

鋼管矢板井筒の自動設計プログラム

Consistent Design Program for Well using Steel Pipe Pile

宮川 隆*
Takashi MIYAGAWA

1. はじめに

钢管矢板井筒とは、従来のコンクリート製井筒とほぼ同一目的を有する鋼製井筒である。この基礎型式は钢管矢板の集合として形成されるもので、これの有する曲げ剛性は、杭基礎のように杭相互の結合を行わない形式に比して、はるかに大きくなりコンクリート製井筒に近い構造となる。施工は従来の钢管杭基礎とほぼ同様に安全、かつ迅速に基盤工を築造する事ができる。以上の特徴により近年本井筒を用いて大規模な構造物を軟弱地盤上に施工する例が増加する傾向にある。

钢管矢板井筒に関する設計手法は、従来のコンクリート製ケーソン、杭基礎の中間に位置するものとして、矢板式基礎研究委員会より「矢板式基礎の設計と施工指針」として昭和47年1月に発行されている。

以下、本プログラムの詳細について述べる。

2. 適用構造型式

一般に钢管矢板井筒の型式は、図-1に示すように、

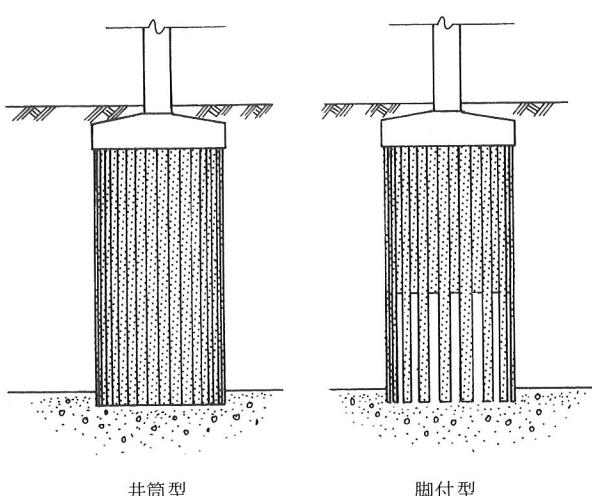


図-1 鋼管矢板井筒の型式

井筒型、脚付型に分類できるが、その他、内部にコンクリートを巻いた剛体型等の型式もある。剛体型はコンクリート製井筒と同一の設計法に拠ると思われ、プログラムの開発に当たっては、井筒型、脚付型の2種類に対応できるようにした。

また断面形状は図-2に示すように、円形、小判形、矩形等に分類できるが、その他これらの変形断面、隔壁を有するもの等、種々のタイプが施工してきた。したがって任意の断面について適用できるものとした。

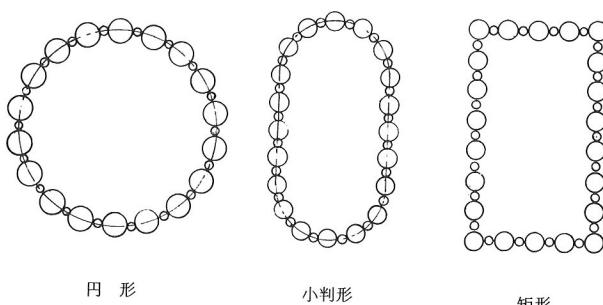


図-2 鋼管矢板井筒の断面

3. 設計計算法

3-1 設計の基本

钢管矢板井筒の側面水平抵抗は、杭基礎と同様に弾性床上の梁としての扱いをし、また底面の水平、鉛直抵抗については、コンクリート製ケーソンと同様な扱いをした。脚付型については杭基礎における底版と杭の釣合条件式により解析した。その他、土質定数の算出にはコンクリート製井筒と同一式を用いた。

3-1-1 井筒型の力学モデル

弾性床上の梁の基本式を図-3の様に左手系の座標を用いてChangの基本式を適用すると、(3.1)式のようになる。

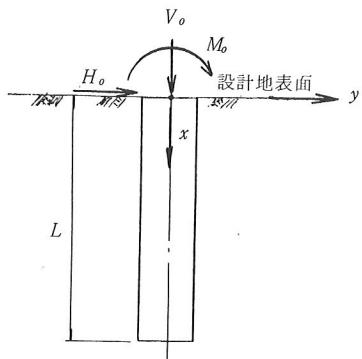


図-3 座標系

$$\left. \begin{aligned} EI \frac{d^4 y}{dx^4} + E_s \cdot y = 0 \\ E_s = K_h \cdot D \end{aligned} \right\} (3.1)$$

 EI : 鋼管矢板井筒の曲げ剛性 K_h : 水平方向地盤反力係数 D : 鋼管矢板井筒の前面幅

(3.1) 式の一般解は

$$y = e^{Px} (A \sin \beta x + B \cos \beta x)$$

$$+ e^{Px} (C \sin \beta x + D \cos \beta x) \quad (3.2)$$

$$\text{ここで } \beta = \sqrt{\frac{E_s}{4EI}}$$

となる。

一般解より井筒部分における地表面より深さ x の回転角を θ_x , 曲げモーメントを M_x , せん断力を S_x とおけば, 次式のようになる。

$$\theta_x = \frac{dy}{dx}, \quad M_x = -EI \frac{d^2 y}{dx^2}, \quad S_x = -EI \frac{d^3 y}{dx^3} \quad (3.3)$$

(3.2) 式の未定定数 $A \sim D$ は下記の境界条件から求まる。

$$\begin{aligned} x=0 \text{ で} \quad & -EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -M_o \\ & -EI \frac{d^3 y}{dx^3} = -H_o \\ x=L \text{ で} \quad & -EI \frac{d^2 y}{dx^2} = K_V \cdot I'_V \cdot \frac{dy}{dx} \\ & -EI \frac{d^3 y}{dx^3} = K_S \cdot A'_V \cdot y \end{aligned}$$

 K_V : 井筒底面の鉛直方向地盤反力

係数

 K_S : 井筒底面のせん断ばね係数 I'_V : 井筒底面の有効部断面 2 次モーメント A'_V : 井筒底面の有効載荷面積

井筒側面が単一地盤の場合は、未定定数 $A \sim D$ は(3.4)式の境界条件により求められるが、複数の地盤の場合には、さらに地盤の変化位置で次のような連続条件を加味して解く。

- $x = l_i$ での i 層と $i+1$ 層の境界条件は

$$\left. \begin{aligned} \left[y_i \right]_{x=l_i} &= \left[y_{i+1} \right]_{x=l_i} \\ \left[\frac{dy_i}{dx} \right]_{x=l_i} &= \left[\frac{dy_{i+1}}{dx} \right]_{x=l_i} \\ \left[\frac{d^2 y_i}{dx^2} \right]_{x=l_i} &= \left[\frac{d^2 y_{i+1}}{dx^2} \right]_{x=l_i} \\ \left[\frac{d^3 y_i}{dx^3} \right]_{x=l_i} &= \left[\frac{d^3 y_{i+1}}{dx^3} \right]_{x=l_i} \end{aligned} \right\} (3.5)$$

3-1-2 脚付型の力学モデル

脚付型の弾性方程式、井筒頭部の境界条件式、及び地盤の変化位置での連続条件式等は、井筒型と同様にして解ける。

即ち、井筒底面と脚頭部の境界条件は、杭基礎における杭と底版の釣合条件式より一般式は次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} A_{yy} \cdot \delta_y + A_{yx} \cdot \delta_x + A_{y\alpha} \cdot \alpha &= H_B \\ A_{xy} \cdot \delta_y + A_{xx} \cdot \delta_x + A_{x\alpha} \cdot \alpha &= V_B \\ A_{\alpha y} \cdot \delta_y + A_{\alpha x} \cdot \delta_x + A_{\alpha\alpha} \cdot \alpha &= M_B \end{aligned} \right\} (3.6)$$

ここで、 $\delta_y, \delta_x, \alpha$: 井筒底面での水平、鉛直、および回転変位

H_B, V_B, M_B : 井筒底面での水平、鉛直、およびモーメント反力

井筒の底面は水平であり、脚部に斜杭を有せず、かつ脚配置が対称であると仮定すると、次式が成り立つ。

$$A_{yy} = \Sigma K_1, \quad A_{yx} = A_{xy} = 0, \quad A_{y\alpha} = A_{\alpha y} = \Sigma (-K_2)$$

$$A_{xx} = \Sigma K_{VP}, \quad A_{x\alpha} = A_{\alpha x} = 0, \quad A_{\alpha\alpha} = \Sigma (K_{VP} \cdot y_i^2 + K_4)$$

ここで、 $K_1, K_2,$

K_3, K_4 : 脚部矢板の軸直角方向バネ定数

K_{VP} : 脚頭部の軸方向バネ定数

この式を (3.6) 式に代入すると,

$$\left. \begin{array}{l} \sum K_1 \cdot \delta_y - \sum K_2 \cdot \alpha = H_B \\ - \sum K_2 \cdot \delta_y + (K_{VP} \cdot y_i^2 + K_4) \alpha = M_B \\ \sum K_{VP} \cdot \delta_x = V_B \end{array} \right\} (3.7)$$

と表わされる。一般に鋼管矢板井筒は対称断面である事から、(3.7) 式を境界条件として用いる。即ち、今は対称断面についてのみ考慮する。

3-2 井筒本体剛度の計算

一般に井筒本体の曲げ剛度は、継手により結合された鋼管矢板の集合体を、一本の梁とみなして算出するものとする。また鋼管矢板井筒の曲げ剛性は継手の処理方法、矢板頭部の処理方法等により異なるが、下式により求めるのが一般的なので、それに準ずる。

$$EI = E \left(\sum_{i=1}^n I_i + \mu \sum_{i=1}^n A_i \cdot y_i^2 \right) \quad (3.8)$$

ここに、

E : 矢板の弾性係数

I_i : i 番目の矢板の断面2次モーメント

n : 矢板の総本数

A_i : i 番目の矢板の断面積

y_i : i 番目の矢板の井筒中心よりの距離

μ : 継手の合成効率 ($0 \sim 1.0$)

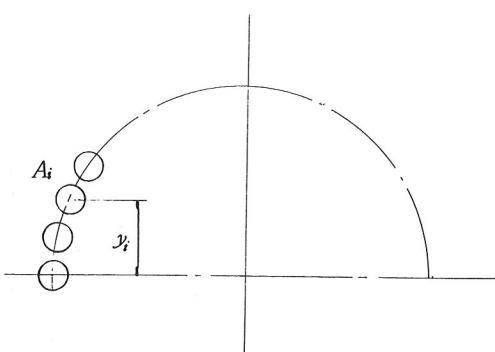


図-4 矢板配置

井筒は鋼管矢板の集合体であり、継手の結合が100%完全でない故、継手の合成効率 μ という実験値を用い、みかけの曲げ剛度を算出している。

合成効率は実験により、一般的な井筒型式のものについて、頭部を項版コンクリートに剛結し継手部にモルタルグラウトを行ったものは0.5、グラウトを行わないものは0.3程度となることがわかっている。

プログラムでは0より1.0までの任意の値を入力できるようにした。

4. プログラムの特徴

鋼管矢板井筒は適用構造型式の章でも述べたが、種々の断面形状のものがあるので、断面形状の変化に応じて、プログラムの制約を受けている。

1) 井筒本体の曲げ剛性を算出する際に、断面形状に合わせた式を用いる。

2) 井筒底面の面積、断面2次モーメントを計算する際に、底面形状に合わせた式を用いる。

また井筒底面に浮き上がりの生ずる場合は、この部分を無視して断面積、断面2次モーメントを算出する必要がある。断面形状が矩形、円形等の一般的な断面については容易に算出することができるが、2方向の曲げモーメントが作用する場合、非対称形の複雑な断面においては、やや手間を要する。これらの条件を満足する為に、全ての断面に対して、各々計算式を用意する事は不可能に近い。

また、断面形状が正方形でも、2方向の曲げモーメントの作用する場合には、2方向の曲げモーメントの比が変化することにより、同一計算式での処理が出来ない。

このような場合の断面諸量は、ガウスの積分定理を用いて線積分に置きかえ、図-5のように折れ線にて算出する事ができる。

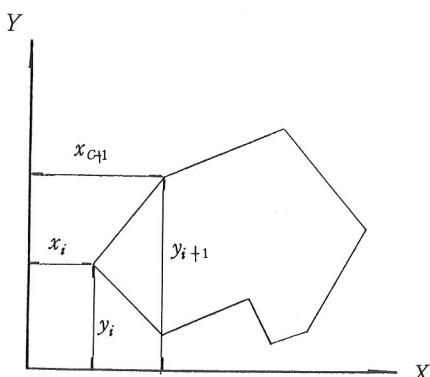


図-5 折れ線近似

$$\left. \begin{aligned} A &= 1/2 \sum (x_{i+1}y_i - x_iy_{i+1}) \\ G_X &= 1/2 \sum (x_{i+1}-x_i) \{ y_i^2 + 1/3 (y_{i+1} - y_i)(y_{i+1} + 2y_i) \} \\ I_X &= 1/3 \sum (x_{i+1}-x_i) \{ y_i^3 + 1/6 (y_{i+1} - y_i)(y_{i+1} + 2y_i)^2 + 1/12 (y_{i+1}-y_i)^3 \} \\ I_{XY} &= -1/2 \sum (y_{i+1}-y_i) \{ 1/2 x_i^2 (y_{i+1} + y_i) \\ &\quad + 1/36 (x_{i+1}-x_i)^2 (y_{i+1}-y_i) \\ &\quad + 1/9 (x_{i+1}-x_i)(x_{i+1}+2x_i)(2y_{i+1}+x_i) \} \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

式(4.1)を使用する事により、円形も折れ線に近似させ断面諸量を求める。

底面に浮き上がりが生じ、浮き上がり部を無視した有効部の断面諸量は

$$\left. \begin{aligned} \Sigma Q &= N_B \\ K_V \cdot I_V' \cdot \frac{dy}{dx} &= M_B \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

Q : 地盤反力
 N_B, M_B : 底面に働く鉛直力、曲げモーメント

の釣合条件式により求める。

図-6のように軸力と2方向の曲げモーメントを受ける部材の応力を、中立軸 $n-n$ をX軸、Y軸をそれぞれ($a, 0$), ($0, b$)で切る直線式で表し、(i, j)点での圧縮応力を σ_c 、また(i, j)点より中立軸 $n-n$ に下ろした垂線の長さを d_j とすると、任意点の圧縮応力は(4.3)式で表わせる。

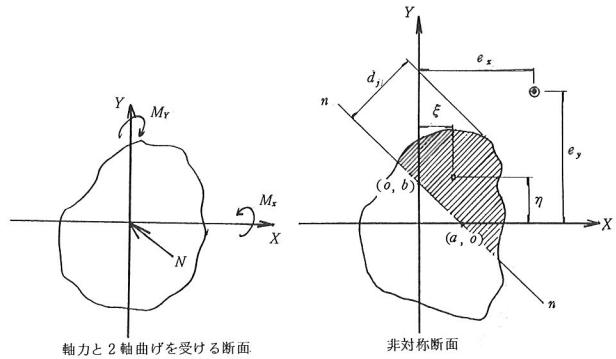


図-6

$$\sigma = \frac{\sigma_c}{d_j} \left(\frac{b\xi + a\eta - ab}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right) \quad (4.3)$$

軸力および曲げモーメントの平衡条件式は

$$\begin{aligned} N &= \int_{AC} \sigma dA_C \\ &= \frac{\sigma_c}{d_j \sqrt{a^2 + b^2}} \left(b \int_{AC} \xi dA_C + a \int_{AC} \eta dA_C - ab \int_{AC} dA_C \right) \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} M_x &= N \cdot e_y \\ &= \frac{\sigma_c}{d_j \sqrt{a^2 + b^2}} \left(b \int_{AC} \xi \eta dA_C + a \int_{AC} \eta^2 dA_C - ab \int_{AC} \eta dA_C \right) \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} M_y &= N \cdot e_x \\ &= \frac{\sigma_c}{d_j \sqrt{a^2 + b^2}} \left(b \int_{AC} \xi^2 dA_C + a \int_{AC} \eta \xi dA_C - ab \int_{AC} \xi dA_C \right) \end{aligned} \quad (4.6)$$

となる。

(4.4), (4.5), (4.6)式より $\sigma_c / d_j \sqrt{a^2 + b^2}$ を消去し a, b について整理すると次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} a(NI_X - M_xG_X) + b(NI_{XY} - M_xG_Y) &= ab(NG_X - M_xA_C) \\ b(NI_{XY} - M_yG_X) + b(NI_Y - M_yG_Y) &= ab(NG_Y - M_yA_C) \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

ここで $a \neq 0, b \neq 0, N \neq 0$ より

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{(I_{XY} - e_Y G_Y)(I_{XY} - e_X G_X) - (I_X - e_Y G_X)(I_Y - e_X G_Y)}{(G_X - e_Y A_C)(I_{XY} - e_X G_X) - (I_X - e_Y G_X)(G_X - e_Y A_C)} \\ b &= \frac{(I_{XY} - e_Y G_Y)(I_{XY} - e_X G_X) - (I_X - e_Y G_X)(I_Y - e_X G_Y)}{(I_{XY} - e_Y G_Y)(G_Y - e_X A_C) - (G_X - e_Y A_C)(I_Y - e_X G_Y)} \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

となる。(4.8)式より a , b を求めるわけであるが、この式の右辺も未知数 a , b を含んだ関係項となっており、左辺と右辺との等号が成り立つまで繰り返し計算を行うことにより、斜線部の断面諸量を求める。

プログラム上では、井筒底面の形状を折れ線で近似した格点の座標で表わしている。しかし、この格点を入力する事は、入力者に大きな負担を与える為、円形、小判形、矩形等の一般的な断面のものは、橋軸方向、直角方向の幅を入力する事により、計算機内部で格点の座標値を算出している。その他の形状は直接、底面の外形、内形を折れ線に近似させ交点の座標を入力する事により、任意の断面に対して設計を可能としている。

しかし、このことは任意の断面諸量を算出し、設計計算が行えるということであって、与えられた断面形状を、一本の梁として置換する事の妥当性についてはプログラム上では考慮していない。

よって設計者は、継手合成率、有効とする底面形状の技術的判断をした上で使用する必要がある。

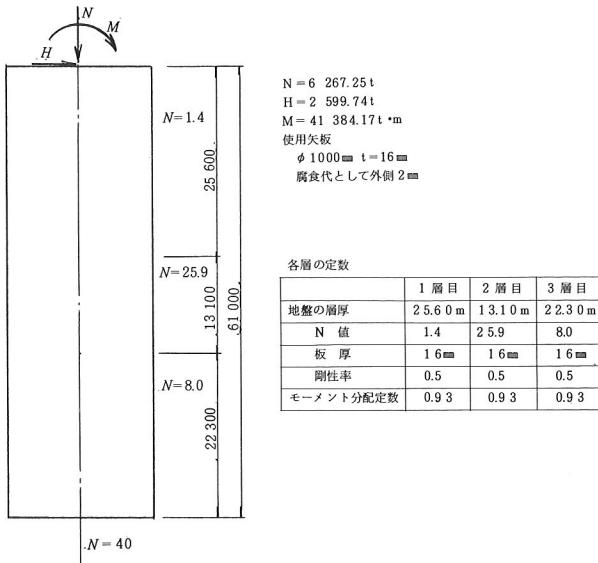


図-7 設計条件

5. 特殊型の設計例

本プログラムの特徴である、特殊な断面形状を有する井筒についての入力例を示す。

井筒の形状は矩形の隅角部を円弧にしたものであり、地質は3層より成っており、設計条件は図-7に示す。このタイプの井筒の入力は、矢板の位置を図-8に示すように、各々の矢板に番号を付け、全ての矢板の中心座標を入力する。また底面の形状も図-9に示すように、

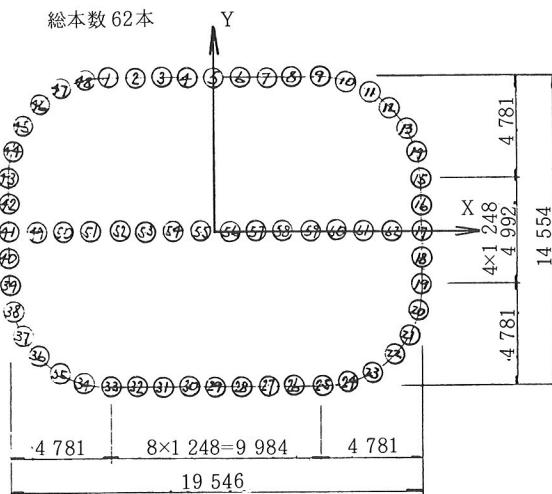


図-8 矢板配置図

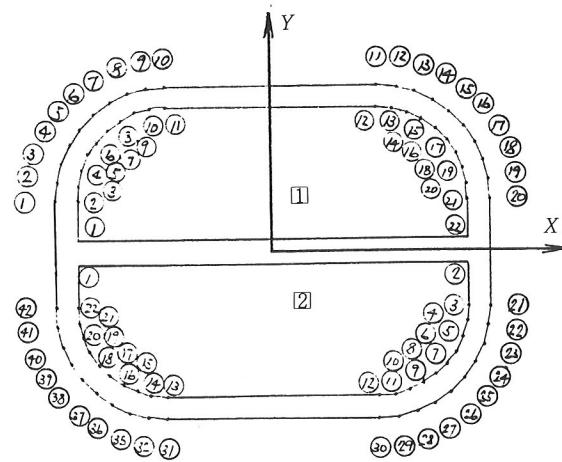


図-9 底面の形状図

外形内形をそれぞれ折れ線に近似させ各節点の座標を入力する。

結果は、計算書としての出力の他に、ドラフター等に図化出力される。ここでは図化出力結果のみを図-10に示す。

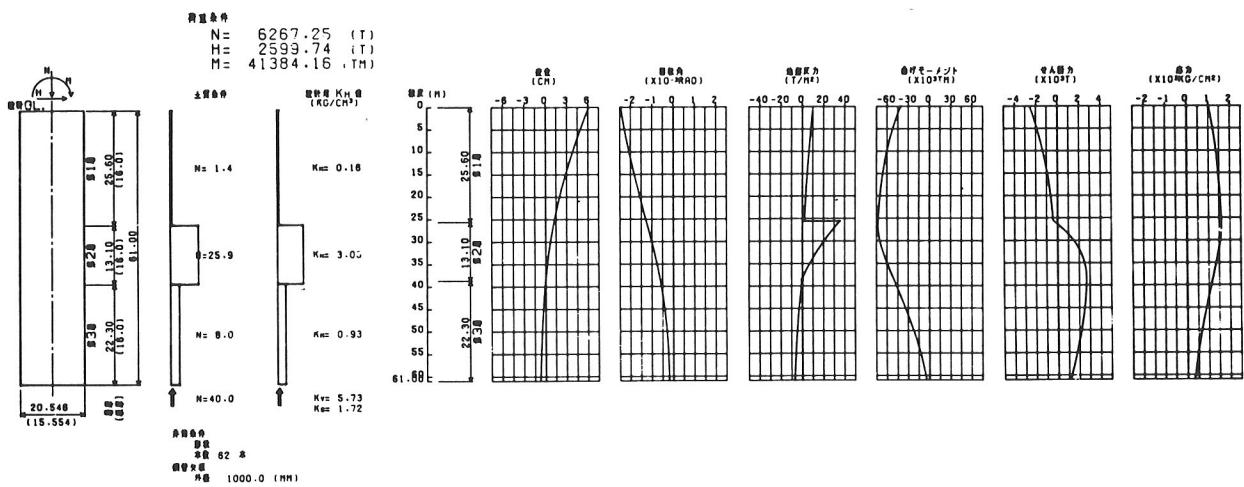


図-10 図化出力結果

参考文献

- 矢板式基礎研究委員会：矢板式基礎の設計と施工指針，1972.
- 川崎製鉄株式会社：鋼管矢板井筒工法デザインマニュアル
- 海老沢・中山・大地：任意形断面をもつ鉄筋コンクリート部材の応力算出，土木学会誌，Vol. 62, No 11, 1977.
- 阪神高速道路公団，鋼管杭協会：矢板式基礎の模型実験報告書