

I-29 鋼管矢板人工島の動的解析

室蘭工業大学	正員	松岡 健一
北海道開発局	正員	大沼 秀次
室蘭工業大学	正員	岸 徳光
(株)メイケンシニアリング	正員	小針 憲司
日本大学	正員	能町 純雄

1. はじめに

鋼管矢板人工島は、方形、小判形または円筒形状に鋼管矢板等を打設し、土砂などを中詰めにした構造物であり、地震力などの水平力に対する安全性の検討が必要となる。

この種の構造物が矢板と中詰め合成構造であることから、中詰め自体も外力に対してある程度抵抗すると同時に、中詰めの質量は大きな慣性力を持ち矢板に対して外力を与えることになり大きな影響を及ぼすと考えられる。ここでは、地震力をうける鋼管矢板人工島の動的応力問題を、中詰をせん断弾性体として鋼管矢板との連成を考慮しながら解析するものである。

2. 中詰の振動方程式

鋼管矢板人工島構造を図-1のようにモデル化する。ここでは、円筒形の構造を考え、中詰部は水平変位とせん断抵抗のみを考慮するものとし、水平断面内では変位は一様分布するものとする。また外力として地震力を考えるものとし、地盤の入力地震波を u_s とすれば、中詰めの水平変位 u は、入力地震波と相対変位 u_0 の和として

$$u = u_0 + u_s \quad (1)$$

となり、中詰の振動方程式は、微小部分のつり合いから

$$\begin{aligned} & \left(\tau_z + \frac{\partial \tau_z}{\partial z} dz \right) \pi R^2 - \tau_z \cdot \pi R^2 + \int_0^{2\pi} p R \cos \theta d\theta \cdot dz \\ & - \rho \cdot \pi R^2 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} dz = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 ρ は中詰めの密度、 p は鋼管矢板との接触面の圧力を表わし、周方向 cosine 分布とすれば

$$p = p_0 \cos \theta \quad (3)$$

と表わされるので、上式は

$$\frac{\partial \tau_z}{\partial z} + \frac{p_0}{R} - \rho \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} (u_0 + u_s) = G \frac{\partial^2 u_0}{\partial z^2} + \frac{p_0}{R} - \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} (u_0 + u_s) = 0 \quad (4)$$

又は、減衰を考慮して

$$G \frac{\partial^2 u_0}{\partial z^2} + \xi \frac{\partial^3 u_0}{\partial t \partial z^2} + \frac{p_0}{R} - \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} (u_0 + u_s) = 0 \quad (5)$$

ξ : 減衰抵抗係数

上式は、築島中詰部の振動方程式であるが、築島構造全体としては、鋼管矢板の質量を無視し、埋込み部は鋼管は弾性支持されているものとすれば、上式と静的解析における鋼管矢板の基礎方程式を組合せて解析することができる。

3. 鋼管矢板の基礎方程式¹⁾

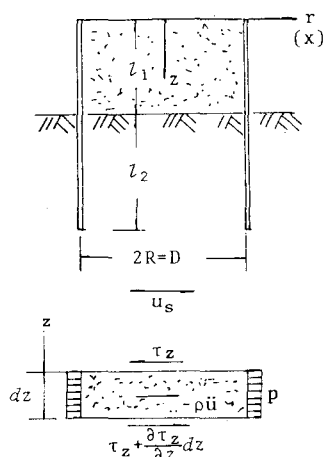


図-1 鋼管矢板人工島

図-2、3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 $u_r^L, u_r^Z, v_r^L, v_r^Z, \theta_r^L, \theta_r^Z, w_r^L, w_r^Z$ は、

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

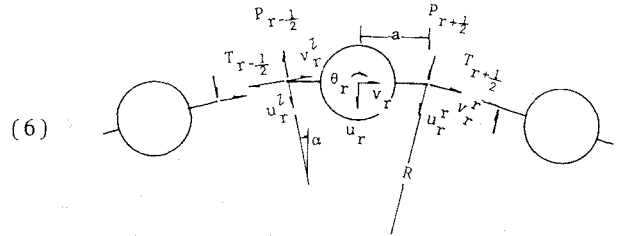


図-2 鋼管要素の節点変位及び節点力

ただし、 $f = df/dz$ 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Kn、Kt、Ksとして次式の様に表される。

$$P_{r+1/2} = K_n(u_{r+1}^L - u_r^r), \quad T_{r+1/2} = K_t(v_{r+1}^L - v_r^r), \quad S_{r+1/2} = K_s(w_{r+1}^L - w_r^r). \quad (7)$$

はり要素の力のつり合いは図-3を参考にして

$$EI\ddot{u}_r + KDu_r = N_r + \Delta P_{r-1/2} \cos\alpha + \nabla T_{r-1/2} \sin\alpha, \quad (8)$$

$$EI\ddot{v}_r + Kdv_r = T_r - \nabla P_{r-1/2} \sin\alpha + \Delta T_{r-1/2} \cos\alpha + a\dot{v}_r, \quad (9)$$

$$GJ\ddot{\theta}_r = -M_r - \nabla P_{r-1/2} a \cos\alpha - \Delta T_{r-1/2} a \sin\alpha, \quad (10)$$

$$EA\ddot{w}_r = -P_r - \Delta S_{r-1/2}. \quad (11)$$

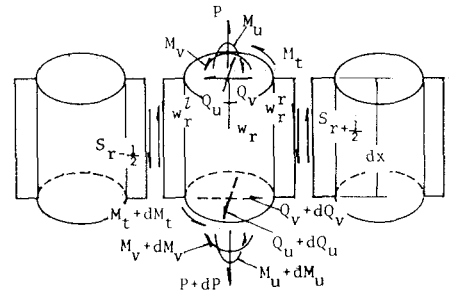


図-3 鋼管に作用する断面力

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外力である。

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。

4. 入力地震波を受ける鋼管矢板中詰構造の解析

ここで入力地震波を調和波動と考えることとすれば

$$u_s = \tilde{u}_s \sin \omega t \quad (12)$$

とおけるのでその他の変位、断面力も

$$f = \tilde{f} \sin \omega t \quad (13)$$

とおくことができる。

鋼管部分についても、水平振動を考えれば

$$\tilde{u}_r = \tilde{u}_1 \cos \frac{2\pi r}{n}, \tilde{v}_r = \tilde{v}_1 \sin \frac{2\pi r}{n}, \tilde{\theta}_r = \tilde{\theta}_1 \sin \frac{2\pi r}{n}, \tilde{w}_r = \tilde{w}_1 \cos \frac{2\pi r}{n}, \tilde{N}_r = \tilde{p}_1 \cos \frac{2\pi r}{n} \quad (14)$$

と表わせる。

ここで鋼管と中詰め境界では、接触応力と変位の間に

$$\tilde{p}_0 = -K_b(\tilde{u}_0 + \tilde{u}_1), \quad \tilde{p}_1 = 2\pi R \tilde{p}_0 / n \quad (15)$$

の関係があるものとする。ここで、 K_b は一種のバネ定数であり、 u_0 は中詰め x 方向変位、 u_1 は鋼管矢板 ($r=0$) の半径方向変位で向きは中心に向う変位を正としている。

また、接触面の応力は、鋼管に対しては、半径方向力しか伝達しないものとする。

減衰を無視して、式 (6)、(7) および (12) ~ (15) を考慮し、式 (2) および (8) ~ (11) を、 z についてフーリエ変換すれば

$$\begin{aligned} & \left\{ G \left(\frac{m\pi}{L} \right)^2 - \rho\omega^2 \right\} \cdot RS_m[\tilde{u}_0] - GR \left(\frac{m\pi}{L} \right) \{ \tilde{u}_0(0) - (-1)^m \tilde{u}_0(L) \} \\ & - \rho\omega^2 \frac{LR}{m\pi} \{ 1 - (-1)^m \} \tilde{u}_S + K_b (S_m[\tilde{u}_0] + S_m[\tilde{u}_1]) = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & \{ EI \left(\frac{m\pi}{L} \right)^4 + \{ KD + K_n D_2 \cos^2 \alpha + K_t (4 - D_2) \sin^2 \alpha \} \} S_m[\tilde{u}_1] + \{ (K_n \cos^2 \alpha \\ & + K_t \sin^2 \alpha) 2a \sin \frac{2\pi}{n} \} S_m[\tilde{\theta}_1] - 2(K_n + K_t) \sin \alpha \cos \alpha \cdot \sin \frac{2\pi}{n} S_m[\tilde{v}_1] \\ & = -\frac{2\pi RK_b}{n} (S_m[\tilde{u}_0] + S_m[\tilde{u}_1]) + EI \left(\frac{m\pi}{L} \right) \{ (-1)^m \tilde{u}_1(L) - \tilde{u}_1(0) \} \\ & + EI \left(\frac{m\pi}{L} \right)^3 \{ \tilde{u}_1(0) - (-1)^m \tilde{u}_1(L) \} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & -2(K_n + K_t) \sin \alpha \cos \alpha \cdot \sin \frac{2\pi}{n} S_m[\tilde{u}_1] - \{ K_n (4 - D_2) - K_t D_2 \} \cdot a \sin \alpha \cos \alpha S_m[\tilde{\theta}_1] \\ & + EI \left(\frac{m\pi}{L} \right)^4 + K_n D + K_n (4 - D_2) \sin^2 \alpha + K_t D_2 \cos^2 \alpha + K_s (4 - D_2) a^2 \left(\frac{m\pi}{L} \right)^2 \} S_m[\tilde{v}_1] \\ & - K_s \cdot 2a \sin \frac{2\pi}{n} \left(\frac{m\pi}{L} \right) C_m[\tilde{w}_1] = EI \left(\frac{m\pi}{L} \right) \{ (-1)^m \tilde{v}_1(L) - \tilde{v}_1(0) \} + EI \left(\frac{m\pi}{L} \right)^3 \{ \tilde{v}_1(0) \\ & - (-1)^m \tilde{v}_1(L) \} - K_s (4 - D_2) a^2 \left(\frac{m\pi}{L} \right) \{ (-1)^m \tilde{v}_1(L) - \tilde{v}_1(0) \} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} & (K_n \cos^2 \alpha - K_t \sin^2 \alpha) 2a \sin \frac{2\pi}{n} S_m[\tilde{u}_1] + \{ GJ \left(\frac{m\pi}{L} \right)^2 + K_n (4 - D_2) a^2 \cos^2 \alpha \\ & + K_t D_2 a^2 \sin^2 \alpha \} S_m[\tilde{\theta}_1] - \{ K_n (4 - D_2) - K_t D_2 \} a \sin \alpha \cos \alpha S_m[\tilde{v}_1] \\ & = GJ \left(\frac{m\pi}{L} \right) \{ \tilde{\theta}_1(0) - (-1)^m \tilde{\theta}_1(L) \} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & -K_s 2a \sin \frac{2\pi}{n} \left(\frac{m\pi}{L} \right) S_m[\tilde{v}_1] + \{ EA \left(\frac{m\pi}{L} \right)^2 + K_s D_2 \} C_m[\tilde{w}_1] \\ & = EA \{ (-1)^m \tilde{w}(L) - \tilde{w}(0) \} + 2a \sin \frac{2\pi}{n} \cdot K_s \{ (-1)^m \tilde{v}_1(L) - \tilde{v}_1(0) \} \end{aligned} \quad (20)$$

ただし、 $m=1, 2, \dots$ 、 $D_2 = 2(1 - \cos \frac{2\pi}{n})$ であり、また式中の $u_0(0)$, $u_0(L)$, $u_1(0)$, ... などは、それぞれの境界の変位などで、境界条件により決定する定数である。

5. 境界条件

ここで、対象とする鋼管矢板中詰構造の動的解析は、鋼管矢板と中詰めを、地盤条件や構造条件の変化する部分で分割し、2. および 3. で述べた解を重ね合せ、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、鋼管は地盤中に固定さ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ながれ半径方向の力のみ伝達するものとする。また、補強ばりの半径方向、接線方向変位、たわみ角および鋼管に作用する半径方向力を、 u_{br} , v_{br} , ϕ_r , N_r として、これについても次のように仮定する。

$$u_{br}=u_{b1}\cos\frac{2\pi r}{n}, v_{br}=v_{b1}\sin\frac{2\pi r}{n}, \phi_r=\phi_1\sin\frac{2\pi r}{n}, N_r=N_1\cos\frac{2\pi r}{n} \quad (21)$$

補強ばりを折線で近似し、節点でのつり合い式を導けば、

$$(6-D_2)\phi_1+\frac{6}{\lambda}\cos\alpha\sin\frac{2\pi}{n}u_{b1}-\frac{3}{\lambda}\sin\alpha(4-D_2)v_{b1}=0 \quad (22)$$

$$\begin{aligned} & -\frac{6I_b}{A_b\lambda}\sin\alpha(4-D_2)\phi_1-(1+\frac{12I_b}{A_b\lambda^2})\sin\alpha\cdot\sin\frac{2\pi}{n}u_{b1} \\ & +\{D_2\cos^2\alpha+\frac{12I_b}{A_b}\frac{1}{2}(4-D_2)\sin^2\alpha\}v_{b1}=0 \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} & -\frac{12EI_b}{\lambda^2}\sin\frac{2\pi}{n}\cos\alpha\phi_1-\{\frac{12EI_b}{\lambda^3}D_2\cos^2\alpha+\frac{EA_b}{\lambda}\sin^2\alpha(4-D_2)\}u_{b1} \\ & +(\frac{12EI_b}{\lambda^3}+\frac{EA_b}{\lambda})\sin\frac{2\pi}{n}\sin^2\alpha v_{b1}=N_1 \end{aligned} \quad (24)$$

ここで、 λ ：節点間の長さ、また $u_{b1}=u_1(0)$ であるから、式(22)、(23)から ϕ_1 と v_{b1} を求め式(24)に代入して、 N_1 を u_{b1} と外力で与えることが出来る。

この時の境界条件は、

1) 鋼管矢板に対して、

i) 矢板頂部 ($z=0$) では、

$$M_u(0)=0 \therefore \ddot{u}_1(0)=0, \quad M_v(0)=0 \therefore \ddot{v}_1(0)=0, \quad M_t(0)=0 \therefore \dot{\theta}_1(0)=0$$

$$Q_u(0)=N_r, \quad Q_v(0)=0, \quad P(0)=0 \therefore \dot{w}_1(0)=0$$

ii) 矢板先端部 ($z=l$) では、固定されているとすれば、

$$u_1(l)=v_1(l)=u_1(l)=v_1(l)=\dot{\theta}_1(l)=w_1(l)=0$$

となる。

2) 中詰めに対して、

i) 中詰め天端 ($z=0$) では、

$$\tau_z(0)=0$$

ii) 中詰め底部 ($z=l$) では、

a) 底部で地盤に連結されているとすれば $u_0(l)=0$

b) 底部にせん断力がないとすれば $\tau_z(l)=0$

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。

6. 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構造を取り上げる。構造の概略は図-4に示す通りであるが、ここでは、地盤から下は固定されているものとする。また、中詰めについては底部で相対変位がない場合 (Case-I) とせん断断力がない場合 (Case-II) を考慮した。従って、計算に用いる数値は、 $l=16.0$ m, 鋼管の外径 100.0cm, 肉厚 1.4cm, 鋼管の中心から継手までの長さ (a) は 62.24cm, $E=2.1\times 10^4$ Kg/cm² 鋼管本数 $n=168$ 本とし、中詰めの密度 $r=1.8$ g/cm³、せん断弾性定数 $G=2000.0$ Kg/cm²、 Kb は中詰めが軸対称外圧をうける時の変位を考慮して、 $Kb=2(1+\nu)G/(1-\nu)R=300.0$ Kg/cm² とした。また、継手のバネ定数は、 $Kt=10$ Kn=100.0 kg/cm² として、 Ks を変化させた場合について、補強ばりの剛性を $Ab=729.6$

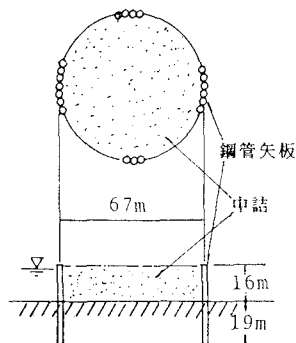


図-4 計算モデル

cm² , $I_b = 1.174 \times 10^4 \text{ cm}^4$ として補強ばりを考慮する場合としない場合などについて解析を行なったがあまり大きな差はないので、以下には、 $K_s = 10000.0 \text{ Kg/cm}^2$ で、補強ばりを考慮した場合の結果を示す。

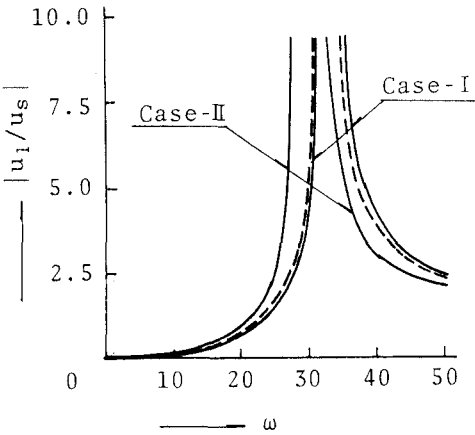


図-5 変位の応答倍率

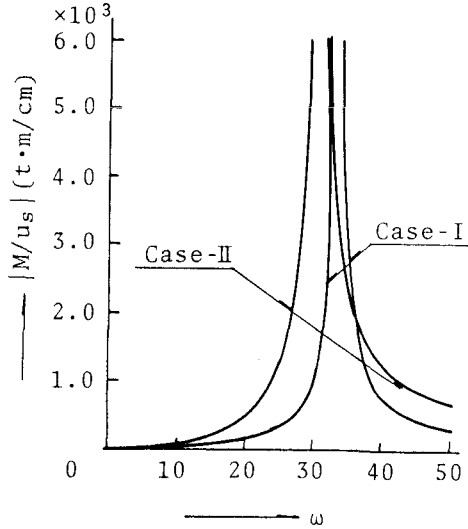


図-6 鋼管の曲げモーメントの応答

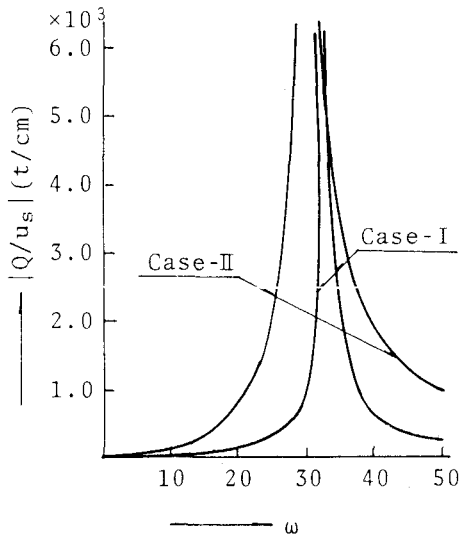


図-7 鋼管のせん断力の応答

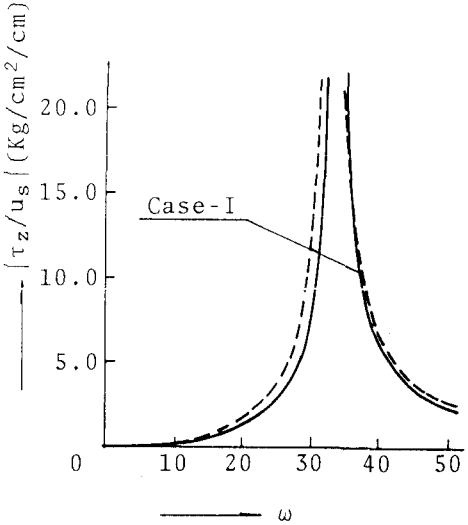


図-8 中詰めのせん断応力の応答

図-5は、変位の応答倍率を示したものであるが、横軸には入力波の角速度を、縦軸には鋼管頂部最大水平変位と入力波の振幅の比の絶対値を示している。図中の破線はCase-Iで中詰めのみの場合の結果である。図から明かなように、応答倍率はCase-Iの場合は、中詰めのみの場合とあまり大きな差がなく、鋼管の効果があまり現われていないことがわかる。Case-IIの場合は、やはりCase-Iに比べて大きな応答倍率となり、 $\omega = 15 \text{ rad/sec}$ (周期 $T = 0.42 \text{ sec}$) で約30%大きくなっている。また、固有円振動数も小さくなっており危険側へ変化している。

図-6と7には鋼管の最大曲げモーメントと最大せん断力の変化を示した。図-5と同様に Case-IIの方

が Case-I より大きな値となっており、 $\omega = 15\text{rad/sec}$ では、それぞれ約 3.2 倍および 5.5 倍大きくなっている。

中詰め最大のせん断応力の値を図-8に示した。破線は中詰めのみの場合、実線は Case-I のものである。この場合も鋼管の効果はあまり現われていない。

図-9~12に $\omega = 15\text{rad/sec}$ のときの中心鋼管 ($r=0$) の変位、曲げモーメント、せん断力分布と、中詰めのせん断応力分布を示した。

図-9の変位は、Case-I、Case-II と中詰めのみの場合を破線で示した。

当然 Case-II の変位は大きくなるが、Case-I と中詰めのみの場合の変位はそれ程変らない。

図-10, 11ではいずれの場合も鋼管埋込み部で大きな値となり、Case-II の方が 3.2~5.5 倍大きな値となっている。

中詰めのせん断応力は、Case-I の場合底部付近で多少変化するものの、中詰めのみの場合と比べやはり大差ない。

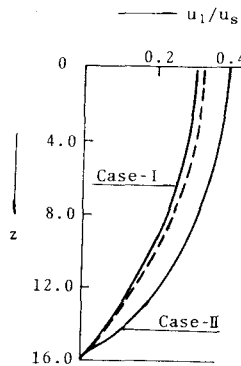


図-9 変位分布

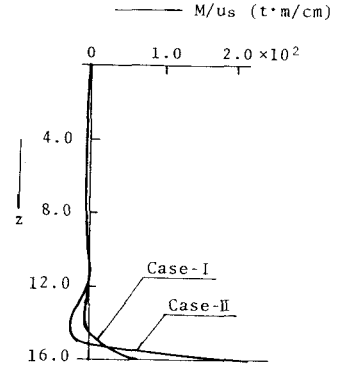


図-10 曲げモーメント分布

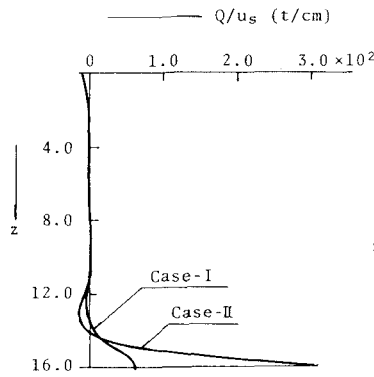


図-11 せん断力分布

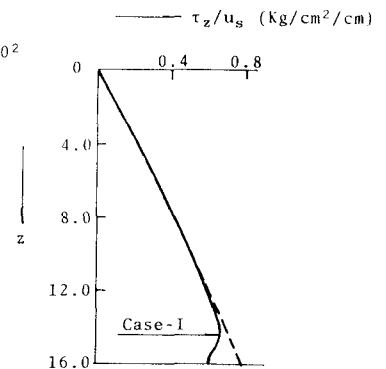


図-12 せん断応力分布

7. まとめ

鋼管矢板人工島の動的解析を、鋼管は棒要素を継手部でバネ結合とする方法で定式化された解を用い、中詰めをせん断ばりとし、中詰めと鋼管の接触面では接触応力を考え鋼管の質量は無視する方法で解析した。以上の仮定はかなり大胆な仮定であるが、概略の値を得る方法として解析してみた。

解析の結果、ここで用いた数値計算例では、地震動の角速度があまり大きくない範囲では、中詰め、鋼管とも十分安全であることが示された。なお詳細な検討はより厳密な仮定のもとで解析する必要があると思われるが、それについては今後の課題としたい。

《参考文献》

- 1) 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、苫小牧工業高等専門学校紀要, 第15号, pp.75~94, 1980