

フーリエ定和分変換を用いた鋼管矢板 円筒形構造物の解析

A STRESS ANALYSIS OF STEEL PILE-WELL STRUCTURE
BY MEANS OF FOURIER INTEGRATION TRANSFORMS

澤田知之* 二宮正明** 松岡健一*** 能町純雄****

By Tomoyuki SAWADA, Masaaki NINOMIYA, Kenichi MATSUOKA, Sumio NOMACHI

In this paper, the stress analysis of a steel pile-well structure is considered.

The steel pile-well structure is assumed to be an assembly of beam elements, with these beam elements connected to each other by spring joints in three directions. From the equilibrium of forces of these beam elements, we derived four differential-difference equations, and showed that these equations are easily solved by making use of the finite fourier integral-integration transforms.

We discuss the resistant effect of the spring rigidity of the pile joints and the flexial rigidity of the reinforced ring beam which is located at the top of the pile-well structure, on the external concentrated load or the earthquake forces.

The numerical calculations are performed for several examples of the spring rigidity of the pile joint, and the flexial rigidity of the reinforced ring beam.

1. はじめに

鋼管矢板構造は個々の鋼管矢板を継手によって連結し、全体として円形または小判形状に閉合し、支保工や、鉄筋コンクリートフーチングにより筒状に一体化するものである。これら鋼管矢板構造は、施工が容易であり、経済的であるなど、施工上の有利さから、また、外力に対する抵抗性が大きく、水密性とすることも可能なことから、橋梁の基礎など大きな鉛直・水平抵抗を要求される重量構造物の基礎や、仮締切工など施工中、あるいは完成後水密性を要求される基礎などに数多く用いられてきている。

鋼管矢板構造は、複雑な構造であるので、厳密な理論解析は困難なことから、その力学的挙動を明らかにするため、数多くの模型実験や実物実験がなされており実用的な設計に寄与している。^{1)~3)}

理論的な研究としては、鋼管矢板を引張剛性、曲げ剛性を持つ線材、継手は等価なせん断剛性と水平方向の引張剛性をもつ平面応力板有限要素、地盤を三次元有限要素としてモデル化し有限要素解析を行ない鋼管矢板構造の全体性状を明らかにした木寺らの研究。⁴⁾ 鋼管矢板をSt. Venantのねじりを考慮したはりとし、継手の剛性を3方向のバネ、地盤を弾性床として解析し、水平に置かれた、鋼管矢板構造の特性を明らかに

* 工博 苫小牧工業高等専門学校助教授 (〒059-12 苫小牧市錦岡443)

** 広島工業大学講師 (〒731-51 広島県佐伯郡五日市町三宅725)

*** 工博 室蘭工業大学教授 工学部土木工学科 (〒050 室蘭市水元町27番1号)

**** 工博 日本大学教授 生産工学部土木工学科 (〒275 習志野市泉町1丁目2番1号)

した山川らの研究がある。⁵⁾

また、本研究と類似的な研究として、井筒全体を円筒シェルと仮定して、その変位場を決め、その変位場から各矢板の変位場を求め、それに応じた断面力を求め、そのつり合い条件から全体の構造解析を行ない、さらに実物載荷試験との比較を行なって地盤作用に言及している駒田らの研究がある⁶⁾が、その誘導過程は複雑となり、得られる基本微分方程式も直接解くことが困難となるような、非常に複雑なものになると考えられる。本解法では、基本微分方程式は誘導の過程において簡便となると考えられる。

さらに、山本らは数多くの現場実験結果を整理し、地盤の非線形性を考慮した解析により継手の剛性効率の再評価を行ない合理的な設計法を提案した。⁷⁾

これらの研究成果をもとに、鋼管矢板基礎設計指針⁸⁾が作成され、設計に利用されている。この指針は主としてフーチングと一体となった鋼管矢板基礎の設計を対象としている。

一方、現在、室蘭港に架橋予定の白鳥大橋（中央径間720mの吊橋）の主塔基礎の施工には、海中の基礎設置箇所に、鋼管矢板で仮締切りし、中に中詰土砂で充填し、大規模な人工島を築島し、その後中心部を掘削することにより基礎を施工する方法がとられているが⁹⁾、この構造は、頂部に剛なフーチングのようなものを持たず、また、施工期間も長くなることから、船舶の衝突などの集中外力や、地震力など非軸対称外力に対する、仮設構造物としての安全性の検討も重要となっている。

この種の構造物は今後も施工が予想されるが、頂部の剛性によっては、局所的な変形や、継手部の剛性の評価に問題があり、より詳しい検討が必要と思われる。

著者らは、これまで、鋼管矢板をSt. Venantのねじりを考慮したはり要素で、継手の力の伝達を3方向の力学的バネで評価し、地盤は弾性床として、モデル化する方法で定式化し、種々の条件のものの解析を行ない検討を加えてきた。^{10)~13)} 本方法によれば、矢板を円形に建て込む井筒基礎構造において矢板の支持条件に何の制限も加えることなく、個々の矢板および全体としての構造の力学的挙動を明らかにすることができ、ただし、地盤反力係数は周方向には一定と仮定している。また、深さ方向に変化する場合は、その点で分割して要素法的な適用を行なうことも可能となる。

本論文は、このような点に着目し、円形に配置され、頂板コンクリートを持たない鋼管矢板構造物の解析を行ない、継手剛性や、頂部補強リングビームの効果について検討を加え、今後予想される大規模海中構造物の検討に役立てることを目的としている。

また、解析に当たっては、フーリエ定和分¹⁴⁾、積分変換¹⁵⁾を用いているが、この方法によれば、多本数の矢板からなる大規模鋼管矢板構造物の解析がかなり容易に行なえ、パソコンでの解析も可能であり、この種の構造物の解析に有効な方法である。

2. 基本微分差分方程式の誘導

図-1および2に示すように、鋼管矢板構造の座標を、構造の中心から半径方向を x ，円周方向を y ，軸方向を z とし、鋼管矢板の中心でのそれぞれの方向の変位を u ， v ， w およびねじり角を θ とする。

鋼管矢板は、St. Venantのねじりまでを考慮したはりとし、継手部は3方向に力学的バネを考え、矢板相互の力の伝達を行なうものとする。図-1の

ように r 番目の鋼管の中心の変位を u_r ， v_r ， θ_r ，

w_r とすれば、左右の継手部の変位 u_r^L ， u_r^L ， v_r^L ， v_r^L ， θ_r^L ， θ_r^L ， w_r^L ， w_r^L は、

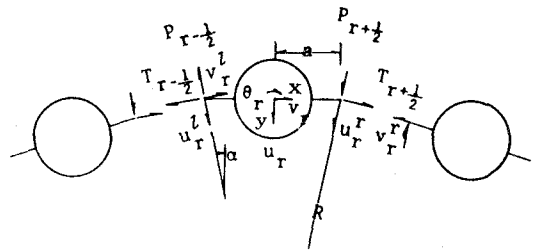


図-1 鋼管要素の節点変位および節点力

$$\begin{aligned}
u_r^r &= (u_r + a\theta_r) \cos\alpha - v_r \sin\alpha, & u_r^l &= (u_r - a\theta_r) \cos\alpha + v_r \sin\alpha, \\
v_r^r &= (u_r + a\theta_r) \sin\alpha + v_r \cos\alpha, & v_r^l &= (a\theta_r - u_r) \sin\alpha + v_r \cos\alpha, \\
w_r^r &= w_r - a\dot{v}_r, & w_r^l &= w_r + a\dot{v}_r
\end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 $\dot{f} = df/dz$ で a は鋼管の中心から継手までの長さである。また、継手部の節点力は、継手の x , y , z 方向のバネ定数を K_n, K_t, K_s として次式のように表わされる。

$$P_{r+\frac{1}{2}} = K_n (u_{r+1}^l - u_r^r), \quad T_{r+\frac{1}{2}} = K_t (v_{r+1}^l - v_r^r), \quad S_{r+\frac{1}{2}} = K_s (w_{r+1}^l - w_r^r) \quad (2)$$

はり要素の力のつり合いも図-1 および2を参考にして

$$EI \ddot{u}_r + K Du_r = N_r + \Delta P_{r-\frac{1}{2}} \cos\alpha + \nabla T_{r-\frac{1}{2}} \sin\alpha \quad (3)$$

$$EI \ddot{v}_r + K dv_r = T_r - \nabla P_{r-\frac{1}{2}} \sin\alpha + \Delta T_{r-\frac{1}{2}} \cos\alpha + a \nabla \dot{S}_{r-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$GJ \ddot{\theta}_r = -M_r - \nabla P_{r-\frac{1}{2}} a \cos\alpha - \Delta T_{r-\frac{1}{2}} a \sin\alpha \quad (5)$$

$$EA \ddot{w}_r = -P_r - \Delta S_{r-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

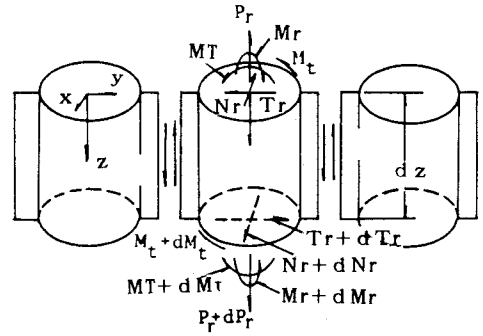


図-2 鋼管に作用する断面力

ここに、 K, K' は半径方向および接線方向の水平地盤反力係数、 $D = 2a$, d は鋼管の径、 N_r, T_r, M_r, P_r は鋼管矢板に作用する各々、構造全体としての半径方向力、接線方向力、半径方向曲げモーメントおよび軸方向力としての外力を示す。

また、式中の記号 Δ, ∇ は $\Delta f_r = f_{r+1} - f_r, \nabla f_r = f_{r+1} + f_r$ である。

3. 基本微分差分方程式のフーリエ定和分および有限フーリエ変換による解法

円形に配置された鋼管矢板構造の解析は、式(3)～(6)の連立微分差分方程式を解くことで求められるが、このような規則的な構造物の解析にはフーリエ定和分変換や有限フーリエ変換が有効であることがすでに明らかであるので、ここでは、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を用いて解く方法によって解析する。(詳しくは、文献14, 15または12参照)

まず、式(3)～(6)に式(1), (2)を代入し、式(3), (6)を $\cos(i\pi r/n)$ 、式(4), (5)を $\sin(i\pi r/n)$ を核とするフーリエ定和分変換を行なう。次に式(3)～(5)は $\sin(m\pi z/l)$ 、式(6)は $\cos(m\pi z/l)$ を核とし、 $0 \leq z \leq l$ で有限フーリエ変換を行なうと

$$\begin{aligned}
& [EI \gamma_m^4 + \{KD + K_n D_i \cos^2\alpha + K_t (4 - D_i) \sin^2\alpha\}] S_m R_i [u_r] \\
& - 2(K_n + K_t) S_i \sin\alpha \cos\alpha S_m S_i [v_r] + (K_n \cos^2\alpha - K_t \sin^2\alpha) D \cdot S_i S_m S_i [\theta_r] \\
& = S_m R_i [N_r] + EI \gamma_m^3 \{U_{0i} - (-1)^m U_{1i}\} - EI \gamma_m \{\ddot{U}_{0i} - (-1)^m \ddot{U}_{1i}\}
\end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
& -2(K_n + K_t)S_i \sin \alpha \cos \alpha S_m R_i [u_r] + \{EI\gamma_m^4 + K_s(4-D_i)a^2\gamma^2 + K_d + K_t D_i \cos^2 \alpha \\
& + K_n(4-D_i) \sin^2 \alpha\} S_m S_i [v_r] - \{K_n(4-D_i) - K_t D_i\} a \sin \alpha \cos \alpha S_m S_i [\theta_r] \\
& - K_s D_i S_i \gamma_m C_m R_i [w_r] = S_m S_i [T_r] + \{EI\gamma_m^3 + K_s(4-D_i)a^2\gamma_m\} \{V_{0i} \\
& - (-1)^m V_{1i}\} - EI\gamma_m \{\ddot{V}_{0i} - (-1)^m \ddot{V}_{1i}\} \quad (8)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (K_n \cos^2 \alpha - K_t \sin^2 \alpha) D_i S_i S_m R_i [u_r] - \{K_n(4-D_i) - K_t D_i\} a \sin \alpha \cos \alpha S_m S_i [v_r] \\
& + \{GJ\gamma_m^2 + K_n(4-D_i)a^2 \cos^2 \alpha + K_t D_i a^2 \sin^2 \alpha\} S_m S_i [\theta_r] \\
& = S_m S_i [M_r] + GJ\gamma_m \{\theta_{0i} - (-1)^m \theta_{1i}\} \quad (9)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -K_s D_i S_i \gamma_m S_m S_i [v_r] + (EA\gamma_m^2 + K_s D_i) C_m R_i [w_r] \\
& = C_m R_i [P_r] - K_s D_i S_i \{V_{0i} - (-1)^m V_{1i}\} - EA\{\dot{W}_{0i} - (-1)^m \dot{W}_{1i}\} \quad (10)
\end{aligned}$$

ただし、 $i=0, 2, 4, \dots, n$, $m=1, 2, 3, \dots$ $D_i = 2(1 - \cos \frac{i\pi}{n})$, $S_i = \sin \frac{i\pi}{n}$, $\gamma_m = \frac{m\pi}{l}$ であり

$$\begin{aligned}
R_i[f_r] &= \sum_{r=1}^n f_r \cos \frac{i\pi r}{n}, \quad S_i[f_r] = \sum_{r=1}^n f_r \sin \frac{i\pi r}{n} \\
C_m[f_r] &= \int_0^l f_r \cos \frac{m\pi z}{l} dz, \quad S_m[f_r] = \int_0^l f_r \sin \frac{m\pi z}{l} dz
\end{aligned}$$

式(10)で、 $m=0$ のときは、

$$K_s D_i C_0 R_i [w_r] = C_0 R_i [P_r] - K_s D_i \{V_{0i} - V_{1i}\} - EA(W_{0i} - W_{1i}) \quad (10)$$

上式中の、 U_{0i} , V_{0i} などは、それぞれ境界の物理量であり、次のようにおいたものである。

$$\begin{aligned}
U_{0i} &= R_i[u_r(0)], \quad U_{1i} = R_i[u_r(l)], \quad \ddot{U}_{0i} = R_i[\ddot{u}_r(0)], \quad \ddot{U}_{1i} = R_i[\ddot{u}_r(l)] \\
V_{0i} &= S_i[v_r(0)], \quad V_{1i} = S_i[v_r(l)], \quad \ddot{V}_{0i} = S_i[\ddot{v}_r(0)], \quad \ddot{V}_{1i} = S_i[\ddot{v}_r(l)] \\
\theta_{0i} &= S_i[\theta_r(0)], \quad \theta_{1i} = S_i[\theta_r(l)], \quad \dot{W}_{0i} = R_i[\dot{w}_r(0)], \quad \dot{W}_{1i} = R_i[\dot{w}_r(l)]
\end{aligned}$$

これらの未知定数は、境界条件により決定する定数である。

式(7)～(10)をマトリックス表示すれば、

$$A_{mi} \cdot \delta_{mi} = B_{mi} \cdot \delta_{bi} + P_{mi} \quad (11)$$

ここで、 A_{mi} , B_{mi} はそれぞれの係数マトリックスである。また、

$$\begin{aligned}
\delta_{mi} &= (S_m R_i [u_r] \quad S_m S_i [v_r] \quad S_m S_i [\theta_r] \quad C_m R_i [w_r])^T \\
\delta_{bi} &= (U_{0i} \quad \ddot{U}_{0i} \quad V_{0i} \quad \ddot{V}_{0i} \quad \theta_{0i} \quad \dot{W}_{0i} \quad U_{1i} \quad \ddot{U}_{1i} \quad V_{1i} \quad \ddot{V}_{1i} \quad \theta_{1i} \quad \dot{W}_{1i})^T \\
P_{mi} &= (S_m R_i [N_r] \quad S_m S_i [T_r] \quad S_m S_i [M_r] \quad C_m R_i [P_r])^T
\end{aligned}$$

式(11)を解くと

$$\delta_{mi} = A_{mi}^{-1} \cdot B_{mi} \cdot \delta_{bi} + A_{mi}^{-1} P_{mi} \quad (12)$$

となり、これを有限フーリエ逆変換およびフーリエ定和逆変換することにより、各変位を求めることができる。しかし、式(12)の有限フーリエ逆変換では、このままの形では、各変位の微分形を計算するとき、級数和が発散することがあるので、次のように変形して計算する必要がある。

$$\delta_{mi} = \{A_{mi}^{-1} \cdot B_{mi} - D_m\} \delta_{bi} + D_m \cdot \delta_{bi} + A_{mi}^{-1} \cdot P_{mi} \quad (13)$$

ただし、

$$D_m = \begin{bmatrix} e_1 & e_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_4 & e_6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e_1 & e_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_4 & e_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_5 \end{bmatrix}$$

$$e_1 = 1/\gamma_m, \quad e_2 = -1/\gamma_m^2, \quad e_3 = -1/\gamma_m^3, \quad e_i = -(-1)^m e_{i-3} \quad (i \geq 4)$$

式(13)は、有限フーリエ逆変換により、

$$\delta_i = \frac{2}{l} \sum_m c_m \{ \{A_{mi}^{-1} \cdot B_{mi} - D_m\} \delta_{bi} + A_{mi}^{-1} \cdot P_{mi} \} \left\{ \frac{\cos(m\pi/l)}{\sin(m\pi/l)} \right\} + F(z) \delta_{bi} \quad (14)$$

となり、右辺の第1項は、収束性の良いものとなる。

ここで、

$$F(z) = \begin{bmatrix} f_1 & f_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_4 & f_6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_1 & f_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_4 & f_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & f_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_5 \end{bmatrix}$$

$$f_1 = 1 - \xi, \quad f_2 = l \{ 1 - 3(1 - \xi)^2 \} / 6, \quad f_3 = -l^2 \xi (2 - 3\xi + \xi^2) / 6$$

$$f_4 = \xi, \quad f_5 = l (3\xi^2 - 1) / 6, \quad f_6 = l^2 \xi (\xi^2 - 1) / 6, \quad \xi = z/l$$

4. 境界条件

鋼管矢板構造の解析は、鋼管矢板を、地盤条件や構造条件の変化する部分で分割し、3. で述べた解を重ね合わせ、各境界条件を満足するように、未知定数を決定することにより行なわれる。

ここでは、一つの例として、鋼管の一部が、一様な地盤中に埋め込まれ矢板頂部をはりで補強した場合について考える。矢板頂部の補強ばりは、鋼管矢板構造断面方向の曲げと軸力のみを考慮するものとする。

補強ばりの断面2次モーメントおよび断面積を I_b , A_b として、補強ばりと鋼管は点で継がれ半径方向の力のみ伝達するものとする。したがって、補強ばりを折線で近似し、節点でのつり合い式を定積分変換すれば

$$(6 - D_i) S_i [\phi_r] + \frac{6}{\lambda} \cos \alpha \cdot S_i R_i [u_{br}] - \frac{3}{\lambda} \sin \alpha (4 - D_i) S_i [v_{br}] = 0 \quad (15)$$

$$- \frac{6 I_b}{A_b \lambda} \sin \alpha (4 - D_i) S_i [\phi_r] - \left(1 + \frac{12 I_b}{A_b \lambda^2} \right) \sin \alpha \cdot S_i R_i [u_{br}]$$

$$+ \{ D_i \cos^2 \alpha + \frac{12 I_b}{A_b \lambda^2} (4 - D_i) \sin^2 \alpha \} S_i [v_{br}] = 0 \quad (16)$$

$$- \frac{12 E I_b}{\lambda^2} S_i \cos \alpha S_i [\phi_r] - \left\{ \frac{12 E I_b}{\lambda^3} D_i \cos^2 \alpha + \frac{E A_b}{\lambda} \sin^2 \alpha (4 - D_i) \right\} R_i [u_{br}]$$

$$+ \left(\frac{12 E I_b}{\lambda^3} + \frac{E A_b}{\lambda} \right) S_i \sin^2 \alpha S_i [v_{br}] + R_i [N_r^0] = R_i [N_r] \quad (17)$$

ここで、 λ ：節点間の長さ、 u_{br} , v_{br} , ϕ_r ：補強ばりの半径方向、接線方向変位およびたわみ角、 N_r^0 ：r 節点に作用する集中外力、 N_r ：鋼管に作用する半径方向力。さらに、 $u_{br} = u_r(0)$ であるから式(15)、(16)から $S_i [\phi_r]$ と $S_i [v_{br}]$ を求め式(17)に代入して、 N_r を $R_i [u_{br}]$ と外力で与えることが出来る。

今、鋼管矢板構造の地盤上および地盤中の諸値をそれぞれ添字 1, 2 を付けて表わすものとすれば、この時の境界条件は、式 (10) のうしろを参照して、

i) 矢板頂部 ($z_1 = 0$) では

$$\begin{aligned} M_{u_1} = 0, \quad \ddot{U}_{0_1} = 0, \quad M_{v_1} = 0, \quad \ddot{V}_{0_1} = 0, \quad M_{t_1} = 0, \quad \dot{\theta}_{0_1} = 0, \\ Q_{u_1} = N_r, \quad Q_{v_1} = 0, \quad P = 0, \quad \dot{W}_{0_1} = 0 \end{aligned}$$

ii) 地盤面 ($z_1 = l_1, z_2 = 0$) では変形が全て連続すものとし、

$$\begin{aligned} U_{1_1} = U_{0_2}, \quad \dot{U}_{1_1} = \dot{U}_{0_2}, \quad \ddot{U}_{1_1} = \ddot{U}_{0_2}, \quad \ddot{U}_{1_1} = \ddot{U}_{0_2}, \quad V_{1_1} = V_{0_2}, \quad \dot{V}_{1_1} = \dot{V}_{0_2}, \\ \ddot{V}_{1_1} = \ddot{V}_{0_2}, \quad \ddot{V}_{1_1} = \ddot{V}_{0_2}, \quad \theta_{1_1} = \theta_{0_2}, \quad \dot{\theta}_{1_1} = \dot{\theta}_{0_2}, \quad W_{1_1} = W_{0_2}, \quad \dot{W}_{1_1} = \dot{W}_{0_2} \end{aligned}$$

iii) 矢板先端部 ($z_2 = l_2$) では、固定されているとすれば、

$$U_{1_2} = \dot{U}_{1_2} = V_{1_2} = \dot{V}_{1_2} = \dot{\theta}_{1_2} = W_{1_2} = 0$$

となり、これらの条件から境界未知量が決定され、解析することが出来る。

5. 数値解析例

数値解析例として、室蘭港に建設中の白鳥大橋主塔基礎部仮締切人工島鋼管矢板円筒形取り上げる。構造の概略を図-3に示す。

計算に用いる数値は、 $l_1 = 16.0\text{m}$, $l_2 = 19.0\text{m}$ 、鋼管の外径 100.0cm 、肉厚 1.4cm 、鋼管中心から継手までの長さ $a = 62\text{cm}$ 、鋼管本数 $n = 168$ 本、地盤の水平地盤反力係数 $k_2 = k_2' = 1.21\text{Kg/cm}^2$ とし、継手の剛性の効果をみるため、継手のバネ定数は $K_t = 10\text{Kn}$ で (a) $K_n = 100.0\text{Kg/cm}^2$ として K_s を変化、(b) $K_s = 0$ とし K_n を変化させた場合について、補強ばりの剛性を次の三ケースとし解析を行なった。

i) Case-I $Ab = Ib = 0.0$

ii) Case-II $Ab = 729.6\text{cm}^2$,
 $Ib = 1.174 \times 10^6\text{cm}^4$

iii) Case-III $Ab = 10^6\text{cm}^2$,
 $Ib = 10^{11}\text{cm}^4$

継手のバネ定数の評価については、各種の実験や解析により決定すべきことであり、継手の構造、施工条件などにより変化するが、ここでは、その効果を検討するため上記のように仮定した。

また、荷重条件として次の二つの場合を考えた。

1) 矢板頂部に集中外力が作用する場合
施工中の船舶などの衝突を考え、単

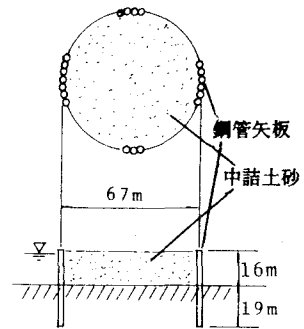


図-3 解析モデル

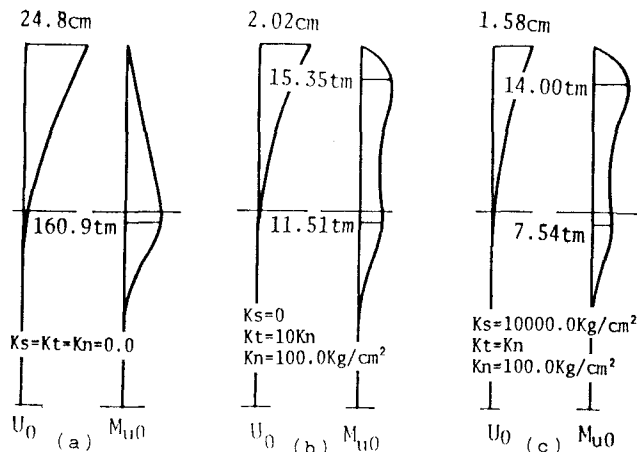


図-4 中心鋼管の変位と曲げモーメント分布 (Case-I)

位荷重(10t)が頂部に作用するものとする。

解析結果を図-4～8に示す。図4、5は集中外力作用点の鋼管を中心鋼管として、その変位分布と曲げモーメント分布を示したものである。図-4はCase-Iのものから、 $K_n=K_t=K_s=0$ すなわち単杭の場合(a)、と $K_n=100.0\text{Kg/cm}^2$ 、 $K_t=10\text{Kn}$ で $K_s=0$ (b)と $K_s=10000.0\text{Kg/cm}^2$ (c)の場合を示したものであり、図-5は、同じ条件でリングビーム($I_b=1.174 \times 10^6\text{cm}^4$, $A_b=729.6\text{cm}^2$, Case-II)

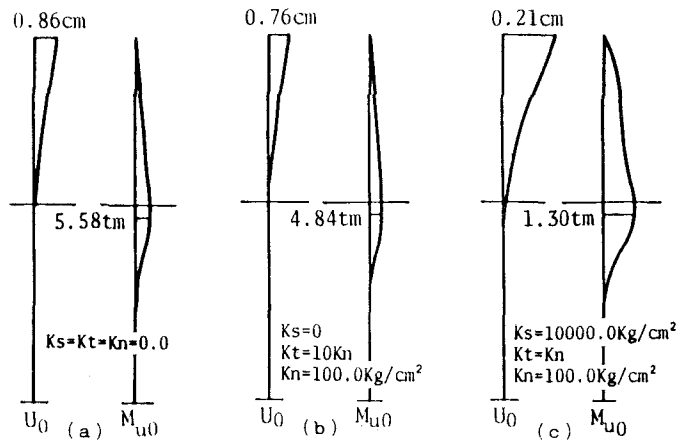


図-5 中心鋼管の変位と曲げモーメント分布 (Case-II)

を取付けた場合のものである。変位、曲げモーメントとも大きさがかなり異なるので、図の縮尺は一定でないが、図-4からリングビームがない場合には、集中外力に対して、継手の剛性の影響、特に半径方向および円周方向の剛性によって大きく変化すること、最大曲げモーメントの生ずる位置が上部に移ることが明らかであり、図-5からリングビームの効果が非常に大きいことがわかる。図-6～8に、各Caseに対して、 $K_s=0$ 、 $K_t=10\text{Kn}$ として、 K_n を変化させた場合と、 $K_t=10\text{Kn}$ 、 $K_n=100.0\text{Kg/cm}^2$ として K_s を変化させた場合の最大変位と最大曲げモーメントの値を、横軸に K_n および K_s の常用対数をとって示した。

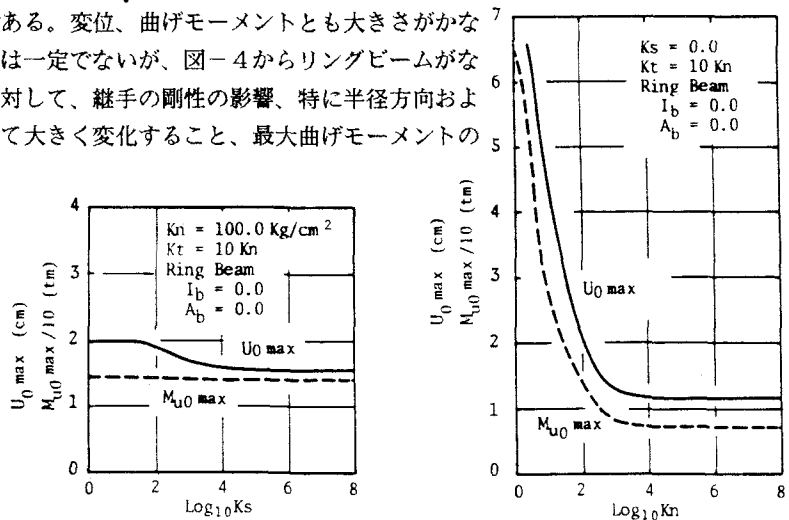


図-6 バネ定数と変位および曲げモーメントの関係 (Case-I)

リングビームがない場合(図-6)には、半径方向と円周方向の継手バネの剛性が大きく影響し、この計算例では、 $K_n=1000.0\text{Kg/cm}^2$ 位でほぼ一定になる。また、継手の軸方向のバネ剛性は、半径方向バネの存在に対してあまり影響しない。特に、曲げモーメントは K_s の変化に対して

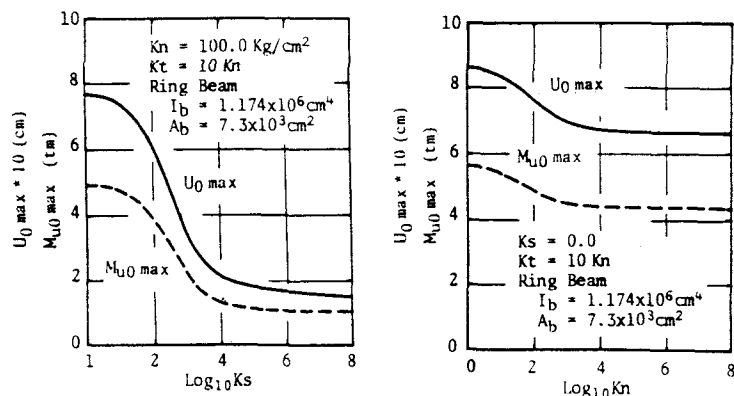


図-7 バネ定数と変位および曲げモーメントの関係 (Case-II)

ほぼ一定である。

リングビームの剛性が無限大に近い場合(図-8)では、 $K_s = 0$ であれば K_n の値に無関係であり、 K_n が存在すれば K_s の影響は大きい。

$K_n = 100.0 \text{ Kg/cm}^2$ で

は、 $K_s = 1000.0 \text{ Kg/cm}^2$ 位で変位、曲げモーメントともほとんど零に近い。

実際のリングビームの補強では、 $K_s = 0$ では $K_n = 1000.0 \text{ Kg/cm}^2$ 位で変位、曲げモーメントとも一定値となり、 $K_n = 100.0 \text{ Kg/cm}^2$ では $K_s = 10000.0 \text{ Kg/cm}^2$ で、ほぼ一定値となっている。(図-7)

以上のことから、全体としては、リ(2) $K_s = 0$ 、 $K_t = 10 \text{ Kn}$ 、 $K_n = 100.0 \text{ Kg/cm}^2$ ングビームの剛性が、集中外力に大きな役割を持つことが明らかである。

2) 一方向等分布力が作用する場合

地震によって築島の中詰土砂が慣性力として鋼管に作用する場合、土は普通引張力は作用しないとするが、もともと本構造では、土圧が作用しているので、土圧が減少するという考え方で、土の引張力を考慮し、図-9のように一方向の力が周方向にcosine分布で軸方向には等分布するものとする。(水平震度0.1とする)

1)の場合と同様に、

各ケースの計算結果から、図-10には、最大分布荷重が作用する鋼管を中心鋼管として、その変位および曲げモーメントの軸方向分布を継手のバネ定数の3種類の組合せについて示し、図-11~13には、やはり、各ケースに対して、継手のバネ定数を変化させた結果を示した。

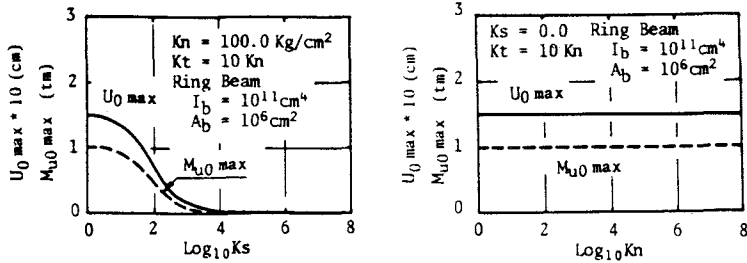


図-8 バネ定数と変位および曲げモーメントの関係 (Case-III)

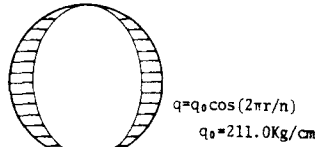


図-9 一方向分布力

(1) $K_s = K_t = K_n = 0.0$

(2) $K_s = 0$, $K_t = 10 \text{ Kn}$, $K_n = 100.0 \text{ Kg/cm}^2$

(3) $K_s = 10000.0 \text{ Kg/cm}^2$, $K_t = K_n$, $K_n = 100.0 \text{ Kg/cm}^2$

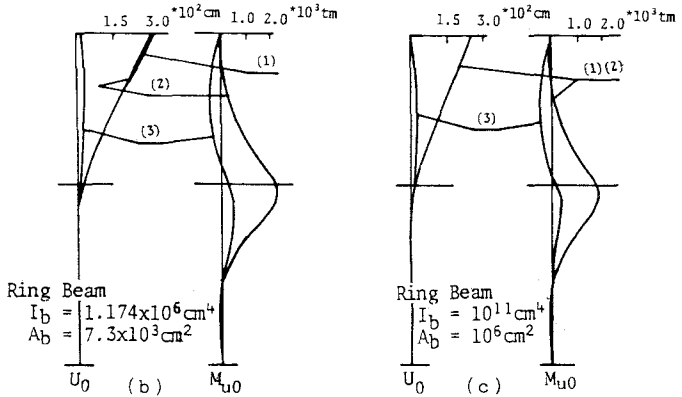


図-10 中心鋼管の変位曲げモーメント分布 (一方向分布力)

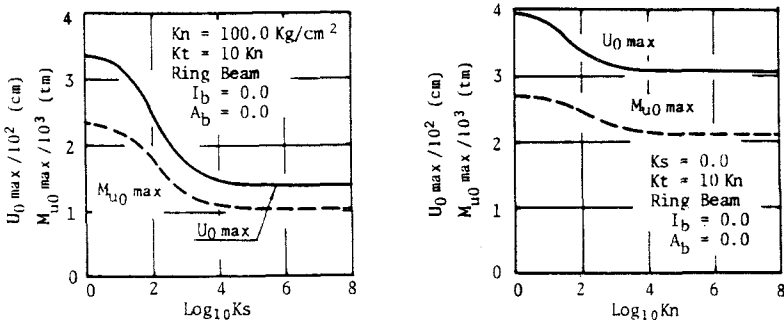


図-11 バネ定数と変位および曲げモーメントの関係 (Case-I)

このような外力に対しては、補強リングビームがない場合（図-10（a））は、変位、曲げモーメントとも非常に大きく、大変形の範囲になり、このような解析は実際的ではないが比較の意味で示した。

また、リングビームがある場合（図-10（b），（c））でも、軸方向バネがないときは、変位、曲げモーメントとも大きく、リングビームのない場合と比べ、それほど減少していないが、軸方向バネがあることにより、変位、応力とも非常に減少しており、変位で1/100、曲げモーメントでも1/5程度になっている。

以上のことから、このような非軸対称外力に対しては、補強リングビームとともに軸方向継手の剛性の影響が大きいことを示しているが、このことは、図

-11～13により一層明らかである。すなわち、リングビームがない場合（図-11）には、 K_n 、 K_s をかなり大きくしても変位、曲げモーメントともそれほど減少せず、リングビームの存在とともに、軸方向の継手バネの効果が大きいことが示されている。（図-12，13）

6. まとめ

鋼管矢板円筒形構造の解析を行なうため、鋼管をはり要素とし、継手をバネ結合として力の伝達を行なうとして定式化を行ない、有限フーリエ変換とフーリエ定和分変換を用いる解法を示し、大規模鋼管矢板井筒基礎構造の解析例を示した。

数値計算例はあまり多くないが、ここに示したような大本数からなる大型構造物の解析結果から次のことが明らかになった。

- 1) 集中外力に対しては、個々の鋼管の変位、曲げモーメントの均等化のために、リングビームの補強は、非常に効果がある。
- 2) 集中外力に対しては、リングビームがない場合でも、継手のバネ剛性の増加によって、変位、曲げモーメントはかなり減少する。
- 3) 地震力のような一方向分布力に対しては、リングビームでの補強にはあまり効果はなく、軸方向継手バネ剛性の影響が大きい。
- 4) いずれの場合でも、リングビームでの補強とともに軸方向継手バネの剛性を増加することにより、外力

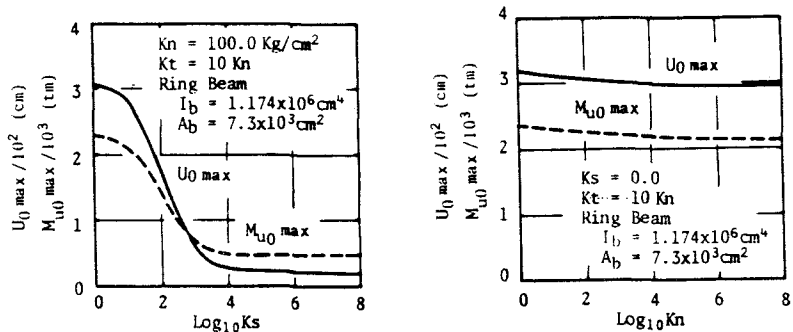


図-12 バネ定数と変位および曲げモーメントの関係 (Case-II)

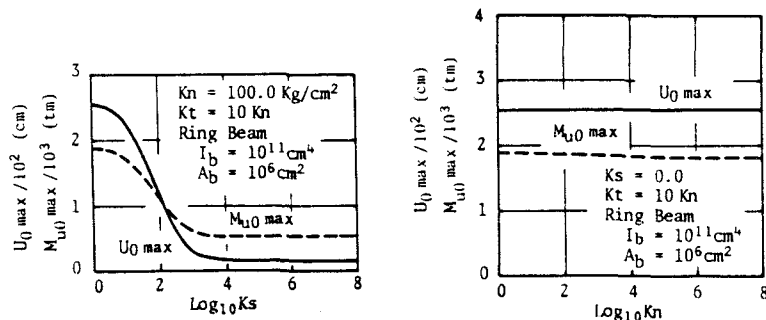


図-13 バネ定数と変位および曲げモーメントの関係 (Case-III)

に対する抵抗力は急激に増加する。

今後、さらに鋼管矢板円筒形構造の規模を変え、継手のバネ定数やリングビームの剛性の効果を検討するとともに、動的な解析を行なう予定である。

尚、本論文の作成に当たり、室蘭工業大学助教授 岸 徳光氏および北海道開発局土木試験所構造研究室長 吉田紘一氏から、いろいろ貴重な御意見をいただきましたことに感謝申し上げます。

また、数値計算に用いました資料は、北海道開発局室蘭開発建設部室蘭道路事務所からいただきましたことを付記し、関係各位に厚く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 藤田圭一, 山口靖紀, 木寺謙爾, 島岡久寿, 小間憲彦: 鋼管矢板井筒基礎の施工および水平載荷試験、土と基礎, Vol. 21, No. 12, pp. 9-15, 1973.
- 2) 笹戸松二, 江見 晋, 山崎真喜雄, 前原 博: 矢板式基礎の構造特性に関する模型実験(上), (下)、橋梁と基礎, Vol. 10, No. 5, pp. 18-24およびVol. 10, No. 6, pp. 27-33, 1976.
- 3) 手塚茂樹, 根本 洋, 清水文夫: 鋼管矢板井筒基礎の水平載荷試験(上), (下)、橋梁と基礎, Vol. 12, No. 7, pp. 29-33およびVol. 12, No. 8, pp. 43-46, 1978.
- 4) 木寺謙爾, 長岡弘明, 島岡久寿, 小間憲彦: 鋼管矢板井筒静的水平抵抗の有限要素解析、土木学会論文報告集, 第259号, pp. 71-81, 1977.
- 5) 山川純雄, 後藤芳顕: 水平鋼管矢板構造の継手による荷重分配作用の解析、土木学会論文報告集, 第301号, pp. 1-12, 1980.
- 6) 駒田敬一, 岡原美知夫, 高尾孝二, 倉方慶夫: 円筒形鋼管矢板井筒基礎の解析、土木学会論文報告集, 第316号, pp. 65-76, 1981.
- 7) 山本 強, 大植英亮, 宗澤勝郎, 篠田 誠: 鋼管矢板井筒の現場試験結果と設計について、土木学会論文報告集, 第334号, pp. 123-134, 1983.
- 8) 日本道路協会: 鋼管矢板基礎設計指針・同解説、1984.
- 9) 土木学会北海道支部: 白鳥大橋下部構造に関する技術検討委員会報告書、1986-3.
- 10) 澤田知之, 能町純雄: Ring-Beam で補強された軸対称荷重を受ける鋼管Well構造の継手係数について、苫小牧高専紀要, 第13号, pp. 95-106, 1978.
- 11) 澤田知之: 継手のバネ効果と井筒型基礎構造の水平抵抗について、土木学会北海道支部論文報告集, 第36号, pp. 45-50, 1980.
- 12) 澤田知之, 能町純雄: 継手のヒンジ効果を考慮した井筒基礎構造の応力解析について、苫小牧高専紀要第15号, pp. 75-94, 1980.
- 13) 澤田知之, 能町純雄: 井筒型基礎構造における継手効果に関する実験的研究, 苫小牧高専紀要, 第16号, pp. 109-120, 1981.
- 14) Nomachi S.G. and K.G. Matsuoka: Applications of Finite Fourier Integration Transforms for Structural Mechanics, Proc. of 20th Japan National Congress for Applied Mechanics, pp. 117-123, 1970.
- 15) Nomachi S.: On one Method for Solving Three-Dimensional Stress Problems by Means of Finite Fourier Transforms, Mem. of Muroran Inst. of Tech., Vol. 3, No. 1, pp. 167-191, 1958.

(1987年10月16日)