

2次元地盤上の剛体の動特性について

東京電力

電力中研

正会員

工藤豊典

○花田和史

1. 目的

耐震設計上、構造物と地盤の相互作用を検討することが、一つの重要な問題点として挙げられる。そのため、計算機による数値解析においては、対象とする構造物と周辺地盤を一つの系としてモデル化する手法が多くの場合に用いられている。本論文は、数値解析としては用いられる2次元(平面ひずみ)地盤上にある剛体の動特性に焦点をあわせ、模型地盤実験と理論解析の両面から数値解析の精度向上のための資料を得ることを目的としている。

2. 模型地盤の物性

模型地盤には、任意の強度で得られる物性が長期間安定であり、かつ材質の均一性、作業性の点から、RTV付加反応型シリコンラバーを使用した。形状および測尺を図1に示す。

模型地盤単体を振動台により加振した際の、表面中央部加速度応答倍率の一例を図2に示す。加振加速度として、25～200gal 5段階を採ったが、応答倍率に換算すると互いの差は見られなかった。図2には、50gal加振の場合を記している。図3～図5に、各測尺より得られる3次までのモードを示す。ベクトルの方向は、加振力に対する位相遅れを表わしている。

模型地盤の物性値を、次のように仮定する。

$$\left. \begin{aligned} E &= 2.57 \text{ kg/cm}^2 && (\text{ヤング率}) \\ G &= 0.89 \text{ kg/cm}^2 && (\text{剛性率}) \\ \rho &= 1.01 \times 10^{-6} \text{ kg sec}^2/\text{cm}^4 && (\text{単位体積質量}) \\ \mu(f) &= 0.028 \times \frac{f}{4.75} && (\text{各モードの減衰定数}) \end{aligned} \right\} (1)$$

図1に破線で併示したメッシュ割りの数値解析(F.E.M.)モデルに対し、上述の値を入力した場合の表面中央部加速度応答倍率を図2に併示した。また、図6～図8に、模型地盤モードの計算値を示す。両者には、かなりの一致がみられることから、上述の値を模型地盤の物性値とする。

3. 載荷剛体の自由振動

地盤表面中央部に、巾50%、100%、150%、最大厚さ10%の鉛、鉄またはアルミニウム製の矩形板(以下、剛体と略す)を設置し、水平方向に荷重をかけ急激に除荷する方式の自由振動実験を行なった。各中の剛体に対し、剛体重量250gr～1,700grの5種を用意し、各18回の自由振動の平均値

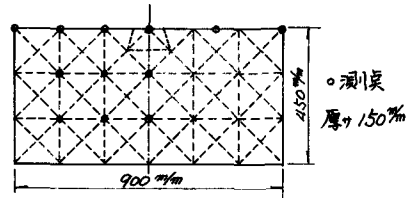


図1 模型地盤と測尺(破線はFEMメッシュ)

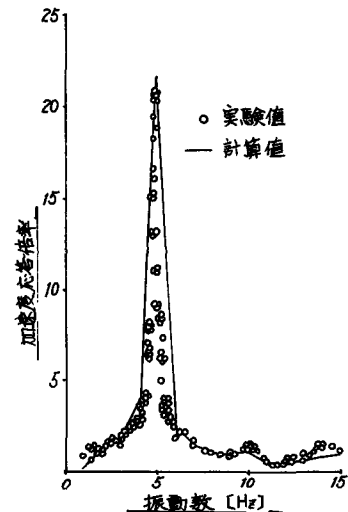


図2 模型地盤表面中央部加速度応答倍率

動を採った。図9に、巾100%、自重1,200grの鉛板中央部の自由振動時刻歴を示す。数値解析においても、同諸元の剛体を対象とした。剛体の中心に単位荷重を水平にかけた場合の静的解析を行ない、その静的変位を初期条件として、1/200 sec 毎に自由振動計算を行なった。結果を図9に併示した。

0~0.015 secまでの鋭いインパルスは模型実験で捕えられなかったのは、ピックアップに固有振動数70 Hzの小型加速度計を用いたためである。同じ理由により、実測値では計算値より約π/4の位相遅れが生じる。また、数値計算は、50 Hzまでのモードを合成して行なった。各別点で、実験結果と計算結果を比較すると、反射波到来時刻(図9では、0.085 sec 程度)附近からの波形の不一致がみられた。

4. 剛体の複素バネ定数

半無限平面のすみ状態の媒質表面上の水平線加振による、力Pと地表面水平変位uの関係は、次のように表わされる。

$$u = \frac{P}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sqrt{(s^2-1)}}{G \cdot f(s)} e^{i k_s s x} ds \quad (2)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} F_0(s) &= (2s^2-1)^2 - 4s^2/(s^2-1)/\sqrt{(s^2-\alpha^2)} \\ k_s &= \frac{\omega}{V_s} \\ \alpha &= \sqrt{\left\{ \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \right\}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

また、 V_s :せん断波(S波)速さ、 ν :ポアソン比、 ω :振動率、 x :線加振源よりの水平距離を表わしている。

(2)式中の荷重に、剛体基礎中2a下の応力分布による重みを乗じて、基礎領域内で積分し、基礎の変位を求めると、剛体の複素バネ定数が得られる。ただし、剛体の中心変位が、剛体下の地盤変位を代表すると考える。上述の応力分布を、i) 均等分布の場合、ii) 剛板分布の場合、とて、複素バネ定数Kは次式の形となる。

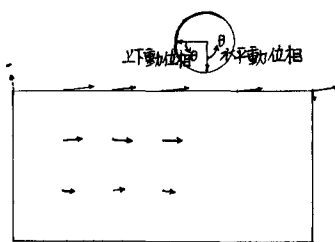


図3 模型地盤 1次モード 4.75 Hz

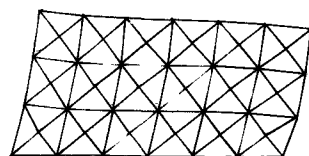


図6 数値モデル 1次モード 4.75 Hz

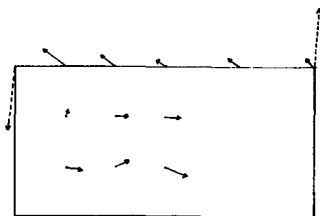


図4 模型地盤 2次モード 10.6 Hz

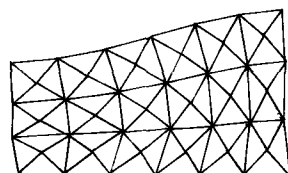


図7 数値モデル 2次モード 10.5 Hz

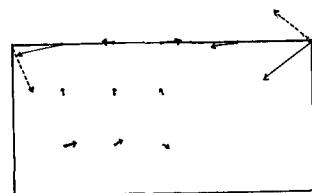


図5 模型地盤 3次モード 14.0 Hz

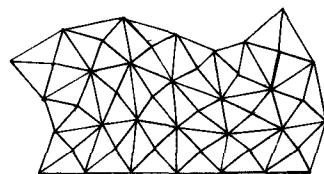


図8 数値モデル 3次モード 13.6 Hz

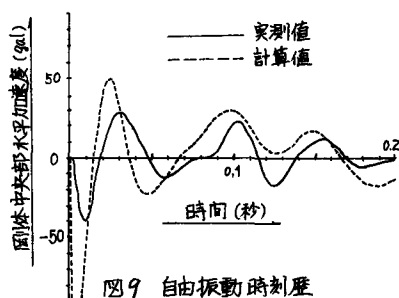


図9 自由振動時刻歴

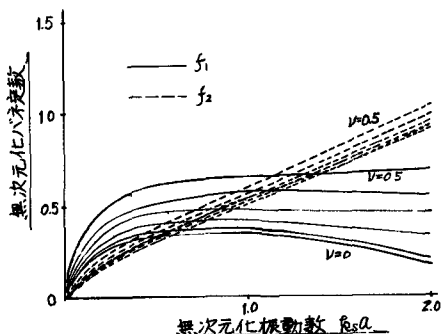


図10 水平バネ定数(均等分布)

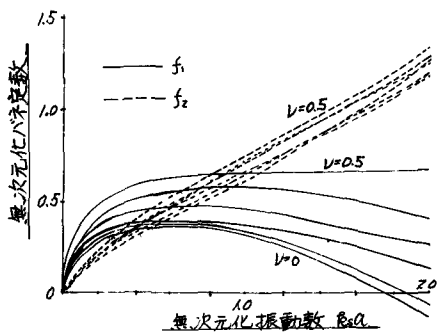


図11 水平バネ定数(矩形板分布)

$$K = \pi G (f_1 + i f_2) \quad (4)$$

(4)式内の、無次元化バネ定数 f_1 , f_2 の値を、図10と図11に示す。

一方、図9に示した自由振動挙動には、地盤単体のモードや、板のロッキングモードを含んでいるが、0.08 sec以前の挙動は、近似的に(4)式のバネ定数による一質点系の応答が主体となっていると考えられる。また、模型地盤上の剛体の底面圧力分布は、2次元状態ではありえないが、ここではまだ検討しない。

図12に、各種剛体の自由振動時刻歴より得た無次元化バネ定数を示す。同図に併示した理論曲線は、底面圧力分布が均等の場合の値である。

5. 数値解析上の地盤境界条件

前節では、反射波到来以前の剛板挙動を採り、無限体解析結果と比較を行なった。実際の地盤は、無限遠方まで連続していると近似できるが、数値解析の手法上地盤には何らかの境界を設定しなければならない。この仮想的な境界面では、構造物の振動によって惹起された二次生成波を通過させることが好ましい。本節では、境界面で反射する波のエネルギーと入射する波のエネルギーの比を最小にする境界条件を、J. Symon にならって⁽³⁾求める。

半無限弾性体中に、図13に示す仮想長方形を考える。

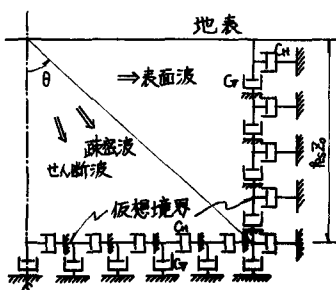


図13 仮想境界と境界条件

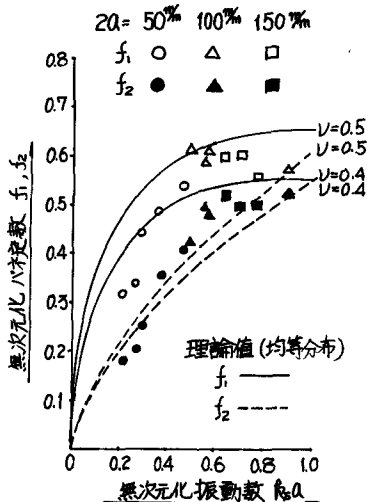


図12 自由振動より求めた無次元バネ定数

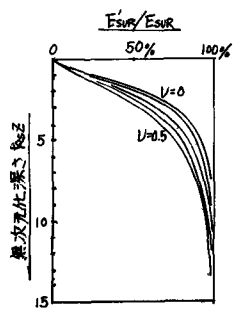


図14 斜面を通過する表面波エネルギーの割合 (E_{SUR}/E_{SUR})

着者は先に線加振源より逸散する疎密波、せん断波、表面波のエネルギー(それぞれ、 E_c , E_s , E_{SUR})の分布を計算した⁽⁴⁾。これらの計算の積分範囲を若干変えて、仮想境界の側面を通過し、境界の外に出る表面波エネルギー E'_{SUR} を求める。 E_{SUR} に対する E'_{SUR} の比と、無次元化深さの関係を図14に示す。この関係は、加振方向に拘らず同一である。

図13に併示した仮想境界側面のダンパーの減衰係数を次式で表わす。

$$\begin{Bmatrix} C_H \\ C_V \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} a \\ b \end{Bmatrix} \rho V_s \begin{Bmatrix} 1/\alpha \\ 1/\beta \end{Bmatrix} \quad (5)$$

ESURを完全に吸収しうるダンパーのインピーダンス比 a, b と無次元化深さの関係を図15、図16に示す。

また、仮想境界底面のダンパーの減衰係数も同様に次式で表わす。

$$\begin{Bmatrix} C_H \\ C_V \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} b \\ a \end{Bmatrix} \rho V_s \begin{Bmatrix} 1/\beta \\ 1/\alpha \end{Bmatrix} \quad (6)$$

底面に到達する実体波を完全に吸収するダンパーのインピーダンス比を定めることは徒らに複雑となる。境界の形状を示すパラメータ θ と、 V が与えられた場合に、疎密波の入射エネルギーに対して反射エネルギーを最小とするインピーダンス比 a, b の値の一例を図17に示す。

せん断波の入射エネルギーに対しても同様の図を得ることができる。

これらの結果を総合すると、地盤のポアソン比 $\nu = 0.3 \sim 0.4$ 、仮想境界形状 $\theta = \pi/4$ の場合には、底面ダンパーとして、 $a = 1.0 \sim 1.2$ 、 $b = 0.7 \sim 1.0$ を用いるとエネルギー反射は少なくなる。

一例として、 $\nu = 0.3$ 、底面ダンパー $a = 1.1$ 、 $b = 0.8$ の場合に、全透散エネルギーに対する境界における吸収エネルギーの比（いわば、無限体近似率）を、 θ と R_{∞} のパラメータにより図18に示す。

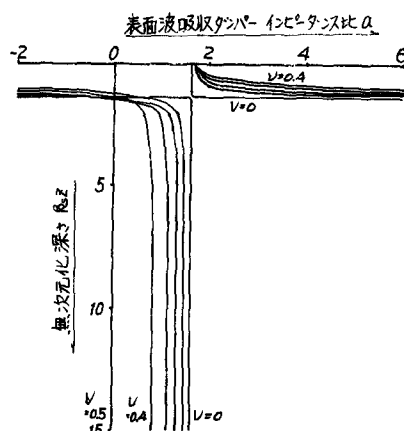


図15 表面波吸収ダンパーインピーダンス比 a と深さ

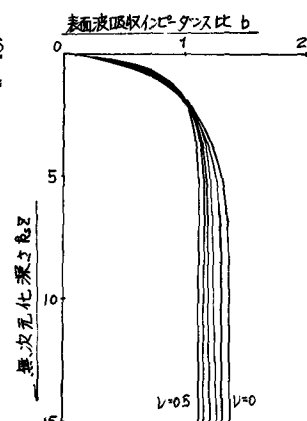


図16 表面波吸収ダンパーインピーダンス比 b と深さ

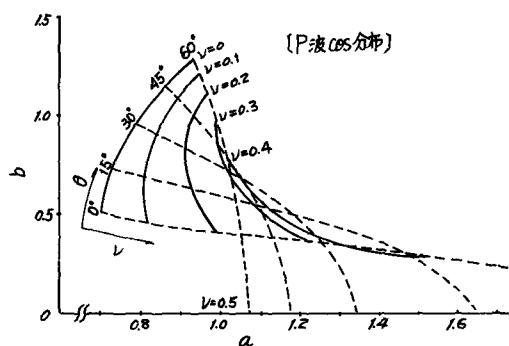


図17 コサイン分布P波エネルギーを底面で最も多く吸収するダンパーのインピーダンス比

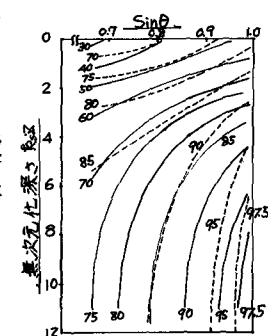


図18 境界形状と無限近似率(%)
—— 上下線加減 ($\nu = 0.3$)
---- 水平線加減 ($b = 0.8$)

- 参考文献 [1] Miller 他 The Field and Radiation ... 1954. Proc. R.S.A.
[2] 田沼見 宏 建築構造学大系1(彰国社)のうち第2章
[3] Symon, J. 他 Finite Dynamic Model ... 1969. ASCE SM4
[4] 花田 和史 平面のすみ状態の地盤 ... 第28回年次学術講演会