

共振時における剛体の振動特性

Vibration Properties of Rigid Body on Sand Ground in Resonant Condition

金 潤相*, 三浦 清一**, 三浦均也***

Yoon-sang KIM, Seiichi MIURA and Kinya MIURA

* 学生員 工修 北海道大学大学院 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北 1 3 条西 8 丁目)

** フェロー 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北 1 3 条西 8 丁目)

*** 正会員 工博 北海道大学大学院助教授 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北 1 3 条西 8 丁目)

The aim of this study is to clarify experimentally the vibration behavior of rigid body placed on dense sand ground surface in resonant condition. The rigid bodies with variable mass, inertial moment and base size were prepared, and their vibration behavior was observed in a series of forced vibration tests. From the observed behaviors, the resonant and natural frequencies and amplification factors were analyzed. It was found that the natural frequency and amplification factor in resonant condition are dependent on the contact pressure of footing. The stiffness coefficients of springs modeling the interactive mechanical behavior between rigid body and ground were assessed from the analysis of coupled horizontal and rotational vibrations. The influence of base pressure and base size on the spring coefficients is also discussed.

Key Words : resonant condition, rigid body, sand ground, natural frequency, damping, spring coefficient, laboratory test

1. ま え が き

共振現象は、機械基礎や地震時の構造物において非常に重要な研究テーマになって来た。特に地震時の場合、共振現象は、同じ地震動を受けた構造物においてもその構造物の振動特性、固有振動数に依存して大きな被害をもたらしている。そこで、共振現象のメカニズム及びこの時の卓越周波数と増幅率の特性に関する研究が進められてきた。

この研究は、大きくわけて弾性力学に基いた理論的な研究と実験による研究と分けられる。Nelson ら¹⁾によれば、弾性力学に基いた研究は Reissner(1936)から初められ、Sung(1953)によって他の接触圧分布について拡大された。さらに、Bycroft(1956)では他の振動モードまで拡大して議論されている²⁾。一方、Richart³⁾は工学的な利用のために卓越周波数と増幅率を決定する簡単な形式の解を提案した。その後、Borodatchev(1966)⁴⁾は接触圧を仮定せず、半無限の上にある物体の振動問題を解決した。最近は、パソコンの発展に伴い有限要素法などの数値解析が中心になっている。そのような数値解析は、地盤-構造物系全体をモデル化することができるが、モデルの複雑さと計算量の増大は避けられない。また、この場合でも構造物と地盤の境界面における力学的挙動のモデルは解析結果を左右する重要な要素である。したがって、地盤材料が示す力学的性質の非線形性(剛性のひずみ依存性)や

拘束圧依存性などを適切にモデル化することが必要である。

さらに、共振現象のメカニズムを明らかにし、適切なモデルを提案するため、実験による研究も多数の研究者によって行なわれている。特に、以下の研究は注目に値する。すなわち、1960 年から 1962 年までの Waterways Experiment Station(WES)⁵⁾の実験、Novak⁶⁾、Stokoe & Richart⁷⁾と Gazetas & Stokoe⁸⁾である。WES⁵⁾の実験は、基礎面積の影響を考慮しながら黄土と砂地盤に対する死荷重、鉛直方向、ねじりとロッキングの活荷重を与えて実行し、卓越周波数の減少により基礎の振幅が非線形的に増加することを示した。Novak⁶⁾は、実験結果と半無限弾性理論から算定された結果を詳細に比較検討した。その結果、卓越周波数が卓越振幅の増加によって減少すること、無次元化された卓越振幅が構造物の質量の関数であること、見掛けの減衰が基礎寸法と重りの減少によって増加することを明らかにした。Stokoe & Richart⁷⁾と Gazetas & Stokoe⁸⁾は、地盤に埋まっている基礎の自由振動試験から明らかにした周波数の変化と減衰特性から計算された結果と実験から求めた卓越周波数とはよく一致することを示している。しかし、これらの実験的研究では、共振現象における振動特性が定量的に把握されていない。さらに、地盤材料が示す力学的性質の非線形性(剛性のひずみ依存性)や拘束圧依存性などが適切に考慮されたモデルの提案には至っていない。

このような背景から、本研究では、まず地盤上におけ

る共振時の構造物の振動特性を明らかにし、ついで種々のタイプの振動解析に有用な地盤-構造物境界面の力学モデルを提示することを目指とした。特に、地盤上の種々の剛体の共振時振動特性を室内模型実験によって調べている。すなわち、質量や慣性モーメントを調整できる剛体模型の振動挙動を砂地盤上で詳細に観察した。その結果を解析し、卓越振動数と増幅率を評価するとともに、それらに及ぼす底面圧力と底盤寸法の影響を定量的に明らかにしている。

なお、この研究は、自由振動中の振動周期と振幅の減衰特性を議論した以前の研究⁹⁾を基礎にして、共振時の振動特性を明確にすることを目標にしている。

2. 実験装置および方法

図-1 に、本実験で用いた剛体模型、土槽、振動台と計測機器の配置を示す。厚さ 400mm の乾燥砂地盤は、表-1 に示す物性を有する珪砂を 8 層に分けて空中落下させ、各層毎に 500Gal、20Hz で 3 分間程度振動台によって締固め、最終的相対密度を $D_r = 85-90\%$ として作成されたものである。予備的な実験によると、剛体模型を載せていない状態での砂地盤の固有振動数は約 90Hz、土槽の固有振動数は約 45Hz であった。剛体模型の振動中の挙動を計測するために、模型の上下端（図中 a8 と a9）に加速度計を取りつけた。さらに、強制振動中の地盤の挙動を計測するために、地盤内と表面（図中 a5 と a6 と a7）にも複数の加速度計を取りつけた。加速度計は加振中転倒しないように、図-2 で示しているようにペグで地盤の表面と地中に設置された。

その加速度計から得られた電気信号は、動ひずみ測定器により測定され、データレコーダーにアナログの形式で記録される。それらは、さらにパーソナルコンピュータによってデジタル形式で変換され、保存されている。

剛体模型は図-3 に示すように、ネジを切った塔と底盤からなるステンレス製である。ここでは、直径 $D = 100, 150, 200, 250, 300\text{mm}$ の 5 種類の底盤を用意した。また、鉛製の錘の枚数と位置を調整することが可能のように制作されている。剛体模型の質量 m (4.90~19.19kg) と慣性モーメント I_y (398.9~6442.0 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$) を実験条件に合わせて調整した。底盤と塔の接続部には加速度計を固定し、かつ剛性を高めるように工夫した。剛体模型のタイプは、

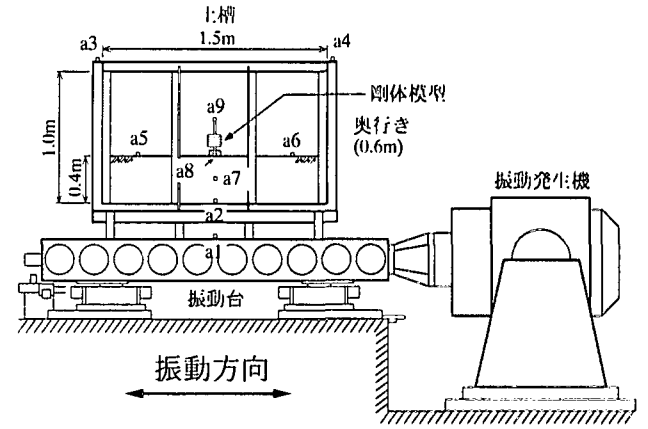


図-1 実験装置の全体図；振動台、土槽、剛体模型

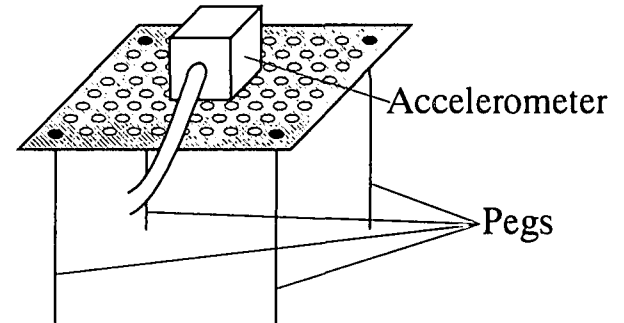


図-2 地盤の表面と地中における加速度計の設置方法

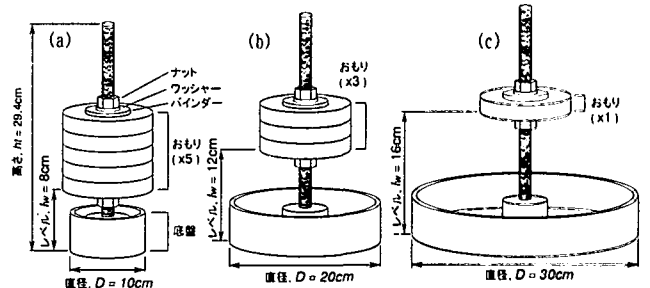


図-3 質量、慣性モーメント底盤寸法を調節できる剛体模型；(a) D10-L5-08、(b) D20-L3-12、(c) D30-L1-16

底盤の直径 D 、おもりの枚数 N と位置 l_w によって識別し、例えば、D10-L5-08 は底盤直径 $D=100\text{mm}$ 、おもり $N=5$ 枚、位置 $l_w=80\text{mm}$ に対応している。ここでは、 $D=100\text{mm}$ 模型について得られた結果を中心に実験計画を立てた。

剛体模型を設置する前には砂地盤表面を水平にし、かつ、地盤と模型の密着性を高める必要がある。そのため、地盤を作成した後、表面をストレートエッジで十分に均し、剛体模型を設置した後は振動台によって 10Gal、20Hz で 1 分間振動を与えた。この予備的に与えた振動が地盤と剛体模型の密着性を高め、同時に実験の再現性を

表-1 地盤材料（珪砂）の物性値

土粒子 比重 ρ_s	平均 粒径, D_{50}	均等 係数, U_c	最大乾 燥密度, ρ_{dmax}	最小乾 燥密度, ρ_{dmin}
2.72 g/cm^3	0.18 mm	1.82	1.61 g/cm^3	1.23 g/cm^3

向上させていることを予備実験で確認した。
 本研究で行った実験は強制振動試験であって、振動台上で振幅 50Gal のサイン波で 5~100Hz の加振を与え、その応答特性を観察した。

3. 実験結果および考察

3.1 剛体の基本的な振動特性

強制振動試験で得られた時刻歴から定常状態にある一部分(1024 個のポイント)を取ってフーリエ変換を行った。その結果から基礎、地盤と土槽のフーリエ振幅と位相が算定できた。しかし、その基礎のフーリエ振幅と位相が

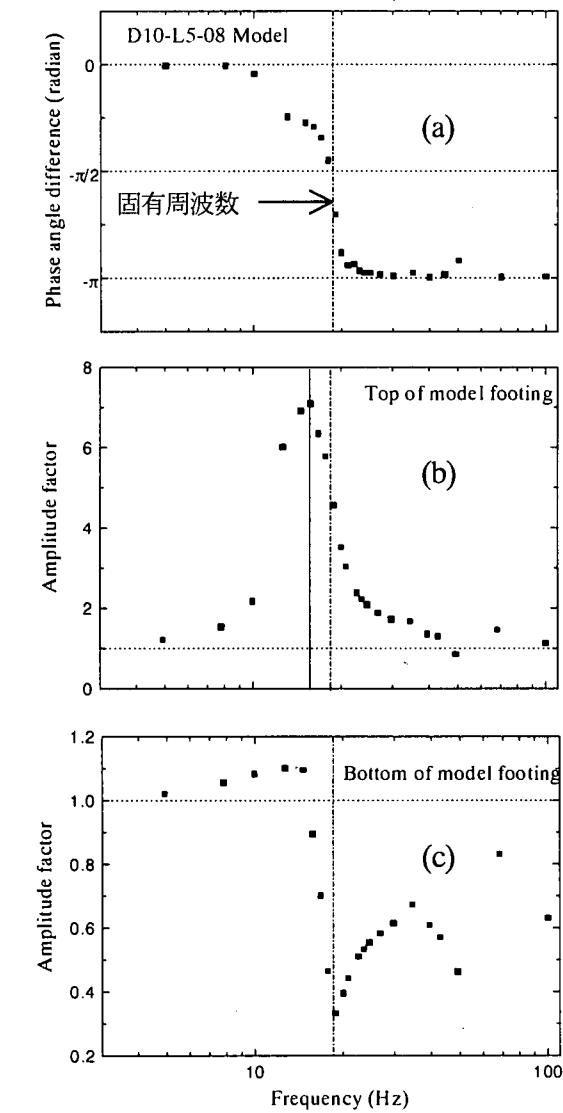


図-4 強制振動中にある剛体基礎の挙動; (a) 剛体基礎の上下部の位相差、(b) 剛体基礎の上部の増幅率、(c) 剛体基礎の下部の増幅率

ら直接に基礎の振動挙動を判断すると、土槽の振動特性(固有振動数、45Hz)の影響を含んでいる可能性がある。そこで、その影響を除くため、ここでは基礎の上下部の振幅を地盤表面の振幅により正規化し、その結果を図-4に示している。図-4 は模型剛体 D10-L5-08 における模型の上下部の位相差と地盤表面の振幅によって正規化された増幅率を示している。図より明らかなように、振動数が増大する時模型の上下部の位相差が 0 から $-\pi$ (radian)に変わる。このことは図-5 に示しているように、模型の振動固有モードが剛体の一次モードから二次モードに変わることを示唆しているように思われるが、図-6 に示したように細線で示される元々の模型剛体があった地盤上から見た中心線と地盤の振動を示す地点 A

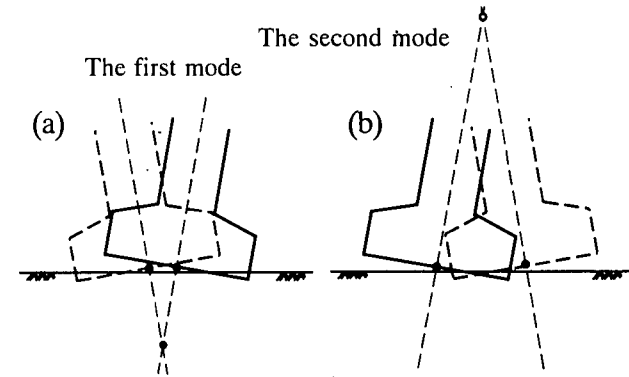


図-5 模型基礎の固有モード
 (a) 一次モード、(b) 二次モード

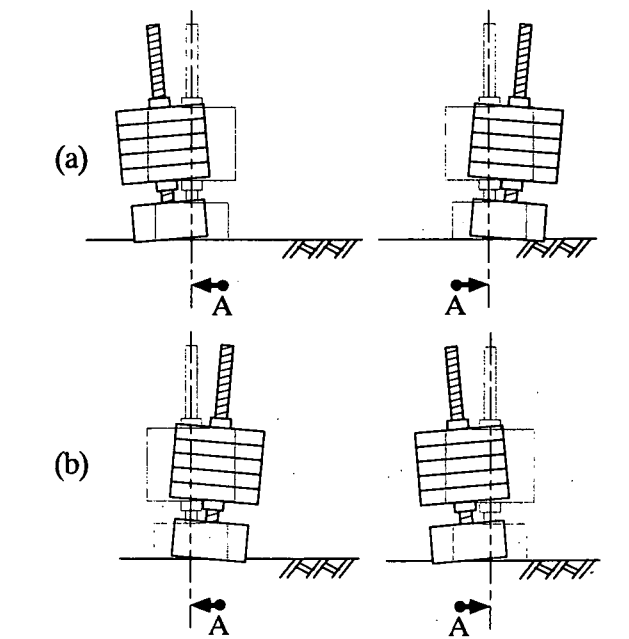


図-6 振動数による基礎の振動挙動の違い、
 (a) 低い振動数における挙動、
 (b) 高い振動数における挙動

の関係から見ると、(a)、(b)共に模型剛体上下端とも同方向に変位しているというを示していることが分かる。また、そのモードは、本論文では載せていないが、地盤表面と模型剛体上下部の位相差の関係から確認された。よってこれらの振動はすべて一次モードの振動であるとみなしてよい。

また図-4の模型剛体上下部の増幅率を見ると、上部の増幅率は一次自由度のバネとダッシュポットのモデルから算定できそうであり、振動数が増大する時卓越周波数より低い振動数では増加し、その周波数を超えると減少するという挙動を示している。固有周波数を示す一点鎖線と最大増幅値の実線の違いがあるが、それは減衰の影響によって生じることであると考えられている。下部における増幅率の挙動は振動数が増大する時上部の増幅率が最大値に達する前に最大値になり、引続き減少を示し、固有周波数で最小値になる。さらにその後増加する傾向が伺える。下部において増幅率がそのような挙動になるのは、増幅率が絶対値で算定され、位相差が変わるためであると判断される。

以上のように、模型剛体の上部の挙動が下部より単純であるので、次節では模型剛体の上部の挙動を中心として卓越周波数と増幅率の模型剛体の接触圧と底盤寸法の依存性を検討する。

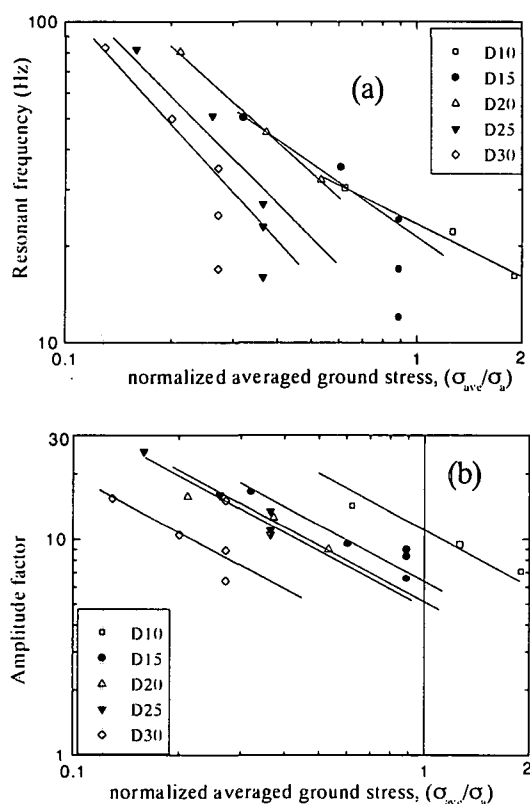


図-7 卓越周波数と増幅率の応力依存性; (a) 卓越周波数、(b) 増幅率

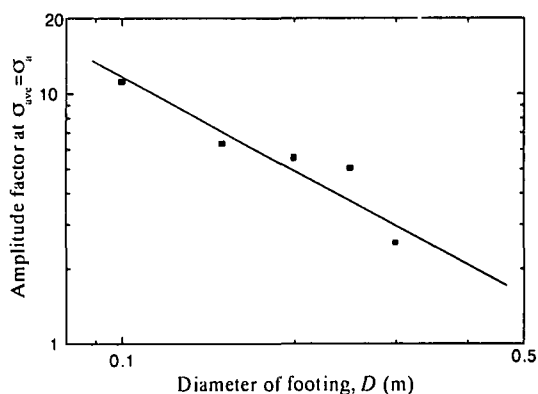


図-8 増幅率の寸法依存性

3.2 増幅率の底面圧力依存性

図-7には前節の図-4に示す基礎上部の卓越周波数と増幅率の最大値を $\sigma_g=98\text{kPa}$ で正規化した平均底面圧力 $\sigma_{mv}=mg/(\pi D^2/4)$ との関係としてプロットしている。図の中でD15、D25及びD30のデータの幅が大きいところは、同じ重さで慣性モーメントが異なるL5-08、-12、-16の場合で、慣性モーメントの増加によって固有周波数と増幅率が変化し、図の縦軸の方向に並ぶことになった。データにばらつきが見られるものの、剛体の底面寸法毎に両対数紙上で直線に近い関係が認められる。卓越周波数はそれぞれで直線の傾きが違っている。しかし増幅率に関しては図示のように各試験で得た直線関係は平行であり、底面圧力の影響は底面寸法によらず独立したものとして考えることができる。

図示のように、底面圧力の増加に伴い卓越周波数と増幅率は増大する傾向が見られる。物性によってその程度は異なるものの、地盤材料は一般に拘束圧の増大に伴って剛性が高くなる特性を有している⁷⁾。このことは、剛性が高くなることによって、共振現象における振幅が抑えられ、増幅率が減少すると説明できる。また卓越周波数では底面圧力の増加に伴う剛性の増大により、振動に与える質量と慣性モーメントの増大が大きいため減少すると説明することができる。

3.3 増幅率の底面寸法依存性

増幅率は剛体の底面寸法の影響を受けることが図-7(b)から明らかになった。ここでは、増幅率の剛体の底面寸法依存性を明らかにするために、底面圧力 $\sigma_{mv}=\sigma_g$ に対応する増幅率を底面寸法に対してプロットしている。図-8に示すように底盤寸法とともに両対数関係で直線的に減少する傾向があることが判明した。この挙動は、基礎下の地盤剛性が底面寸法の増加に伴い増大し、その増大によって振動を抑えられるためである。

4. 剛体模型の振動モード解析

この節では、剛体と地盤との境界面における力学的性質を等価なバネでモデル化することによって、振動特性のモード解析を行っている。ここでは、鉛直方向の振動は考慮しておらず、回転方向と水平方向における振動特性について考察している。図-9 に示すように、水平方向と回転方向それぞれの成分の等価バネ係数を K_h^* 、 K_r^* とした。これらは限界減衰比を含んでいるものであり、以下ようになる。

$$K_h^* = K_h(1+i2h_h), \quad K_r^* = K_r(1+i2h_r) \quad (1)$$

ここで、 K_h 、 K_r は水平と回転バネの剛性定数、 h_h 、 h_r はそれぞれの限界減衰比、 i は虚数である。

回転を伴う水平運動は、剛体模型の上下端における水平変位に着目すれば良く、その2成分の水平変位を図-9のように s_t 、 s_b とした。

水平方向、回転方向それぞれにおける平衡条件は以下のように与えられる。

$$m\{\ddot{s}(t) + h_g \ddot{\theta}(t)\} + K_h^* s(t) = -m\ddot{y}(t) \quad (2)$$

$$mh_g \ddot{s}(t) + I_y \ddot{\theta}(t) + K_r^* \theta(t) = -mh_g \ddot{y}(t) \quad (3)$$

ただし、 m は基礎の質量、 I_y は基礎の慣性モーメント、 $y(t)$ は入力された加速度である。ここで水平移動量 s と回転角 θ は、基礎上端と下端の水平変位 s_t 、 s_b を用いて

$$s(t) = s_b(t), \quad \theta(t) = \frac{s_t(t) - s_b(t)}{h_t}$$

となるので、式(2)と(3)にこれらを代入して整理すると、振動を記述する連立方程式は以下ようになる。

$$m(h_t - h_g) \ddot{s}_b(t) + mh_g \ddot{s}_t(t) + h_t K_h s_b(t) = -mh_t \ddot{y}(t) \quad (4)$$

$$(mh_g h_t - I_y) \ddot{s}_b(t) + I_y \ddot{s}_t(t) + K_r s_t(t) - K_r s_b(t) = -mh_g h_t \ddot{y}(t) \quad (5)$$

角速度 ω を導入して調和振動解を求めるため、振幅 A_p 、 B_p を用いて次式のように変位を設定する。ここで、 A_p 、 B_p および C_f は複素数である。

$$s_b(t) = A_p \exp(i\omega_k t), \quad s_t(t) = B_p \exp(i\omega_k t)$$

$$\ddot{y}(t) = C_f \exp(i\omega_k t)$$

これらを式(4)、(5)に代入して整理すると次式が得られる。

$$m\omega_k^2(h_g - h_t)A_p \exp(i\omega_k t) - mh_g \omega_k^2 B_p \exp(i\omega_k t) + h_t K_h^* A_p \exp(i\omega_k t) = -mC_f h_t \exp(i\omega_k t) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & -(mh_g h_t - I_y) \omega_k^2 A_p \exp(i\omega_k t) \\ & - I_y \omega_k^2 B_p \exp(i\omega_k t) + K_r^* B_p \exp(i\omega_k t) \\ & - K_r^* A_p \exp(i\omega_k t) = -mh_g h_t C_f \exp(i\omega_k t) \end{aligned} \quad (7)$$

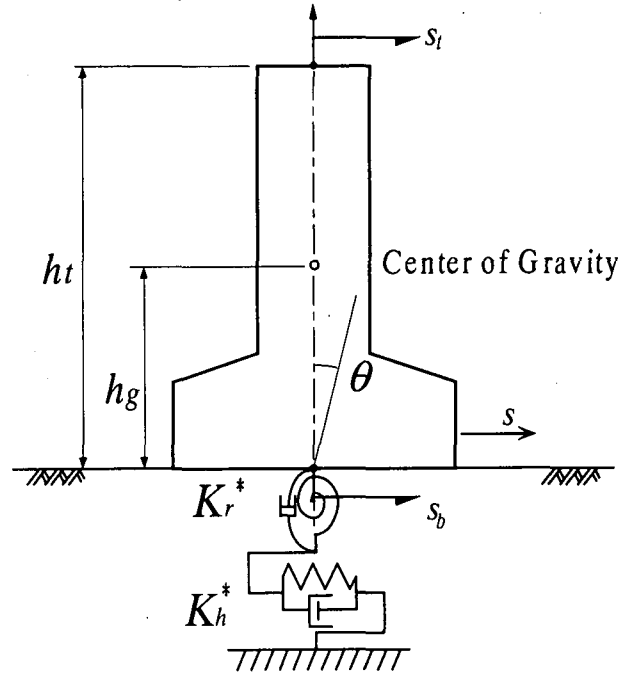


図-9 剛体底面における2成分バネを採用した振動モデル

この連立方程式を整理すると次式が得られる。

$$\{h_t K_h^* - m(h_t - h_g) \omega_k^2\} A_p - mh_g \omega_k^2 B_p = -mC_f h_t \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & -\{(mh_g h_t - I_y) \omega_k^2 + K_r^*\} A_p + (K_r^* - I_y \omega_k^2) B_p \\ & = -mh_g h_t C_f \end{aligned} \quad (9)$$

以上から、振幅 A_p 、 B_p は以下のように得られる。

$$A_p = -\frac{-mC_f (K_r^* - I_y \omega_k^2 + mh_g^2 \omega_k^2)}{m^2 h_g^2 \omega_k^4 - (K_r^* - I_y \omega_k^2)(K_h^* - m \omega_k^2)} \quad (10)$$

$$B_p = -\frac{-mC_f (I_y \omega_k^2 - K_r^* - h_g h_t K_h^* - mh_g^2 \omega_k^2)}{m^2 h_g^2 \omega_k^4 - (K_r^* - I_y \omega_k^2)(K_h^* - m \omega_k^2)} \quad (11)$$

A_p 、 B_p は変位の振幅であるが、実験で測ったものは加速度振幅である。実験で測った加速度振幅 a 、 b は変位振幅 A_p 、 B_p と以下の関係にある。ここで、 a と b も複素数である。

$$a = -A_p \omega_k^2, \quad b = -B_p \omega_k^2 \quad (12)$$

式(12)の関係から一次モードの等価バネ定数を導くと次式のようなになる。

$$K_h^* = \frac{m\omega_k^2}{ah_t} \{C_f h_t + a(h_t - h_g) - bh_g\} \quad (13)$$

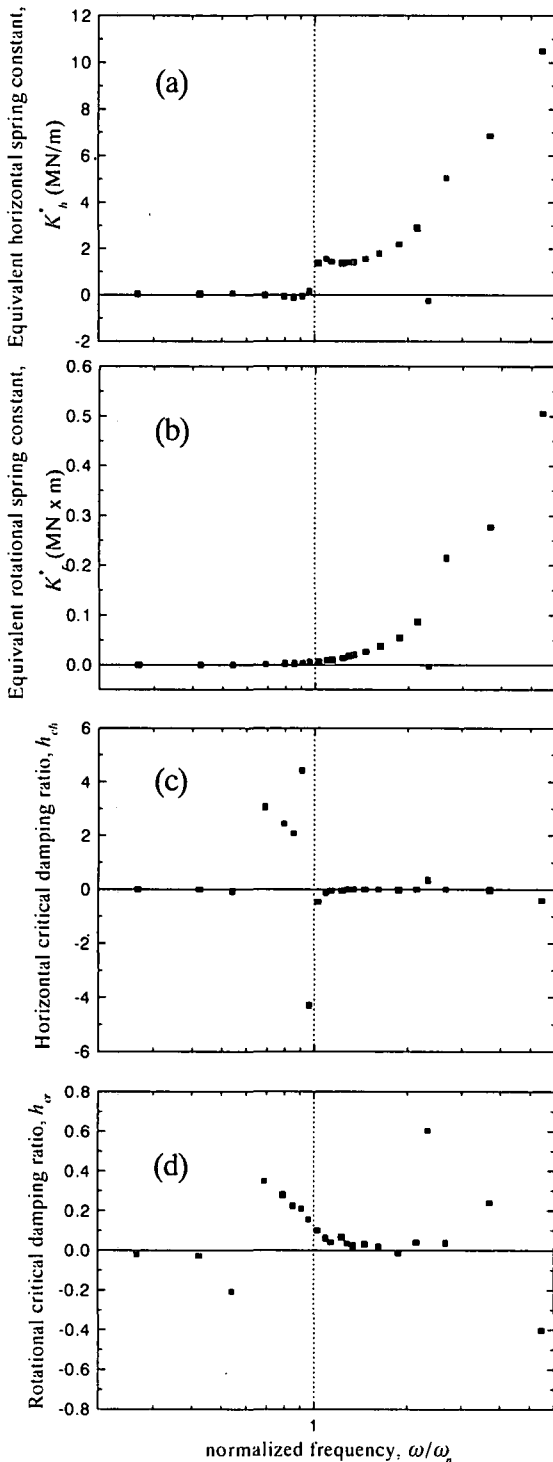
$$K_r^* = \frac{\omega_k^2}{(a+b)} \{(a+b)I_y - (a+C_f)mh_g h_t\} \quad (14)$$

このとき、例えば回転を伴わない水平振動に対する $a =$

− b の場合は、 $K_r \rightarrow \infty$ となり、回転成分バネが十分に強い場合に対応し、また、回転のみが生じる振動に対する $a = 0$ の場合は、 $K_h \rightarrow \infty$ となり、水平方向のバネが極端に大きい場合に対応している。

5. 分布バネ定数の考察

5.1 等価バネ定数と減衰特性の周波数依存性



図－10 バネ定数と限界減衰比の周波数依存性

等価バネ定数は、入力された入力波と模型基礎の上下部の位相差、振幅比の関係を示す以下の式(15)、(16)により算定できる。

$$\ddot{s}_b(t) = c_b \ddot{y}(t) \exp(i\theta_b)$$

$$a \exp(i\omega t) = c_b C_f \exp(i\omega t + i\theta_b) \quad (15)$$

$$\ddot{s}_t(t) = c_t \ddot{y}(t) \exp(i\theta_t)$$

$$b \exp(i\omega t) = c_t C_f \exp(i\omega t + i\theta_t) \quad (16)$$

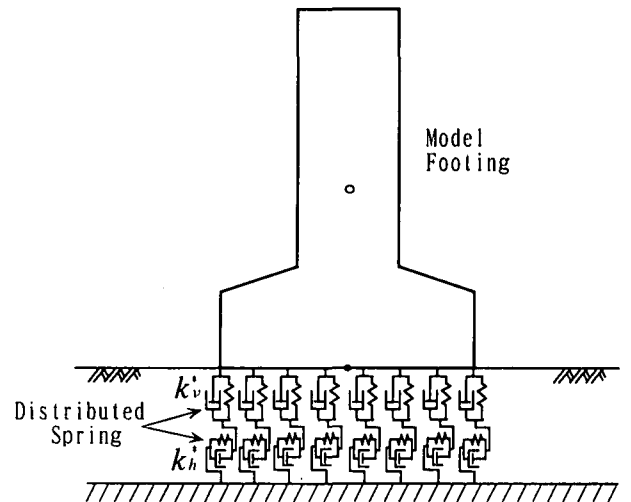
ここで、 c_b と c_t は入力波と模型基礎の上部と下部の振幅比であり、 θ_b と θ_t はそれぞれの位相差である。

実験から得られるそれぞれの位相差と振幅比の関係で上式を整理すると以下のような式が導かれる。

$$\frac{a}{C_f} = c_b \exp(i\theta_b), \quad \frac{b}{C_f} = c_t \exp(i\theta_t) \quad (17)$$

式(17)を入力して算定された等価バネ定数と限界減衰比が図－10 に示されている。等価バネ定数は周波数によって増加する傾向が伺えるが、限界減衰比ではそのような傾向が認められていない。特に等価水平バネ定数は、固有周波数の前で「－」方向に減少し、固有周波数のところで急増する傾向が見られた。このような挙動は、図－4 に示している剛体下部の挙動で述べた理由により説明できる。周波数が固有周波数のところでは基礎の上部と下部の位相が変わり、基礎下部の振幅が地盤のものより小さくなるため、バネの作用方向は反対側になり、その後は下部が上部と反対方向の動きを示すためにバネの作用方向が「＋」方向になる。

水平限界減衰比は固有周波数を軸とする双曲線の形になった。そこで水平バネと同様に基礎下部の運動と連動していると判断できる。



図－11 剛体底面における 2 成分の分布バネを採用した振動モデル

一方、回転バネは固有周波数と関係なく周波数と共に増加する傾向にある。それは加振力によって図-4 のように回転の運動が固有周波数ところで変化がなかったためである。また、回転限界減衰比は水平振動の影響を強く受け、共振時に近い所で急に増加し、引続き徐々に減少するようである。

5.2 バネ定数の底面圧力依存性

等価バネは図-11 に示した分布バネを積分したモデルで、水平・鉛直 2 成分の分布バネ定数 k_h と k_v を知る必要がある。模型の底面の接地圧は決して一様ではなく、粘着成分を有しない砂の特徴から、底盤の中央で最大となるように分布しているサドルのような形になるはずである³⁾。したがって、バネについてもこれに対応して一様ではないと考えるべきであろう。そこで、本論文では底面の中央で最大となり、周辺で 0 に線形的に減少する円錐形の分布バネを仮定した。円形基礎に対しては以下の関係が導かれる。

$$K_{h0} = \int_0^{D/2} \int_0^{2\pi} k_{h0} \left(\frac{D-2r}{D} \right) r d\psi dr = \frac{\pi D^2}{12} k_{h0} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} K_{r0} &= \int_0^{D/2} \int_0^{2\pi} k_{v0} \left(\frac{D-2r}{D} \right) (r \cos \psi)^2 r d\psi dr \\ &= \frac{\pi D^4}{320} k_{v0} \end{aligned} \quad (20)$$

ここで、 k_{h0} と k_{v0} は底面中央の最大分布バネ定数である。

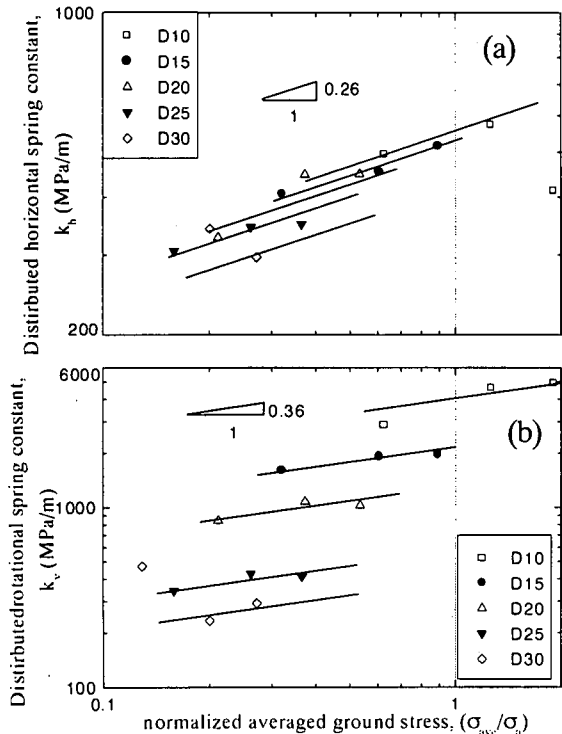


図-12 分布バネ定数の底面圧力依存性

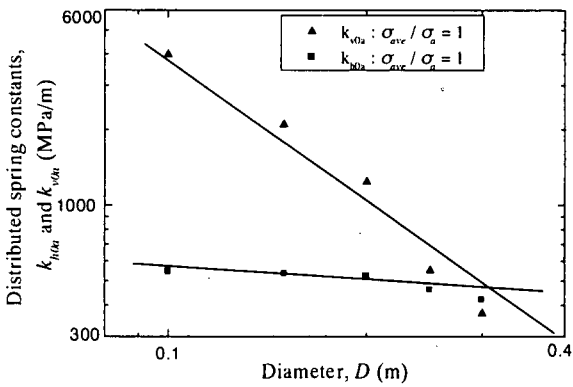


図-13 分布バネ定数の底面寸法依存性

図-12 には分布バネ定数を大気圧 $\sigma_a = 98 \text{ kPa}$ で正規化した平均底面圧力 $\sigma_{ave} = mg/(\pi D^2/4)$ に対してプロットしている。データにばらつきが見られるものの、剛体の底面寸法毎に両対数関係において直線関係が認められる。図示のようにこれらの直線関係は平行であり、底面圧力の影響は底面寸法によらず、独立したものとして考えることができる。それらの関係は以下の式で表現できる。

$$k_{h0} = k_{h0a} (\sigma_{ave} / \sigma_a)^{0.26} \quad (21)$$

$$k_{v0} = k_{v0a} (\sigma_{ave} / \sigma_a)^{0.36} \quad (22)$$

これらの式における k_{h0a} , k_{v0a} は、剛体の底面圧力 $\sigma_{ave} = \sigma_a$ に対応するバネ定数である。図示のように、底面圧力の増加に伴いバネ定数は増大し、限界減衰比は減少する傾向が見られる。先述のように、物性によってその程度は異なるものの、地盤材料は一般的に拘束圧の増大に伴って剛性が大きくなる特性を有している³⁾。ここで明らかになった底面圧力の増大に伴うバネ定数の増加は、地盤材料のこのような特性によって説明できる。

以前の研究¹⁾の結果と比較すると、回転バネはよく一致するが、水平バネはその差が大きくなる。それは自由振動の解析で考慮できない位相差の変化の影響によるものと考えられる。

5.3 バネ定数の底面寸法依存性

バネ定数は剛体の底面圧力の影響を受けることが図-12 から明らかである。ここでは、バネ剛性と減衰特性の剛体の底面寸法依存性を明らかにするために、底面圧力 $\sigma_{ave} = \sigma_a$ に対応するバネ定数 k_{h0} , k_{v0} を底面寸法に対して図-13 にプロットしている。円錐形の分布を仮定したバネ定数は図示のように底盤寸法とともに両対数関係で直線的に減少する傾向にある。ここで、鉛直方向のバネ定数の減少割合が水平方向のそれに比べて大きくなったが、そのことは以下のように説明できる。鉛直方向のバネは剛体の鉛直変位によって、水平方向のバネは剛体の水平変位によってもたらされる地盤との摩擦によって働いているものである。剛体が回転振動する時鉛直方向の変位

は、剛体の中心より周辺部の方が大きくなる。そこで、発生する底面圧力は剛体の中心より小さくなるが、剛体周辺部の鉛直方向のバネがよく働くことになる。その傾向は底面の直径が大きくなるほど、顕著に現れる。一方、水平方向のバネは底面で同じ変位が生じるため、底面圧力が顕著に発生する剛体の中心で一番重要な役割をする。そこで、鉛直方向と水平方向の分布バネ定数は、それぞれを積分して等価バネ定数を求め、それらから式(19)と(20)によって計算されるものである。したがって、鉛直方向の分布バネ定数の方が水平方向のそれにより底面寸法の影響を強く受け、減少割合が水平方向の分布バネ定数に比べて大きくなったと考えられる。ただし、水平方向と回転方向の等価バネ定数 K_h , K_r は、式(19), (20)が示すように、それぞれ直径の 2 乗と 4 乗に比例するので、底盤寸法とともに実質は増大することになる。

6. あとがき

共振時砂地盤上における剛体の振動特性を明らかにするために、模型基礎に対して強制振動実験を実施した。模型基礎の振動挙動を観察し解析した結果、剛体と地盤との境界面における力学特性をモデル化することができた。本研究で得られた結果を取りまとめると、以下のようである。

- (1) 振動台による強制振動挙動から、水平と回転がカップリングされた剛体の共振時の挙動が明らかになった。すなわち、基礎の上部と下部の位相差が 0 から $-\pi$ (radian) まで変化した。その間、模型剛体の上部は一次自由度のバネ-ダッシュポットモデルのような挙動を示し、下部は位相差の変化に強く依存する挙動を示した。
- (2) 共振時の剛体の周波数と増幅率は、底面圧力の影響を強く受け、底面圧力の増大に伴い共振周波数と増幅率が増大する傾向が得られた。また、底盤寸法の増加によって増幅率が減少する傾向も示された。
- (3) 等価バネは周波数に依存することが明らかになった。バネ定数と限界減衰比は、水平振動に関連して、固有周波数の点で増加することが分かった。
- (4) 剛体の底面に仮定した円錐形の分布バネの剛性は剛体底面の圧力と底盤の寸法に依存することが明確にされた。

本研究で得られた成果は、特定の砂についてのものであり、所定の範囲の条件において得られたものである。今後は、室内実験による地盤材料物性の定量的な評価を行うとともに、数値解析を通して、地盤物性と振動特性との関係の一般化に取り組む予定である。

本研究を実施するに当たっては、著者らが属する研究室の学生諸君に種々の助力をいただいた。記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Nelson, E. Function and William, J. Hall; "Footing Vibration with Nonlinear Subgrade Support", J. Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 93, No. SM5, pp. 191-211, 1967
- 2) Richart, F. E. Jr.: "Foundation Vibration", J. Transaction, ASCE, Vol. 127, Part 1, pp. 863-898, 1962
- 3) Novak, M.; "Prediction of Footing", J. Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 96, No. 3, pp. 837-861, 1970
- 4) Stokoe, K. H. and Richart, F. E.; "Dynamic Response of Embedded Machine Foundation", J. Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 100, No. 4, pp. 427-447, 1974
- 5) Gazetas, G and Stokoe, K. H. : "Free Vibration of Embedded Foundation : Theory versus", J. Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 117, No. 9, pp. 1382-1401, 1991
- 6) 金 潤相、三浦 均也、斉藤 道真、三浦 清一、西村右敏; "砂地盤における剛体の振動特性の室内模型実験による検討", 応用力学論文集, Vol. 2, pp. 347-354, 1999
- 7) Maeda, k. and Miura, K.: "Confining Stress Dependency of Mechanical Properties of Sands", Soil and Foundations, Vol. 39, No. 1, pp. 53-68, 1999
- 8) Schultz, E.: "Distribution of Stress Beneath a Rigid Foundation", Proceedings, 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 807-813, 1961

(2000 年 4 月 21 日受付)