

# 長方形基礎の Dynamical Ground Compliance (その 3)

— 基盤上に弾性層のある場合 (続) —

小堀 鐸二・南井良一郎・鈴木 有

## DYNAMICAL GROUND COMPLIANCE OF RECTANGULAR FOUNDATION ON AN ELASTIC STRATUM OVER A SEMI-INFINITE RIGID MEDIUM

By *Takuji* KOBORI, *Ryoichiro* MINAI and *Tamotsu* SUZUKI

### Synopsis

In this paper, we discuss, at first, on "Dynamical Ground Compliance" of a rectangular foundation on an elastic stratum over a semi-infinite rigid medium. Comparing the numerical results of horizontal case with those of vertical and rotational case derived in the previous paper<sup>2)</sup>, we can indicate, as a pronounced character of the horizontal case, the energy diffusion phenomena caused by the two kind of surface waves, the Rayleigh and Love waves. Secondly, to find the relation between Dynamical Ground Compliance and Voigt's ground model of the visco-elastic elements, the equivalent spring and damping coefficients of this simplified model are calculated from the various numerical results of Dynamical Ground Compliance derived already in the present and previous papers<sup>2), 3)</sup>.

### 1. ま え が き

構造物の地震応答には基礎周辺地盤の動特性が大きな影響を与えることは、理論的にも実験的にもあるいは震害観測の面からもしばしば指摘されているところである。最近、地盤を含む構造物の連成系としての地震応答を求めようとする研究が数多く報告されているが、その基礎ともいべき構造物系との連成を想定した地盤の動特性自体の解明さえ、まだまだ大きく立遅れているというのが現状であろう。

筆者らは、標題にある "Dynamical Ground Compliance" という概念を導入することによって、とくに弾性体とみなしうるような基礎周辺地盤の概括的な動特性を、所謂弾性波動論に基づいて表現しようという試みを行ってきた。ここに "長方形基礎の Dynamical Ground Compliance" とは、地表面上の剛体長方形基礎に種々の加振力が作用するとき、時間に関して Fourier 変換された像空間 (range) における、あるいは time factor を  $e^{i\omega t}$  とおいたときの原空間 (domain) における、基礎の加振方向の変位応答を加振力との比の形で表現したものである。これは剛性 (stiffness) の逆数の元をもつ複素数となり、基礎周辺地盤系の伝達関数に相当し、これを知れば任意の非定常な加振力に対する加振方向の基礎の変位応答を求めることができる。さらに、これを構造物系の伝達関数に接続すれば、任意の非定常な地震波入力に対する連成系の応答解析を行なうことが原理的に可能である。

前報 (その 1)<sup>2)</sup> において、基礎周辺地盤が 3 次元の拡がりをもつ半無限弾性体とみなしうるような場合を、同じく (その 2)<sup>3)</sup> では、半無限の剛の基盤上に平面的に無限の拡がりをもつ一様な厚さの弾性体の表層がのるとみなしうるような場合について、それぞれ報告した。ところが、(その 2) では、垂直および回

転加振の場合は数値解を求めて解の性状を検討し、その動特性について考察を行なったが、構造物系の地震応答を対象として地盤の動特性を論じるさいに最も基本的と思われる水平加振の場合を扱っていなかったため、本報の前半では、この場合の数値解とその特性について主として報告する。

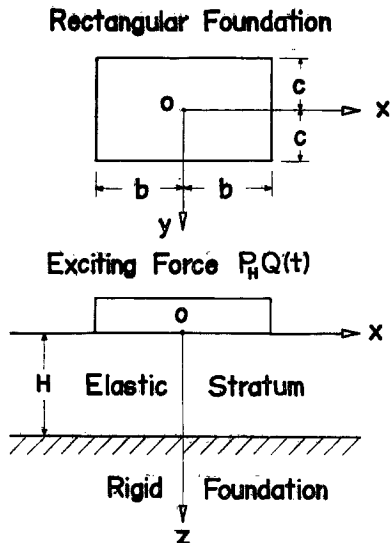
後半では、このような波動論的な扱いにはよらずに最初から地盤の a priori なモデル化を行なうとき、spring と dash-pot からなるような簡単なモデルが一般によく採用されているので、これまでに求められてきた Dynamical Ground Compliance で示される周辺地盤の特性を、spring と dash-pot の並列結合である Voigt type の系の特性に置き換えて、その等価係数を振動数の関数として換算した結果を、前報(その1)および(その2)で扱った場合をも含めて報告する。

なお、前報(その2)では、表層と基盤との間の境界条件に関して、水平面内のすべりのみ許す場合と完全に密着している場合という二つの理想的な状態に分け、 $j=1$  および  $j=2$  でそれぞれを表記したが、 $j=1$  の水平加振のときには Statical Ground Compliance が発散するなど不適切な現象が生じてくるので、ここではこの場合の検討を割愛し、完全に密着している  $j=2$  の場合のみを扱う。

## 2. Ground Compliance の解析的表現 (水平加振の場合)

### 2.1 Dynamical Ground Compliance の解析的表現

Fig. 1 に示すように、半無限の剛な基盤上に平面的に無限の広がりをもつ一様な厚さ  $H$  の等質等方な弾性層がのる地盤を考え、その地表面上の図に示すような断面



( $2b \times 2c$ ) をもつ自重を無視した剛体長方形基礎に、水平方向の加振力  $P_H Q(t)$  が作用する問題を扱う。直角座標系  $(x, y, z)$  に関する等質等方な3次元弾性体の波動方程式より出発し、これに空間座標  $x, y$  と時間座標  $t$  に関する3重 Fourier 変換を導入すれば、変位および応力成分の解を6個の未定常数を含んだ形で求めることができる。一方、弾性層の表面において、基礎下の加振方向の剪断応力のみ一様分布その他の応力をすべて零とおけば、未定常数が定まり、地盤内の任意の点の変位および応力成分を表わす解が得られる。基礎の加振方向の変位を基礎中心の位置における載荷面の地盤の変位で代表させれば、無次元化された Dynamical Ground Compliance の解析的表現は、半無限地盤の解をも含めて二つの場合を同一の式で表示することができる。以下では、層を成す地盤の場合を  $j=2$  で、半無限地盤の場合を  $j=0$  で表記する。前報(その2)の(3.45)および(3.47)式と重複するが、ここに結果のみをまとめて記しておく。

Fig. 1 Formulation of problem.

$$\frac{\mathcal{F}_t[u_0]}{\mathcal{F}_t[P_H Q(t)]} \cdot b\mu = \frac{u_0}{P_H e^{t\omega}} \cdot b\mu$$

$$= \frac{1}{\pi^2 a_0^2} \int_0^\infty \int_0^{\pi/2} \left[ \frac{\sin^2 \theta}{\xi \sqrt{\xi^2 - 1}} - \frac{\sqrt{\xi^2 - 1}}{\xi F_j(\xi)} D_j(\xi) \cos^2 \theta \right] \cdot E_j(\xi) S(a_0 \xi, \theta) d\theta d\xi \dots (2.1)$$

ここに、

$$\left\{ \begin{aligned} F_0(\xi) &= F(\xi) = (2\xi^2 - 1)^2 - 4\xi^2 \sqrt{\xi^2 - n^2} \sqrt{\xi^2 - 1}, \\ F_2(\xi) &= 4\xi^2 (2\xi^2 - 1) \sqrt{\xi^2 - n^2} \sqrt{\xi^2 - 1} \operatorname{cosech}(\sqrt{\xi^2 - n^2} a_1) \cdot \operatorname{cosech}(\sqrt{\xi^2 - 1} a_1) \\ &\quad - \{4\xi^4 + (2\xi^2 - 1)^2\} \sqrt{\xi^2 - n^2} \sqrt{\xi^2 - 1} \coth(\sqrt{\xi^2 - n^2} a_1) \cdot \coth(\sqrt{\xi^2 - 1} a_1) \\ &\quad + \xi^2 \{4(\xi^2 - n^2)(\xi^2 - 1) + (2\xi^2 - 1)^2\}, \end{aligned} \right.$$

$$\left. \begin{aligned}
 D_0(\xi) &= E_0(\xi) = 1, \quad E_2(\xi) = \tanh(\sqrt{\xi^2 - 1}a_1), \\
 D_2(\xi) &= \{\xi^2 \coth(\sqrt{\xi^2 - 1}a_1) - \sqrt{\xi^2 - n^2} \sqrt{\xi^2 - 1} \coth(\sqrt{\xi^2 - n^2}a_1)\} \coth(\sqrt{\xi^2 - 1}a_1), \\
 S(a_0\xi, \theta) &= \frac{\sin(a_0\xi \cos\theta) \cdot \sin\left(\frac{c}{b}a_0\xi \sin\theta\right)}{\cos\theta \cdot \sin\theta} \dots\dots\dots(2.2) \\
 n^2 &= \frac{c_2^2}{c_1^2} = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}, \quad a_0 = \frac{\omega}{c_2}b, \quad a_1 = \frac{\omega}{c_2}H = a_0 \frac{H}{b}, \quad \xi = c_2 \frac{\zeta}{\omega}, \\
 c_1, c_2 &: \text{表層内を伝播する疎密波および剪断波の速度, } \mu, \nu, H; \text{表層の剪断弾性係数, Poisson 比} \\
 &\text{および層厚, } b, c; \text{基礎の半巾, } \omega; \text{加振力の振動数, } \zeta; \text{wave number, } t; \text{時間, } \mathcal{F}_t; t \text{ に関する} \\
 &\text{Fourier 変換演算子}
 \end{aligned} \right\}$$

**2.2 Statical Ground Compliance 解析的表現**

“Statical Ground Compliance”, すなわち, Dynamical Ground Compliance の解析的表現において加振力の振動数  $\omega \rightarrow 0$  とした極限值, の解析的表現 ( $j=2$  の場合) は次式で与えられる。[前報 (その2) の (3.52) 式参照]

$$\begin{aligned}
 f_{sH_2} &= \frac{u_0}{P_H} \cdot b\mu = \frac{H}{\frac{b}{\pi^2} \frac{c}{b}} \int_0^\infty \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[ \tanh\eta \cdot \sin^2\theta \right. \\
 &\quad \left. + \frac{(1+n^2)\sinh\eta \cdot \cosh\eta + (1-n^2)\eta}{2[1+(1-n^2)\{(1+n^2)(\sinh\eta)^2 + (1-n^2)\eta^2\}]} \cos^2\theta \right] \frac{1}{\eta^2} S\left(\frac{\eta}{H/b}, \theta\right) d\theta d\eta \\
 &\dots\dots\dots(2.3)
 \end{aligned}$$

ここに,

$$S\left(\frac{\eta}{H/b}, \theta\right) = \frac{\sin\left(\frac{\eta}{H/b} \cos\theta\right) \cdot \sin\left(\frac{c}{b} \cdot \frac{\eta}{H/b} \sin\theta\right)}{\cos\theta \cdot \sin\theta}, \quad \eta = \zeta H \dots\dots\dots(2.4)$$

**2.3 振動数方程式とその解**

この場合には, (2.1) 式の積分中の二つの項の分母に現われてくる関数を零とおいた次の二つの振動数方程式が存在する。

$$F_2(\xi) = 0 \dots\dots\dots(2.5)$$

$$[E_2(\xi)]^{-1} = 0 \dots\dots\dots(2.6)$$

(2.5)式は剛基盤上に弾性層がある場合の Rayleigh 波の方程式を, (2.6) 式は同じ場合の Love 波の方程式を表わしており, とともに一般に有限個の実根をもっている。(2.5) 式の解については前報 (その2) で詳述したのでここでは省略する。(2.6) 式の根を  $\xi_{0k'}$  [ $k'=1, 2, \dots, N'$ ;  $N'$ は実根の総数] で表わすと, これはこの場合の一つの free wave である Love 波 (表面波) の phase velocity  $c_p$  と表層内を伝播する剪断波の速度  $c_2$  との逆比になっている。Fig. 2 は  $\nu=1/4$  ( $n^2=1/3$ ) のときの実根  $\xi_{0k'}$  を, 4次までの mode について, 振動数  $\omega$  と層厚  $H$  の積に比例する無次元量  $a_1$  の関数として図示したもので, 破線は上より表層内を伝わる剪断波の速度および同じく疎密波の速度にあたる。また, Fig. 3 は振動数  $\omega$  を wave number  $\zeta$  の関数として表わしたもの (Hamiltonian) である。これらの結果より計算された phase velocity  $c_p = \omega/\zeta$  を Fig. 4 に, group velocity  $c_g = d\omega/d\zeta$  を Fig. 5 に, それぞれ剪断波の速度  $c_2 = \sqrt{\mu/\rho}$  ( $\rho$ ; 表層の密度) との比の形で, wave number と層厚との積  $\zeta H$  の関数として図示した。

**3. Ground Compliance の数値解とその特性 (水平加振の場合)**

**3.1 数値計算および結果**

(2.1) および (2.3) 式の解析的表現に数値積分法を適用して数値解を誘導し, これがもつ特性を検討し

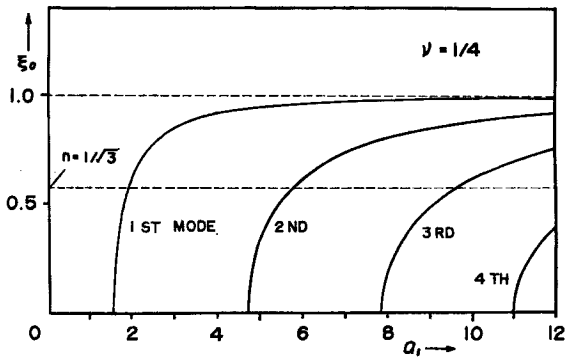


Fig. 2 Real roots of  $[E_2(\xi)]^{-1}=0, \nu=1/4$ .

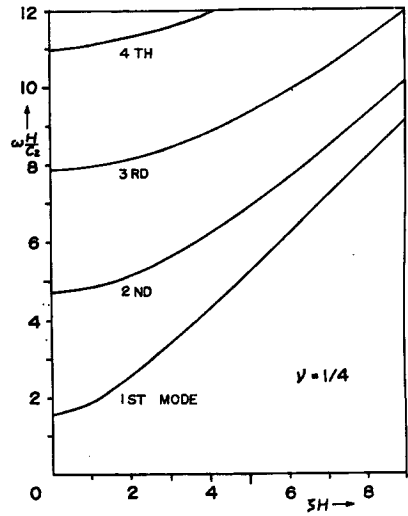


Fig. 3 Hamiltonian,  $\nu=1/4$ .

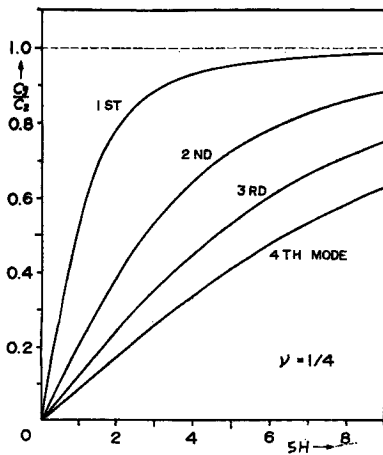


Fig. 5 Group velocity,  $\nu=1/4$ .

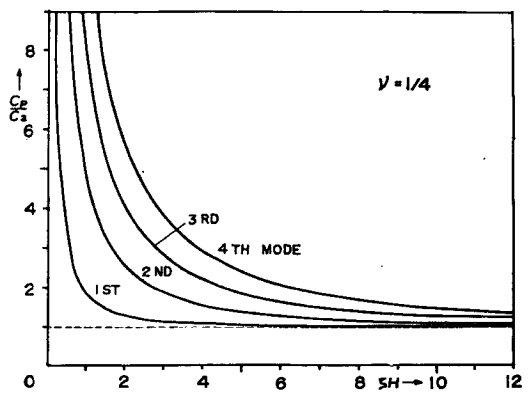


Fig. 4 Phase velocity,  $\nu=1/4$ .

てみよう。数値積分には前報(その2)で述べた方法をそのまま適用する。

(2.1) 式の積分には数個の特異点が存在するため、複素平面に拡張して評価しなければならないが、結果は複素数で得られるからその実数部を  $f_{1H}$ 、虚数部を  $f_{2H}$  で表示すれば、 $f_{2H}$  は前節で述べた二つの振動数方程式から得られる実根まわりの留数項の  $-pi$  倍の和となる。前報(その2)の(4.2)式で示される  $f_{2H}$  には Rayleigh 波に関するもの ( $R_{RH}$ ) しか記されていないが、さらに Love 波によるもの

$$R_{HL} = -\pi \cdot \frac{1}{\pi^2 a_0 \frac{c}{b}} \sum_{k'=1}^{N'} \frac{S_{1R}(a_0 \xi_{0k'})}{a_1 \xi_{0k'}} \dots\dots\dots (3.1)$$

ここに、

$$S_{1R}(a_0 \xi) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} S(a_0 \xi, \theta) \sin^2 \theta d\theta \dots\dots\dots (3.2)$$

が付加わることを訂正しておく。

計算結果はすべて、 $n^2=1/3$ 、すなわち、表層の Poisson 比  $\nu=1/4$  の場合である。Fig. 6 は Statical Ground Compliance の図で、層厚と平均基礎巾との比  $H/\sqrt{bc}$  の関数として、基礎断面積一定の関係を保ちながら、断面の形を加振方向とは直角な方向に細長くなるように変えて比較したものである。なお、半無限地盤の解が比較のために挿入してある。また、Figs. 7, 8 は、正方形断面のときの Dynamical Ground Compliance の実数部  $f_{1H}$  と虚数部  $f_{2H}$  を図示したもので、加振力の振動数と基礎の寸法と地盤常数とを結びつける無次元量  $a_0 = \omega b / c_2$  の関数として、層厚と加振方向の基礎半巾との比  $H/b$  を変えて比較したもの、Figs. 9, 10 は、加振方向の基礎巾  $2b$  をそのままにもう一方の巾  $2c$  を2倍にして基礎の断面形状を加振と直角な方向に細長く変えた場合の同じ図である。図中一点鎖線で示したのは比較のために挿入した半無限地盤の解で、虚数部の図にある点線は Rayleigh 波に関する留数によるもの  $R_{RH}$  を、したがって

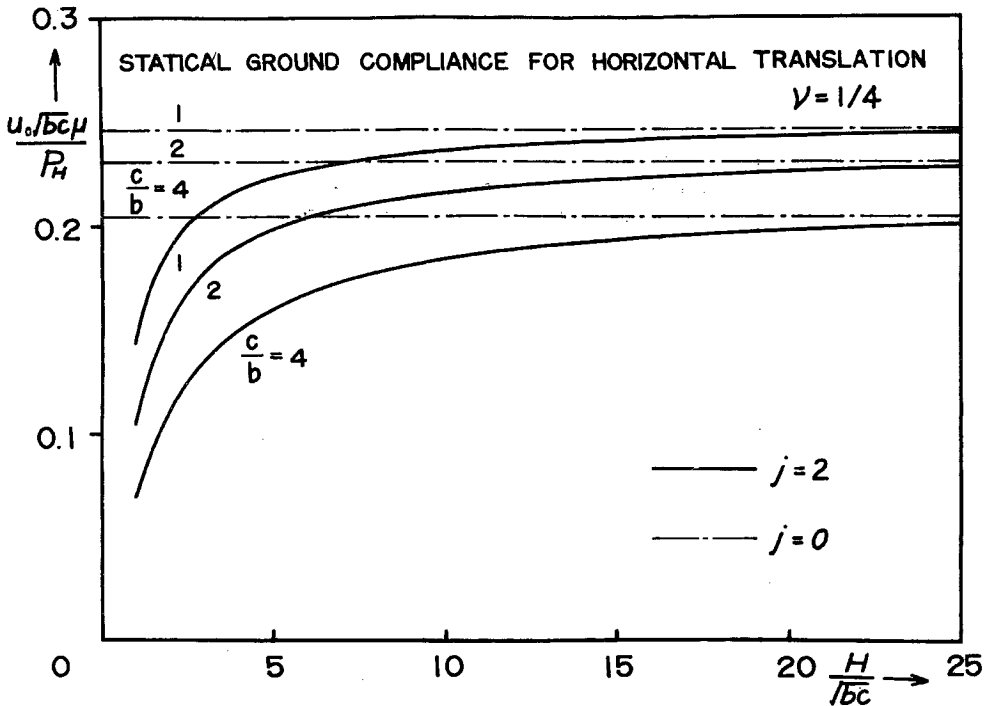


Fig. 6 Statical Ground Compliance, horizontal translation,  $\nu=1/4$ .

Dynamical Ground Compliance, horizontal translation,  $j=2, \nu=1/4$ .

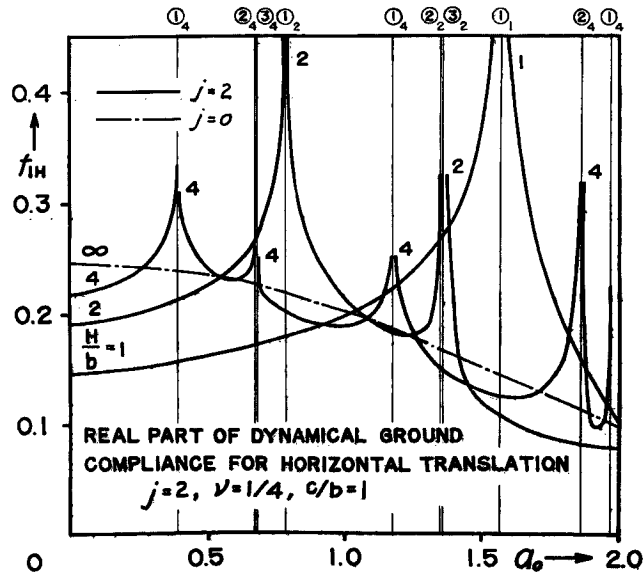


Fig. 7 Real part,  $c/b=1$ .

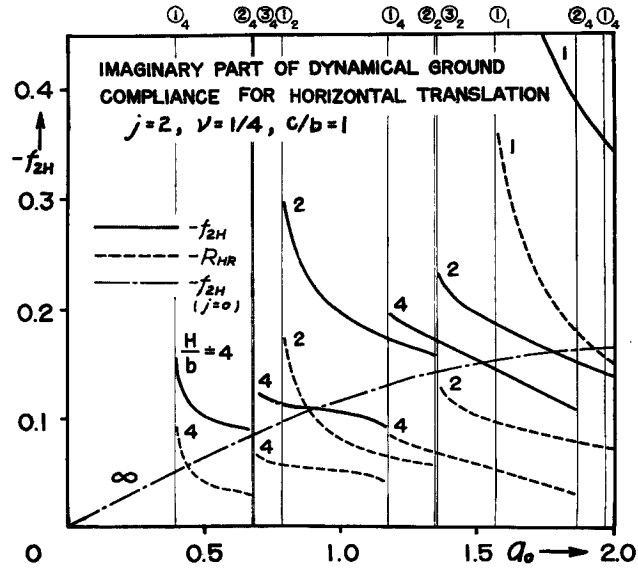


Fig. 8 Imaginary part,  $c/b=1$ .

Dynamical Ground Compliance, horizontal translation,  $j=2, \nu=1/4$ .

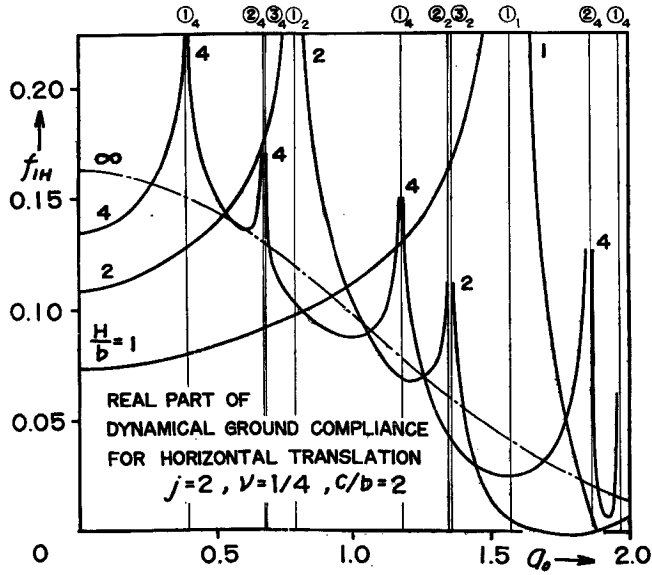


Fig. 9 Real part,  $c/b=2$ .

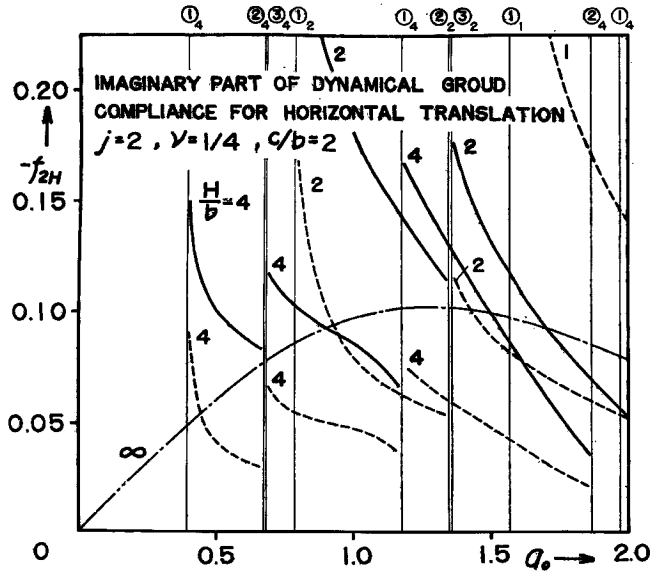


Fig. 10 Imaginary part,  $c/b=2$ .

実線と点線との間の部分が Love 波によるもの  $R_{HL}$  を表わしている。

### 3.2 解析結果の考察

#### 共振現象

表層の両境界面における波動の完全反射現象のために、振動数と層厚との間にある関係が満たされると、下記の三種の共振現象が起こる。それぞれの場合に、図の振動数範囲 ( $0 \leq a_0 \leq 2$ ) に現われてくるものを { } 内に併記しておく。

- ①  $\xi=0$  の近傍で積分が発散する場合——表層と同じ媒質で層厚に等しい長さをもつ、一端固定・他端自由な棒の剪断振動の固有振動数に一致するとき

$$a_1 = \frac{2m+1}{2}\pi, \quad \text{すなわち, } \omega = \frac{2m+1}{2H}\pi\sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \quad [m; \text{整数}]$$

$$\left. \begin{array}{l} H/b=1 \text{ のとき } a_0=1.5708 \\ H/b=2 \text{ のとき } a_0=0.7854 \\ H/b=4 \text{ のとき } a_0=0.3927, 1.1781, 1.9635 \end{array} \right\}$$

- ②  $F_2(\xi)=0$  が同じ mode で重複根をもつ場合——その mode の group velocity が零になるとき

$$a_1 = 2.7012, 7.4549, \dots\dots\dots$$

$$\left. \begin{array}{l} H/b=1 \text{ のとき } \text{なし} \\ H/b=2 \text{ のとき } a_0=1.3506 \\ H/b=4 \text{ のとき } a_0=0.6753, 1.8637 \end{array} \right\}$$

- ③  $F_2(\xi)=0$  が異なる mode の間で重複根をもつ場合——それらの mode の phase velocity が等しくするとき

$$a_1 = 2.7207, 8.1621, \dots\dots\dots$$

$$\left. \begin{array}{l} H/b=1 \text{ のとき } \text{なし} \\ H/b=2 \text{ のとき } a_0=1.3603 \\ H/b=4 \text{ のとき } a_0=0.6802 \end{array} \right\}$$

なお、Figs. 7~10 の上端に ① $_k$ [ $I=1, 2, 3; k=1, 2, 4$ ] なる記号で、 $H/b$  の値が  $k$  のときのその位置の共振振動数の種類を示した。

表層のある地盤が半無限地盤と異なる主要な特徴のひとつは、上記の三種の共振振動数が無数に存在することであるが、ここで扱っている問題では、表層の媒質自身には dissipative な減衰機構を導入していないことと、表層から剛基盤への波動伝播が生起しえないために、その共振振巾は無無限大に発散する。

#### 減衰機構

虚数部  $f_{2H}$  は減衰に関係する量で、Rayleigh 波および Love 波に関する二つの振動数方程式の実根まわりの留数項  $R_{HR}$  および  $R_{HL}$  の和から成立っている。したがって、加振力の作用する地表面の震源から radial 方向に拡がる波動の逸散によって所謂 エネルギー減衰が起こるが、これは、free wave である Rayleigh 波および Love 波という二種の表面波によって生じ、地盤はみかけ上減衰作用を示すわけである。そして、振動数が増して一つの共振点を越えると、新たに高次の mode の表面波が現われてきて、エネルギー減衰の量が増加する。前報(その2)で扱った垂直および回転加振の場合は、応力分布のとり方からも明らかのように、主として縦波を誘発しやすい加振型であったから、表面波として Rayleigh 波のみを生じたが、水平加振の場合は横波を誘発しやすい加振型なので、shear wave type の Love 波がさらに付加わったところに、この加振型の他と異なる大きな特徴がある。

#### 表面波の性質

層が存在する場合には半無限地盤の場合とは異なり、wave number あるいは波長によって表面波の速度が変わるといふ所謂分散 (dispersion) の現象がみられ、無数の mode が存在する。(2.5) 式の解より得られる Rayleigh 波の性質については前報(その2)で詳述したので、ここでは主として(2.6)式の解より



り求められる Love 波の性質を中心に考察を行なうことにする。

まず、その phase velocity は表層を伝わる剪断波の速度より大きい、group velocity は逆に小さくなっており、振動数と層厚との積に比例する量  $a_1$  が増加するとともに、両者とも剪断波の速度に近づいていく。また、 $a_1$  が大きくなると実根の個数が増し、現われてくる Love 波の mode の数が次第に増加する。 $\xi_{0v}=0$  すなわち wave number  $\zeta=0$  あるいは波長が無限大のところの  $a_1$  の値から算出した振動数は、層厚に等しい長さをもつ一端固定・他端自由な 3次元の棒の固有振動数に一致しており、これはまた前述の第①種の共振振動数にも一致していることがわかる。

なお、振動数方程式に実根が存在しないような、すなわち、表面波が全く存在しないような  $a_1$  の領域  $0 < a_1 < a_{1cr} = \pi/2$  (i. e.  $\omega_{cr} = \pi\sqrt{\mu/\rho}/2H$ ) が 2種の表面波に共通に存在する。言い換えると、表層と同じ媒質・同じ境界条件で、層厚に等しい長さをもつ 3次元の拡がりをもつ棒の、加振型に対応する振動形態(剪断振動)の基本固有振動数  $\omega_{cr}$  より低い振動数領域では、表面波が存在せず、したがって地盤は減衰作用を全く示さない。このことはまた、表層のある地盤が半無限地盤と異なる主要な特徴のひとつである。

#### 他の加振型との比較・基礎巾と層厚との比および断面形状の及ぼす影響

前報で扱った他の加振型の結果と比較すれば、ともに並進方向の振動という意味で振動現象として本質的な差がないことに対応して、全般的な傾向は垂直加振の場合に似ているといえよう。

Dynamical Ground Compliance は、地表面における加振点での変位応答という集約された形で地盤の動特性を把えているので、基礎巾に比べて表層の層厚が相対的に大きくなると、当然基礎の存在の及ぼす影響が少なくなり、共振点の近傍を除いて半無限地盤の解へ近づくことが予想されるが、回転加振のときとは異なり、この場合の収束は遅い。しかし、後述の Statical Ground Compliance の数値解から判断して、垂直加振の場合と同様に、 $H/b=10$  すなわち基礎巾に対する層厚の比が 5 程度以上あれば、半無限地盤として扱っても工学的には差支えないのではなかろうか。さらに、 $H/b$  の値が大きくなれば、波動の逸散による地盤のみかけの減衰作用が存在しない振動数領域が極めて狭くなること、および、現実の地盤には多少とも媒質自身に dissipative な減衰作用が存在して共振振巾が有限になること、を考慮すれば、表層が存在する場合の前述の二つの主要な特徴の及ぼす影響は、このような地盤では小さくなることを予想しうるので、上のような扱いを近似的には許しうのではないかと考える。

なお、断面形状の及ぼす影響については、加振方向の基礎巾を一定にしてこれと直角な方向の基礎巾を増しても、全般的な傾向はほとんど変わらず、基礎断面積の増加による影響も加わって、Dynamical Ground Compliance の値が実数部・虚数部ともに全般的に減少するという結果になっている。

#### Statical Ground Compliance の特性

$H/b$  の増加とともに漸近的に半無限地盤の状態へ近づいていくが、その収束は遅い。また、基礎断面積を一定に保って、加振と直角な方向に細長くした場合の断面形状の及ぼす影響は、半無限のときと同じように、どのような  $H/\sqrt{bc}$  の値に対しても細長いものほど小さく、静的剛性は大きく現われる。総じて垂直加振の場合とほぼ似た傾向を示している。

### 4. 置換系の等価係数で表現した Ground Compliance の特性

Dynamical Ground Compliance 誘導の基礎になった波動論的な扱いにはよらずに、構造物系の耐震性に及ぼす地盤の影響を論じようとするとき、従来は mass や spring や dash-pot から成るような単純な地盤モデルを最初から設定してしまう場合が多かった。なかでも、最も単純な組み合わせのひとつと思われる spring と dash-pot の並列結合である Voigt type のモデルがよく採用されている。そこで、従来からの簡単な地盤モデルとの対応関係をみるために、前報(その1)および(その2)で扱った場合をも含めて、これまでに求められた Dynamical Ground Compliance で示される地盤の動特性を、このような Voigt type の系の特性に置き換えて、前報(その1)での扱いと同じようにして、その等価係数を振動数の関数として換算してみよう。置換系の伝達関数を  $1/(k_0 + ia_0c_0)$  で表わせば、等価バネ剛性係数  $k_0$  および等価

Equivalent coefficients of a Voigt type system, vertical translation,  $\nu=1/4$ .

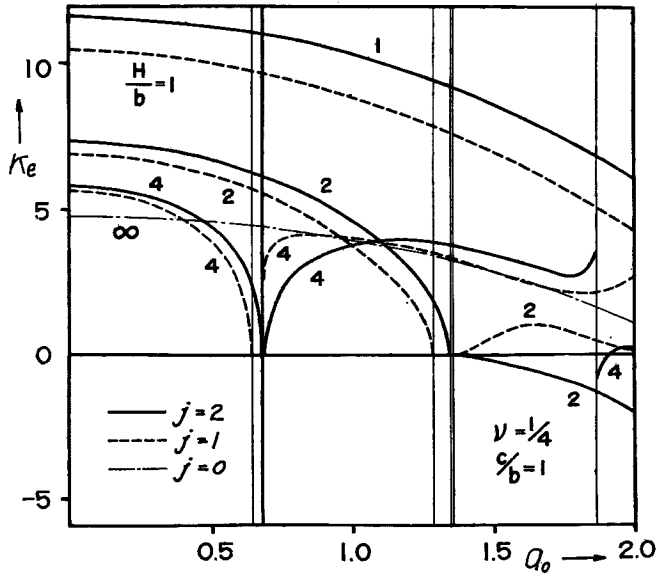


Fig. 11 Spring coefficient,  $c/b=1$ .

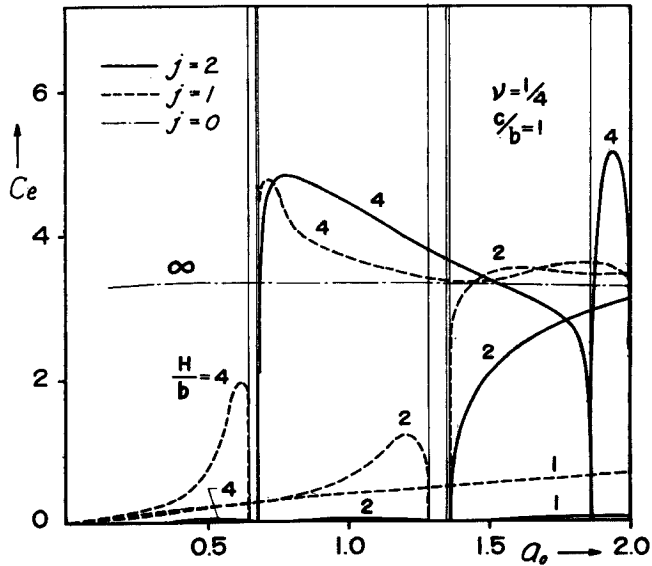


Fig. 12 Damping coefficient,  $c/b=1$ .

Equivalent coefficients of a Voigt type system, vertical translation,  $\nu=1/4$ ,

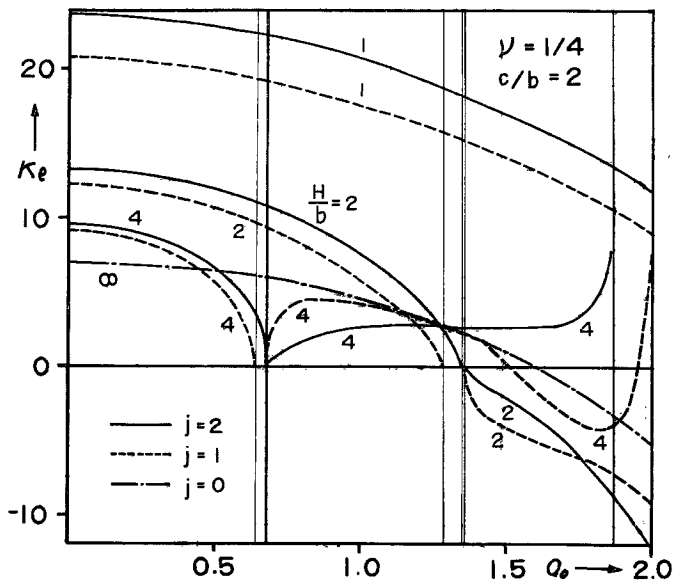


Fig. 13 Spring coefficient,  $c/b=2$

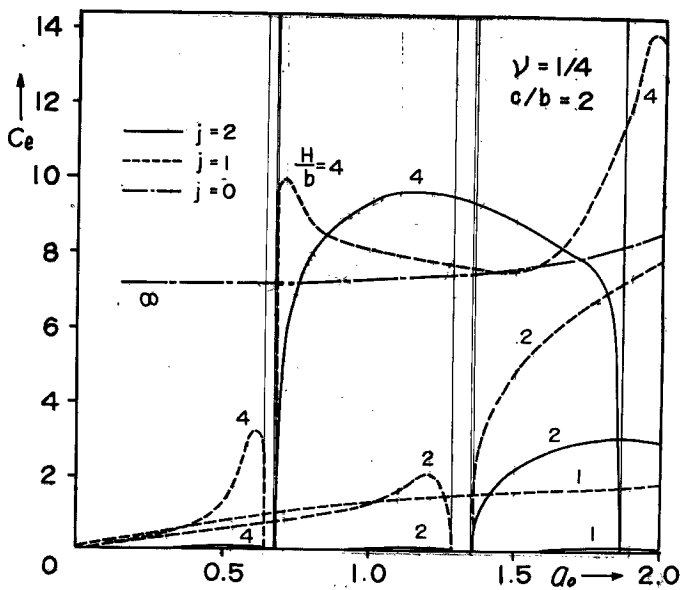


Fig. 14 Damping coefficient,  $c/b=2$ .

Equivalent coefficients of a Voigt type system, horizontal translation,  $\nu=1/4$ .

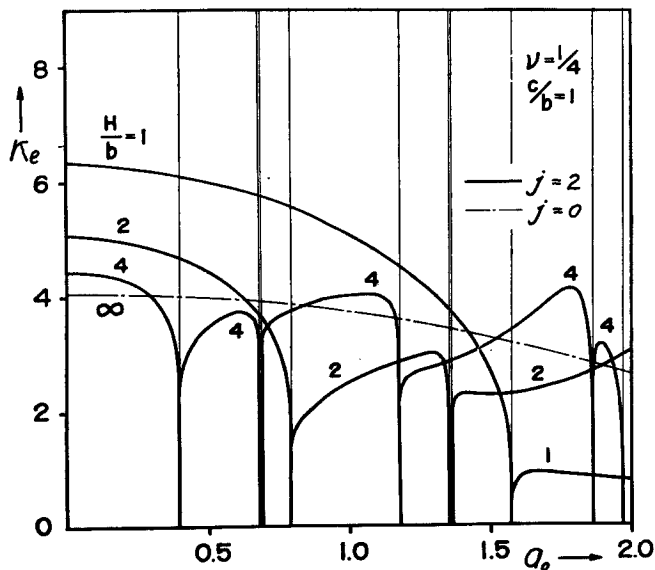


Fig. 15 Spring coefficient,  $c/b=1$ .

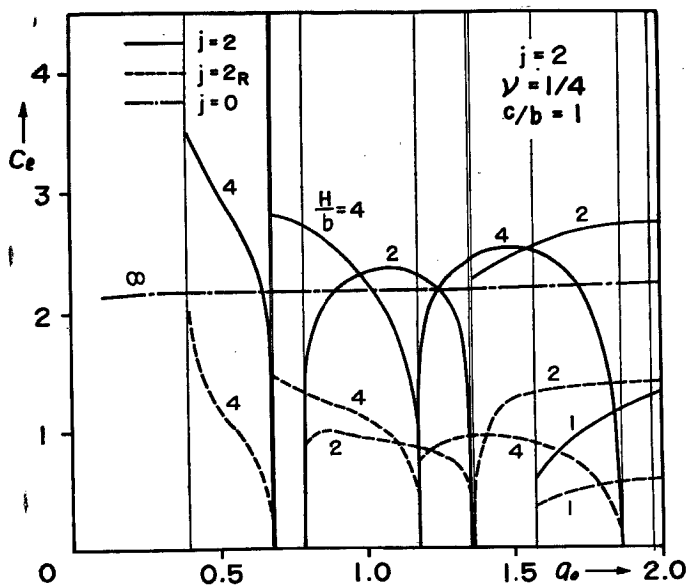


Fig. 16 Damping coefficient,  $c/b=1$ .

Equivalent coefficients of a Voigt type system, horizontal translation,  $\nu=1/4$ .

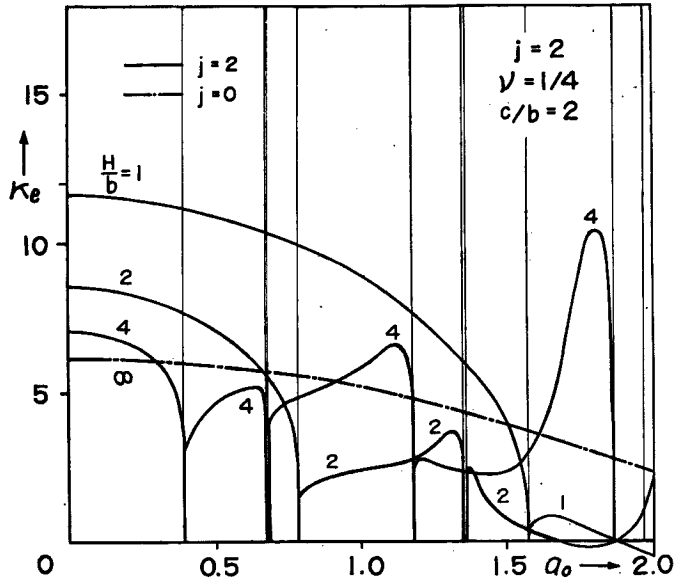


Fig. 17 Spring coefficient,  $c/b=2$ .

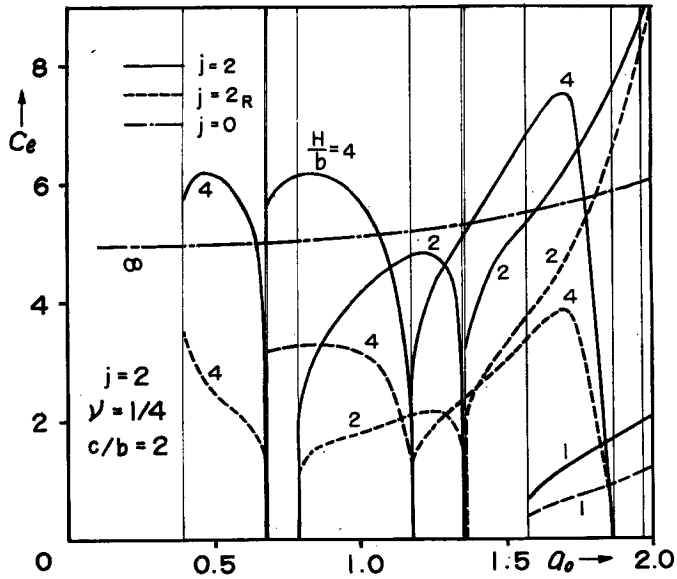


Fig. 18 Damping coefficient,  $c/b=2$ .

Equivalent coefficients of a Voigt type system, rotation,  $\nu=1/4$ .

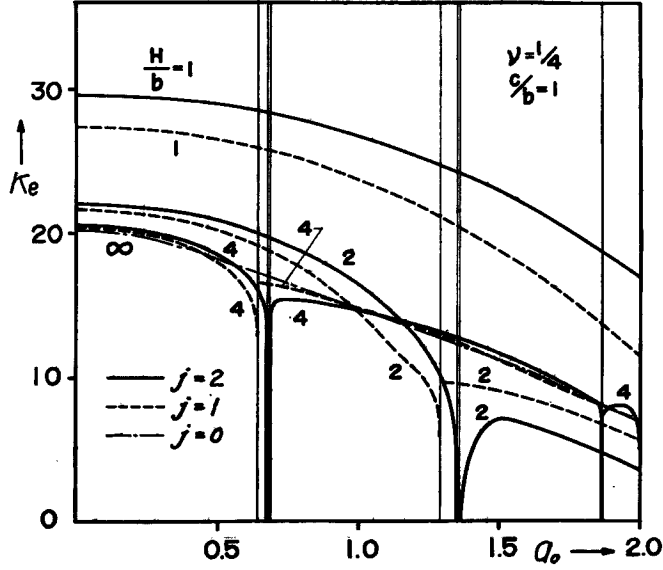


Fig. 19 Spring coefficient,  $c/b=1$ .

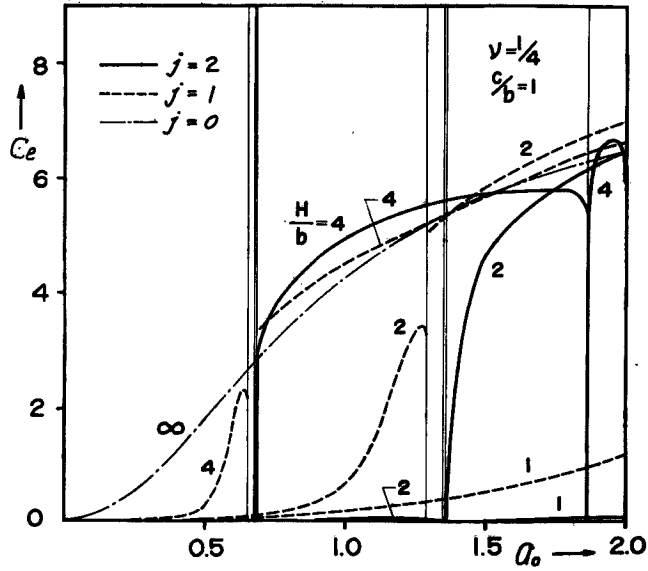


Fig. 20 Damping coefficient,  $c/b=1$ .

Equivalent coefficients of a Voigt type system, rotation,  $\nu=1/4$ .

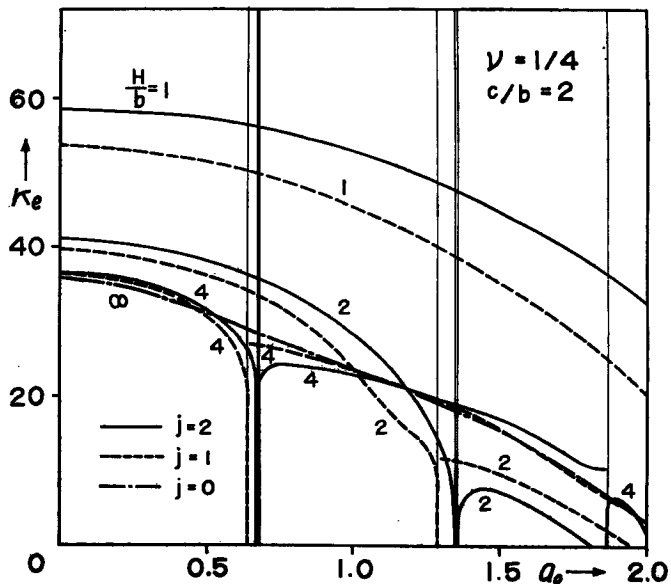


Fig. 21 Spring coefficient,  $c/b=2$ .

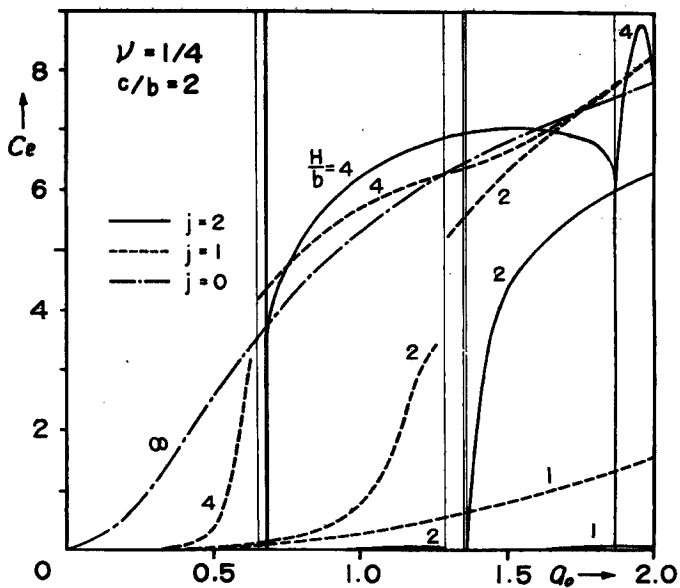


Fig. 22 Damping coefficient,  $c/b=2$ .

粘性減衰係数  $c_e$  は次式で与えられる。

$$k_e = \frac{f_{1l}}{f_{1l}^2 + f_{2l}^2}, \quad c_e = \frac{-f_{2l}}{a_0(f_{1l}^2 + f_{2l}^2)}, \quad l = [V, H, R] \dots \dots \dots (4.1)$$

垂直加振の場合を Figs. 11, 12 ( $c/b=1$ ) および Figs. 13, 14 ( $c/b=2$ ) に、水平加振の場合を Figs. 15, 16 ( $c/b=1$ ) および Figs. 17, 18 ( $c/b=2$ ) に、そして回転加振の場合を Figs. 19, 20 ( $c/b=1$ ) および Figs. 21, 22 ( $c/b=2$ ) に示す。図中、実線は表層のある地盤で基盤との間が完全に密着している場合 ( $j=2$ ) を、点線は同じく水平面内のすべりのみを許す場合 ( $j=1$ ) を、一点鎖線は半無限地盤の場合 ( $j=0$ ) を表わしている。なお、水平加振の  $c_e$  の図では点線の意味が異なり、Rayleigh 波による減衰部分を表わしているので、したがって点線と実線の間が Love 波による減衰部分を示すことになる。

結果を総合すれば、

1. 表層のある地盤が半無限地盤と異なる主要な特徴のひとつとして、三種の共振振動数が無数に存在することを述べたが、ここでは非常に理想化された地盤モデルを想定しているために、共振帯幅が無限大に発散し、その振動数では剛性係数  $k_e$  あるいは粘性減衰係数  $c_e$  は零となる。そして、基礎巾に対する層厚の比  $H/b$  が大きいほど、共振点の近傍から急速に零に収束している。
2. 剛性は全般的にみれば振動数に関して漸減の傾向にあり、とくに低振動数領域では変化が少ない。基盤の存在が表層に拘束を与えるために、最初の共振点に至るまでの低振動数領域では、基礎巾に対する層厚の比が小さくなって基盤の存在の影響が大きくなるほど、剛性は大きく、また、基盤と表層との間の境界条件としてより拘束の強い  $j=2$  の状態の方が  $j=1$  より、剛性が大きく現われている。
3. 波動の逸散に起因する diffusive なエネルギー減衰によって地盤はみかけ上減衰作用を示すが、表層のある地盤の主要な特徴のひとつとしてあげておいたように、最初の共振点に至るまでの低振動数領域において、この減衰が極めて小さいか ( $j=1$  のとき) あるいは全く存在しない ( $j=2$  のとき) ことが、これらの図にも明瞭に現われている。これより大きい振動数領域では、全般的にみて、垂直および水平の並進方向の加振型ではほぼ平坦な傾向を示しているが、回転加振では振動数の増加とともに増大し、 $H/b$  の値が大きくなるほどこのような傾向はより顕著になって、半無限地盤にみられる傾向に一致する。
4. このように、ここで扱った地盤の動特性に関して、振動数による等価係数の変動が相当に大きいことは、地盤を簡単なモデルに抽象するさいに、それらの特性値を振動数に無関係な常数として与えているという従来の方法の欠陥を示唆しているわけである。しかし、基礎周辺の構成が半無限体とみなしうるような地盤で、とくに低振動数領域のみを対象とする並進振動の場合には、従来のような地盤モデルの設定も許しうるといえよう。

## 5. む す び

地盤の影響をとり入れた構造物系の耐震性を明らかにしていくための基礎的研究として、弾性波動論に基づいて求められた Dynamical Ground Compliance (伝達関数) という概念を導入することにより、構造物の周辺地盤の概括的な動特性を明らかにしようとする一連の研究を行ってきた。前報(その1)では半無限体とみなしうるような周辺地盤を、(その2)では剛な地盤上に一樣な厚さの弾性体の表層がのっているような地盤を扱ったが、本報では(その2)に引き続いて、まず、そこには含まれていなかった水平加振の場合の動特性の解明を試みた。次いで、これまでに求められた Dynamical Ground Compliance を、波動論的な手法にはよらずに地盤の簡単なモデルを最初から設定してしまう従来の方法で、最もよく採用されてきた Voigt type の系の特性に置き換えて、その等価係数を換算し、これまでの簡単な地盤モデルとの対応関係を検討した。その結果、

(1) 横波としての成分を生起しやすい水平加振の場合には、Rayleigh 波に新たに shear wave type の Love 波が加わって、この2種の表面波の逸散によってエネルギー減衰が生じるというところが、他の加振型の場合とは異なるが、その他の点では、全体として垂直加振の場合とほぼ似た傾向を示していること。



(2) ここでの扱いのように地盤を完全弾性の連続体と想定したときには、従来の単純な地盤モデルのように、周辺地盤の等価的な剛性係数や粘性減衰係数を振動数に無関係な一定値として与えることは一般にはできないが、半無限体とみなしうるような構成をもつ周辺地盤で、低振動数領域での挙動に限られた並進振動の場合には、地盤常数と基礎の形状・寸法により定まる特性値をもつ従来のような地盤モデルの設定も可能なこと。

などを明らかにすることができた。

成層構造をもつ地盤の動特性を解明する第一段階として、本報では、問題の扱いを簡単にするのと最も基本的な地盤を対象に選ぶという目的から、極めて理想化された地盤のモデルを設定している。例えば、共振振巾が無限大に発散する等の特異な現象が生じている。このような点を改善してより現実の地盤に近いモデルとするには、次の発展段階として、表層の媒質に dissipative な減衰機構を導入すること、および基盤に有限な剛性を与えることなどが考えられるが、今後に残された課題である。次報(その4)では、その前段階の研究として、Voigt type の減衰機構をもつ媒質からなる半無限粘弾性地盤を対象を選び、その動特性の解明を試みる。

以上の計算には、京都大学計算センターの digital 電子計算機“KDC—I”<sub>μ</sub>(HITAC 102)ならびに“KDC—II”(HITAC 5020)を使用した。

#### 参 考 文 献

- 1) 小堀鐸二, 南井良一郎, 鈴木有: 弾性層上の長方形基礎の Ground Compliance, 日本地震工学シンポジウム(1966)講演集, 昭41.10, pp.261—266.
- 2) 小堀鐸二, 南井良一郎, 鈴木有, 日下部馨: 長方形基礎の Dynamical Ground Compliance (その1) ——半無限弾性地盤の場合——, 京都大学防災研究所年報, 第10号A, 昭42.3, pp.283—314.
- 3) 小堀鐸二, 南井良一郎, 鈴木有: 長方形基礎の Dynamical Ground Compliance (その2) ——基盤上に弾性層のある場合——, 京都大学防災研究所年報, 第10号A, 昭42.3, pp.315—341.
- 4) 小堀鐸二, 南井良一郎, 鈴木有: 弾性層上の長方形基礎の Dynamical Ground Compliance (水平加振の場合), 日本建築学会近畿支部研究報告集, 昭42.4, pp.85—88.
- 5) 小堀鐸二, 南井良一郎, 鈴木有: 基礎周辺の弾性地盤の等価剛性と減衰性について, 日本建築学会論文報告集, 号外, 昭42.10, p.165.