + \frac{\varepsilon - \varepsilon_{p0}}{0.015 - \varepsilon_{p0}} (f_{puB} - f_{puA}) \right]$$

$$T_s = A_s \cdot f_{puk}$$

以上の条件で

$C = T_s$  として計算を行い、 $\varepsilon$  の条件に当てはまる  $x$  を算定する

$$\varepsilon_s = \frac{d - x}{x} \varepsilon'_{cu} + \frac{\sigma_{ped}}{E_p}$$

$$C = 0.85 f'_{cd} \cdot b \cdot 0.8x$$

ここに

$A_s$  : 使用鉄筋量 ( $mm^2$ )

$f_{puk}$  : PC鋼材の設計引張降伏強度 ( $N/mm^2$ )

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

$d$  : 有効高さ ( $mm$ )

$\sigma_{ped}$  : PC鋼材の有効応力度鉄筋量 ( $N/mm^2$ )

$E_s$  : PC鋼材のヤング係数 ( $N/mm^2$ )

$C$  : コンクリートの圧縮応力の合力 ( $kN$ )

$\varepsilon'_{cu}$  : コンクリートの終局ひずみ

$T_s$  : 鉄筋の引張の合力 ( $kN$ )

$\gamma_b$  : 部材係数

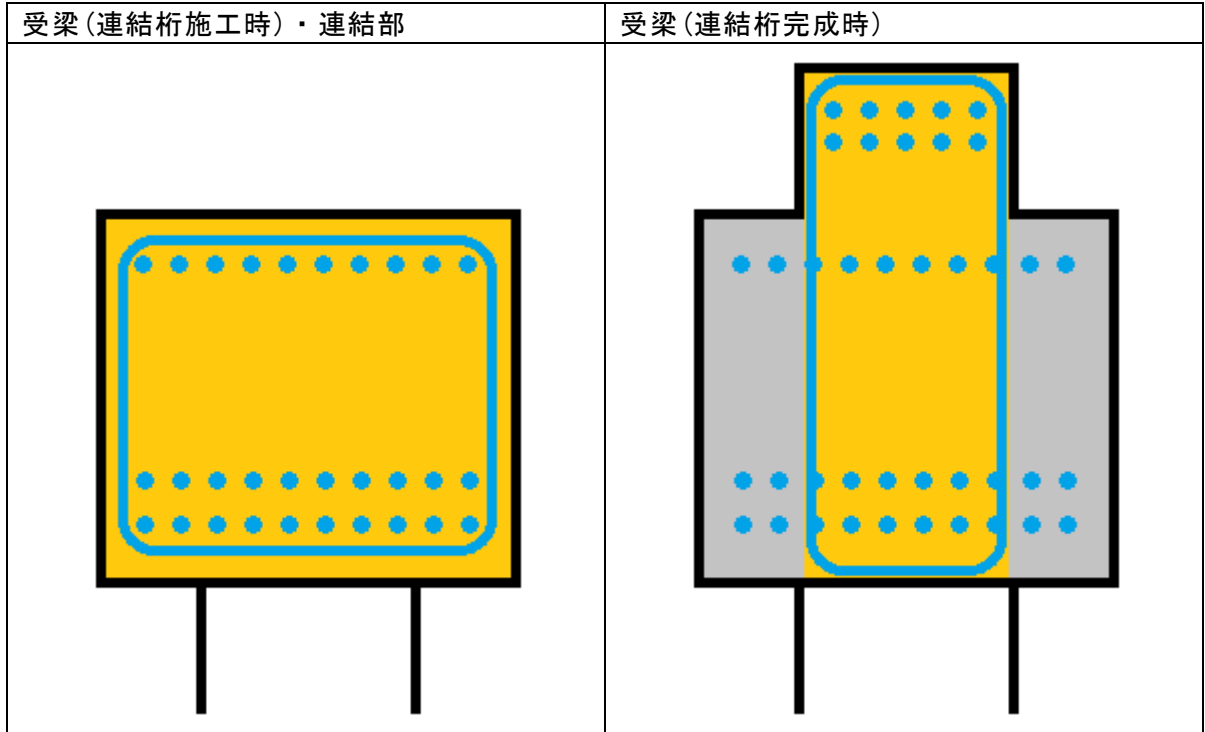
$\gamma_s$  : 材料係数



## せん断に対する検討

### 受梁・連結部の場合

せん断力を考える上で受梁・連結部の部材の考え方は次のようになります。黄色く塗られた箇所の断面と、その中に含まれる鉄筋を考慮するようになります。



### 1. せん断力の検討

せん断耐力の設計用値  $V_{yd}$  がせん断力の設計用値  $V_d$  以上であることを確かめる

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

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

$$V_{cd} = \beta_d \beta_p \beta_n f_{vcd} b_w d / \gamma_{b1}$$

$$V_{sd} = \left\{ A_w f_{wyd} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) / S_s \right\} Z / \gamma_{b2}$$

ここに

$\gamma_i$  : 構造物係数

$V_{cd}$  : コンクリートの受持つせん断耐力の設計用値 (kN)

$V_{sd}$  : せん断補強筋の受持つせん断耐力の設計用値 (kN)

$$f_{vcd} : 0.20(f'_{cd})^{1/3}$$

$$\beta_d : (1000/d)^{1/4} \quad \beta_d > 1.5 \text{ の場合 } \beta_d = 1.5$$

$$\beta_p : (100 \cdot p_w)^{1/3} \quad \beta_p > 1.5 \text{ の場合 } \beta_p = 1.5$$

$\beta_n$  : 1.00(最小値を考慮して)

$b_w$  : 部材の腹部幅

$d$  : 部材の有効高さ (mm)

$p_w$  : 鉄筋比

$\gamma_{b1}$  : 部材係数

$S_s$  : せん断補強筋の配置間隔 (mm)

$A_w$  : 区間 $S_s$ におけるせん断補強筋の総断面積

$f_{wyd}$  : せん断補強筋の降伏強度の設計用値

$Z$  : 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)

$\alpha_s$  : せん断補強筋と部材角のなす角度

$\gamma_{b2}$  : 部材係数

## 2. 腹部コンクリートの斜め圧縮破壊力の検討

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

$$V_{wcd} = f_{wcd} b_w d / \gamma_{b1} \quad , \quad f_{wcd} = 1.25(f'_{cd})^{1/2}$$

## 主桁部の場合

### 1. せん断力の検討

せん断耐力の設計用値がせん断力の設計用値以上であることを確かめる

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

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd} \quad , \quad V_{cd} = \beta_d \beta_p \beta_n f_{vcd} b_w d / \gamma_{b1} \quad , \quad V_{sd} = \{A_w f_{wyd} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) / S_s\} Z / \gamma_{b2}$$

$\gamma_i$  : 構造物係数

$V_{cd}$  : コンクリートの受持つせん断耐力の設計用値 (kN)

$V_{sd}$  : せん断補強筋の受持つせん断耐力の設計用値 (kN)

$$f_{vcd} : 0.20 (f'_{cd})^{1/3}$$

$$\beta_d : (1000/d)^{1/4} \quad \beta_d > 1.5 \text{ の場合 } \beta_d = 1.5$$

$$\beta_p : (100 \cdot p_w)^{1/3} \quad \beta_p > 1.5 \text{ の場合 } \beta_p = 1.5$$

$$\beta_n : 1.0 + 2M_0 / M_{ud} \quad \beta_n > 2.0 \text{ の場合 } \beta_n = 2.0$$

$b_w$  : 部材の腹部幅

$d$  : 部材の有効高さ

$p_w$  : 鉄筋比

$\gamma_f$  : 荷重係数

$\gamma_{b1}$  : 部材係数

$S_s$  : せん断補強筋の配置間隔

$A_w$  : 区間  $S_s$  におけるせん断補強筋の総断面積

$f_{wyd}$  : せん断補強筋の降伏強度の設計用値

$Z$  : 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 (=  $d/1.15$ )

$\alpha_s$  : せん断補強筋と部材角のなす角度

$\gamma_{b2}$  : 部材係数

設計曲げモーメントに対する引張縁において軸方向力によって発生する応力を打ち消すのに必要な曲げモーメント

$M_0$  : (kN · m)

$$M_0 = P_e (W_L / A_c + e_p)$$

$P_e$  : 有効プレストレス力

$W_L$  : コンクリート総断面における主桁下縁の断面係数

$A_c$  : コンクリート総断面における断面積

$e_p$  : 偏心距離

$M_{ud}$  : 検討断面位置における曲げ耐力 (kN · m)

### 2. 腹部コンクリートの斜め圧縮破壊力の検討

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

$$V_{wcd} = f_{wcd} b_w d / \gamma_{b1} \quad , \quad f_{wcd} = 1.25 (f'_{cd})^{1/2}$$

## 使用性/使用限界状態

### 曲げひび割れに対する検討（受梁・連結部の場合）

ひび割れ幅  $w$  が許容ひび割れ幅  $w_{lim}$  以下である事を確かめる

$$w \leq w_{lim}$$

ひび割れ幅は次式により求める

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

ここに

$k_1$  : 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及ぼす影響を表す係数  $k_2 = \frac{15}{f'_{cd} + 20} + 0.7$

$k_3$  : 引張鋼材の段数を表す係数  $k_3 = \frac{5(N+2)}{(7N+8)}$

$f'_{cd}$  : 設計圧縮強度

$N$  : 引張鋼材の段数

$c$  : 鉄筋のかぶり

$C_\phi$  : 鉄筋の中心間隔

※有効幅から純かぶりを差し引いて各段の鉄筋数でそれぞれ除した値の最大値

$\phi$  : 鉄筋の付着性状を表す係数

$\sigma_s$  : 鉄筋の増加応力度

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

$k_1 = 1.0$  (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

環境区分	許容ひび割れ幅	最小かぶり
特に厳しい腐食性環境	0.0035C	70 (mm)
腐食性環境	0.0040C	-----
一般の環境	0.0050C	50 (mm)

※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)

増加応力度  $\sigma_s$  は次のように検討する項目に応じて次のように算定する

	連結部・受梁（連結桁施工時）
断面形状	
計算手法	矩形で算定
算定に用いる荷重	全ての荷重

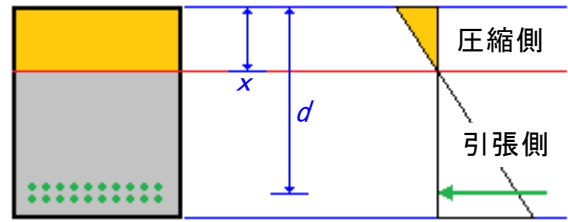
受梁（連結桁完成時）			
	上側	下側	
		連結桁施工時	連結桁完成時
断面形状			
計算手法	任意形状で算定	矩形で算定 ( $\sigma_{s1}$ )	任意形状で算定 ( $\sigma_{s2}$ )
		$\sigma_s = \sigma_{s1} + \sigma_{s2}$	
算定に用いる荷重	地覆、舗装 変動・偶発荷重 	受梁、主桁、桁間 連結部荷重 	地覆、舗装 変動・偶発荷重 

### 矩形による増加応力度の算定

$$\sigma_s = n \cdot \sigma_c \frac{d-x}{x}$$

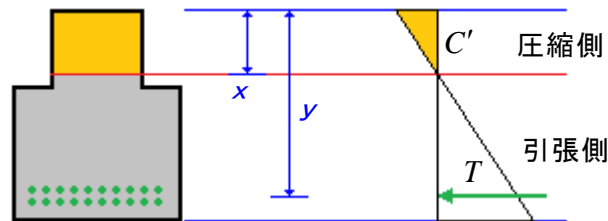
$$\sigma_c = \frac{2M_d}{b \cdot x \left( d - \frac{x}{3} \right)}$$

$$x = -\frac{nA_s}{b} \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{2bd}{nA_s}} \right)$$



$\sigma_c$ : コンクリートの応力度  
 $x$ : 中立軸位置  
 $b$ : 部材幅  
 $d$ : 部材高さ  
 $n$ : ヤング係数比

### 任意形状による増加応力度の算定



$$T = C'$$

$$\therefore G'_c - nG_s = 0$$

$C'$ : コンクリートの全圧縮応力

$T$ : 引張鉄筋の全引張応力

$G'_c$ : 中立軸に関する圧縮側コンクリートの断面一次モーメント

$G_s$ : 中立軸に関する引張側鉄筋の断面一次モーメント

$n$ : 鉄筋とコンクリートとのヤング係数比

これにより中立軸  $x$  に関する断面二次モーメントが次式で算定される

$$I_p = I_c + nI_s$$

$I_p$ : 中立軸に関する断面二次モーメント

$I_c$ : 圧縮側コンクリートの断面二次モーメント

$I_s$ : 鉄筋の断面二次モーメント

これによりコンクリートおよび鉄筋の応力は次式で算定される

$$\sigma'_c = \frac{M}{I_p} x$$

$$\sigma_s = n\sigma'_c \frac{y-x}{x}$$

$\sigma'_c$ : コンクリートの等価換算応力度

$\sigma_s$ : 鉄筋の引張応力度

## 曲げ及び軸力に対する検討（主桁の場合）

### 1. 永久荷重による応力度とプレストレスによる

上縁・下縁での応力度を合わせたものが制限値以下であることを示す

$$\sigma_{cd} \leq 0.4f'_{cd}$$

$$\sigma_{cd} = \sigma_{cd0} + \sigma_{cd1} + \sigma_{cd2} + \sigma_{cd3} + \sigma_{ck} + \sigma_{cp}$$

$$\sigma_{cd0} = \frac{M_{d0}}{W_2}, \quad \sigma_{cd1} = \frac{M_{d1}}{W_2}, \quad \sigma_{cd2} = \frac{M_{d2}}{W_3}$$

$$\sigma_{cd3} = \frac{M_{d3}}{W_3}, \quad \sigma_{ck} = \frac{M_k}{W_3}, \quad \sigma_{cp} = \frac{P_e}{A_3} + \frac{M_{pe}}{W_3}$$

ここに

$f'_{cd}$ :主桁コンクリートの設計基準強度の設計用値

$\sigma_{cd}$ :永久荷重による曲げ応力度

$\sigma_{cd0}$ :主桁荷重による曲げ応力度

$\sigma_{cd1}$ :桁間荷重による曲げ応力度

$\sigma_{cd2}$ :地覆荷重による曲げ応力度

$\sigma_{cd3}$ :舗装荷重による曲げ応力度

$\sigma_{ck}$ :二次力による応力度

$\sigma_{cp}$ :プレストレスによる曲げ応力度

$M_{d0}$ :主桁自重による曲げモーメント

$M_{d1}$ :桁間自重による曲げモーメント

$M_{d2}$ :地覆自重による曲げモーメント

$M_{d3}$ :舗装自重による曲げモーメント

$M_k$ :二次力による曲げモーメント

$M_{pk}$ :プレストレスによる曲げモーメント

$P_e$ :主桁プレストレス力

$W_2$ :PC鋼材換算断面での断面係数

$W_3$ :場所打換算断面での断面係数

$A_3$ :場所打換算断面での断面積

### 2. 1. で求めた $\sigma_{cd}$ に対して変動荷重作用時による

上縁・下縁での応力度を合わせたものが制限値以下であることを確かめる

$$0 \leq \sigma_{cd} + \gamma_f \sigma_{cv} \leq 0.40f'_{cd}, \quad \sigma_{cv} = \frac{M_v}{W_3}$$

ここに

$\sigma_{cv}$ :変動荷重による曲げ応力度

$\gamma_f$ :変動荷重に作用する荷重係数

$M_k$ :変動荷重による曲げモーメント

3. PC鋼材の最大引張強度がPC鋼材の引張応力度の限界値以下であることを確かめる

$$\sigma_{\max} \leq 0.70 f_{pud}$$

$$\sigma_{\max} = \Delta\sigma_{ped} + |\Delta\sigma_{pd}|$$

$$\Delta\sigma_{pd} = \Delta\sigma_{pd1} + \Delta\sigma_{pd2} + \Delta\sigma_{pd3} + \Delta\sigma_{pk} + \Delta\sigma_{pL}$$

$$\Delta\sigma_{pd1} = n \frac{M_{d1}}{W'_{g2}}, \quad \Delta\sigma_{pd2} = n \frac{M_{d2}}{W'_{g3}}, \quad \Delta\sigma_{pd3} = n \frac{M_{d3}}{W'_{g3}}$$

$$\Delta\sigma_{pk} = n \frac{M_k}{W'_{g3}}, \quad \Delta\sigma_{pL} = n \frac{M_v}{W'_{g3}}$$

$$W'_{g2} = \frac{I_2}{y_{u2} - d_p}, \quad W'_{g3} = \frac{I_3}{y_{u3} - d_p}$$

ここに

$f'_{cd}$ : PC鋼材の引張応力度の設計用値

$\sigma_{\max}$ : PC鋼材の最大引張応力度

$\sigma_{ped}$ : PC鋼材の有効応力度

$\Delta\sigma_{pd}$ : 荷重によるPC鋼材の引張応力度の増分

$\Delta\sigma_{pd1}$ : 桁間荷重によるPC鋼材の引張応力度の増分

$\Delta\sigma_{pd2}$ : 地覆荷重によるPC鋼材の引張応力度の増分

$\Delta\sigma_{pd3}$ : 舗装荷重によるPC鋼材の引張応力度の増分

$\Delta\sigma_{pk}$ : 二次力によるPC鋼材の引張応力度の増分

$\Delta\sigma_{pL}$ : 積載荷重によるPC鋼材の引張応力度の増分

$n$ : PC鋼材とコンクリートとのヤング係数比

$M_{d1}$ : 桁間自重による曲げモーメント

$M_{d2}$ : 地覆自重による曲げモーメント

$M_{d3}$ : 舗装自重による曲げモーメント

$M_k$ : 二次力による曲げモーメント

$M_v$ : 積載自重による曲げモーメント

$W'_{g2}$ : PC鋼材換算断面での最下段PC鋼材位置の断面係数

$W'_{g3}$ : 場所打換算断面での最下段PC鋼材位置の断面係数

$I_2$ : PC鋼材換算断面での断面係数

$I_3$ : 場所打換算断面での断面係数

$y_{u2}$ : PC鋼材換算断面での図心から主桁上縁までの距離

$y_{u3}$ : 場所打換算断面での図心から主桁上縁までの距離

$d_p$ : 最下段PC鋼材位置



## 曲げ及び軸力に対する検討（横桁の場合）

### 1. 永久荷重による応力度とプレストレスによる

上縁・下縁での応力度を合わせたものが制限値以下である事確かめる

$$\sigma_{cd} \leq f'_{cd}$$

$$\sigma_{cd} = \sigma_{ch} + \sigma_{cp}$$

$$\sigma_{ch} = \frac{M_{dh}}{W_c} \quad , \quad \sigma_{cp} = \frac{P_e}{A_c} + \frac{M_{pe}}{W_c}$$

ここに

$f'_{cd}$  : 横桁コンクリートの設計基準強度の設計用値

$\sigma_{cd}$  : 永久荷重による曲げ応力度

$\sigma_{ch}$  : 橋面工（地覆・舗装）による曲げ応力度

$\sigma_{cp}$  : プレストレスによる応力度

$M_{dh}$  : 橋面工（地覆・舗装）による曲げ応力度

$M_{pe}$  : プレストレスによる曲げ応力度

$P_e$  : プレストレス力

$W_c$  : 横桁の断面係数

$A_c$  : 横桁の断面積

### 2. 変動荷重作用時による

上縁・下縁での応力度を合わせたものが制限値以下である事確かめる

$$0 \leq \sigma_{cd} + \gamma_f \sigma_{cv} \leq f'_{cd} \quad , \quad \sigma_{cv} = \frac{M_v}{W_c}$$

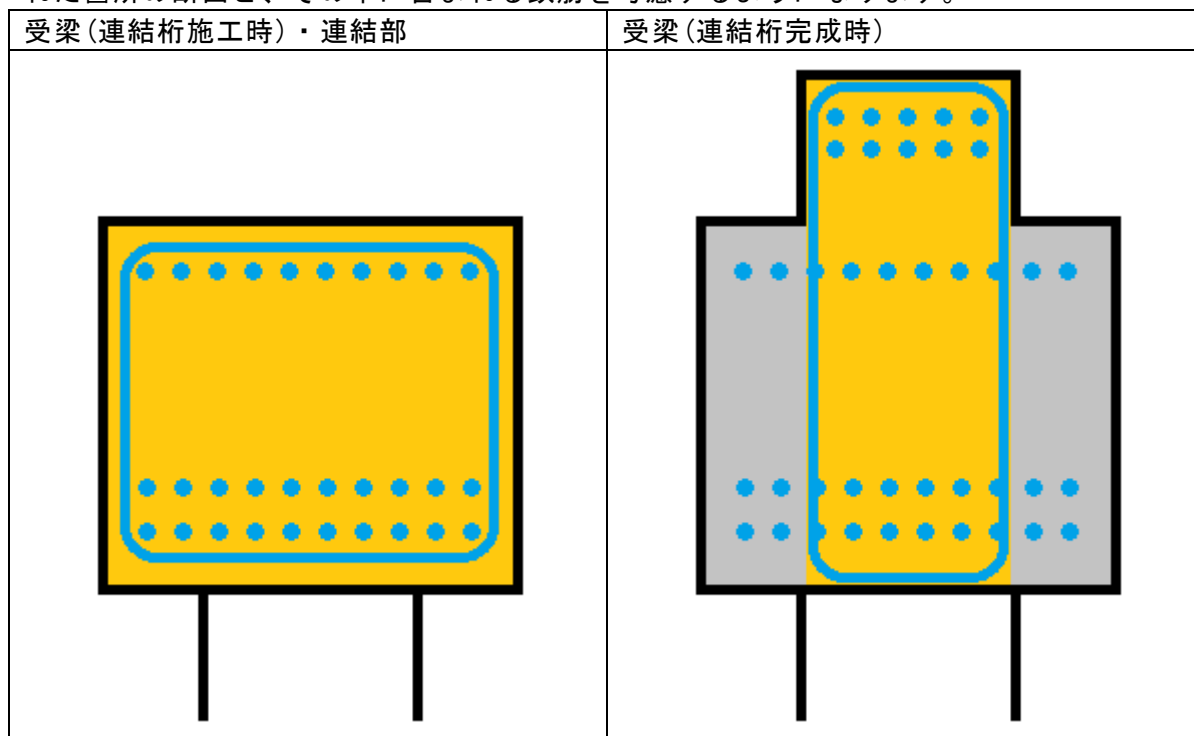
ここに

$\sigma_{cv}$  : 変動荷重による曲げ応力度

$M_k$  : 変動荷重による曲げモーメント

## せん断ひび割れの検討（受梁・連結部の場合）

せん断力を考える上で受梁・連結部の部材の考え方は次のようになります。黄色く塗られた箇所の断面と、その中に含まれる鉄筋を考慮する必要があります。



せん断力を受ける部材で設計せん断力  $V_d$  がコンクリートのせん断耐力  $V_{cd}$  の 70% より小さい場合、せん断ひび割れに対する検討を省略できる

せん断耐力は次式により求める

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

ここに

$$f_{vcd} : 0.20 (f'_{cd})^{1/3}$$

$$\beta_d : 0.20 (1000/d)^{1/4} \quad \beta_d > 1.5 \text{ の場合} \quad \beta_d = 1.5$$

$$\beta_p : 0.20 (100 \cdot p_w)^{1/3} \quad \beta_p > 1.5 \text{ の場合} \quad \beta_p = 1.5$$

$$\beta_n : 1.00$$

$p_w$  : 鉄筋比

$b_w$  : 部材の腹部幅 (mm)

$d$  : 有効高さ (mm)

$\gamma_b$  : 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% よりも大きい場合は

せん断補強筋の応力度  $\sigma_{wd}$  が鉄筋応力度の増加量の制限値より小さいことを

確認すれば詳細な検討を行わなくてもよい

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

ここに

$\sigma_{wd}$  : 永久荷重によるせん断補強筋の応力度

$V_d$  : 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

$k_2$  : 永久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

$S_s$  : せん断補強筋の断面積

$Z$  : 永久荷重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)

$d$  : 永久荷重部材の有効高さ

$\alpha_s$  : せん断補強筋と部材軸のなす角度 (=90°)

### せん断に対する検討（主桁の場合）

変動荷重作用時のコンクリートの斜め引張応力度が制限値以下であることを確かめる

$$\sigma_l \geq -0.75 \times 0.23 \times \frac{f'_{ck}{}^{2/3}}{\gamma_c}$$

$$\sigma_l = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau^2}$$

$$\sigma_x = \frac{P_e}{A_c}$$

$$\tau = \frac{V_d Q}{b_w I}$$

ここに

$\sigma_l$  : 斜め引張応力度

$\sigma_x$  : 垂直応力度

$\sigma_y$  :  $\sigma_x$ 直交する応力度 (=0)

$\tau$  : せん断応力度

$d$  : 主桁有効高さ

$b_w$  : 主桁腹部幅

$A_c$  : 主桁の断面積（場所打換算断面）

$Q$  : 主桁の断面一次モーメント

$I$  : 主桁の断面二次モーメント

$V_d$  : 斜め変動荷重作用時のせん断力

## 耐久性/性能の経時変化に対する検討

### 中性化の検討

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

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

$$\alpha_k = \gamma_p \alpha_p$$

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

ここに

$y_d$  : 中性化深さの設計用値 (mm)

$y_{\text{lim}}$  : 鉄筋腐食発生限界深さ (mm)

$\gamma_{cb}$  : 中性化深さの設計用値のばらつきを考慮した部分係数

$\alpha_d$  : 中性化速度係数の設計用値 (mm / y<sup>-1/2</sup>)

$t$  : 耐用年数 (y)

$\alpha_k$  : 中性化速度係数の特性値 (mm / y<sup>-1/2</sup>)

$\beta_e$  : 環境作用の程度を表わす係数

$\gamma_c$  : コンクリートの材料係数

$\alpha_p$  : コンクリートの中性化速度係数の予測値 (mm / y<sup>-1/2</sup>)

$\gamma_p$  : 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

※土木学会，コンクリート標準示方書 設計編（2017年制定 P153～155）

## 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/m<sup>3</sup>)

$C_{\text{lim}}$ : 鋼材腐食発生限界濃度 (kg/m<sup>3</sup>)

$\gamma_i$ : 構造物係数

$\gamma_{cl}$ : 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/m<sup>3</sup>)

$c_d$ : かぶりの設計値 (=  $c - \Delta c_e$ ) (mm)

$c$ : かぶり (mm)

$\Delta c_e$ : 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 (cm<sup>2</sup>/y)

$t$ : 設計耐用年数 (y)

$C_i$ : 初期塩化物イオン濃度 (kg/m<sup>3</sup>)

$\text{erf}(z) = \int_0^z e^{-t^2} dt$ : 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/m<sup>3</sup>) 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)】

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

$\gamma_c$ : 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 ( $mm$ )

$\sigma_{se}$ : 鉄筋の増加応力度 ( $N/mm^2$ )

$E_s$ : 鉄筋のヤング係数 ( $N/mm^2$ )

$\varepsilon_\phi$ : 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

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事ができる

$$D_k = \gamma_p \alpha D_p$$

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

ここに

$\alpha$ : 換算係数

$D_p$ : コンクリートの拡散係数の予測値 ( $cm^2/y$ )

$\gamma_p$ :  $D_p$ 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

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

※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)

※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~P489)

## 【港湾基準 (H30)】

### 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

$\gamma_c$ : 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 ( $\text{cm}^2/\text{y}$ )

$D_0$ : 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 ( $\text{cm}^2/\text{y}$ )

$w$ : ひび割れ幅 ( $\text{mm}$ )

$l$ : ひび割れ間隔 ( $\text{mm}$ )

$\lambda$ : 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)

$\sigma_{se}$ : 鉄筋の増加応力度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

$E_s$ : 鉄筋のヤング係数 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

$\varepsilon_\phi$ : コンクリートの乾燥収縮及びクリープによる  
ひび割れを考慮するための係数

### 2. 算定式

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

ここに

$\beta_{cl}$ : 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  $D_k$  ( $\text{cm}^2/\text{y}$ ) は次式により算定する事ができる

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

※土木学会, コンクリート標準示方書 設計編 (2017年制定 P156~160)

※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~P600)



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

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

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 ( $\text{cm}^2 / \text{y}$ )

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 ( $\text{cm}^2 / \text{y}$ )

※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)

**安全性(疲労破壊)/疲労限界状態**

**栈橋上部工疲労限界状態モデル荷重**

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	$(\text{取扱総貨物量} / \text{定格荷重}) \times 0.4$	
		最大輪荷重 $\times 0.9$	$(\text{取扱総貨物量} / \text{定格荷重}) \times 0.4$	
		最大輪荷重 $\times 0.8$	$(\text{取扱総貨物量} / \text{定格荷重}) \times 0.4$	
		最大輪荷重 $\times 0.7$	$(\text{取扱総貨物量} / \text{定格荷重}) \times 0.4$	
		空荷時輪荷重	$(\text{取扱総貨物量} / \text{定格荷重}) \times 1.6$	
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

※沿岸技術研究センター，港湾構造物設計事例集(下巻) (平成11年4月 9-21)

※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 (P209)

- ※ トラッククレーンの場合、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。

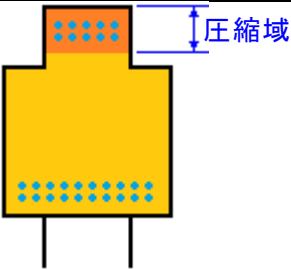
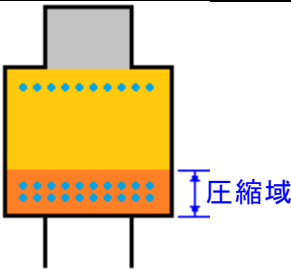
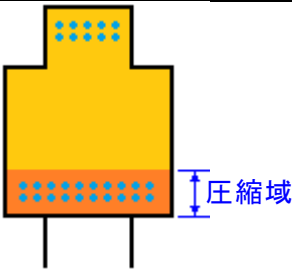
### 曲げモーメントによる疲労検討

永久荷重および変動荷重に関する応力度の算定

永久荷重および変動荷重に関する応力度は次のように検討する項目に応じて次のように算定する

	連結部・受梁（連結桁施工時）
断面形状	
計算手法	矩形で算定
算定に用いる荷重	全ての荷重

受梁（連結桁完成時）－鉄筋の応力度			
	上側	下側	
		連結桁施工時	連結桁完成時
断面形状			
計算手法	矩形で算定	矩形で算定 ( $\sigma_{s1}$ )	任意形状で算定 ( $\sigma_{s2}$ )
		$\sigma_s = \sigma_{s1} + \sigma_{s2}$	
算定に用いる荷重	地覆、舗装 変動・偶発荷重 	受梁、主桁、桁間 連結部荷重 	地覆、舗装 変動・偶発荷重 

受梁（連結桁完成時）－コンクリートの応力度			
	上側	下側	
		連結桁施工時	連結桁完成時
断面形状			
計算手法	任意形状で算定	矩形で算定 ( $\sigma_{c1}$ )	任意形状で算定 ( $\sigma_{c2}$ )
算定に用いる荷重	地覆、舗装 変動・偶発荷重	受梁、主桁、桁間 連結部荷重	地覆、舗装 変動・偶発荷重

### 矩形による応力度の算定

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

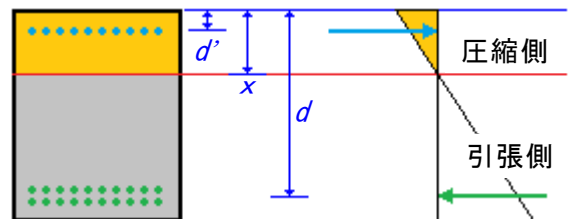
$$k = \sqrt{n^2 (P + P')^2 + 2n \left( P + P' \frac{d'}{d} \right)} - n(P + P')$$

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

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

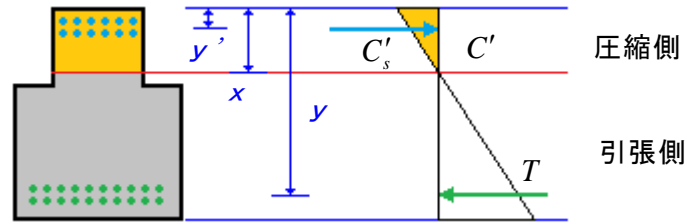
$$\sigma_s = n \sigma_c \frac{1 - k}{k}$$

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



$P$ : 引張側鉄筋の鉄筋比  
 $P'$ : 圧縮側鉄筋の鉄筋比  
 $k$ : 中立軸比

### 任意形状による応力度の算定



$$T = C' + C'_s$$

$$\therefore G'_c + nG'_s - nG_s = 0$$

$C'$ : コンクリートの全圧縮応力

$C'_s$ : 圧縮鉄筋の全圧縮応力

$T$ : 引張鉄筋の全引張応力

$G'_c$ : 中立軸に関する圧縮側コンクリートの断面一次モーメント

$G'_s$ : 中立軸に関する圧縮側鉄筋の断面一次モーメント

$G_s$ : 中立軸に関する引張側鉄筋の断面一次モーメント

$n$ : 鉄筋とコンクリートとのヤング係数比

これにより中立軸  $x$  に関する断面二次モーメントが次式で算定される

$$I_p = I_c + nI_s$$

$I_p$ : 中立軸に関する断面二次モーメント

$I_c$ : 圧縮側コンクリートの断面二次モーメント

$I_s$ : 鉄筋の断面二次モーメント

これによりコンクリートおよび鉄筋の応力は次式で算定される

$$\sigma'_c = \frac{M}{I_p} x$$

$$\sigma_s = n\sigma'_c \frac{y-x}{x}$$

$$\sigma'_s = n\sigma'_c \frac{x-y'}{x}$$

$\sigma'$ : コンクリートの等価換算応力度

$\sigma_s$ : 鉄筋の引張応力度

$\sigma'_s$ : 鉄筋の圧縮応力度

主桁部の場合、以下のように算定を行う

### コンクリートの変動荷重による応力度の算定

$$\sigma_{pU} = \frac{M_h}{W_{2U}} \quad , \quad \sigma_{pL} = \frac{M_h}{W_{2L}}$$

ここに

$\sigma_{pU}$  : 変動荷重による上縁での曲げ応力度  $W_{3U}$  : 場所打換算断面での上縁の断面係数

$\sigma_{pL}$  : 変動荷重による下縁での曲げ応力度  $W_{3L}$  : 場所打換算断面での下縁の断面係数

$M_h$  : 変動荷重による曲げモーメント

### コンクリートの永久荷重による応力度の算定

$$\sigma_{cd} = \sigma_{cd0} + \sigma_{cd1} + \sigma_{cd2} + \sigma_{cd3} + \sigma_{ck} + \sigma_{cp}$$

$$\sigma_{cd0} = \frac{M_{d0}}{W_2} \quad , \quad \sigma_{cd1} = \frac{M_{d1}}{W_2} \quad , \quad \sigma_{cd2} = \frac{M_{d2}}{W_3}$$

$$\sigma_{cd3} = \frac{M_{d3}}{W_3} \quad , \quad \sigma_{ck} = \frac{M_k}{W_3} \quad , \quad \sigma_{cp} = \frac{P_e}{A_3} + \frac{M_{pe}}{W_3}$$

ここに

$\sigma_{cd}$  : 永久荷重による曲げ応力度

$\sigma_{cd0}$  : 主桁荷重による曲げ応力度

$\sigma_{cd1}$  : 桁間荷重による曲げ応力度

$\sigma_{cd2}$  : 地覆荷重による曲げ応力度

$\sigma_{cd3}$  : 舗装荷重による曲げ応力度

$\sigma_{ck}$  : 二次力による応力度

$\sigma_{cp}$  : プレストレスによる曲げ応力度

$W_2$  : PC鋼材換算断面での断面係数

$W_3$  : 場所打換算断面での断面係数

$A_3$  : 場所打換算断面での断面積

$M_{d0}$  : 主桁自重による曲げモーメント

$M_{d1}$  : 桁間自重による曲げモーメント

$M_{d2}$  : 地覆自重による曲げモーメント

$M_{d3}$  : 舗装自重による曲げモーメント

$M_k$  : 二次力による曲げモーメント

$M_{pk}$  : プレストレスによる曲げモーメント

$P_e$  : 主桁プレストレス力

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。

a) コンクリート

$$f_{crd} : \text{設計疲労強度} \quad f_{crd} = k_1 \cdot f_d \cdot \left(1 - \frac{\sigma_p}{f_d}\right) \left(1 - \frac{\log N}{K}\right)$$

$k_1$  : 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

$\sigma_p$  : 永久荷重時の応力度

$K$  : 10(普通コンクリートで水に飽和される場合)

$N_i$  : 疲労寿命

$$N_i = 10^a$$

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

b) 鉄筋

$$f_{srd} : \text{設計疲労強度} \quad f_{srd} = 190 \cdot \frac{10^\alpha}{N^k} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{sp}}{f_{ud}}\right) / \gamma_s$$

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

$k$  : 0.12

$k_0$  : 1.0

$\phi$  : 鉄筋公称直径

$\sigma_{sp}$  : 永久荷重時の応力度

$f_{ud}$  : 鉄筋の設計引張強度

$\gamma_s$  : 材料係数 (疲労限界状態 = 1.05)

$N_i$  : 疲労寿命

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

※ 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)

③ 疲労限界状態の検討について

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

- ④ 疲労寿命が $2 \times 10^6$ 回を超えない場合  
 $2 \times 10^6$ 回を超えない回数を対象とし、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

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

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

$\sigma_{ri}$ : 移動荷重の変動応力度

$\sigma_{rd}$ : 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

$\sigma_p$ : 永久荷重時の応力度

$n_i$ : 移動荷重の発生回数

b) 鉄筋

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

$\sigma_{ri}$ : 移動荷重の変動応力度

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

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

※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 6-6～6-7）

※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（P183）



## せん断力による疲労検討

i) せん断補強筋がない場合

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

$V_{rcd}$  : せん断補強筋のない部材の設計疲労耐力

$V_{cd}$  : せん断補強鋼材を用いない棒部材の設計せん断耐力

$V_{pd}$  : 永久荷重作用時における設計せん断力

$N$  : 疲労寿命

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

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

疲労寿命  $N_i$

$$N_i = 10^a$$

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

$V_{pd}$

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

曲げモーメント時と同様、疲労強度  $N_i$  が  $2.0 \times 10^6$  回を上回る回数は無視する。  
 $2.0 \times 10^6$  回を超えない場合は設計変動せん断応力度に対する等価繰返し回数を計算し、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

- $\sigma_{wrd}$  : 変動荷重によるせん断補強筋の応力度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\sigma_{wpd}$  : 永久荷重によるせん断補強筋の応力度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $f_{wrd}$  : せん断補強筋の設計疲労強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $V_{rd}$  : 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 (mm<sup>2</sup>)
- $S$  : 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)
- $\alpha_s$  : 変動せん断補強筋が部材軸となす角度
- $N$  : 疲労寿命
- $\alpha = k_0 (0.081 - 0.003\phi)$
- $\kappa = 0.12$
- $\phi$  : 鉄筋直径 (mm)
- $f_{ud}$  : 鉄筋の設計引張応力度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\beta_d = \sqrt[4]{(100/d)}$
- $\beta_p = \sqrt[3]{(100 p_w)}$
- $\beta_n = 1.0$
- $f_{vcd} = 0.2 \sqrt[3]{f'_{cd}}$
- $p_w$  : 鉄筋比
- $\gamma_b$  : 部材係数
- $\gamma_i$  : 構造物係数
- $\gamma_s$  : 鉄筋の材料係数

※沿岸技術研究センター，港湾構造物設計事例集（平成11年4月 下巻 9-17～9-18）

### 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 橋技術マニュアル              | 平成22年 9月      | 沿岸開発技術研究センター |
| ・ 杭基礎設計便覧                  | 平成 4年10月      | 日本道路協会       |
| ・ 道路橋示方書・同解説               | 平成14年 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         |
| ・ 杭基礎設計便覧                  | 平成 4年10月      | 日本道路協会       |
| ・ 鋼管杭—その設計と施工—             | 2000年         | 鋼管杭協会・(株)クボタ |
| ・ 鋼矢板 設計から施工まで             | 2000年         | 鋼管杭協会        |
| ・ 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 |              |