

I-24 中詰の掘削を考慮した鋼管矢板構造の安定解析

北見工業大学 正員 大島 俊之
 苫小牧高専 同 沢田 知之
 室蘭工業大学 同 松岡 健一
 日大生産工学部 同 能町 純雄

1、まえがき

鋼管矢板構造は基礎の施工時において止水および土留め対策用の仮設構造物としてよく用いられる。また連続止水壁と逆巻コンクリート打設による吊橋主塔基礎の設計例は明石海峡大橋下部工の計画案などに見られるが、近年LNG地下式貯槽の施工実績の蓄積がなされこのような構造の設計に応用されている。本研究ではこれらの構造を対象として、できるだけ構造本体に忠実にモデル化することにより複合構造体 (Hybrid Structure) の三次元的挙動を解析すると共に、そのモデル化の妥当性についても検討することを目的としている。理論計算式の内容としては (1) 鋼管矢板土留壁 (2) 中詰材料 (3) 連続止水壁 (4) 逆巻基礎工 の4種類のモデル化に分類される。以下、順に計算式の概要について述べる。

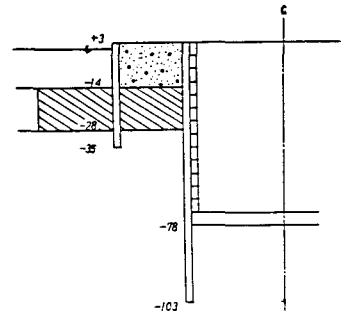


図1 全体系の概略図

2、フーリエ定和分変換による鋼管矢板構造の解析

ここで用いる理論計算式は文献 1) において用いられたものであり、鋼管矢板構造は連立微分差分方程式として表現される。これを構造全体について解析するため、円周方向にはフーリエ定和分変換、軸方向には有限フーリエ変換およびその逆変換を用い、境界条件、適合条件などから境界変位、境界の応力を求める手法である。地盤条件の変化に対しては地層ごとに境界を設けることにより不連続地盤を考慮する。鋼管矢板構造に関する研究はこれまで多くの研究発表があるが、これらについては文献 1) に述べられているのでここでは省略する。

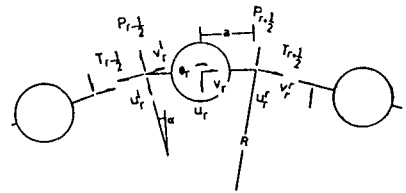


図2 鋼管矢板構造

図2および図3を参照して要素間のつりあいをとれば基本微分差分方程式が次のように得られる。

$$EI \ddot{U}_r + K D U_r = N_r + \Delta P_{r-1/2} \cos \alpha + \nabla T_{r-1/2} \sin \alpha \quad (1)$$

$$EI \ddot{V}_r + K' d V_r = T_r - \nabla P_{r-1/2} \sin \alpha + \Delta T_{r-1/2} \cos \alpha + a \nabla S_{r-1/2} \quad (2)$$

$$GJ \ddot{\theta}_r = -M_r - \nabla P_{r-1/2} a \cos \alpha - \Delta T_{r-1/2} \sin \alpha \quad (3)$$

$$EA \ddot{W}_r = -P_r - \Delta S_{r-1/2} \quad (4)$$

ただし N_r , T_r , M_r , P_r は外力、 K , K' は r , θ 方向の水平地盤反力係数、 $D = 2a$ 、 K_n , K_t , K_s はそれぞれ x , y , z 方向の鋼管矢板継手のバネ定数、 d は鋼管の直径

$$\Delta f(r) = f(r+1) - f(r)$$

$$\nabla f(r) = f(r+1) + f(r)$$

4. 多角円筒シェルによる連続止水壁構造の解析

連続壁を対象として多角円筒シェルによるモデル化を行う。個々の平面壁要素は等断面として帯板要素法を適用し、要素間のつりあい関係から基本微分差分方程式を誘導する。図6を参照して節点でのつりあいは

$$\begin{aligned} M_{r,r+1} + M_{r,r-1} &= M_r \\ T_{r,r+1} + T_{r,r-1} &= T_r \\ (S_{r,r+1} + S_{r,r-1}) \cos \alpha - (X_{r,r+1} - X_{r,r-1}) \sin \alpha &= S_r \\ (X_{r,r+1} + X_{r,r-1}) \cos \alpha + (S_{r,r+1} - S_{r,r-1}) \sin \alpha &= P_r \end{aligned} \quad (11)$$

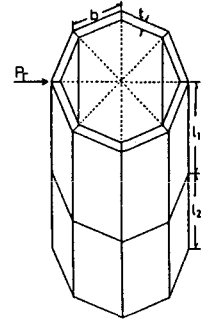


図5 多角円筒シェル

これに文献1)における解法と同様に要素関係式を代入し、円周方向にフーリエ変換と分変換、軸方向に有限フーリエ変換を適用すれば基本式は次のように表される。

$$A_{mi} \delta_{mi} = B_{mi} \delta_{bi} + P_{mi} \quad (12)$$

ただし

$$\{\delta_{mi}\} = \{R_i [U_{rm}] \quad S_i [V_{rm}] \quad S_i [\theta_{rm}] \quad R_i [W_{rm}]\}^T$$

A_{mi}, B_{mi} は係数マトリックス、 δ_{mi}, δ_{bi} はそれぞれ一般変位及び境界変位の像関数、 P_{mi} は荷重の像関数

これらを逆変換することにより任意点の変位が境界での変位と外力の項の和として与えられる。また連壁頂上の境界条件としては $\delta_b = 0$ とし、半径方向および円周方向のせん断力のつりあい式は代償せん断力の式を用いて次のように表される。

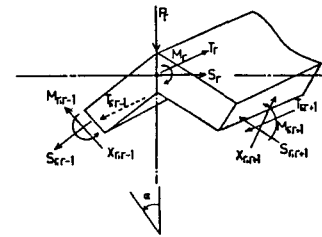


図6 節点でのつりあい

$$\begin{aligned} R_i [P_{r0}] &= -Dtb/6 \cos 2\alpha (6-Di) R_i [\ddot{U}_{r0}] - Dtb/6 \sin \alpha \cos \alpha \sin i\pi/n S_i [\ddot{V}_{r0}] + Dtb^2 \cos \alpha^2 \sin i\pi/n \\ S_i [\ddot{\theta}_{r0}] &- Gt/2 \sin \alpha Di R_i [W_{r0}] + Gtb/6 \cos \alpha \sin \alpha^2 \sin i\pi/n S_i [\ddot{V}_{r0}] - Gtb/6 \sin 2\alpha (6-Di) R_i [\ddot{U}_{r0}] \\ S_i [Q_{v0}] &= -Gt/2 \cos \alpha^2 \sin i\pi/n R_i [W_{r0}] + Gtb/6 \cos 2\alpha (6-Di) S_i [\ddot{V}_{r0}] + Gtb/6 \sin \alpha \cos \alpha^2 \sin i\pi/n \\ R_i [\ddot{U}_{r0}] &- Dtb/6 \cos \alpha \sin \alpha^2 \sin i\pi/n R_i [\ddot{U}_{r0}] - Dtb/6 \sin 2\alpha (6+Di) S_i [\ddot{V}_{r0}] + Dtb^2/30 \sin \alpha \\ (5+Di) S_i [\ddot{\theta}_{r0}] \end{aligned}$$

ただし

$Dt = Et^3/(12(1-\nu^2))$, $N = Et/(1-\nu^2)$, $M = m\pi/l$, l, b, E, G, ν, n はそれぞれ連壁の長さ、幅、弾性係数、せん断弾性係数、ポアソン比、全パネル数である。

5. 薄肉円筒シェル要素による逆巻基礎構造の解析

逆巻基礎の建設初期には頂部より内部の土砂を掘削しながらコンクリート構造体を打設する施工順序により逐次中詰材料が円筒体と置換されるので、その施工過程に応じて薄肉円筒シェル要素を下部に追加する解析法を用いる。そのため以下にはこの要素の剛性マトリックスの誘導過程について略述する。

図8を参照して要素内変位は

$$\begin{aligned} U &= \sum_m [(1-\eta)U_{1m} + \eta U_{2m}] \sin m\pi\theta/\alpha \\ V &= \sum_m [(1-\eta)V_{1m} + \eta V_{2m}] \cos m\pi\theta/\alpha \\ W &= \sum_m [(1-3\eta^2+2\eta^3)W_{1m} + z(1-2\eta+\eta^2)\Psi_{1m} + (3\eta^2-2\eta^3)W_{2m} + z(\eta^2-\eta)\Psi_{2m}] \sin m\pi\theta/\alpha \end{aligned} \quad (13)$$

$$\Psi = \partial W / \partial z$$

$$\varepsilon_z = \partial u / \partial z, \quad \varepsilon_\theta = (1/r) \partial v / \partial \theta + w/r, \quad \gamma_{z\theta} = (1/r) \partial u / \partial \theta + \partial v / \partial z$$

$$\chi_z = -\partial^2 w / \partial z^2, \quad \chi_\theta = (-1/r^2) \partial^2 w / \partial \theta^2 + (1/r^2) \partial v / \partial \theta$$

$$\chi_{z\theta} = 2(-1/r) \partial^2 w / \partial z \partial \theta + 1/r \partial v / \partial z$$

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\}$$

[D] は 6×6 の対称マトリックスであり、次の値以外はゼロである。

$$D_{11} = K_z = Et/(1-\nu^2), \quad D_{12} = K_\theta = \nu K_z, \quad D_{22} = K_\theta = K_z, \quad D_{33} = K_{z\theta} = Gt,$$

$$D_{44} = D_z = K_z t^3/12, \quad D_{45} = \nu D_z, \quad D_{55} = D_\theta = D_z, \quad D_{66} = D_{z\theta} = Gt^3/12$$

文献2)によれば剛性マトリックスは

$$\{F\} = [S^*] \{\delta\} \quad (14)$$

ただし

$$[S^*]_{mn} = \frac{\alpha}{2} \int_0^b [S]_{mn} r \, dz \quad (15)$$

$$[S]_{mn} = \begin{bmatrix} [S11]_{mn} & [S12]_{mn} \\ [S21]_{mn} & [S22]_{mn} \end{bmatrix}$$

[S11] mn, [S12] mn, [S21] mn,

[S22] mn は円筒シェル要素の曲げ

剛性、面内剛性、および形状関数からなる係数マトリックスであり文献2)に詳述されている。

6、数値計算例

複合構造の全体解析を行うためには各構造間に仮想の内力を作用させ、構造間の接触条件を満足するようにこの内力を決定する方法を用いる。全体系の解析に先だって各構造要素自身のモデル化の妥当性と変形挙動の数値的傾向を把握することが必要なため、その計算結果の二、三の例について述べる。鋼管矢板構造の挙動については文献1)で述べられているので省略する。

(1) 連壁の数値計算結果

図8には図5のように多角円筒シェル構造の連壁頂部に集中力が作用した場合の半径方向変位 U_r の軸方向分布を連壁厚 t が 1.5m と 3.5m の場合について比較している。その他の数値は $E=300000 \text{ kgf/cm}^2$, $\nu=0.17$, $b=7\text{m}$, $n=20$ 半径は約 22.37m である。

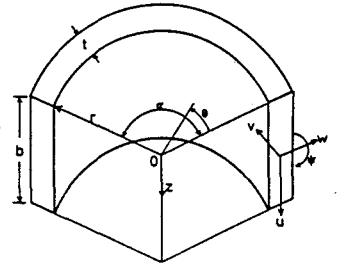


図7 薄肉円筒シェル

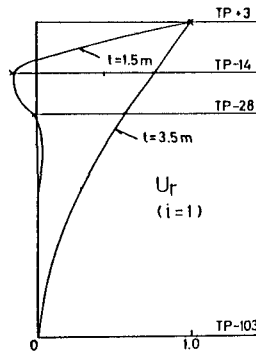


図8 半径方向変位の分布

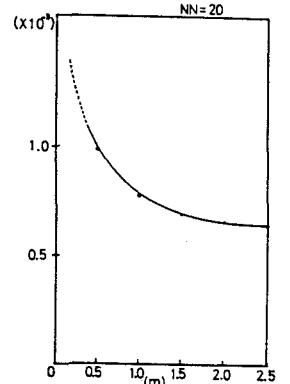


図9 肉厚の変化

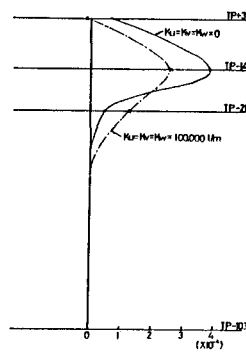


図10 海底面載荷

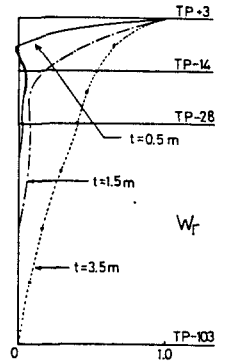


図11 半径方向変位の分布

図には分布形を比較するため頂点での変位を1として示しており円周方向モードが逆対称となる $i=1$ の場合の結果である。地盤反力係数はそれぞれ $K_u=K_v=K_w=1000 \text{ t/m}$ と比較的小さい値を均等に考慮している。これによれば連壁厚のちがいにより半径方向変位の分布は大きく異なることがわかる。また図9には同じ条件で連壁厚 t を変化させた場合の頂上の荷重点変位の変化を示しているがこれによれば連壁厚が1mあたりから急激に増加することがわかる。図10には連壁厚1.5mの場合について地震時を想定して集中荷重100tfを海底面(Tp-14)に作用させた場合の半径方向変位の結果について地盤反力係数による変化を比較した例を示している。海底面での変位が大きくなると共に頂部では断面変形によりかなり変位の減少がみられる。その他の条件は前述と同様である。

(2) 薄肉円筒シェルの数値計算結果

薄肉円筒シェルの場合も多角円筒シェルと同様肉厚の変化によって半径方向変位の分布が大きく異なる。図11には肉厚を3.5m, 1.5m, 0.5m と小さくした場合の半径方向変位を比較しているが、前述と同様頂上での変位を1として示している。計算に用いた数値は $r=22.37\text{m}$ 、 b はTP+3 から TP-103 までを13パネルとなる様ほぼ均等に分割した。 $E=300000 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\nu=0.17$ 、 $P=100 \text{ tf}$ 地盤反力係数はそれぞれ $K_u=K_v=K_w=1000 \text{ tf/m}$ を各方向に考慮している。まえがきで述べたように逆巻工法の場合

は頂点より順次円筒パネルを打設する工法となるので各施工段階ごとの変形の変化を求める必要がある。図12には頂上に集中荷重 $P=100\text{tf}$ が作用する場合の半径方向変位 w の分布を示している。(円周方向モード $m=2$ ：逆対称変形の場合) ここでは地盤反力係数を上層から $K_1=10000\text{tf/m}$, $K_2=50000\text{tf/m}$, $K_3=100000\text{tf/m}$ とした場合の結果を示している。初期の肉厚 1.5m などその他の数値は前述と同様である。また軸方向に全長を13パネルに分割し、上部から1パネルごとに地盤反力係数を壁厚2mの円筒シェル要素と置換する手法により各段階ごとの変位分布を求めた結果を比較している。これによれば第8パネルを施工したあたりから全体的変形が大きくなる傾向となっている。図13には同様の計算を荷重が海底面(Tp-14)に作用する場合の結果について示している。全体的には図12と同様のことが言える。

(3) Annular Plate 要素による全体構造系の数値計算結果

ここでは図14のような3種類の材質からなる複合構造体を解析した結果について述べる。荷重は集中

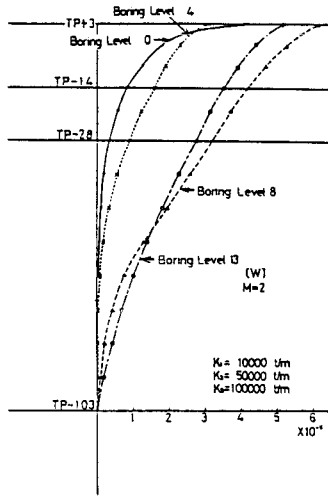


図12 半径方向変位の分布

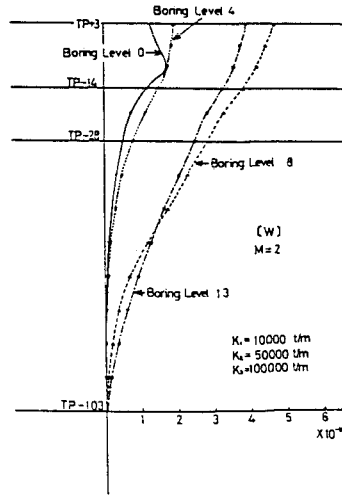


図13 半径方向変位の分布

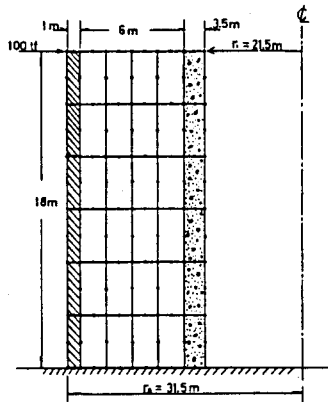


図14 複合構造の要素分割

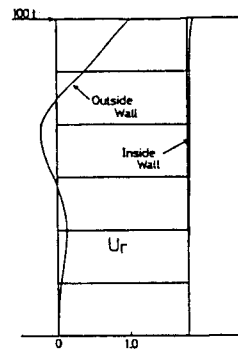


図15 半径方向変位の分布

荷重を想定している。弾性定数は外壁より

$$E1=2100000\text{kgf/cm}^2, E2=10000\text{kgf/cm}^2, E3=300000\text{kgf/cm}^2, \nu 1=0.3, \nu 2=0.2, \nu 3=0.17$$

としている。計算例では円周方向モードが $m=1$ で逆対称モードの場合の結果について示す。図 15 には半径方向変位の軸方向変化を外壁での最大変位を 1 として示している。内壁では変位が非常に小さくなり中詰材料の変形が大きいことを示している。

7、あとがき

本報告の段階では全構造系を 1 つの系として計算した結果を示すことはできなかったが、個々の構造要素の変形挙動を明らかにすることができたので、全体系の挙動の大ざっぱな傾向を把握することができた。本研究の実施に当たっては北見工大開発工学科構造研究室の三上修一氏及び学生諸君、特に木原尚彦、推名徹両君の援助を受けました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 沢田、二宮、松岡、能町：フーリエ定和分変換を用いた鋼管矢板構造物の解析、構造工学論文集、No .34A, 1988
- 2) Y.K.Cheung: Finite Strip Method in Structural Analysis, Pergamon Press,, 1976