

建物—基礎構造体—表層地盤連成系の振動解析に関する研究（その1）

——基礎構造体側壁での動的相互作用ばねと震動土圧の離散化表示——

安井 讓

Study on Interaction Problems of Superstructure-Substructure-Soil Surface Layer System (Part 1)

——Discrete Representation of Dynamic Interaction Spring Coefficients and Seismic Earth Pressures at Side Wall of Substructure——

Yuzuru Yasui

Abstract

In order to simulate a system which consists of a superstructure, a substructure and a soil surface layer by a lumped mass model, lumped or discrete representations regarding dynamical interaction spring coefficients and seismic earth pressures at the side of the substructure are necessary. The author derived these discrete representations making use of Tajimi's general solution. In comparison with earlier work by J. Penzien or recent work by K. Wakamatsu, the author's method has the following advantages: (1) coefficients are dynamic, not static, (2) dynamic effects of the surface layer are considered, (3) radiation damping from side walls is included, and (4) representations are infinite series so that handling by computer is easy. These representations and some numerical examples are shown in this report.

概要

建物、基礎構造体および表層地盤からなる系を集中質量系でモデル化するためには、基礎構造体側面での表層地盤による動的相互作用ばねと地震時に表層地盤から受ける震動土圧に関する離散化表示が必要となる。このたび、田治見博士が深い基礎理論の中で表層地盤に弾性波動理論を適用して求めている一般解を利用して、これらの離散化表示式を得た。静的な相互作用ばねの離散化表示については、古くは Penzien、最近では若松らによって求められている。本法はこれら既往の研究に比較して次の様な特長をもっている。即ち、(1) 動的な係数として求まること、(2) 表層地盤の動特性が考慮されていること、(3) 基礎構造体側面から表層地盤への波動逸散減衰効果が表示式の中に含まれていること、(4) 表示式が無限級数で求まるため電算機による計算が容易であること。本報告では、離散化表示式を示すとともに、これらの表示式に関する若干の数値計算結果を示す。

1. 序

本研究の目的は、建物—基礎構造体—表層地盤連成系の地震応答解析手法を開発し、その手法を用いて建物および基礎構造体の耐震安全性を検討することにある。本研究で対象とする基礎構造体の典型的なものとして次の様な形式のものを考えている。即ち、基礎構造体は基礎あるいは地下室とそれを支持する連続地中壁とからなっているとす。この連続地中壁は基礎構造体の外周を取り囲んでいるものとし、その先端は硬質地盤に支持されているものとする。この様な構造物の耐震安全性を検討

するための解析モデルは基礎構造体と表層地盤および地中壁に取り囲まれた内部地盤との相互作用の効果が適確に取り入れられたものでなければならない¹⁾。本研究では構造物を集中質量系でモデル化することを考える。このとき、基礎構造体と表層地盤および内部地盤との動的相互作用ばねを離散化表示する必要が生じる。更に、表層地盤あるいは内部地盤が地震時に基礎構造体に及ぼす震動土圧についても離散化表示する必要がある。このたび、田治見博士の深い基礎の理論²⁾の中で得られている表層地盤についての一般解を利用して、動的相互作用ばねと震動土圧³⁾の離散化表示式を求めた。本法ではこれ

2c_i, その中点から基盤までの距離を d_i とする。この分割数は基礎構造体を質点系で置換する際の質点数に対応し, 厚さは質点化するときの範囲に対応する。今, U_g=0, 即ち地震入力がない場合を考え, 図-3 に示す様に, i 番目の分割小円筒域に正弦振動する分布荷重 $\bar{q} \cdot e^{i\omega t}$ が作用しているとする。この荷重は深さ方向には一様で円周方向には楕円分布 (4式参照) であるとする。また, この分布荷重の合力の絶対値は 1 とする。このとき得られる r=a での連続した変位分布 2u_i(z) を有限個の離散点の変位で代表させることを考える。離散点として各々の分割小円筒域の中点を考え, 離散値としては各々の分割小円筒域での平均値をとる。こうして定めた。i 番目の分割小円筒域の変位を U_{ij} · e^{iωt} とすると U_{ij} を要素にもつマトリクス [U^s] は動的な影響係数となる。従って求める動的相互作用ばねのマトリクス [K^s] は次式により定めることができる。

$$[K^s] = [U^s]^{-1} \quad \dots\dots\dots(10)$$

以下で U_{ij} の表示式を求める。なお, 本節で前章の諸式を用いる際 U_g=0 としている点に注意されたい。

まず, i 番目の分割小円筒域に作用している正弦波分布荷重を円周方向に積分したものを q とする。その q は次式で表わされる。

$$q = \int_0^{2\pi} \bar{q} \cdot e^{i\omega t} a d\theta = \frac{1}{2c_1} \cdot e^{i\omega t}$$

上式をフーリエ級数に展開すると次の様になる。

$$q = \frac{4}{\pi c_1} \sum_{n=1,3} \frac{\sin\left(\frac{n\pi c_1}{2H}\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi d_1}{2H}\right)}{n} \sin \frac{n\pi z}{2H} \cdot e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots(11)$$

-q は(7)式の p(z) と等しい。即ち,

$$p(z) = -q \quad \dots\dots\dots(12)$$

一方, r=a での地盤の変位 u_i(z) も級数表示して次の様に表わしておく。ここに, U_nⁱ はフーリエ係数である。

$$u_i(z) = \sum_{n=1,3} U_n^i \sin \frac{n\pi z}{2H} \cdot e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots(13)$$

この u_i(z) は変位 u_r の一般式と次の様な関係にある。

$$u_r|_{r=a} = u_i(z) \quad \dots\dots\dots(14)$$

(2), (4), (7), (11), (12), (13), (14)の諸式を用いると(13)式中の U_nⁱ を定めることができる。結局 u_i(z) は次の様になる。

$$u_i(z) = \frac{1}{\mu\pi a} \cdot \pi \left(\frac{2}{\pi}\right)^3 \left(\frac{2H}{\pi a}\right) \left(\frac{H}{c_1}\right) \times \sum_{n=1,3} \frac{\sin\left(\frac{n\pi c_1}{2H}\right) \sin\left(\frac{n\pi d_1}{2H}\right)}{n^2 \xi_n^2 \Omega_n^*} \sin\left(\frac{n\pi z}{2H}\right) \cdot e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots(15)$$

ここで, (15)式中の Ω_n^{*} は次式で表わされるものである。

$$\Omega_n^* = \frac{K_1(\eta_{Ln}^*) + K_1(\eta_{Tn}^*) \frac{2K_1(\eta_{Ln}^*) + \eta_{Ln}^* K_0(\eta_{Ln}^*)}{2K_1(\eta_{Tn}^*) + \eta_{Tn}^* K_0(\eta_{Tn}^*)}}{K_1(\eta_{Ln}^*) + \eta_{Ln}^* K_0(\eta_{Ln}^*) - K_1(\eta_{Tn}^*) \frac{2K_1(\eta_{Ln}^*) + \eta_{Ln}^* K_0(\eta_{Ln}^*)}{2K_1(\eta_{Tn}^*) + \eta_{Tn}^* K_0(\eta_{Tn}^*)}} \quad \dots\dots\dots(16)$$

(15)式を用いると離散化された変位 U_{ij} は次の様に求まる。

$$U_{ij} \cdot e^{i\omega t} = \frac{1}{2c_1} \int_{d_j-c_j}^{d_j+c_j} u_i(t) dz = \frac{1}{\mu\pi a} \cdot \frac{16}{\pi^2} \left(\frac{H}{c_1}\right) \left(\frac{H}{c_j}\right) \left(\frac{2H}{\pi a}\right) \times \sum_{n=1,3} \frac{\sin\left(\frac{n\pi c_1}{2H}\right) \sin\left(\frac{n\pi c_j}{2H}\right) \sin\left(\frac{n\pi d_1}{2H}\right) \sin\left(\frac{n\pi d_j}{2H}\right)}{n^2 \xi_n^2 \Omega_n^*} \cdot e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots(17)$$

こうして U_{ij} が求まると [K^s] は(10)式により求めることができる。U_{ij} は振動数の関数となるから [K^s] の各要素 K_{ij}^(s) も振動数の関数となる。

4.2. 震動土圧の離散化表示

地下構造体側面から入射する地震力即ち震動土圧の離散化表示式を求める。この震動土圧の離散化表示式は次の様にして求める。入力が基盤において正弦振動 u_g = U_g · e^{iωt} で与えられているとする。このとき基礎構造体側面位置 (r=a) での地盤の基盤に対する相対変位を零とする。言い換えれば, 図-4 に示した様に, その基部が基盤に固定された半径 a の剛な円筒基礎を考えることになる。この剛基礎の側壁に加わる土圧が震動土圧³⁾ である。地下構造体を質点系でモデル化することからこの震動土圧を離散化表示して各質点に作用する集中力とし

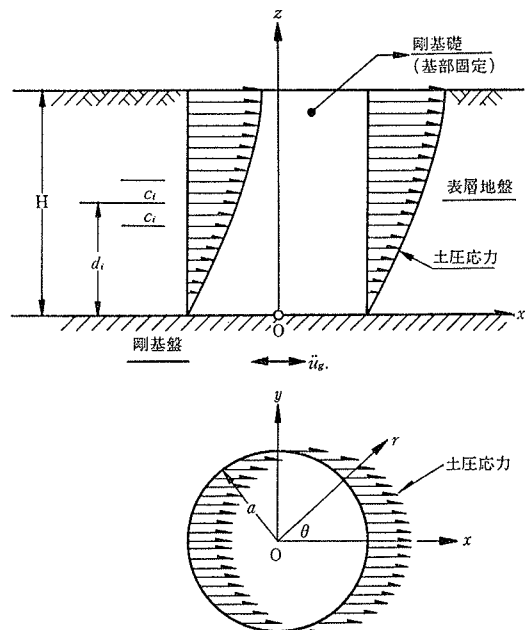


図-4 表層地盤の震動による土圧応力分布

て表現しておく必要がある。この離散値として、前節で想定した各分割小円筒域での積分値をとることとする。これらの離散化表示した震動土圧のほかに地下構造体基部の中心線まわりの震動土圧による転倒モーメント E_R も求めておく。これは質点系モデルにおいて基礎構造体基部での回転を考慮するためのものである。参考のために震動土圧による合水平力 E_S も求めておく。以下で震動土圧のベクトル $\{E\}$ の要素 E_I および E_R と E_S の表示式を求める。

この場合、地盤の変位について次の条件が成り立つ。

$$u_r|_{r=a} = 0 \quad \dots\dots\dots(18)$$

(18)式と(4)式とから、 A_n 、 B_n を定めることができる。この A_n 、 B_n を(7)式に代入すると基礎構造体単位長さあたりに作用する震動土圧 $p_E(z)$ を求めることができる。計算すると次のようになる。

$$p_E(z) = \rho \pi a^2 \sum_{n=1,3}^{\infty} \xi_n^2 \omega_g^2 \frac{4}{n\pi} \cdot \frac{\Omega_n^*}{\xi_n^2} \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2 \cdot U_g \cdot \sin \frac{n\pi z}{2H} \cdot e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots(19)$$

従って、各々の分割小円筒域に作用する震動土圧の合力 $E_I^{(S)}$ は次の様に求まる。

$$E_I^{(S)} = \int_{d_i - c_i}^{d_i + c_i} p_E(z) dz$$

$$= \frac{8}{\pi^2} \left(\frac{H}{c_i}\right) \left(\frac{a}{H}\right) \sum_{n=1,3}^{\infty} \frac{\Omega_n^*}{n^2} \sin \frac{n\pi c_i}{2H} \sin \frac{n\pi d_i}{2H} \times (-m_1^{(S)} \ddot{u}_g) \quad \dots\dots\dots(20)$$

ここに、

$$m_1^{(S)} = 2\rho\pi a H c_i \quad \dots\dots\dots(21)$$

また、基礎構造体基部の中心線まわりのモーメントは(9)式により次の様に求まる。

$$E_R = \frac{32}{\pi^3} \left(\frac{a}{H}\right) \sum_{n=1,3}^{\infty} \frac{\Omega_n^* (-1)^{\frac{n-1}{2}}}{n^3} \times \left(-\frac{H}{2} m_s^{(S)} \ddot{u}_g\right) \quad \dots\dots\dots(22)$$

ここで、

$$m_s^{(S)} = \rho\pi a H^2 \quad \dots\dots\dots(23)$$

最後に、震動土圧による合水平力は(8)式を用いて次の様に求まる。

$$E_S = \frac{8}{\pi^2} \left(\frac{a}{H}\right) \sum_{n=1,3}^{\infty} \frac{\Omega_n^*}{n^2} \times (-m_s^{(S)} \ddot{u}_g) \quad \dots\dots\dots(24)$$

4.3. 内部地盤による動的相互作用ばねと震動土圧の離散化表示

内部地盤について同様な表示式を得るための解析モデルを図-5および図-6に示した。図-5は内部地盤の側壁に加わる分布荷重に対する変形を求めるためのモデルを示したものであり、図-6は地震時に内部地盤が地中壁内壁に及ぼす震動土圧を求めるためのモデルを示したものである。いずれの場合も、内部地盤の上面の応力は零と仮定する。

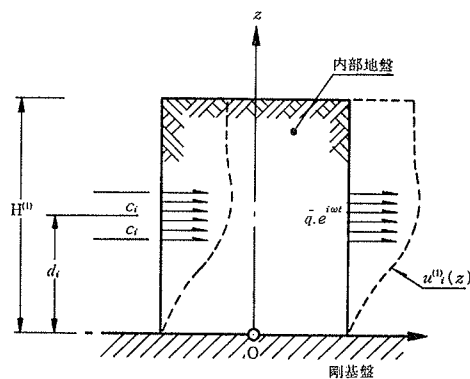


図-5 内部地盤に作用する分布荷重と変位分布

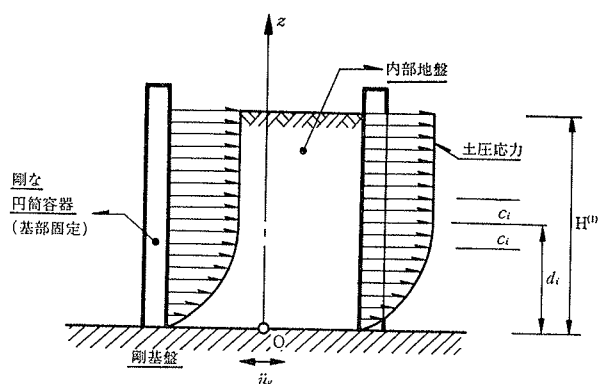


図-6 内部地盤の震動による土圧応力分布

この場合、4.1.節と4.2.節で得られた結果を次の様に変更するだけで良い。まず、 a を $a^{(1)}$ 、 H を $H^{(1)}$ とする。ここに $a^{(1)}$ は地中壁に囲まれた内部地盤の半径であり、 $H^{(1)}$ は内部地盤の厚さである。次に、第2種の変形されたベッセル関数 $K_0(x)$ 、 $K_1(x)$ のかわりに、それぞれ $-I_0(x)$ 、 $I_1(x)$ を用いる¹⁾。ここに、 $I_0(x)$ 、 $I_1(x)$ は第1種の変形されたベッセル関数である。こうして得られた結果に逆符号をつけたものが、内部地盤による相互作用に関する係数となる。(外側の)表層地盤による係数と内部地盤によるものとの区別は表層地盤による諸量を表わす記号の右肩に (I) を追加することにより行なうこととする。例えば $K_{1j}^{(S)}$ に対応する内部地盤によるばねは $K_{1j}^{(SI)}$ のようにする。

5. 数値計算例

本章では、前章で得られた表示式を実際に計算して表示式の表わす意味を目で見えるようにすること、また後に実施する予定の相互作用に関する係数についての詳しいパラメトリック・スタディのための予備知識を得ることの2つを主な目的として行なった数値計算結果を示す。次節以降に見られるように相互作用に関する係数の性質についての興味ある結果が得られた。

5.1. 数値計算モデル

例題用の数値計算モデルとして次の様なものを考える。表層地盤および内部地盤のポアソン比 ν は $1/3$ とする。このとき $C_L/C_T=2$ である。また、これらの地盤の材料減衰は 5% とする。即ち、 $h_T=h_L=0.05$ とする。更にインピーダンス比に基づく外部粘性減衰 h_g^s は 10% とする。表層地盤の厚さ H の(想定する)基礎構造体の半径 a に対する比 H/a は 2 とする。また、内部地盤の厚さ $H^{(D)}$ の(想定する)地中壁の内径 $a^{(D)}$ との比 $H^{(D)}/a^{(D)}$ も 2 とする。この H/a と $H^{(D)}/a^{(D)}$ の値を必ずしも一致させる必要はないが、今回は簡単のために等しい値とした。表層地盤の $r=a$ での分割小円筒域の数は 5 とし各小円筒域の厚さは等しいとした。内部地盤についても相等的な厚さを持つ 5 つの分割小円筒域を考えた。

5.2. 静的な相互作用ばね

5.2.1. 分布荷重による静的変位 図-7に表層地盤の $r=a$ なる側壁の各分割小円筒域に分布荷重が作用した場合の静的な変位分布を示した。(13)式を計算したものである。この図から次の様なことがわかる。即ち、分布荷重が作用する位置が深くなるにつれて荷重が作用する小円筒域の変位が小さくなること、荷重が加わる領域のみが変位するという Winkler の仮定が成立しそうなこと等がわかる。

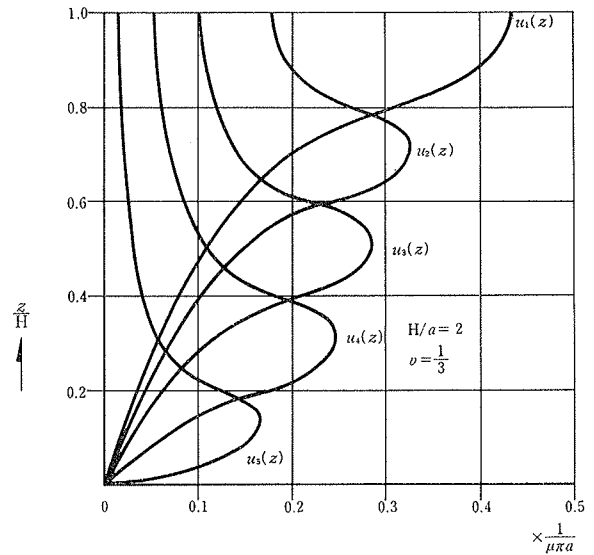


図-7 分布荷重による変位分布 (表層地盤)

図-8は内部地盤の $r=a^{(D)}$ なる側壁の各分割小円筒域に分布荷重が作用した場合の変位分布を示したものである。計算は(13)式に対応する内部地盤についての式によった(4.3.節参照)。この図から内部地盤の場合はせん断型の変位をすることがわかる。

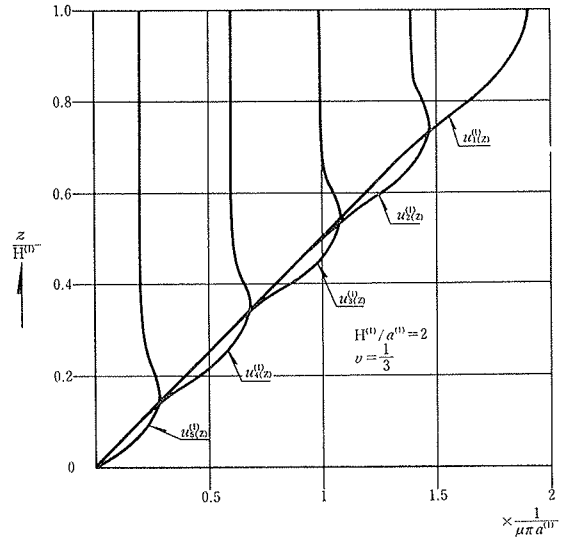


図-8 分布荷重による変位分布 (内部地盤)

なお、地盤には材料減衰 5% を与えていることから、静的な変位には実数部の 10% の虚数が含まれる。図-7と図-8はこの実数部のみを示したものである。

5.2.2. 静的な相互作用ばね (17)式により変位の離散化表示 U_{ij} を求め、更に(10)式により $[K^S]$ の要素 $K_{ij}^{(S)}$ を計算する。内部地盤についても同様にして計算できる。ここで静的な相互作用のばねの記号として、 ${}_0K_{ij}^{(S)}$ 、 ${}_0K_{ij}^{(SD)}$ を定義する。 ${}_0K_{ij}^{(S)}$ 、 ${}_0K_{ij}^{(SD)}$ はそれぞれ振動数が零のときの $K_{ij}^{(S)}$ 、 $K_{ij}^{(SD)}$ の実数部である。

図-9に表層地盤による静的なばね定数 ${}_0K_{ij}^{(S)}$ についての計算結果を示した。当然のことながら ${}_0K_{ij}^{(S)} = {}_0K_{ji}^{(S)}$ が成り立っている。分布荷重を作用させた分割小円筒域に対応するばね ${}_0K_{ii}^{(S)}$ とその直上と直下の領域のばね ${}_0K_{i, i-1}^{(S)}$ 、 ${}_0K_{i, i+1}^{(S)}$ とは符号が反対である。また、これらのばね以外のばねの値は小さく無視して良さそうである。 ${}_0K_{ii}^{(S)}$ 間の値の大小関係は次の様である。

図-9に表層地盤による静的なばね定数 ${}_0K_{ij}^{(S)}$ につ

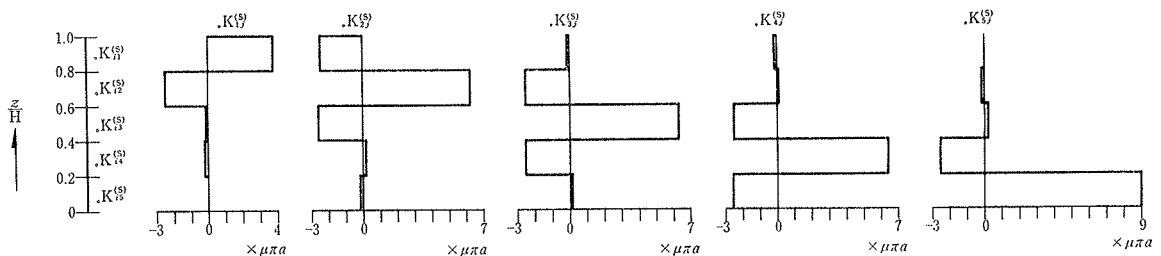


図-9 表層地盤による静的な相互作用ばね

即ち、地表面に最も近い ${}_0K_{11}^{(S)}$ が最も小さく、基盤に最も近い ${}_0K_{55}^{(S)}$ が最も大きい。その他の ${}_0K_{22}^{(S)}$ 、 ${}_0K_{33}^{(S)}$ 、 ${}_0K_{44}^{(S)}$ の値は互いにほぼ等しい。 ${}_0K_{11}^{(S)}$ の直上と直下のばねの値は、その位置によらず、ほぼ同じ値をとる。

図-10に内部地盤による静的なばね定数 ${}_0K_{ij}^{(SD)}$ を示した。表層地盤の場合とほぼ同様な性質を有しているが、内部地盤の方がせん断型のばねに近い様である。

5.3. 相互作用ばねの動的性質

次に、相互作用ばねの振動数に対する変化の様子を見る。振動数は次の五つの場合を考えて、則ち $\omega/\omega_g=0, 0.5, 1, 2, 3$ の場合について計算する。内部地盤の場合についても $\omega/\omega_g^{(D)}$ の値として同じ五つの値を用いる。

図-11に例として $K_{ij}^{(S)}$ についての計算結果をしめした。同図の左の列が $K_{ij}^{(S)}$ の実数部についての計算結果であって、いわゆるばね定数にあたる。また、右の列が

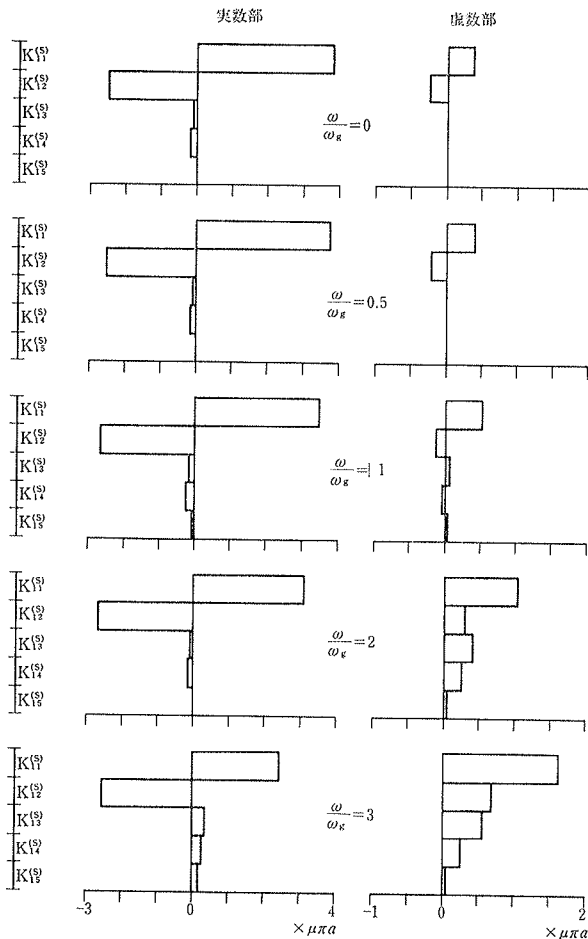


図-11 $K_{ij}^{(S)}$ の振動数による変化の様子

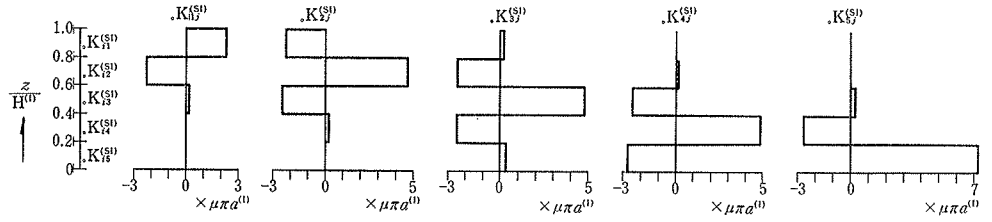


図-10 内部地盤による静的な相互作用ばね

虚数部であって、減衰係数に関する量である。この図から次の様なことがわかる。

まず実数部について述べる。 $K_{11}^{(S)}$ の実数部は振動数が増すにつれて漸減している。 $K_{12}^{(S)}$ の実数部の値は振動数によらず一定の値をとるようである。また、 $K_{11}^{(S)}$ 、 $K_{12}^{(S)}$ 以外のばねの定数部は振動数が大きくなっても、静的な場合と同様に無視して良さそうである。以上のことから、 $[K^S]$ の実数部からなるマトリクス、いわゆるばねマトリクスは、3重対角マトリクスとなること、振動数によるばねの変化は対角項についてのみ考えれば良さそうであること等がわかる(但し $\omega/\omega_g \leq 3$)。

次に虚数部について述べる。 K_{ij} の虚数部の値は振動

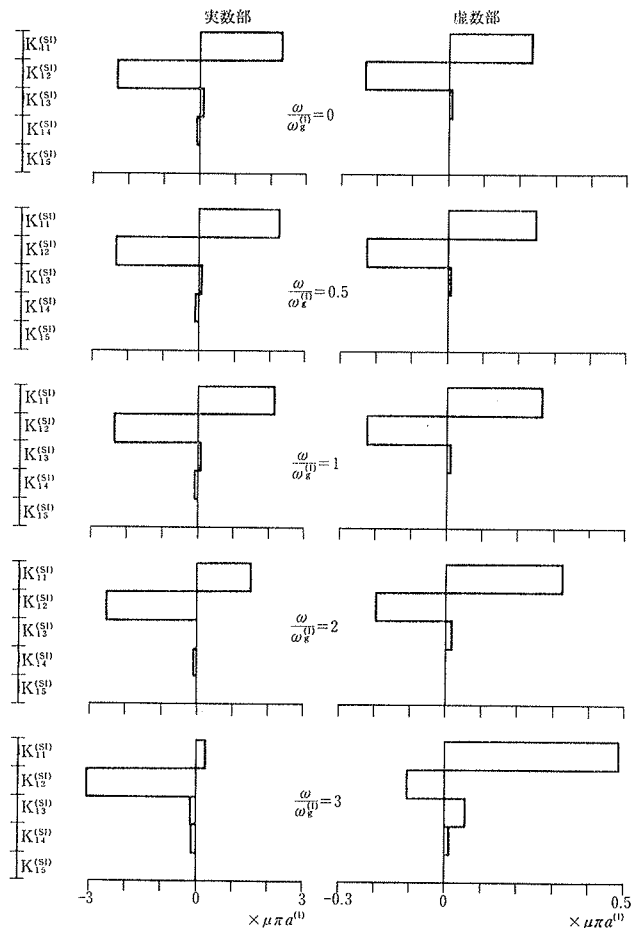


図-12 $K_{ij}^{(SD)}$ の振動数による変化の様子

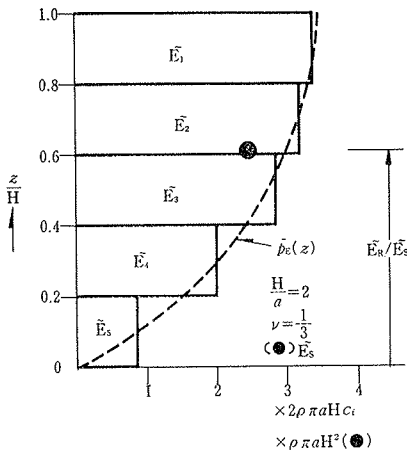


図-13 静的な震動土圧 (表層地盤)

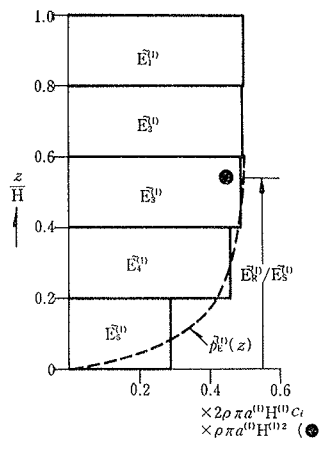


図-14 静的な震動土圧 (内部地盤)

する必要があることになる。なお、 ω/ω_g が1より小さいときでも虚数部が零でないのは、地盤に材料減衰5%と外部粘性減衰10%を与えていることに起因する。特に、材料減衰が零であれば $\omega/\omega_g=0$ のときの虚数部は零になる。

図-12に内部地盤によるばねの例として $K_{1j}^{(SD)}$ の計算例を示した。内部地盤には独特の振動特性もあるようなので¹⁾、より詳細な検討が必要であろう。この数値計算モデルでは、内部地盤によるばねは表層地盤によるばねと同じ様な性質を示しているようである。

5.4. 震動土圧

本節では震動土圧の数値計算例を示す。ここで次の様な記号を定義しておく。

$$\left. \begin{aligned} p_E(z) &= -\tilde{p}_E(z) \ddot{u}_g \\ E_i &= -\tilde{E}_i \cdot \ddot{u}_g \\ E_s &= -\tilde{E}_s \cdot \ddot{u}_g \\ E_R &= -\tilde{E}_R \cdot \ddot{u}_g \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(25)$$

この様にして定義された $\tilde{p}_E(z)$, \tilde{E}_i , \tilde{E}_s , \tilde{E}_R は質量慣性効果とも言うべき量を表わすことになる。内部地盤についても同様に定義することとし、その場合は記号の右肩に(I)をつけて区別することとする。以下に(19)~(24)および(25)を用いて計算した結果を示す。

図-13は表層地盤による静的な震動土圧を示したものである。同図中の破線は震動土圧 $\tilde{p}_E(z)$ であって、その土圧を五つの分割小円筒域で積分した値 \tilde{E}_i を階段状に示してある。また(●)印は合水平力 \tilde{E}_s を示し、その点の高さは合水平力の作用位置、即ち \tilde{E}_R/\tilde{E}_s を示す。静的な震動土圧 $\tilde{p}_E(z)$ は基盤から始まる正弦曲線に近い形をしている。また、合水平力の作用位置は表層の厚さの約6割の高さにあることがわかる。

図-14は内部地盤による静的な震動土圧を示したものである。震動土圧の分布 $\tilde{p}_E^{(I)}(z)$ の形は正弦曲線とは異なり、基盤で零から始まるその値は急激に一定値に近づく様な形をしている。合水平力の作用位置は、表層地盤の場合と比べて若干低いようである。

次に震動土圧の振動数にある変化の様子をみる。図-15は \tilde{E}_i および \tilde{E}_s 即ち表層地盤による震動土圧についての計算結果である。 \tilde{E}_s は(●)印で示してある。その

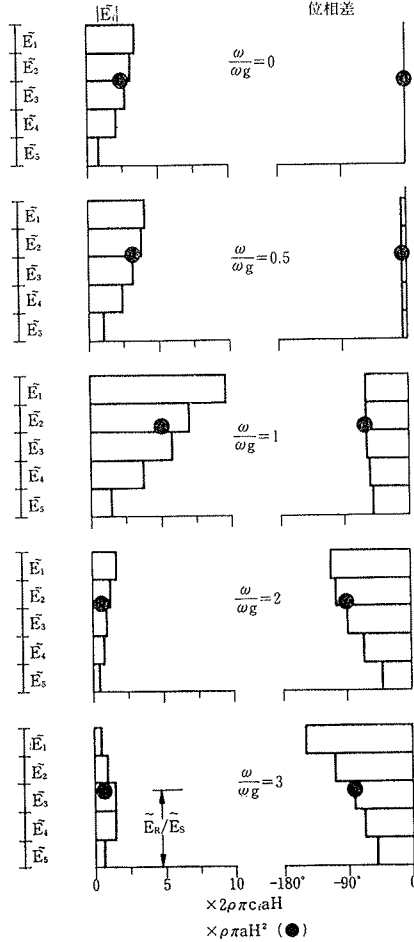


図-15 震動土圧の動的性質 (表層地盤)

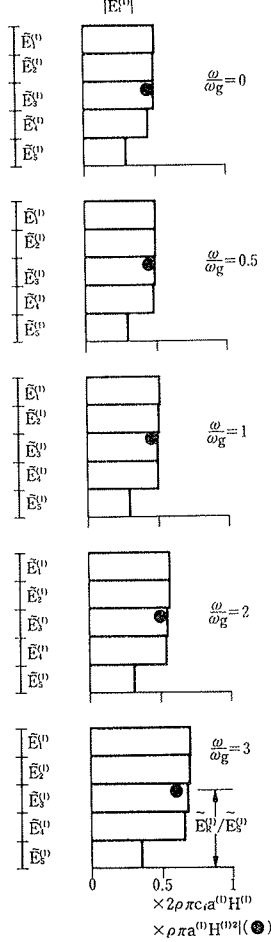


図-16 震動土圧の動的性質 (内部地盤)

数が大きくなるにつれて漸増していくようである。特に $\omega/\omega_g=1$ を越えて大きくなると、虚数部の値は急激に大きくなるようである。 $K_{11}^{(S)}$, $K_{12}^{(S)}$ 以外のばねの虚数部は、実数部の場合と異なって、 ω/ω_g が1を越えて大きくなると無視できない程大きくなることわかる。従って、 $[K^S]$ の虚数部からなるマトリクスは全要素を考慮

高さは静的な場合と同様で、 \tilde{E}_R/\tilde{E}_S である。この図の左側は \tilde{E}_i および \tilde{E}_s の絶対値を示し、右側の列は \tilde{E}_i 、 \tilde{E}_s の u/g に対する位相差を示す。 ω/ω_g の値は、相互作用ばねの場合と同じ五つの値を用いた。この図から次の様なことがわかる。震動土圧の最大値は $\omega/\omega_g=1$ のとき起こりそのときの深さ方向の分布形は逆三角形分布であること、また、合水平力の作用位置は振動数によりあまり大きく変化しないようであること等がわかる。

図—16に内部地盤による震動土圧の計算例を示した。この場合、 $\omega/\omega_g < 3$ の範囲では、位相差が生じなかった。このことは、内部地盤の固有振動数が $\omega/\omega_g=3$ より高いところにあることを示している。詳しい検討が必要であろう。

6. あとがき

建物、基礎構造体および表層地盤からなる系を集中質点系でモデル化するために必要な動的相互作用ばねおよび震動土圧の離散化表示式を求めた。これらの表示式は、動的な係数として求まること、表層地盤の動特性および基礎構造体側面から表層地盤への波動逸散減衰効果が表示式の中に含まれていること、また、表示式が無限級数で求まるため電算機による計算が容易であること等の長所をもっている。

本報では、解の性質を概観するというを目的としたため簡単な数値計算結果を示すにとどまったが、次報では、相互作用ばねと震動土圧についてのより詳細な検討結果を報告するつもりである。

参考文献

- 1) 林, 田村, 渡辺, 角田, 安井, 金子: RC 超高煙突の基礎および筒体の振動実験と地震観測, その1, その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), (昭和53. 9)
- 2) 田治見: Dynamic Analysis of a Structure Embedded in an Elastic Stratum, IV-W. C. E. E., (1969)
- 3) S. A. Thau: Radiation and Scattering from a Rigid Inclusion in an Elastic Medium, Journal of Applied Mechanics, (Jun. 1967)
- 4) R. A. Parmelee, J. Penzien, C. F. Scheffey, H. B. Seed, G. R. Thiers: Seismic Effects on Structures Supported on Piles Extending through deep sensitive Clays, (1964)
- 5) 鈴木, 茶谷, 若松: 地中連続壁に囲まれた地下構造物に対する地盤の水平ばねに関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), (昭和52. 10)
- 6) 中川, 渡辺, 武田, 金谷, 鈴木, 茶谷, 若松: Wall Foundation によって支持された構造物の動的解析に関する一考察, その1, その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), (昭和53. 9)
- 7) 安井: 建物—基礎—表層地盤連成系の振動解析に関する研究, その1, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), (昭和54. 9)
- 8) 中川, 渡辺, 安井, 若松, 金子: 建物—基礎—表層地盤連成系の振動解析に関する研究, 大林組技術研究所報, No. 19, (1979)