

## 原子炉建屋の振動解析に関する研究

—隣接建屋の相互干渉を含むバネ・マスモデルの作成方法—

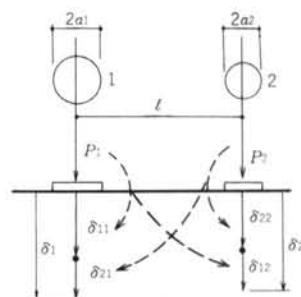
平 島 新 一

## § 1. 序

隣接建物の相互干渉、およびある建物の地下外壁面と基礎底面の相互干渉を考慮するバネ・マス系の振動解析モデルを、何とかリーズナブルに作成し得ないものであろうか。有限要素法によれば、何とかモデル化は可能であろう。しかし、現実の複雑な構築物を対象とする場合には、要素数の増大により計算費用がかかりすぎることになるであろうし、また、技術的にはモデルの境界設定位置と境界条件の設定、および減衰性の評価法についても問題をかかえている。このようなことを考えると、リーズナブルなバネ・マスモデルは、実用面において大変優れていると考える。

まず、§ 2. で自己相互作用バネと隣接基礎間の相互干渉バネが求まったとの前提に立てば、これらのバネに修正を施すことによって、静力学的に等価なバネ・マス

系モデルを作成し得ることを示し、さらに動力的な概念の導入法を提案した。§ 3. では、今までにあまり算定されていない相互干渉バネの評価式のいくつかを、半無限弾性地盤理論にもとづいて示した。§ 4. では、これら基本式の適用例として、実在原子炉建屋強制振動試験のシミュレーション解析の一部を紹介した。



図—1

## § 2. バネ・マス系モデルによる隣接基礎間の相互干渉の表現

## 2.1 隣接基礎の静的相互干渉

いま、距離  $l$  だけ離れた二つの基礎に鉛直荷重を作用させた時の沈下量を考えよう(図—1)。荷重  $P_1$  による基礎 1 自身の沈下量を  $\delta_{11}$ 、基礎 2 の沈下量を  $\delta_{12}$  とする。また、荷重  $P_2$  による基礎 2 自身の沈下量を  $\delta_{22}$ 、このとき、基礎 1 の沈下量を  $\delta_{21}$  とする。したがって、基礎 1 の全沈下量  $\delta_1$  は  $\delta_{11}$  と  $\delta_{21}$  を合計したものになる。基礎 2 についても同様に  $\delta_2$  は  $\delta_{22}$  と  $\delta_{12}$  の和となる。このことを方程式で表わせば次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \delta_1 &= \delta_{11} + \delta_{21}, \quad \delta_{11} = P_1 / o k_{11}, \quad \delta_{21} = P_2 / o k_{21} \\ \delta_2 &= \delta_{12} + \delta_{22}, \quad \delta_{12} = P_1 / o k_{12}, \quad \delta_{22} = P_2 / o k_{22} \end{aligned} \right\} \cdots \cdots (1)$$

バネ定数  $o k_{11}$  と  $o k_{22}$  の、半無限弾性地盤理論による評価式は多くの研究者 (Timoshenko<sup>1)</sup>, Barkan<sup>2), 3)</sup>, 田治見<sup>4)</sup>, 山原<sup>5)</sup> 等) によって発表されている。しかし、 $o k_{12}$  と  $o k_{21}$  に関する実用レベルの評価式は皆無に近い。ここでは、バネ定数  $o k_{ij}$  が全て評価し得るものとして論を進める。式(1)をマトリックス表示すると、

$$\delta = A \cdot P \quad \cdots \cdots (2)$$

$$\text{ここに、} \delta = \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{Bmatrix}, \quad P = \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{Bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 1/o k_{11} & 1/o k_{21} \\ 1/o k_{12} & 1/o k_{22} \end{bmatrix}$$

式(2)を通常の表現形式にすると、

$$P = K \cdot \delta \quad \cdots \cdots (3)$$

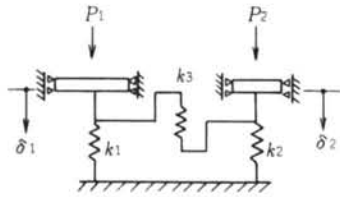


図-2

$$\text{ここに, } K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} = A^{-1}$$

式(2)と式(3)から剛性マトリックスKの各要素を求めると

$$k_{11} = \alpha \cdot {}_0k_{11}$$

$$k_{22} = \alpha \cdot {}_0k_{22}$$

$$k_{12} = -\beta \cdot {}_0k_{12}, \quad k_{21} = -\beta \cdot {}_0k_{21}$$

$$\text{ここに, } \alpha = {}_0k_{12} \cdot {}_0k_{21} / ({}_0k_{12} \cdot {}_0k_{21} - {}_0k_{11} \cdot {}_0k_{22})$$

$$\beta = {}_0k_{11} \cdot {}_0k_{22} / ({}_0k_{12} \cdot {}_0k_{21} - {}_0k_{11} \cdot {}_0k_{22})$$

また, Maxwell-Betti の相反定理から,

$${}_0k_{12} = {}_0k_{21}$$

.....(5)

次に, 式(3)~式(5)と等価になるようなバネ・マス系モデルを考えよう。図-2に示すようなモデルの静的釣合方程式は次のようになる。

$$P_1 = (k_1 + k_3)\delta_1 - k_3\delta_2$$

$$P_2 = -k_3\delta_1 + (k_2 + k_3)\delta_2$$

.....(6)

式(3)と式(6)を比較して,

$$k_1 + k_3 = \alpha \cdot {}_0k_{11}$$

$$k_2 + k_3 = \alpha \cdot {}_0k_{22}$$

$$k_3 = \beta \cdot {}_0k_{12} \text{ or } \beta \cdot {}_0k_{21}$$

.....(7)

かくして, 隣接基礎間の静的相互干渉を考慮するバネ・マス系モデルとそのバネ定数を決定し得ることが分った。つまり, 半無限弾性地盤理論によって ${}_0k_{ij}$ を求めれば, 式(4)から $\alpha$ と $\beta$ が決まり, ついで式(7)から $k_1$ と $k_2$ および $k_3$ が定まる。ここで,  ${}_0k_{ij}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $k_i$ の名称を決めておく。

${}_0k_{11}$ : 基礎—地盤の自己相互作用バネ定数

${}_0k_{12}$ : 隣接基礎間の相互干渉バネ定数

$k_1, k_2$ : 基礎—地盤の修正自己相互作用バネ定数

$k_3$ : 隣接基礎間の修正自己相互干渉バネ定数

$\alpha$ : 隣接基礎による自己相互作用補正係数

$\beta$ : 隣接基礎間の相互干渉補正係数

水平動に関する隣接基礎間の相互干渉についても, 全く同様になることは明らかであろう。むしろ, 式(1)~式(7), および図-2等は水平動について適切なものである。厳密に考えると, 鉛直動の相互干渉にはロッキング動が連成する。外力・変位・符号を図-3のように決めると, 図から明かなように次式が成り立つ。

$$\delta_1 = \delta_{V11} + \delta_{V21} - \delta_{R21} = P_1/k_{V11} + P_2/k_{V21} - M_2/vk_{R21}$$

$$\delta_2 = \delta_{V12} + \delta_{V22} + \delta_{R21} = P_1/k_{V12} + P_2/k_{V22} + M_1/vk_{R12}$$

$$\theta_1 = \theta_{V21} + \theta_{R11} + \theta_{R21} = P_2/rk_{V21} + M_1/k_{R11} - M_2/k_{R21}$$

$$\theta_2 = -\theta_{V12} - \theta_{R12} + \theta_{R22} = -P_1/rk_{V12} - M_1/k_{R12} + M_2/k_{R22}$$

.....(8)

相反定理式(9)を考慮して, 式(8)をマトリックス形式にまとめると,

$$k_{V21} = k_{V12}, \quad k_{R12} = k_{R21}$$

$$vk_{R21} = vk_{R21} = rk_{V21} = rk_{V12} \quad (=k_{RV} \text{ とする。単位は ton, あるいは kg})$$

.....(9)

$$\begin{Bmatrix} \delta \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{12}^T & B_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P \\ M \end{Bmatrix}$$

.....(10)

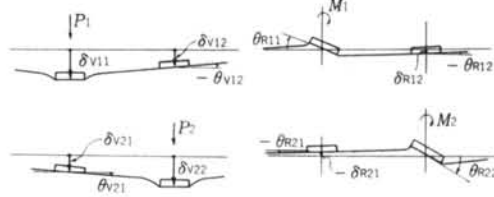


図-3 鉛直動とロッキング動の連成

$$\text{ここに, } \delta = \{\delta_1, \delta_2\}^T, P = \{P_1, P_2\}^T, B_{12} = \begin{bmatrix} 0 & -1/k_{RV} \\ 1/k_{RV} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Theta = \{\theta_1, \theta_2\}^T, M = \{M_1, M_2\}^T$$

$$B_{11} = \begin{bmatrix} 1/k_{V11} & 1/k_{V12} \\ 1/k_{V12} & 1/k_{V22} \end{bmatrix}, B_{22} = \begin{bmatrix} 1/k_{R11} & -1/k_{R12} \\ -1/k_{R12} & 1/k_{R22} \end{bmatrix}$$

式(10)から,

$$P = K_{11}\delta + K_{12}\Theta$$

$$M = K_{12}^T\delta + K_{22}\Theta$$

$$\text{ここに, } K_{11} = [B_{11} - B_{12}B_{22}^{-1}B_{12}^T]^{-1}$$

$$K_{12} = -[B_{22}B_{12}^{-1}B_{11} - B_{12}^T]^{-1}$$

$$K_{22} = -[B_{12}^TB_{11}^{-1}B_{12} - B_{22}]^{-1}$$

式(10)と式(11)から, 剛性マトリックス  $K$  は式(4)と同じタイプで表現される。

$$K_{11} = \begin{bmatrix} \alpha'_V k'_{V11} & -\beta'_V k'_{V12} \\ -\beta'_V k'_{V12} & \alpha'_V k'_{V22} \end{bmatrix}, K_{12} = \begin{bmatrix} -b' k_{RV} & c' k_{RV} \\ -c' k_{RV} & a' k_{RV} \end{bmatrix}$$

$$K_{22} = \begin{bmatrix} \alpha'_R k'_{R11} & \beta'_R k'_{R12} \\ \beta'_R k'_{R12} & \alpha'_R k'_{R22} \end{bmatrix}$$

$$\text{ここに, } \alpha_R = k_{R12}^2 / (k_{R12}^2 - k_{R11}k_{R22}), \alpha_V = k_{V12}^2 / (k_{V12}^2 - k_{V11}k_{V22})$$

$$\beta_R = k_{R11}k_{R22} / (k_{R12}^2 - k_{R11}k_{R22}), \beta_V = k_{V11}k_{V22} / (k_{V12}^2 - k_{V11}k_{V22})$$

$\alpha', \beta'$ : 上記  $\alpha, \beta$  の  $k_{Rij}$  と  $k_{Vij}$  を  $k'_{Rij}$  と  $k'_{Vij}$  に変える。

$$\frac{1}{k'_{V11}} = \frac{1}{k_{V11}} - \frac{\alpha_R k_{R22}}{k_{RV}^2}, \frac{1}{k'_{R11}} = \frac{1}{k_{R11}} - \frac{\alpha_V k_{V22}}{k_{RV}^2}$$

$$\frac{1}{k'_{V12}} = \frac{1}{k_{V12}} + \frac{\beta_R k_{R12}}{k_{RV}^2}, \frac{1}{k'_{R12}} = \frac{1}{k_{R12}} + \frac{\beta_V k_{V12}}{k_{RV}^2}$$

$$\frac{1}{k'_{V22}} = \frac{1}{k_{V22}} - \frac{\alpha_R k_{R11}}{k_{RV}^2}, \frac{1}{k'_{R22}} = \frac{1}{k_{R22}} - \frac{\alpha_V k_{V11}}{k_{RV}^2}$$

$$a = k_{RV}^2 \left( \frac{1}{k_{V11}k_{R12}} + \frac{1}{k_{V12}k_{R11}} \right), a' = \frac{a}{ab+c^2}$$

$$b = k_{RV}^2 \left( \frac{1}{k_{R22}k_{V12}} + \frac{1}{k_{R12}k_{V22}} \right), b' = \frac{b}{ab+c^2}$$

$$c = k_{RV}^2 \left( \frac{1}{k_{V11}k_{R22}} + \frac{1}{k_{V12}k_{R12}} \right) + 1, c' = \frac{c}{ab+c^2}$$

次に, 式(8)~式(12)と等価になるバネ・マス系モデルとして, 図-4 のようなモデルが考えられよう。式(12)との対応の概略は次のようになる。

$$K_{11} \cdots k_{V1}, k_{V2}, k_{V3}$$

$$K_{22} \cdots k_{R1}, k_{R2}, -k_{R3}$$

$$K_{12} \cdots -k_{RV11}, k_{RV12}, k_{V21}, -k_{RV22}$$

$k_R$  と  $k_V$  は, 図-2 の延長として容易に理解できるであろう。ただし, 回転動の相互干渉を表わす  $k_{R3}$  は負のバネとなる。 $k_{RV12}$  は基礎 1 の回転による基礎 2 の鉛直動を,  $k_{RV11}$  は基礎 1 の回転による  $k_{RV12}$  から受ける反力を減じる働きをする ( $K_{12}$  の  $-b$  に対応する)。

図-4 の釣合方程式は,

$$\begin{aligned} P_1 &= (k_{V1} + k_{V3} + k_{RV12} + k_{RV21} - k_{RV11})\delta_1 - (k_{V3} + k_{RV12} + k_{RV21})\delta_2 + (k_{RV12} - k_{RV11})l\theta_1 + k_{RV}l\theta_2 \\ P_2 &= -(k_{V3} + k_{RV12} + k_{RV21})\delta_1 + (k_{V2} + k_{V3} + k_{RV12} + k_{RV21} - k_{RV22})\delta_2 - k_{RV12}l\theta_1 - (k_{RV21} - k_{RV22})l\theta_2 \\ M_1 &= (k_{RV12}l - k_{RV11}l)\delta_1 - (k_{RV12}l - k_{RV11}l)\delta_2 + (k_{R1} - k_{R3} + k_{RV12}l - k_{RV11}l)\theta_1 + k_{R3}\theta_2 \\ M_2 &= (k_{RV21}l - k_{RV22}l)\delta_1 + (k_{RV21}l - k_{RV22}l)\delta_2 + k_{R3}\theta_1 + (k_{R2} - k_{R3} + k_{RV21}l - k_{RV22}l)\theta_2 \end{aligned}$$

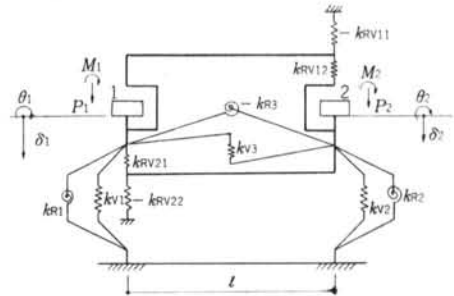


図-4 鉛直動とロッキング動の連成モデル

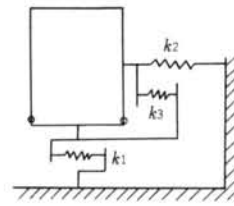
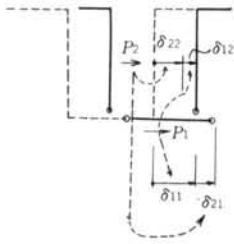


図-6

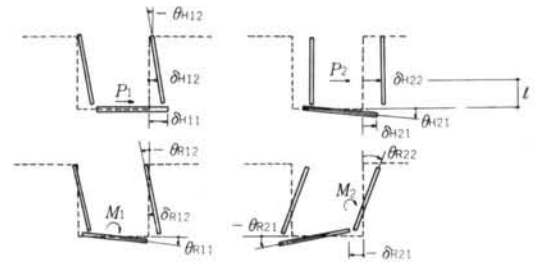


図-7

図-5

式(13)と式(13)を比較して、

$$\alpha'_{V k'_{V11}} = k_{V1} + k_{V3} + k_{RV21} - k_{RV11} \quad \dots\dots *5$$

$$\beta'_{V k'_{V12}} = k_{V3} + k_{RV12} + k_{RV21} \quad \dots\dots *4$$

$$\alpha'_{V k'_{V22}} = k_{V2} + k_{V3} + k_{RV12} + k_{RV21} - k_{RV22} \quad \dots\dots *5$$

$$\alpha'_{R k'_{R11}} = k_{R1} - k_{R3} + k_{RV12}l - k_{RV11}l \quad \dots\dots *3$$

$$\beta'_{R k'_{R12}} = k_{R3} \quad \dots\dots *1$$

$$\alpha'_{R k'_{R22}} = k_{R2} - k_{R3} + k_{RV21}l - k_{RV22}l \quad \dots\dots *3$$

$$b'_{k_{RV}} = k_{RV11}l - k_{RV12}l \quad \dots\dots *2$$

$$c'_{k_{RV}} = k_{RV21}l - k_{RV12}l \quad \dots\dots *1$$

$$a'_{k_{RV}} = k_{RV22}l - k_{RV21}l \quad \dots\dots *2$$

式(14)の左辺は既知ゆえ、順次\*1から\*5までをたどって、図-4の全バネ定数が決定される。

## 2.2 基礎底面と地下外壁面の静的相互干渉

まず、基礎と地下外壁を十分剛なものとして仮定し、両者の縁を切って考えると、隣接基礎の相互干渉と全く似たような現象が考えられる。回転動を無視して水平動だけについて考えると、図-6のようなモデル化が考えられる。図-5と図-6に関して、前出の式(1)~式(7)がそのまま適用できる。次に、回転動を考慮するとどうなるであろうか。これも、前出の図-3と同様に考えて、各荷重とそれによる変位を図-7のように定義する。図-3と図-7を比較すると、サフィックスVがHに変わるだけである。したがって、式(8)~式(14)のサフィックスVをHと読みかえるだけで、すべてそっくり同様な変換式が成り立つ。バネ・マス系のモデル図を示すと、図-8のようになる。地下外壁に取りつけるバネの位置は、深さの1/2より若干下方になると思われる。

## 2.3 動的効果の導入

今まで、隣接基礎の相互干渉を静的なものという概念の範囲で考えてきたが、ここで、動的モデルに拡張するにはどうしたらよいかを考える。波動論による厳密解を求めるのではなく、一つの工学的便法を示唆するに止める。

修正自己相互作用バネ  $k_1$  と  $k_2$  については、単独基礎としての動的自己相互作用バネ（例えば田治見の解<sup>4)</sup>）から求められる減衰係数と付加質量を準用することとし、ここでは、修正相互干渉バネに動的効果を導入することを考える。図-10のような振動系から逃げていくエネルギーは、減衰係数  $c_1$  と  $c_2$  によって表現されていると考える。した

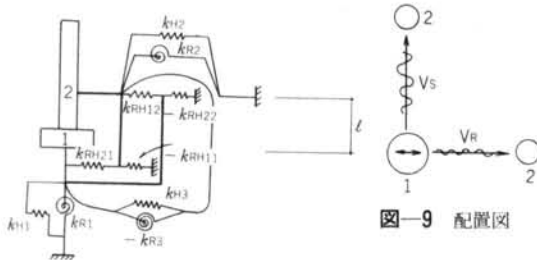


図-8 基礎底面と地下外壁の連成モデル

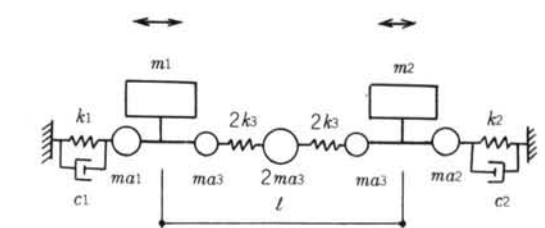


図-9 配置図

図-10 相互干渉動的モデル

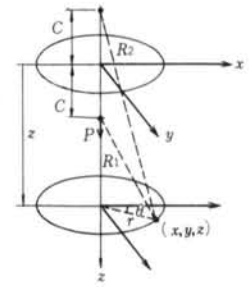
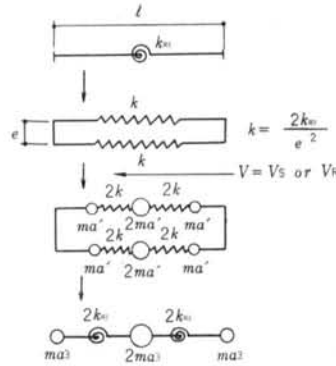
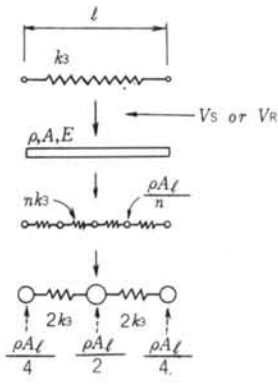


図-13

図-11 相互干渉バネ

図-12

がって、残りの動的効果を何らかの方法で表現すればよい。例えば、図-9で隣接基礎間の力の伝達について考えれば、波動速度 ( $V_S$ : S波,  $V_R$ : Rayleigh 波) が主要な意味を有していることが分るであろう。そこで、図-11に示すように、修正相互干渉バネ  $k_3$  に長さ  $l$  と波動速度  $V$  ( $V_S$  or  $V_R$ ) を加味した等価な棒に置換し、次に再度、バネ・マス系モデルに置換する。このときの変換式は次のようになる。

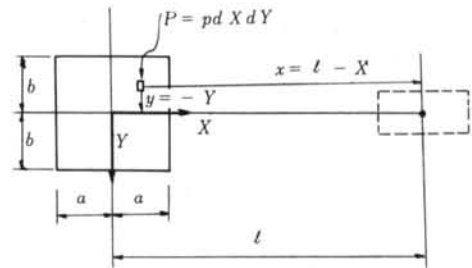
$$k_3 = AE/l, \quad V = \sqrt{E/\rho}$$

$$\therefore m_{a3} = \rho A l / 4 = k_3 l^2 / 4 V^2 \quad \dots\dots(15)$$

図-14

回転動に関する相互干渉バネについても同様に考えて、図-12から、

$$m_{a3} = \frac{1}{4} \cdot \frac{l^2 (2k_3/e^2)}{V^2} \cdot \left(\frac{e}{2}\right)^2 \times 2 = k_3 l^2 / 4 V^2 \quad \dots\dots(16)$$



### § 3. 相互干渉バネの算定

前章の検討から、半無限弾性地盤理論から相互干渉バネを求められるなら、隣接基礎の相互作用を表現するバネ・マス系モデルを作成できることが分った。ここでは、相互干渉バネのいくつかを算出してみる。

#### 3.1 鉛直動に関する相互干渉バネ

深さ  $C$  に作用する鉛直方向点加力  $P$  による地盤内の任意点  $(x, y, z)$  の鉛直方向変位  $w$  は<sup>7)</sup>、図-13の座標系で、

$$w = \frac{P}{16\pi G(1-\nu)} \left\{ \frac{3-4\nu}{R_1} + \frac{8(1-\nu)^2 - (3-4\nu)}{R_2} + \frac{(z-c)^2}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu)(z+c)^2 - 2cz}{R_2^3} + \frac{6cz(z+c)^2}{R_2^5} \right\} \quad \dots\dots(17)$$

$$\text{ここに、} R_1^2 = x^2 + y^2 + (z-c)^2 = r^2 + (z-c)^2$$

$$R_2^2 = x^2 + y^2 + (z+c)^2 = r^2 + (z+c)^2$$

地表面の場合は、 $c = z = 0$  と置いて、

$$w = \frac{P(1-\nu)}{2\pi G} \cdot \frac{1}{r} \quad \dots\dots(18)$$

図-14のような地表面上矩形基礎に一樣分布荷重  $P$  が作用したとき、基礎心から  $l$  だけ離れた位置での鉛直変位を計算する。式(18)に  $P = p d X \cdot d Y$ ,  $x = l - X$ ,  $y = -Y$  を代入して、

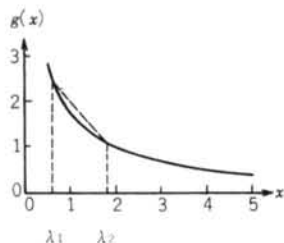
$$w = \frac{p(1-\nu)}{2\pi G} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{1}{\sqrt{(l-X)^2 + Y^2}} dY \cdot dX = \frac{p(1-\nu)}{2\pi G} b \int_{\frac{l-a}{b}}^{\frac{l+a}{b}} \ln \frac{\sqrt{y^2+1}+1}{\sqrt{y^2+1}-1} dy$$

したがって、相互干渉バネ定数は、

$${}_0k_{12} = \frac{4pab}{w} = \frac{8\pi G a}{(1-\nu)} \cdot A_V \quad \dots\dots(19)$$

$$\text{ここに、} 1/A_V = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} g(x) dX, \quad g(x) = \ln \frac{\sqrt{x^2+1}+1}{\sqrt{x^2+1}-1}$$

$$\lambda_1 = \frac{l-a}{b}, \quad \lambda_2 = \frac{l+a}{b}$$



図—15

ここで、係数  $A_V$  の近似解を求めておく。被積分関数  $g(x)$  は図—15のようになる。この種の問題の精度バランスを考慮して、積分範囲  $(\lambda_1, \lambda_2)$  の  $g(x)$  を、 $(\lambda_1, g(\lambda_1))$  と  $(\lambda_2, g(\lambda_2))$  を通る直線で近似することにすれば、下式を得る。

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} g(x) dx \div \frac{1}{2}(\lambda_2 - \lambda_1) \{g(\lambda_2) + g(\lambda_1)\} \quad \dots\dots(20)$$

次に、式(8)の  $Rk_{V21}$  を求める。

$$-\theta_{V12} = \frac{dw}{dl} = \frac{p(1-\nu)}{2\pi G} b \cdot \frac{d}{dl} \int_{\frac{l-a}{b}}^{\frac{l+a}{b}} \ln \frac{\sqrt{y^2+1}+1}{\sqrt{y^2+1}-1} dy = \frac{p(1-\nu)}{2\pi G} \left\{ \ln \frac{\sqrt{\lambda_2^2+1}+1}{\sqrt{\lambda_2^2+1}-1} - \ln \frac{\sqrt{\lambda_1^2+1}+1}{\sqrt{\lambda_1^2+1}-1} \right\} \quad \dots\dots(21)$$

$$\therefore Rk_{V21} = \frac{4pab}{R\theta_{V12}} = \frac{8\pi G ab}{(1-\nu)} \cdot A_{VR}$$

$$\text{ここに、} 1/A_{VR} = g(\lambda_1) - g(\lambda_2)$$

回転動についても同様に、図—14で考える。接地圧分布を線形分布として、

$$p = p_{max} \cdot \frac{X}{a}$$

$$M = \int_{-a}^a p \cdot X \cdot 2b \cdot dX = \frac{4}{3} p_{max} \cdot ba^2$$

$$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \dots\dots(22)$$

式(18)と式(22)から、

$$w = \frac{p_{max}(1-\nu)}{2\pi G a} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{X}{\sqrt{(l-X)^2 + Y^2}} dY \cdot dX = \frac{(1-\nu) \cdot p_{max} \cdot b}{2\pi G a} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (by+l) \cdot g(y) \cdot dy \quad \dots\dots(23)$$

図—14と式(23)から、

$$-\theta_{R12} = \frac{dw}{dl} = \frac{(1-\nu) \cdot p_{max} \cdot b}{2\pi G a} \cdot \frac{d}{dl} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (by+l) \cdot g(y) \cdot dy$$

$$\therefore k_{R12} = \frac{M}{\theta_{R12}} = \frac{8\pi G a^3}{3(1-\nu)} \cdot A_R$$

$$\dots\dots(24)$$

$$\text{ここに、} 1/A_R = - \frac{d}{dl} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (by+l) \cdot g(y) \cdot dy = (\lambda_1 + l/b) \cdot g(\lambda_1) - (\lambda_2 + l/b) \cdot g(\lambda_2)$$

| $n \backslash$ | 1.5   | 2.5   | 3.0   | 4.0   | 5.0   | 10.0  |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\lambda_1$    | 0.5   | 1.0   | 2.0   | 3.0   | 4.0   | 9.0   |
| $\lambda_2$    | 2.5   | 3.0   | 4.0   | 5.0   | 6.0   | 11.0  |
| $g(\lambda_1)$ | 2.887 | 1.763 | 0.962 | 0.655 | 0.495 | 0.222 |
| $g(\lambda_2)$ | 0.786 | 0.655 | 0.495 | 0.397 | 0.332 | 0.182 |
| $A_V$          | 0.272 | 0.414 | 0.686 | 1.04  | 1.21  | 2.48  |
| $A_{VR}$       | 0.478 | 0.923 | 2.14  | 3.88  | 6.13  | 25.0  |
| $A_{RR}$       | 0.380 | 0.497 | 0.743 | 0.988 | 1.25  | 2.53  |

表—1  $A_V, A_{VR}, A_R$  ( $a=b, l=na$ )

| $n \backslash$      | 1.5   | 2.0   | 3.0   | 4.0   | 5.0   | 10.0  |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $g(\lambda_1)$      | 2.887 | 1.763 | 0.962 | 0.655 | 0.495 | 0.222 |
| $g(\lambda_2)$      | 0.786 | 0.655 | 0.495 | 0.397 | 0.332 | 0.182 |
| $\varepsilon$       | 1.592 | 1.289 | 0.906 | 0.695 | 0.558 | 0.279 |
| $(\nu=0.3)$         | 0.267 | 0.337 | 0.542 | 0.741 | 0.938 | 1.91  |
| $A_V$ ( $\nu=0.4$ ) | 0.211 | 0.305 | 0.485 | 0.660 | 0.834 | 1.69  |
| $(\nu=0.5)$         | 0.190 | 0.270 | 0.423 | 0.572 | 0.722 | 1.46  |

表—2  $A_H$  ( $a=b, l=na$ )

ここで、例えば  $a=b$ ,  $l=na$  のときの  $A_V$ ,  $A_{VR}$ ,  $A_R$  の具体値を示すと、表—1 のようになる。

### 3.2 水平動に関する相互干渉バネ

座標を図—13で考える。深さ  $c$ ,  $x$  方向に水平力  $P$  が作用した時の地盤内の変位<sup>7)</sup> のうち、水平変位のみに注目して、

$$u = \frac{P}{16\pi G(1-\nu)} \left[ \frac{3-4\nu}{R_1} + \frac{1}{R_1} + \frac{x^2}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu)x^2}{R_2^3} + \frac{2cz}{R_2^3} \left( 1 - \frac{3x^2}{R_2^2} \right) + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_2+z+c} \left\{ 1 - \frac{x^2}{R_2(R_2+z+c)^2} \right\} \right] \quad \dots\dots(25)$$

地表面での相互干渉については、 $z=c=0$  として、

$$u = \frac{P}{2\pi G} \left[ \frac{1-\nu}{R} + \frac{\nu x^2}{R^3} \right] \quad \dots\dots(26)$$

矩形基礎で、加力方向の相互干渉について考える (図—14)。

$$\begin{aligned} u &= \frac{P}{2\pi G} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \left[ \frac{1-\nu}{\sqrt{(l-X)^2+Y^2}} + \frac{\nu(l-X)^2}{(\sqrt{(l-X)^2+Y^2})^3} \right] dy \cdot dx \\ &= \frac{pb}{2\pi G} \left[ (1-\nu) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} g(\lambda) d\lambda + \nu \left\{ \int_{-1}^1 h(\lambda) d\lambda + \lambda_1 \ln \frac{\sqrt{1+\lambda_1^2}+1}{\sqrt{1+\lambda_1^2}-1} - \lambda_2 \ln \frac{\sqrt{1+\lambda_2^2}+1}{\sqrt{1+\lambda_2^2}-1} \right\} \right] \\ &\div \frac{pb}{2\pi G} \left[ (1-\nu) \frac{1}{2} (\lambda_2 - \lambda_1) \{ g(\lambda_2) + g(\lambda_1) \} + \nu \left\{ \lambda_1 \ln \frac{\sqrt{1+\lambda_1^2}+1}{\sqrt{1+\lambda_1^2}-1} - \lambda_2 \ln \frac{\sqrt{1+\lambda_2^2}+1}{\sqrt{1+\lambda_2^2}-1} + (h(\lambda_1) + h(\lambda_2)) \right\} \right] \quad \dots\dots(27) \end{aligned}$$

ここに、 $\lambda_1=(l-a)/b$ ,  $\lambda_2=(l+a)/b$

$$g(\lambda) = \ln \frac{\sqrt{\lambda^2+1}+1}{\sqrt{\lambda^2+1}-1}, \quad h(\lambda) = \ln \frac{\sqrt{\lambda_2^2+\lambda^2}+\lambda_2}{\sqrt{\lambda_1^2+\lambda^2}+\lambda_1}$$

したがって、相互干渉バネは、

$$0k_{12} = \frac{4pab}{u} = \frac{8\pi Ga}{(1-\nu)} \cdot A_H \quad \dots\dots(28)$$

$$\text{ここに、} \frac{1}{A_H} = \frac{1}{2} (\lambda_2 - \lambda_1) \{ g(\lambda_1) + g(\lambda_2) \} + \frac{\nu}{1-\nu} \varepsilon$$

$$\varepsilon = \lambda_1 g(\lambda_1) - \lambda_2 g(\lambda_2) + \ln \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right) \frac{2 + \sqrt{1 + (\lambda_1/\lambda_2)^2}}{1 + \sqrt{1 + (\lambda_2/\lambda_1)^2}}$$

例えば、 $a=b$ ,  $l=na$  のとき係数  $A_H$  は表—2 のようになる。

### 3.3 基礎底面と地下外壁面の相互干渉バネ

ここでは、水平動のみの相互干渉バネについて考える。地下室の平面形状を円形とし、深さ方向単位長さ当りの荷重を一樣に  $w$  とすれば、式(25)のポアソン比  $\nu$  を 0.5 として、中心線上の水平変位は (図—16)。

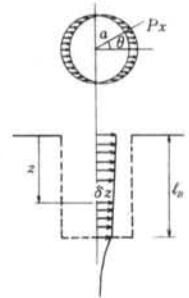
$$\delta z = \frac{w}{8\pi G} f(\zeta, n) \quad \dots\dots(29)$$

$$\begin{aligned} \text{ここに、} f(\zeta, n) &= \ln \frac{\sqrt{1+(n-\zeta)^2}+(n-\zeta)}{\sqrt{1+\zeta^2}-\zeta} + \ln \frac{\sqrt{1+(n+\zeta)^2}+(n+\zeta)}{\sqrt{1+\zeta^2}+\zeta} \\ &+ \frac{2}{3} \left\{ \frac{n-\zeta}{\sqrt{1+(n-\zeta)^2}} + \frac{n+n\zeta^2+\zeta^3-5\zeta}{\sqrt{1+(n+\zeta)^2}} + \frac{2(\zeta+n\zeta^2+\zeta^3)}{(\sqrt{1+(n+\zeta)^2})^3} \right. \\ &\left. - \frac{\zeta^3-6\zeta}{\sqrt{1+\zeta^2}} - \frac{2(\zeta+n\zeta^3)}{(\sqrt{1+\zeta^2})^3} \right\}, \quad \zeta=z/a, \quad n=l_B/a \end{aligned}$$

したがって、基礎底面との相互干渉バネ定数は、

$$0k_{12} = \frac{wl_B}{\delta_B} = 8\pi G \cdot \frac{l_B}{f(n, n)} \quad \dots\dots(30)$$

$$\text{ここに、} f(n, n) = \ln \frac{1}{\sqrt{1+n^2}-1} + \ln \frac{\sqrt{1+4n^2}+2n}{\sqrt{1+4n^2}+n} + \frac{2}{3} \left( \frac{2n^3-3n}{\sqrt{1+4n^2}} \right)$$



図—16

$$+\frac{n}{(\sqrt{1+4n^2})^3}-\frac{n^3-4n}{\sqrt{1+n^2}}\}$$

式(29)は筆者による解である。参考のため、J. Penzien<sup>8)</sup> による数値計算例との比較を図-17に示す。

## § 4. 適用例

前章までの理論の計算例としては、なるべくシンプルなモデルを対象とするのが好ましいが、ここでは実在原子炉建屋とこれに隣接するタービン建屋の連成モデルに適用してみる。日本原子力発電株式会社第二発電所原子炉建屋の強制振動試験が1977年2月に行なわれ、貴重な試験結果が得られている。試験に関するシミュレーション解析、およびその結果に基づく耐震設計の妥当性の評価検討は同年6月に一応完了している。ここに示す計算例は、その後継続して行なった研究の一部として見ていただきたい。なお、振動試験の実施体制は以下であった。試験結果の詳細については、後日発表される機会があると思われる。

総括：日本原子力発電株式会社建設部

計測とデータ処理：原子力中央研究所地盤耐震部

モデル解析：清水建設株式会社原子力部・研究所

### 4.1 解析モデルとその振動諸元

解析モデルは、上記原子炉建屋(BWR-MARK II-1100 MW)とこれに隣接するタービン建屋の連成モデルである。両建屋の概略断面を示すと図-18のようになる。こ

れを、前章までの解析理論を考慮してモデル化したのが図-19である。その振動諸元を表-3に示す。なお、基礎底面と地盤の自己相互作用バネの算定式は表-4によ

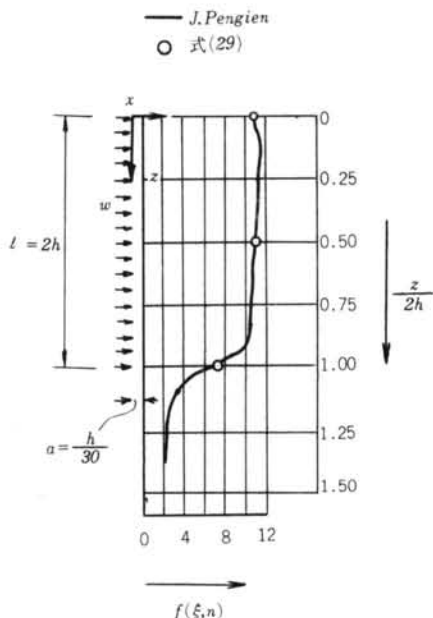


図-17 ( $n=60$ )

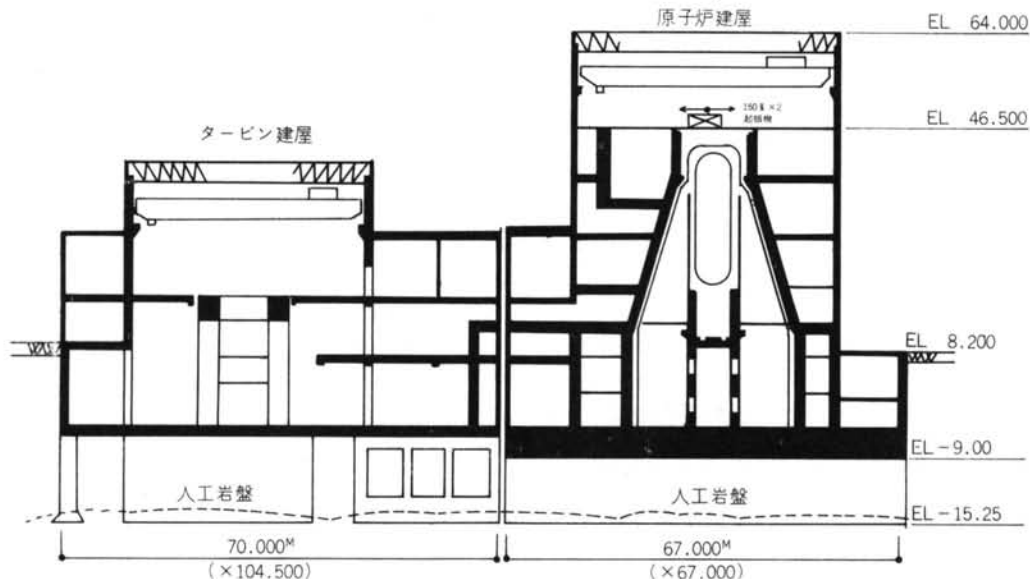
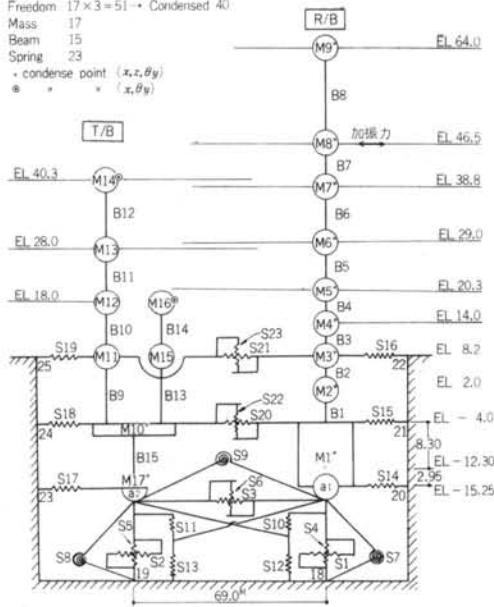


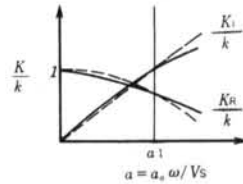
図-18 概略断面図

Freedom 17×3=51 → Condensed 40  
 Mass 17  
 Beam 15  
 Spring 23  
 • condense point (x,z,θy)  
 • " " " (x,z,θy)



図—19 Model RTS

った。つまり、静的自己相互作用バネ定数は山原の解<sup>5)</sup>により、減衰係数と付加質量は田治見の解<sup>4)</sup>を参考にして決めた。その決め方を参考のために示しておく。半無限弾性地盤理論によって得られる基礎—地盤の動的抵抗係数は、図—20の実線のようになる。動的抵抗係数の実部が、無次元化振動数の増加とともに小さくなる傾向がある。この傾向を付加質量を考慮することによって近似する。具体的には、 $a=0$ と $a=a_1$ で理論解<sup>4)</sup>と一致する二次曲線で近似する。虚数部は、 $a=0$ と $a=a_1$ で理論解と



$K = K_0 + iK_i$   
 $k$ : 静的バネ定数  
 $a$ : 基礎の半径  
 $\omega$ : 円振動数  
 $V_s$ : 地盤の横波速度

図—20 動的抵抗係数

| 質 量 要 素                           |              |                                                     | 棒 要 素                                                                                                                                                                  |                                  |                                |                                               |                     | バ ネ 要 素 |                                                                                   |           |               |
|-----------------------------------|--------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------|---------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------------|
| No.                               | 重 量<br>( t ) | 回転慣性<br>( $\times 10^6 \text{t} \cdot \text{m}^2$ ) | No.                                                                                                                                                                    | せん断<br>断 面 積<br>( $\text{m}^2$ ) | 軸<br>断 面 積<br>( $\text{m}^2$ ) | 断面2次<br>モーメント<br>( $\times 10^3 \text{m}^4$ ) | 減 衰<br>$h_0$<br>(%) | No.     | バネ定数<br>( $\times 10^6 \text{t/m}$ )<br>( $\times 10^6 \text{t} \cdot \text{m}$ ) | 減 衰       |               |
|                                   |              |                                                     |                                                                                                                                                                        |                                  |                                |                                               |                     |         |                                                                                   | $h_0(\%)$ | $\gamma$ (S%) |
| M 1*                              | 143,989      | 564.25                                              | B 1                                                                                                                                                                    | 555.3                            | 823.8                          | 165.6                                         | 1                   | S 1     | 111                                                                               | 1         | 3.26          |
| M 2                               | 18,539       | 87.00                                               | B 2                                                                                                                                                                    | 511.2                            | 823.8                          | 165.6                                         | 1                   | S 2     | 27.7                                                                              | 1         | 4.48          |
| M 3                               | 23,403       | 108.07                                              | B 3                                                                                                                                                                    | 455.6                            | 656.4                          | 126.4                                         | 1                   | S 3     | 19.6                                                                              | 1         | 0             |
| M 4                               | 21,945       | 77.45                                               | B 4                                                                                                                                                                    | 274.6                            | 391.0                          | 60.01                                         | 1                   | S 4     | 122                                                                               | 1         | 6.94          |
| M 5                               | 17,941       | 65.90                                               | B 5                                                                                                                                                                    | 221.5                            | 387.0                          | 58.48                                         | 1                   | S 5     | 30.9                                                                              | 1         | 7.67          |
| M 6                               | 16,151       | 50.30                                               | B 6                                                                                                                                                                    | 141.6                            | 247.7                          | 33.83                                         | 1                   | S 6     | 13.7                                                                              | 1         | 0             |
| M 7                               | 13,540       | 25.00                                               | B 7                                                                                                                                                                    | 242.1                            | 350.4                          | 53.99                                         | 1                   | S 7     | 25.2                                                                              | 1         | 1.44          |
| M 8                               | 10,267       | 20.98                                               | B 8                                                                                                                                                                    | 27.1                             | 52.4                           | 26.43                                         | 1                   | S 8     | 12.5                                                                              | 1         | 0.77          |
| M 9                               | 3,419        | 9.52                                                | B 9                                                                                                                                                                    | 344.0                            | 636.0                          | 120.8                                         | 1                   | S 9     | − 5.3                                                                             | 1         | 0             |
| M10*                              | 89,330       | 392.7                                               | B10                                                                                                                                                                    | 185.0                            | 378.0                          | 25.06                                         | 1                   | S10     | 2.85                                                                              | 1         | 0             |
| M11                               | 35,970       | 188.1                                               | B11                                                                                                                                                                    | 127.0                            | 237.0                          | 34.59                                         | 1                   | S11     | 2.85                                                                              | 1         | 0             |
| M12                               | 35,070       | 177.63                                              | B12                                                                                                                                                                    | 39.0                             | 113.0                          | 6.675                                         | 1                   | S12     | − 3.9                                                                             | 1         | 0             |
| M13                               | 9,198        | 65.26                                               | B13                                                                                                                                                                    | 146.0                            | 175.0                          | 4.743                                         | 1                   | S13     | − 5.9                                                                             | 1         | 0             |
| M14                               | 5,465        | 11.84                                               | B14                                                                                                                                                                    | 142.0                            | 170.0                          | 4.743                                         | 1                   | S14     | 26.5                                                                              | 1         | 1.15          |
| M15                               | 400          | 1.57                                                | B15                                                                                                                                                                    | 7,315.0                          | 7,315.0                        | 2990                                          | 16                  | S15     | 21.5                                                                              | 1         | 2.96          |
| M16                               | 11,150       | 2.908                                               | B1~B7, B9~B14 : $E=294\text{t/cm}^2$ , $G=125\text{t/cm}^2$<br>B 8 : $E=210\text{t/cm}^2$ , $G=90\text{t/cm}^2$<br>B15 : $E=4.79\text{t/cm}^2$ , $G=1.65\text{t/cm}^2$ |                                  |                                |                                               |                     | S16     | 6.71                                                                              | 1         | 4.93          |
| M17*                              | 62,280       | 272.8                                               |                                                                                                                                                                        |                                  |                                |                                               |                     | S17     | 26.5                                                                              | 1         | 1.15          |
| $a_1$                             | 130,573      | 1285                                                |                                                                                                                                                                        |                                  |                                |                                               |                     | S18     | 21.5                                                                              | 1         | 2.96          |
| $a_2$                             | 34,833       | 538                                                 |                                                                                                                                                                        |                                  |                                |                                               |                     | S19     | 6.71                                                                              | 1         | 4.93          |
| $\frac{1}{2}\text{B15}$           | 62,280       | 272.8                                               |                                                                                                                                                                        |                                  |                                |                                               |                     | S20     | 28.5                                                                              | 1         | 0             |
| M 1*=M 1+ $a_1$                   |              |                                                     |                                                                                                                                                                        |                                  |                                |                                               |                     | S21     | 28.5                                                                              | 1         | 0             |
| M10*=M10+ $\frac{1}{2}\text{B15}$ |              |                                                     |                                                                                                                                                                        |                                  |                                |                                               |                     | S22     | 0.274                                                                             | 1         | 0             |
| M17*=M17+ $a_2$                   |              |                                                     |                                                                                                                                                                        |                                  |                                |                                               |                     | S23     | 0.274                                                                             | 1         | 0             |

表—3 Model RTS の振動諸元

一致する直線で近似する。このような近似方法を採用すれば、振動方程式として Voigt モデルのものが利用できる。このとき、水平と上下動については  $\alpha_1 \div 2$ 、回転とねじり動については  $\alpha_1 \div 1$  とした。その他、振動諸元算定に当たっての主な仮定事項を示しておく。

- 1) 支持地盤;  $V_s=470\text{m/s}$ ,  $\nu=0.467$ ,  $\rho=1.8\text{t/m}^3$
- 2) 周囲地盤;  $V_s=100\text{m/s}$ ,  $\nu=0.4$ ,  $\rho=1.6\text{t/m}^3$
- 3) タービン建屋地業部;  $V_s=300\text{m/s}$ ,  $\nu=0.45$ ,  
 $\rho=1.8\text{t/m}^3$

4) 接地圧分布; 原子炉建屋(R/B)……剛板分布

タービン建屋(T/B)……一様分布

5) タービン建屋地業先端部の自己相互作用パネは基礎全底面積で評価した値の  $1/3$  とする。

6) 静的自己相互作用パネ定数は根切り深さによる割り

|   | 接 地 圧 分 布                                                       |                                                                 |
|---|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
|   | 一 様 分 布                                                         | 剛 板 分 布                                                         |
| 水 | $k_x = \frac{2\pi b \rho' V_s^2}{2-\nu} Bx$                     | $k_x = \frac{8b \rho' V_s^2}{2-\nu} Ax$                         |
|   | $m_x = \frac{0.142}{2-\nu} \rho \pi a^3$                        | $m_x = \frac{0.347}{2-\nu} \rho \pi a^3$                        |
|   | $C_x = \frac{0.9}{2-\nu} \rho' V_s A$                           | $C_x = \frac{1.375}{2-\nu} \rho' V_s A$                         |
|   | $\gamma_H = C_x / k_x$                                          | $\gamma_H = C_x / k_x$                                          |
| 平 | $k_v = \frac{\pi b \rho' V_s^2}{1-\nu} Bz$                      | $k_v = \frac{4b \rho' V_s^2}{1-\nu} Az$                         |
|   | $m_v = \frac{0.126}{1-\nu} \rho \pi a^3$                        | $m_v = \frac{0.308}{1-\nu} \rho \pi a^3$                        |
|   | $C_v = \frac{0.6}{1-\nu} \frac{V_s}{V_0} \rho' V_p A$           | $C_v = \frac{0.917}{1-\nu} \frac{V_s}{V_0} \rho' V_p A$         |
|   | $\gamma_v = C_v / k_v$                                          | $\gamma_v = C_v / k_v$                                          |
| 上 | $k_\phi = \frac{\pi b^3 \rho' V_s^2}{2(1-\nu)} B\phi$           | $k_\phi = \frac{8b^3 \rho' V_s^2}{3(1-\nu)} A\phi$              |
|   | $m_\phi = \frac{0.063}{1-\nu} \rho \pi a^5$                     | $m_\phi = \frac{0.141}{1-\nu} \rho \pi a^5$                     |
|   | $C_\phi = \frac{0.596}{1-\nu} \frac{V_s}{V_0} \rho' V_p I \phi$ | $C_\phi = \frac{0.816}{1-\nu} \frac{V_s}{V_0} \rho' V_p I \phi$ |
|   | $\gamma_\phi = C_\phi / k_\phi$                                 | $\gamma_\phi = C_\phi / k_\phi$                                 |
| 回 | $k_\theta = \frac{\pi b^3 \rho' V_s^2}{2(1-\nu)} B\theta$       | $k_\theta = \frac{8b^3 \rho' V_s^2}{3(1-\nu)} A\theta$          |
|   | $m_\theta = \frac{0.0344}{1-\nu} \rho \pi a^5$                  | $m_\theta = \frac{0.0791}{1-\nu} \rho \pi a^5$                  |
|   | $C_\theta = \frac{0.298}{1-\nu} \rho' V_s I \theta$             | $C_\theta = \frac{0.306}{1-\nu} \rho' V_s I \theta$             |
|   | $\gamma_\theta = C_\theta / k_\theta$                           | $\gamma_\theta = C_\theta / k_\theta$                           |
| ね | $k_\psi = \frac{\pi b^3 \rho' V_s^2}{2(1-\nu)} B\psi$           | $k_\psi = \frac{8b^3 \rho' V_s^2}{3(1-\nu)} A\psi$              |
|   | $m_\psi = \frac{0.0344}{1-\nu} \rho \pi a^5$                    | $m_\psi = \frac{0.0791}{1-\nu} \rho \pi a^5$                    |
|   | $C_\psi = \frac{0.298}{1-\nu} \rho' V_s I \psi$                 | $C_\psi = \frac{0.306}{1-\nu} \rho' V_s I \psi$                 |
|   | $\gamma_\psi = C_\psi / k_\psi$                                 | $\gamma_\psi = C_\psi / k_\psi$                                 |

- $k$  ; 静的パネ定数  $V_s$  ; 地盤のよこ波速度  
 $m_s$  ; 付加質量  $\nu$  ;  $\rho$  のポアソン比  
 $C$  ; 減衰係数  $\rho'$  ;  $\rho$  の単位体積質量  
 $A$  ; 基礎の底面積  $V_0$  ;  $\rho$  のたて波速度  
 $I \phi$  ; 基礎底面の断面二次モーメント  
 $I \theta$  ;  $\rho$  の極二次モーメント  
 $b$  ; 基礎幅の  $1/2$  } 山原の解<sup>5)</sup> による  
 $Bx, B_y, B_\phi, B_\psi, \dots$   
 $a = \sqrt{A/\pi}$  ; 基礎底面の等価半径

表—4 基礎底面—地盤の相互作用パネ

増しを考慮する<sup>5)</sup>。

7) 基礎底面と地下外壁面の相互干渉は無視する。

8) 地下外壁面と周囲地盤の自己相互作用パネに関しては、両建屋合計水平面積と等価な円断面積杭に置換し、式(29)によって評価する。減衰係数は波動インピーダンス  $c = \rho'(V_s + V_p)\pi a l$  を考慮し、付加質量を考えない。

以上の仮定に従って自己相互作用パネを求め、次に式(19), (21), (24), (28)を使って相互干渉パネを求める。これらを式(4), (7), (12), (14)に代入して修正自己相互作用パネと修正相互干渉パネが求められる。その他に、両建屋の連成要因としてエクспанション材(厚さ5cm)があり、この剛性評価は力学試験結果に基づいてボアソン効果の補正を行なった。シミュレーション解析で  $\nu=0.48$  とするのが最適であった。上部構造のモデル化は、原子炉建屋については施工図に基づいて行ない、タービン建屋については設計検討用モデルによった。

## 4.2 解析方法の概要

解析に用いた基礎方程式は、

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = F_0\{\delta\}e^{i\omega t} \quad \dots(31)$$

ここに、 $[m]$ ,  $[c]$ ,  $[k]$ ; 質量, 減衰, 剛性マトリックス

$F_0$ ; 外力振幅,  $\{x\}$ ; 変位ベクトル

$$\{\delta\}^T = \{0 \dots 0 \quad 1 \quad 0 \dots 0\}, \quad k \text{ は加振位置}$$

$\omega$ ; 外力の円振動数

各部減衰仮定になるので、上式を次のように変形する。

$$[A]\{\dot{X}\} + [B]\{X\} = F_0\{Y\}e^{i\omega t} \quad \dots(32)$$

$$\text{ここに、} [A] = \begin{bmatrix} 0 & m \\ m & c \end{bmatrix}, [B] = \begin{bmatrix} -m & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix},$$

$$\{X\} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ x \end{bmatrix}, \{Y\} = \begin{bmatrix} 0 \\ \delta \end{bmatrix}$$

式(32)の解は複素モード  $[U]$  を使って、

$$\{X\} = [U][\bar{H}_j]\{\beta\}F_0e^{i\omega t} \quad \dots(33)$$

ここに、 $[U]^T[A][U] = [\bar{e}]$ ,

$$[U]^T[B][U] = [-e\lambda]$$

式(33)を式(32)に代入して、左から  $[U]^T$  を乗じて下式を得る。

$$\left\{ \begin{aligned} \{\beta\} &= [\bar{e}]^{-1}[U]^T\{Y\} \\ H_j &= 1/(-\lambda_j + i\omega) \end{aligned} \right\} \quad \dots(34)$$

以上のように、解析方法の骨格は、複素固有値解析とその結果を使う複素モード合成法である<sup>11), 12)</sup>。また、解析モデルの全自由度51を40に縮小<sup>10)</sup>して複素固有値解析を行なった。上部構造のみの減衰定数が、全ての非減衰固

| 次 数    | 固有振動数<br>(Hz) | 減衰定数  | 刺激係数<br>(外力ベクトル<br>は加振点のみ) |
|--------|---------------|-------|----------------------------|
| 1, 2   | 1.733         | 0.321 | $-0.00305 \pm 0.00512 i$   |
| 3, 4   | 2.391         | 0.145 | $-0.00756 \pm 0.02383 i$   |
| 5, 6   | 2.556         | 0.214 | $-0.11017 \pm 0.09779 i$   |
| 7, 8   | 2.866         | 0.554 | $-0.00232 \pm 0.01133 i$   |
| 9, 10  | 3.663         | 0.147 | $-0.04525 \pm 0.21765 i$   |
| 11, 12 | 4.399         | 0.259 | $-0.02135 \pm 0.02905 i$   |
| 13, 14 | 6.918         | 0.097 | $0.13387 \pm 0.66065 i$    |
| 15, 16 | 7.101         | 0.027 | $0.14641 \pm 0.06089 i$    |
| 17, 18 | 7.904         | 0.076 | $0.08701 \pm 0.14686 i$    |
| 19, 20 | 7.983         | 0.147 | $-0.07386 \pm 0.05805 i$   |
| 21, 22 | 10.43         | 0.030 | $-0.00274 \pm 1.0190 i$    |
| 23, 24 | 10.50         | 0.141 | $0.00226 \pm 0.00434 i$    |
| 25, 26 | 10.68         | 0.034 | $0.09741 \pm 0.22258 i$    |
| 27     | 10.82         | 1.145 | 0.06169                    |
| 28, 29 | 13.85         | 0.019 | $-0.05542 \pm 0.65436 i$   |
| 30, 31 | 14.27         | 0.021 | $0.00983 \pm 0.02808 i$    |
| 32, 33 | 14.28         | 0.038 | $0.00121 \pm 0.00063 i$    |

表—5 複素固有値解

有モードに対して一定になるように減衰マトリックスを作成した<sup>7)</sup>。合成に用いたモードは共役モードを含めて1次～60次で、最大固有振動数は60次の48.0Hzである。

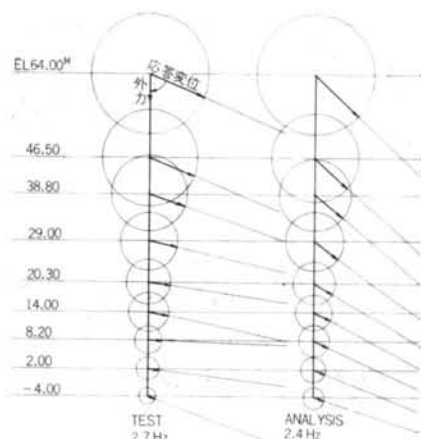
#### 4.3 解析結果の概要

複素固有値解析結果の一部を表—5に示す。強制加振時に卓越すると考えられるモードは、刺激係数を見て明らかなように、2.556Hz、3.663Hz、6.918Hz、7.101Hz、7.904Hz、10.43Hz、10.68Hz、13.85Hzである。減衰定数は、低次モードで10%～30%とかなり大きく、高次モードでは数%台の小さな値になる。これは、低次モードほど逸散減衰の影響が大きく、高次モードでは上部構造の減衰が支配的になるためと考えられる。周波数応答解析結果のうちから、原子炉建屋に関するものを試験結果と対比させて図—21～図—25に示す。

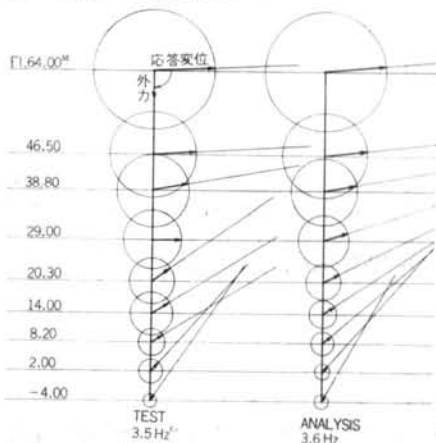
試験値と解析値がよく対応していると考えられる。なお、変位共振曲線のうち点線で示したものは、タービン建屋との連成を無視したモデルによる解析値である。

#### 4.4 考察

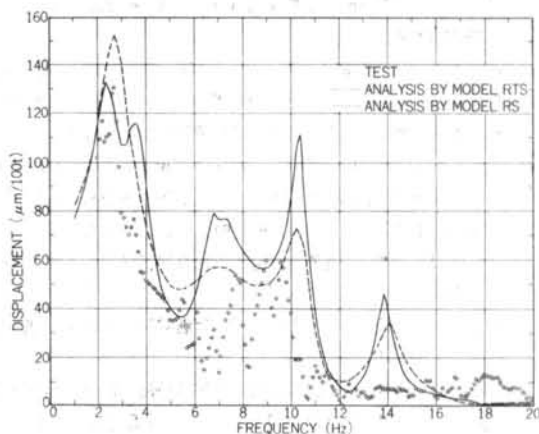
変位共振曲線でみるかぎりにおいては、連成モデルと単独モデルの優劣はつけ難いように思われる。しかし、試験値にみられる3.6Hzピークは、常時微動観測によってもその存在が確認されており、モデル解析も種々のタイプで行なったが、いずれも3.6Hzが卓越するような結果は得られなかった。当解析に用いた連成モデルRTSによって初めて、3.6Hzピークの存在し得るような解析モデルにめぐり合えたわけである。共振曲線でみるかぎ



図—21 1次ピーク変位共振モード

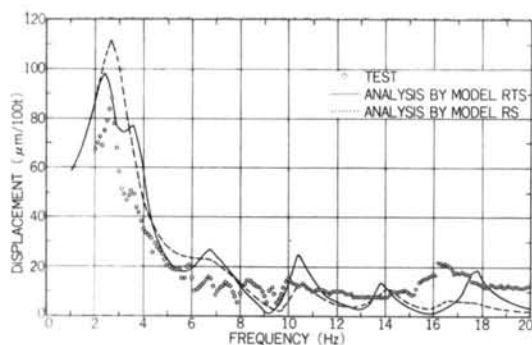


図—22 2次ピーク変位共振モード

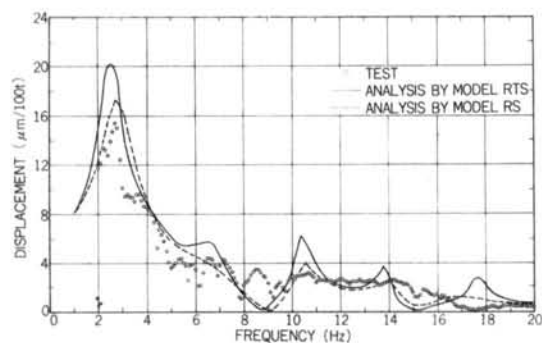


図—23 変位共振曲線 (EL 64.00 m)

り、まだ絶対値を含めた精度は十分ではないように見受けられる。しかし、最大振幅でノーマライズした共振モード(図—22)でみると、試験値と解析値が実に良く対



図—24 変位共振曲線 (E.L. 46.50 m)



図—25 変位共振曲線 (E.L. 4.00 m)

応している。このような2次ピークが、工学的にどのような意味をもつのかは今後の研究課題であろう。

## § 5. 結び

半無限弾性地盤理論に基づく基礎と地盤の相互作用パネおよび隣接基礎間の影響度合を意味する相互干渉パネが求められ、これに若干の修正を施すことによって、隣接基礎の相互干渉を含むパネ・マス系の振動解析モデルを作成できることを示した。今までにあまり行なわれていなかった相互干渉パネの評価式を、ここに筆者なりに示した。一部、積分の厳密解を陽の形になしえないため、近似解を示すに止まったが、実用には十分供し得るものと考えている。このような手法が、隣接建屋の連成振動問題の解明のために有益な手段の一つになるであろう。

## ＜参考文献＞

- 1) Timoshenko & Goodier: "Theory of Elasticity" McGraw-Hill (1951)
- 2) D. D. Barkan: "Dynamics of Base and Foundation" McGraw-Hill (1962)
- 3) R. V. Whitman: "Design Procedures for Dynamically Loaded Foundations" Proc. of ASCE, Vol. 93, No. SM6 (1967)
- 4) 金井・田治見・大沢・小林: "建築構造学大系1(地震工学)" 昭和43年
- 5) 山原 浩: "地盤の動的効果に関する総合的研究" 清水建設研究所研究報告第7号 1973年3月
- 6) 金多・他5名: "土木建築耐震設計施工" 朝倉書店 昭和43年
- 7) R. D. Mindlin: "Force at a Point in the Interior of Semi-Infinite Solid" Physics, May 1936
- 8) J. Penzien, C. Schiffr & R. A. Parmelee: "Seismic Analysis of Bridges on Long Piles" Proc. of ASCE, Vol. 94, No. EM3 (June 1968) pp. 223~253
- 9) 平島・小柳: "原子力発電所の耐震解析 (その1) —減衰マトリックスの作成法について—" 日本建築学会大会梗概集 昭和47年10月
- 10) 小柳・平島: "原子力発電所の耐震解析 (その2) —振動方程式のコンデンス法について—" 日本建築学会大会梗概集 昭和47年10月
- 11) 小柳・平島: "伝達関数法と数値積分法とによる複素モード合成法" 日本建築学会大会梗概集 昭和52年10月
- 12) T. Ito: "Damped Vibration Mode Superposition Method for Dynamic Response Analysis" E.E.S.D., Vol. 2 (1973) pp. 45~57