

港湾設計業務シリーズ

横棧橋耐震照査3

Ver 1. X. X

商 品 概 説 書

目次

1. 概要.....	1
1-1. システムの特長.....	1
1-2. システムの制限事項.....	1
2. 機能説明.....	2
2-1. プッシュオーバー解析.....	2
剛性マトリックス.....	3
伝達マトリックス.....	4
水平方向の地盤の荷重-変位関係.....	5
杭軸方向の地盤の荷重-変位関係.....	8
鋼管杭の非線形モデル.....	11
2-2. 1質点系の非線形動的解析.....	14
3. 補足資料.....	15
3-1. 参考文献.....	15

1. 概要

1-1. システムの特長

本システムは、鋼管杭、上部工コンクリート及び地盤の非線形性を考慮して栈橋の弾塑性挙動を解析するものです。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。
- ・ RC横栈橋、PC横栈橋の計算が可能です。
- ・ 栈橋の計算は弾塑性解析を用いています。
- ・ 耐震照査は1質点系の非線形動的解析を行います。
- ・ 弊社港湾設計業務シリーズ『横栈橋設計計算システム』『横栈橋設計計算2007』から栈橋データをインポート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。
- ・ 杭の支持力計算方法を打込鋼管、中掘鋼管から選択できます。
- ・ 上部工の非線形モデルを直接入力により設定することができます。
- ・ 鋼管杭の非線形モデルをバイリニアモデル、トリリニアモデル、Chenモデル、直接入力から選択することができます。
- ・ 報告書の印刷イメージを画面表示し確認することができます。
- ・ 報告書の一括印刷、章別の印刷、指定ページの印刷ができます。文字サイズの変更も可能です。

1-2. システムの制限事項

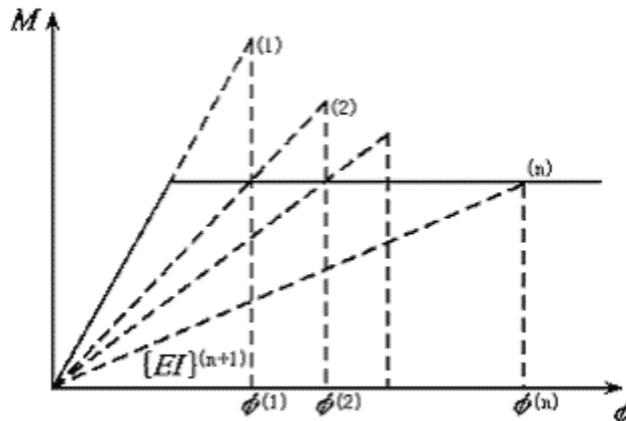
[データ容量]

- | | |
|---------|----------|
| ・ 層データ数 | 最大20層 |
| ・ 杭本数 | 各方向最大20本 |

2. 機能説明

2-1. プッシュオーバー解析

鋼管杭の非線形モデルを考慮する場合、鋼管杭のM-P-φ関係を考慮するために鋼管杭の曲げ剛性を変化させて、剛性マトリックスを書き換えて構造計算をすることにより、収束計算を進めていきます。



収束計算の関係は次式で表します。

$$\{EI\}^{(n+1)} = \frac{M}{\phi^{(n)}}$$

ここに

$\{EI\}^{(n+1)}$: (n+1)回目の収束計算で用いる曲げ剛性

$\phi^{(n)}$: 収束計算(n)回目の曲率の計算値

M: 曲率 $\phi^{(n)}$ におけるM-P-φ関係から得られる曲げモーメント (kN・m)

収束判定は、杭頭部の鉛直変位の合計、杭頭部の水平変位の合計、杭頭部の回転角の合計を行い、次に示す収束判定基準を用いています。

$$\left| \frac{H-H'}{H'} \right| < TOL_1 \quad , \quad \left| \frac{V-V'}{V'} \right| < TOL_2 \quad , \quad \left| \frac{\theta-\theta'}{\theta'} \right| < TOL_3$$

ここに

H: 新しく計算された杭頭部の水平変位の合計

H': 1回前の収束計算で計算された杭頭部の水平変位の合計

V: 新しく計算された杭頭部の鉛直変位の合計

V': 1回前の収束計算で計算された杭頭部の鉛直変位の合計

θ: 新しく計算された杭頭部の回転変位の合計

θ': 1回前の収束計算で計算された杭頭部の回転変位の合計

TOL_i: 収束誤差

※港湾空港技術研究所資料，鋼直杭式棧橋の弾塑性解析による耐震性能照査および簡便照査法の提案 N o . 9 4 3

骨組構造解析

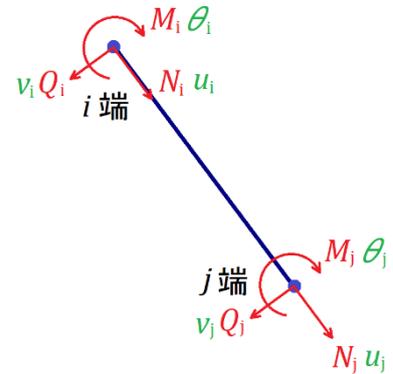
XY平面

$$F = K\delta$$

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

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

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



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

※土木学会, 構造力学公式集 (P73~P93)

伝達マトリックス

$$X_j = F_i X_i$$

$$X_i = (u_i, \alpha_i, M_i, Q_i)^T$$

$$X_j = (u_j, \alpha_j, M_j, Q_j)^T$$

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

$$\mathfrak{I}_1(\beta x) = \cosh \beta x \cos \beta x$$

$$\mathfrak{I}_2(\beta x) = \frac{1}{2} (\cosh \beta x \sin \beta x + \sinh \beta x \cos \beta x)$$

$$\mathfrak{I}_3(\beta x) = \frac{1}{2} \sinh \beta x \sin \beta x$$

$$\mathfrak{I}_4(\beta x) = \frac{1}{4} (\cosh \beta x \sin \beta x - \sinh \beta x \cos \beta x)$$

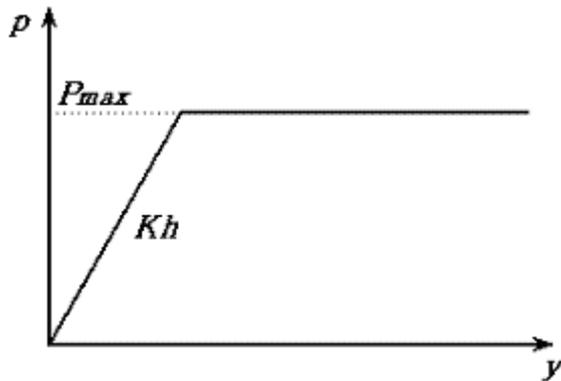
$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K_h D}{4EI}}$$

$$\cosh \beta x = \frac{e^{\beta x} + e^{-\beta x}}{2}, \quad \sinh \beta x = \frac{e^{\beta x} - e^{-\beta x}}{2}$$

※日本道路協会，杭基礎設計便覧（平成4年10月 P196）

水平方向の地盤の荷重－変位関係

地盤の水平方向の荷重－変位関係は次に示す地盤反力の最大値 P_{max} と水平方向地盤反力係数 K_h で設定されるバイリニアモデルとなります。



地盤反力値の算定方法

$$P_{max} = \alpha_p \left(K_p \sum \gamma h + 2c \sqrt{K_p} \right)$$

$$K_p = \frac{\cos^2(\phi + \varphi)}{\cos^2 \phi \cos(\delta + \varphi) \left\{ 1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi - \delta) \sin \phi}{\cos(\phi + \delta) \cos \phi}} \right\}^2}$$

ここに

P_{max} : 地盤反力最大値 (kN / m²)

K_p : 受働土圧係数

α_p : 受働土圧係数

$\left\{ \begin{array}{ll} \text{砂質地盤} & \alpha_p = 3.0 \\ \text{粘性土地盤} & \alpha_p = 1.5 \end{array} \right.$

γ : 土の単位体積重量 (kN / m³)

h : 層厚 (m)

c : 粘着力 (kN / m²)

ϕ : 内部摩擦角 (度)

δ : 壁面摩擦角 (度)

φ : 壁面が鉛直となす角度 (度)

※港湾空港技術研究所資料，鋼直杭式棧橋の弾塑性解析による耐震性能照査および簡便照査法の提案 No. 943

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

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

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

ここに

- D : 杭径 (m)
- EI : 曲げ剛性 ($kN \cdot m^2$)
- 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
$-30^\circ < \theta \leq -20^\circ$	$K_h' = K_h \times (-0.051\theta + 0.71)$
$-20^\circ < \theta \leq -10^\circ$	$K_h' = K_h \times (-0.039\theta + 0.95)$
$-10^\circ < \theta < 0^\circ$	$K_h' = K_h \times (-0.034\theta + 1.00)$
$0^\circ < \theta < 10^\circ$	$K_h' = K_h \times (-0.026\theta + 1.00)$
$10^\circ \leq \theta < 20^\circ$	$K_h' = K_h \times (-0.024\theta + 0.98)$
$10^\circ \leq \theta < 20^\circ$	$K_h' = K_h \times (-0.017\theta + 0.84)$

本システムでは耐震照査に用いるK値の初期勾配は次のようにして用います。

$$K_H = 2 \cdot \alpha_k \cdot k_h$$

ここに

K_H : 地盤反力係数の初期勾配 (kN/m^3)

k_h : 永続状態の地盤反力係数 (kN/m^3)

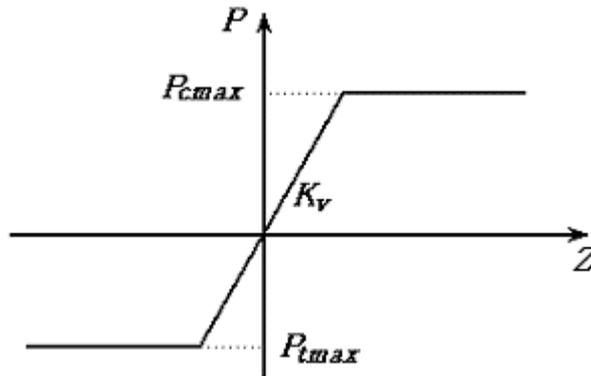
α_k : 単杭における地盤反力係数の補正係数

$$\begin{cases} \text{道路橋示方書} & \alpha_k = 1.5 \\ \text{港湾基準} & \alpha_k = 1.0 \end{cases}$$

- ※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 P254)
- ※鋼管杭協会, 鋼矢板 設計から施工まで(2000年 改定新版 P26)
- ※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, P1112)
- ※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 P4-57)
- ※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

杭軸方向の地盤の荷重－変位関係

杭軸方向の地盤の荷重－変位関係は、次に示す杭の軸方向バネ定数 K_v と押し込み支持力の上限値 P_{cmax} 、引抜き支持力の上限値 P_{tmax} で設定される支持力モデルになります。



杭の軸方向バネ定数の算定方法

$$\frac{1}{K_v} = \frac{L_1}{aA_p E_p} + \frac{L_2}{A_p E_p}$$

ここに

K_v : 杭の軸方向バネ定数 (kN/m)

A_p : 杭の断面積 (m^2)

E_p : 杭のヤング係数 (kN/m^2)

L_1 : 地中部の杭長 (m)

L_2 : 突出部の杭長 (m)

a は次式により算定する

打込鋼管(打撃工法) $a = 0.014 \frac{L}{D} + 0.72$

打込鋼管(パイプロハンマ工法) $a = 0.017 \frac{L}{D} - 0.014$

中堀鋼管 $a = 0.010 \frac{L}{D} + 0.36$

L : 杭の根入れ長 (m)

D : 杭径 (m)

※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 P374）

各支持力の算定方法

押し込み支持力の上限値 P_{cmax} は次式により求めます。

$$P_{cmax} = \min(R_U, R_{PU})$$

ここに

P_{cmax} : 押し込み支持力の上限値 (kN)

R_U : 地盤から定まる杭の極限支持力 (kN)

R_{PU} : 杭から定まる押し込み支持力の上限値 (kN)

引抜き支持力の上限値 P_{tmax} は次式により求めます。

$$P_{tmax} = \min(P_U + W, P_{PU})$$

ここに

P_{tmax} : 引抜き支持力の上限値 (kN)

P_U : 地盤から定まる杭の極限引抜き力 (kN)

P_{PU} : 杭から定まる引抜き支持力の上限値 (kN)

W : 杭及び杭内部の土の有効重量 (kN)

地盤から定まる杭の極限支持力 R_U 、 P_U の算定式については、次の2つの工法から選択できます。

1) 打込鋼管杭

砂質土地盤

$$R_U = 300 \cdot \alpha \cdot N \cdot A_p + \sum 2N_i \cdot A_s + \sum C_{ai} \cdot A_s$$

粘性土地盤

$$R_U = 6 \cdot \alpha \cdot C_p + \sum 2N_i \cdot A_s + \sum C_{ai} \cdot A_s$$

$$P_U = \sum 2N_i \cdot A_s + \sum C_{ai} \cdot A_s$$

$$N = \frac{N_1 + N_2}{2}$$

ここに

α : 杭の閉塞率

A_s : 杭の周表面積

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

N_i : 砂質土層内の平均 N 値

C_{ai} : 粘性土層内の平均 N 値

C_p : 杭先端位置での粘着力

極限支持力の算定 — 中掘鋼管杭（道路橋示方書）

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

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

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

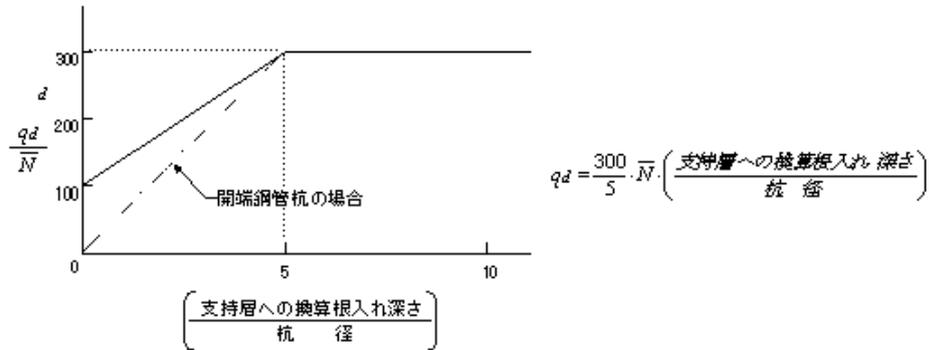
L_i : 層の厚さ

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

極限支持力度 q_d の算定法として以下の 6 種類を選択できます。

1 : 最終打撃工法



2 : セメントミルク噴出攪拌方式（砂層） $q_d = 150 \cdot N$

3 : セメントミルク噴出攪拌方式（砂礫層） $q_d = 200 \cdot N$

4 : コンクリート打設方式（砂礫層及び砂層） $q_d = 3000$

5 : コンクリート打設方式（良質な砂礫層） $q_d = 5000$

6 : コンクリート打設方式（硬質粘性土層） $q_d = 3 \cdot q_u$

q_u : 一軸圧縮強度 (kN/m²)

※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）

※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 P589～P596）

鋼管杭の非線形モデル

$$M_y = \left(\sigma_y - \frac{N}{A} \right) Z_e, \quad M_p = M_{p0} \cos\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right)$$

$$\alpha = \frac{N}{N_{y0}}, \quad N_{y0} = \sigma_y A, \quad M_{p0} = Z_p \sigma_y$$

$$Z_p = \frac{4}{3} \left\{ R^3 - (R-t)^3 \right\}$$

ここに

M_y : 鋼管杭の縁部降伏曲げモーメント

M_p : 鋼管杭の全塑性曲げモーメント

M_{p0} : 軸力がない場合の鋼管杭の全塑性曲げモーメント

N_{y0} : 鋼管杭の降伏軸力

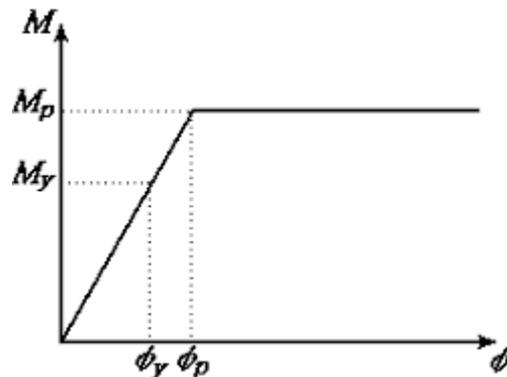
Z_p : 鋼管杭の塑性断面係数

R : 鋼管杭の半径

t : 鋼管杭の肉厚

鋼管杭の材料モデルとして、次の4つの非線形モデルが選択できます。

1) バイリニアモデル



$$M = \begin{cases} EZ_e R \phi & (\phi \leq \phi_p) \\ M_p & (\phi > \phi_p) \end{cases}$$

$$\phi_y = \frac{M_y}{EI}, \quad \phi_p = \frac{M_p}{M_y} \phi_y$$

ここに

ϕ : 鋼管杭の曲率

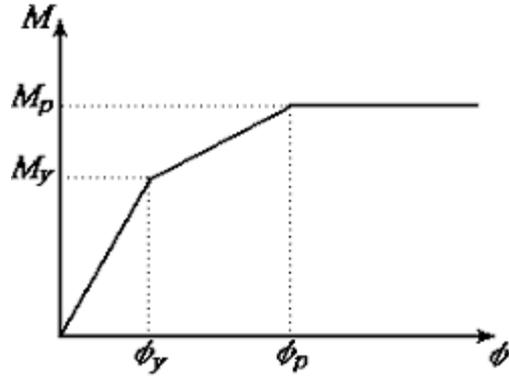
ϕ_y : 鋼管杭の降伏時曲率

ϕ_p : 鋼管杭の全塑性時曲率

E : 鋼管杭のヤング係数

Z_e : 鋼管杭の断面係数

2) トリリニアモデル



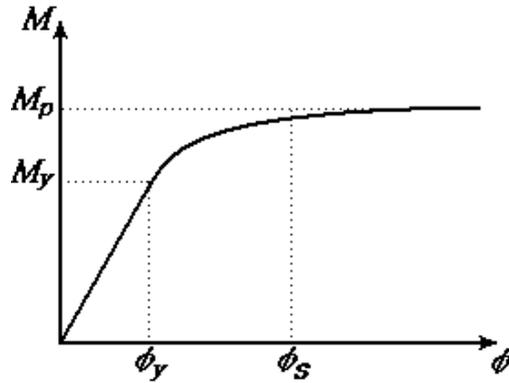
$$M = \begin{cases} EZ_e R \phi & (\phi \leq \phi_y) \\ g\phi + h & (\phi_y < \phi \leq \phi_p) \\ M_p & (\phi > \phi_p) \end{cases}$$

$$g = \frac{M_s - M_y}{\phi_s - \phi_y}, \quad h = \frac{\phi_s M_y - \phi_y M_s}{\phi_s - \phi_y}$$

$$\frac{M_s}{M_y} = 1 + 0.21\alpha - 1.05\alpha^2, \quad \frac{\phi_s}{\phi_y} = \frac{1}{1 - 1.395\alpha + 1.206\alpha^2}$$

$$\phi_p = \frac{\phi_s(M_p - M_y) + \phi_y(-M_p + M_s)}{M_s - M_y}$$

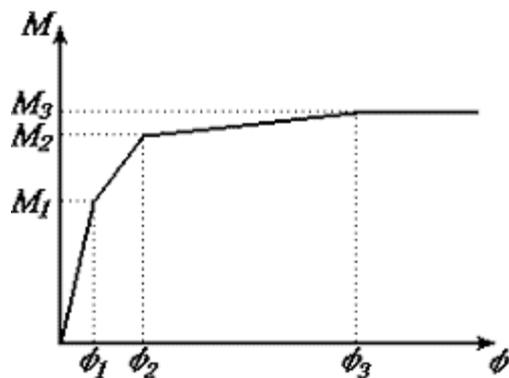
3) Chenモデル



$$M = \begin{cases} EZ_e R \phi & (\phi \leq \phi_y) \\ b - c/\sqrt{\phi} & (\phi_y < \phi \leq \phi_s) \\ M_p - f/\phi^2 & (\phi > \phi_s) \end{cases}$$

$$b = \frac{\sqrt{\phi_s} M_s - \sqrt{\phi_y} M_y}{\sqrt{\phi_s} - \sqrt{\phi_y}}, \quad c = \frac{M_s - M_y}{1/\sqrt{\phi_y} - 1/\sqrt{\phi_s}}, \quad f = \phi_s^2 (M_p - M_s)$$

4) 直接入力



直接入力の場合、 M_1 、 M_2 、 M_3 、 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 を直接入力することで非線形モデルを作成します。上部エコングリートで非線形モデルを設定する場合も直接入力になります。

※港湾空港技術研究所資料，鋼直杭式棧橋の弾塑性解析による耐震性能照査および簡便照査法の提案 No. 943

2-2. 1質点系の非線形動的解析

本システムでは1質点系の非線形動的解析をニューマークβ法で行っています。
尚、 $\beta = 0.25$ としております。

$$x_{n+1} = x_n + \Delta t \dot{x}_n + \left(\frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{x}_n \Delta t^2 + \beta \ddot{x}_{n+1} \Delta t^2$$

$$\dot{x}_{n+1} = \dot{x}_n + \frac{1}{2} (\ddot{x}_n + \ddot{x}_{n+1}) \Delta t$$

$$\ddot{x}_{n+1} = -2h\omega \dot{x}_{n+1} - \frac{Q(x_{n+1})}{m} - \ddot{x}_{0n+1}$$

ここに

x : 変位

\dot{x} : 速度

\ddot{x} : 加速度

Δt : 時間間隔

h : 減衰定数

ω : 質点固有円振動数

m : 質量

$Q(x)$: 復元力特性

森北出版, 最新 耐震構造解析 第2版 (2003年5月 P104~P105、P113~P115)

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19年 7月 | 日本港湾協会 |
| ・ 港湾構造物設計事例集 | 平成11年 4月 | 日本港湾協会 |
| ・ PC 栈橋技術マニュアル | 平成19年 3月 | 沿岸開発技術研究センター |
| ・ 杭基礎設計便覧 | 平成11年 4月 | 沿岸開発技術研究センター |
| ・ 道路橋示方書・同解説 | 平成15年10月 | 沿岸開発技術研究センター |
| ・ 構造力学公式集 | 平成 4年10月 | 日本道路協会 |
| ・ 杭基礎設計便覧 | 平成14年 3月 | 日本道路協会 |
| ・ 鋼管杭—その設計と施工— | 昭和49年12月 | 土木学会 |
| ・ 鋼矢板 設計から施工まで | 平成 4年10月 | 日本道路協会 |
| ・ 斜め組杭式栈橋の地震時挙動に関する
数値解析と耐震性能の照査法の提案 | 2000年 | 鋼管杭協会・㈱クボタ |
| ・ 鋼直杭式栈橋の弾塑性解析による
耐震性能照査および簡便照査法の提案 | 2000年 | 鋼管杭協会 |
| ・ 最新 耐震構造解析 第2版 | | 港湾空港技術研究所報告 第42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 | | 港湾空港技術研究所資料 No. 943
2003年 5月 森北出版
第41回地盤工学研究発表会 |