

地上剛体板基礎の浮上りを伴う ロッキング振動の一解析方法

—— 基礎を加振源とする場合の境界要素法による解法 ——

AN ANALYSIS OF ROCKING MOTION OF RIGID FOUNDATION WITH PARTIAL
UPLIFT USING BOUNDARY ELEMENT METHOD

川上英二* 今村幸一**

By Hideji KAWAKAMI and Koichi IMAMURA

For aseismic design of a structure, such as a nuclear power plant or a tank on the ground surface, rocking behavior of the foundation with partial uplift should be taken into consideration. A static vertical force and a harmonic moment of rotation around a horizontal axis are considered to be applied to the rigid foundation, which rests on an elastic half-space. This paper proposes an iterative procedure for analyzing the rocking oscillation of the foundation with partial uplift. This procedure consists of the two parts; one is the boundary element method in the frequency domain, and the other is the modification method of the solutions considering the boundary conditions in the time domain. Then, they are combined by the fast Fourier transform. The proposed method is applied to two simple problems, and the solutions are shown to be obtained.

1. 序文

原子力発電所、地上タンク、橋梁の海中設置ケーソン基礎等の構造物では、強震時に支持地盤との接触面で剝離が生じて基礎が浮上る可能性がある。実際、地上タンクのアンカーボルトの抜け出し、タンクの底面近くのシェルの座屈等、浮上り・ロッキング現象を示唆する震害が幾つか報告されており、強震時におけるこれらの構造物の浮上り・ロッキングは重要な問題である。浮上りによって接触面の形状が時々刻々と変化すると、これを界して相互にエネルギーを伝達し合っていた地盤—構造物系の挙動の解析問題は非線形問題となり、両者が常に完全に固着していると考えた場合とその挙動は大きく異なるものと考えられる。従って構造物の耐震設計に当たって構造物の地震時挙動を正確に評価するためには、基礎の浮上り現象を考慮した詳細な解析が必要である。

最近では様々な手法によって基礎の浮上り問題へのアプローチが幾つか行われているが、これらは地盤のモデル化の方法によって次の三種類に大別できると考えられる。

(i) 土岐ら¹⁾は構造物、地盤を有限要素法で表し、その境界にジョイント要素を導入して、剝離、滑動という構造非線形性を考慮した振動解析を行っている。領域法である有限要素法は地盤の複雑な形状及び物性の変化を容易に考慮することができ、また、周辺地盤の材料非線形性をも考慮することが可能である。しかし、三次元の問題を扱うには要素数が膨大になるため計算時間に関して問題が生ずるばかりでなく、地盤の半無限性を厳密に表現することは困難である。

* 工博 埼玉大学助手，工学部建設工学科 (☎ 3 3 8 浦和市下大久保 2 5 5)

** 埼玉大学大学院

(ii) 一方、地盤一構造物系を質点系に置換する方法は、定式化とその解の算定が比較的簡単であるのが特徴である。例えば、半谷ら²⁾は、支配運動方程式を直接積分することによって基礎の挙動を検討している。しかし、ウィンクラーばねのばね定数の決定方法、また振動エネルギーの地下逸散減衰を取り扱う際の精度にあいまいさがある。

(iii) 最後に、地盤を半無限連続体として扱う弾性体理論に基づく解析がある。(i)、(ii)の方法に比べ欠点も多いが、地震を波動現象として厳密に扱うには地盤を無限に広がる弾性体と仮定する本手法が最も適している。

従来、(iii)の弾性論による方法で、例えば、対馬ら³⁾は接触面積と振動数の関数として地下逸散減衰効果を含めた地盤ばねを算定して基礎の浮上り振動を解析している。また、小堀ら⁴⁾は接触面積の変化に伴って加速度を補正することによって基礎の浮上りを考慮している。しかし、何れも基礎底面下の表面力分布を仮定しているためこの仮定の妥当性の評価に問題が残る。一方、Wolfら⁵⁾は境界要素法に基づき、運動方程式を時間増分の形で定式化し、時間領域で浮上り振動を解析する方法を展開している。この主な理由は、浮上り問題を扱う際に、基礎下の地盤は引張を負担せず、浮上り部の表面力が零であるという条件で与える場合には、この条件は振動数領域ではなく時間領域において満足させる方が容易なためである。しかし、定常浮上りロッキング振動を考える場合には、時間領域での方法では定常解に収束するまでに膨大な計算ステップ数が必要である。また弾性地盤の運動方程式は振動数領域の方が扱いが容易である。従って振動数、時間領域双方でそれぞれ得意とする問題の部分を扱い、結合させる方法も展開できるものと考えた。

以上のような観点から本研究では、三次元境界要素法 (Boundary Element Method; BEM) を用いて構造物基礎下の表面力 (接触圧) と変位との関係を振動数領域で記述した。一方、浮上り部分及び接触部分において、表面力の境界条件と変位の適合条件とをそれぞれ満足するように表面力および変位を時間領域で補正した。そして、これら振動数領域と時間領域とは高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform; FFT) を用いて結合させるものとした。ただし、浮上りのある場合の従来の地盤の動的コンプライアンスに相当する値を算定するため、基礎は半無限弾性地盤上に置かれた質量の無い剛板を想定し、基礎に自重に相当する鉛直方向の静的な力及びロッキングを起こさせる動的な正弦波形の偶力が作用する場合の定常ロッキング振動を扱った。本論文 2. では、上述の場合の基礎の浮上りを考慮したロッキング振動解析の収束計算方法を提案し、3. では、本方法を簡単な解析例に適用し、本方法の妥当性の検討を行っている。もとよ

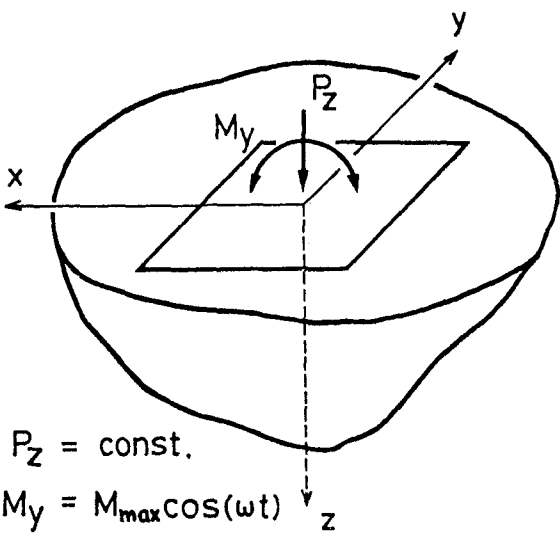


図-1 座標系と加振外力

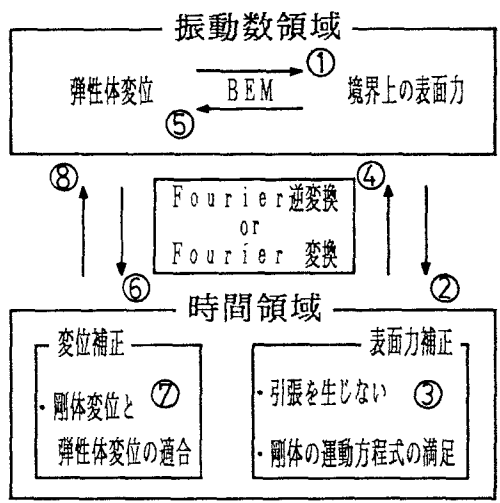


図-2 収束計算手法の概念図

り、本手法は、質量の無い基礎に一定の鉛直力及び加振偶力を与えた場合の基礎の応答を扱ったものであり、弾性体から波動が伝播する場合の基礎の挙動（例えば、弾性体の鉛直下方よりせん断波が入射した場合には、スウェイ振動及びロッキング振動が連成する）を扱ったものではない。本論文は、従来、基礎と地盤との動的相互作用を解析するために重要な値であると言われている動的コンプライアンスが、基礎の浮上りによりどう影響を受けるかを解析する手法を提案したものである。そのため剛体基礎の質量、慣性力は無視しており、鉛直力、加振偶力を基礎の運動によらないものと仮定している。弾性体から波動が伝播する場合の基礎の挙動を解析するためには、この動的コンプライアンスと剛体基礎の運動方程式、及び入射波係数（Input motion coefficient）⁶⁾を連成して解くことにより解析が可能になるものと考えるが、問題点も幾つか残されているため本論文では扱わない。

2. 解析方法

地盤と基礎の動的相互作用は、振動数領域で定式化された境界要素法を用いて評価するが、その際、地盤は等方均質な半無限弾性体と仮定した。また、浮上りのある場合の、従来の地盤の動的コンプライアンスに相当する値を算定するため、基礎は質量の無い剛体とし、基礎に図-1に示すような自重に相当する鉛直方向の時間によらない一定な力 P_z 、及びロッキングを起こさせる角振動数 ω の正弦波形の加振偶力 M_y が作用する場合を考えた。滑動については重要な問題であると考えられるが、本研究では生じないものと仮定した。

解析方法の概略を図-2に示す。解析は大きく振動数領域と時間領域との2つの部分に別れる。前者においては、境界要素法を用いて地盤と基礎との動的相互作用を考慮し、後者では、表面力と変位とが境界条件を満足するように補正する。解析方法は、以下の手順から構成される。

- ①' 先ず、振動数領域において従来のBEMによって浮上りを考慮しない場合の基礎底面下の表面力分布及び剛体基礎の変位を算定する。この表面力と変位を収束計算の初期値とする。
- ② 求めた表面力を高速フーリエ逆変換を用いて時間領域に変換する。
- ③ ②で求めた表面力より基礎底面下の要素を各時間毎に接触要素と非接触要素とに分離する。接触要素と判断されていた要素において基礎と地盤との間に引張力が生じているならば、非接触要素に変更する。そして更に、基礎の運動方程式（つりあい式）を満足したまま引張が生じないように表面力を補正する。（表面力補正）
- ④ ③で求めた表面力を高速フーリエ変換により振動数領域に変換する。
- ⑤ ここで、表面力の分布を③で変化させたために弾性体地盤と剛体基礎との間に変位の不適合が生じている可能性がある。したがって今度はBEMを用いて逆に表面力より変位を求める。
- ⑥ ⑤の振動数領域の変位解を時間領域の値に変換する。
- ⑦ ③で接触要素と判断された要素については、剛体基礎と地盤の両者が適合するように変位を補正し、非接触要素については、不適合が生じているならば接触要素とする。（変位補正）
- ⑧ ⑦で求められた時間領域の変位を振動数領域の値に変換する。
- ① ⑧で求めた基礎下の地盤変位からBEMによって地盤の表面力を算定する。

以上、①～⑧の手順で収束計算における反復の一過程が終了する。

このような繰り返しによって浮上りが生じる時間と場所、基礎の変位、地盤の変位、そして表面力分布の解を収束させる。収束判定は、反復計算の過程で表面力と変位との境界条件が共に満足されて、手順②で表面力分布が収束したか否かによって判定した。

(1) 境界要素法による基礎下の表面力と変位との関係^{7) 8)} (手順①'、①、⑤)

定常加振問題を考えた場合、弾性体の運動方程式は振動数領域において

$$(c_p^2 - c_s^2)u_{j,jj} + c_s^2 u_{i,jj} + \omega^2 u_i = 0 \quad (1)$$

で与えられる。ただし、 c_p 、 c_s はそれぞれP波、S波速度、 u_i ($i=1, 2, 3$) は i 方向の変位、 ω は加振角振動数である。

ここで、式(1)を満足するGreen関数を重み関数として用いて、媒体全体での体積分を境界 Γ での面積分に展開すれば、 i 点に関して境界要素法の基本式である次式が成立する。⁷⁾

$$[C]^{(i)}\{u\}^{(i)} + \int_{\Gamma} [T^*]\{u\}d\Gamma - \int_{\Gamma} [G^*]\{t\}d\Gamma = \{0\} \quad (2)$$

ただし、 $[C]^{(i)}$ は i 点近傍の境界形状を表す定数から成るマトリックス、 $\{u\}^{(i)}$ は i 点の変位ベクトル、 $[T^*]$ 、 $[G^*]$ はそれぞれ表面力と変位のGreen関数から成るマトリックス、そして、 $\{u\}$ 、 $\{t\}$ はそれぞれ未知の値を含んだ変位と表面力のベクトルを表している。

Green関数として三次元半無限弾性体の表面が点加振された場合の表面上での変位を表す関数を用いれば、領域 Γ として基礎底面のみを考えればよい。また、離散化に当たって四角形一定要素(要素内で変位と表面力が一定の要素で、一点でそれらを代表する)を用いれば、結局次式を得る。^{8) 9)}

$$\{u\} = [G]\{t\} \quad (3)$$

$$\{t\} = [G]^{-1}\{u\} \quad (4)$$

ただし、 $\{u\}$ 、 $\{t\}$ で表される変位及び表面力の自由度は基礎下に設けられた総ての要素の三方向の値を示すものとし、複素数として扱っている。

収束計算の手順①、⑤では、時間領域で補正された弾性体変位あるいは表面力を用いて、振動数領域で式(4)、(3)よりそれぞれ表面力、変位を算定する。また、式(3)により表面力から変位を算定する際に、表面力の地表面に平行な成分を零と設定した。この設定は第(3)節で述べる鉛直方向の表面力補正と共に浮上り部の境界条件を三方向共に満足させるものである。

(2) フーリエ変換、フーリエ逆変換 (手順②、④、⑥、⑧)

角振動数 ω の加振偶力の一周期 $T (= 2\pi / \omega)$ を N 等分し、 $r \Delta t$ ($\Delta t = T / N$ 、 $r = 0, 1, \dots, N-1$)の時刻の各要素の変位あるいは表面力の複素数表示の値を $f(r \Delta t)$ とすれば、そのフーリエ変換は、次式となる。¹⁰⁾

$$F(k\omega) = \sum_{r=0}^{N-1} f(r\Delta t) \exp(-j \frac{2\pi rk}{N}) \quad (k = 0, 1, \dots, N-1) \quad (5)$$

ただし、 j は虚数単位である。また、フーリエ逆変換は次式で表せる。¹⁰⁾

$$f(r\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F(k\omega) \exp(j \frac{2\pi rk}{N}) \quad (r = 0, 1, \dots, N-1) \quad (6)$$

各要素の変位あるいは表面力の時間領域での値を $f(r \Delta t)$ とすると、振動数領域の値は $F(k \omega)$ であり ($r, k = 0, 1, \dots, N-1$)、本式を用いて両領域間の変換を行った。ただし、ここでは、加振偶力の角振動数の $0, 1, 2, \dots, N-1$ 倍の成分 (倍振動数成分) の和で浮上り後の各要素の変位あるいは表面力が表せるものとしており、加振偶力の角振動数の整数分の一倍の成分 (倍周期成分) は考慮していない。また、後述する実際の解析 (3章参照) では、モデル 1 の場合は、 $N = 16$ 、モデル 2 では $N = 6$ を用いた。その際、フーリエ変換の効率的なアルゴリズムである FFT を使用した。

(3) 表面力補正 (手順③)

前述の手順③では、求められた基礎下の鉛直方向の表面力に引張が生じないように表面力を補正した。ただし、この補正により基礎の運動が変化しないように考慮した。つまり、基礎下の一部の要素に引張が生じると剝離が生じているものと考え、その部分に生じていた引張を解放して零とした。そして、表面力を零とした要素を非接触要素と呼び、その他の要素を接触要素と呼ぶことにした。更に、接触要素 (地盤と基礎との間に圧縮の表面力が生じている要素) の正の表面力 (圧縮を正、引張を負とする) に次のような簡単な関数を乗じて表面力を補正しようと試みた。(図-3(a) 参照)

$$g(a, n) = \begin{cases} 0 & \text{引張が生じている場合} \\ a \left(\frac{x^{(i)} - \ell}{R} \right)^n & \text{圧縮が生じている場合} \end{cases} \quad (7)$$

ただし、

$x^{(i)}$: 要素 i の x 座標値、

ℓ : 浮上っている領域と接触している領域との境界の x 座標であり、ロッキングの回転軸に沿う方向 (図-1 では y 軸方向) に要素分割した数だけ決定する必要がある。例えば、図-4 に示す解析モデルで必要な ℓ の数は、モデル 1 では 1 つ、モデル 2 では 4 つ (対称性を考慮して 2 つ) である。

a, n : 浮上りの状態によって変化する数で剛体の運動方程式 (後述の式 (8) (9)) を満足するように求める。

R : 矩形基礎では x 軸に沿う辺長の半分、円形基礎では半径を表す。

静的な鉛直荷重 P_z 、動的加振偶力 M_y が基礎に作用する加振問題を考えた場合、基礎は質量が無い剛板なので運動方程式 (つりあい式) は、時間領域で次式のように与えられる。

$$P_z - \sum_{i=1}^{NN} t_z^{(i)} A^{(i)} = 0 \quad (8)$$

$$M_y + \sum_{i=1}^{NN} t_z^{(i)} A^{(i)} x^{(i)} = 0 \quad (9)$$

ここで、 $t_z^{(i)}$ は要素 i に生じている z 軸方向の表面力、 $A^{(i)}$ は要素 i の面積、そして NN は要素分割総数である。

さて、補正後の表面力を $t_z^{(i)'}$ とすれば、式 (7) より

$$t_z^{(i)'} = g(a, n) t_z^{(i)} = \begin{cases} 0 & \text{非接触要素} \\ a \left(\frac{x^{(i)} - \ell}{R} \right)^n t_z^{(i)} & \text{接触要素} \end{cases} \quad (10)$$

となる。補正後の表面力 $t_z^{(i)'}$ も式 (8) (9) を満足していなければならないためこれを式 (8) (9) に代入し、

未知数 n 、 a の 2 つの値を算定した。まず、 a を消去して整理すると n に関する式 (11) を得る。

$$P_z \sum_{i \in NU} t_z^{(i)} A^{(i)} \left(\frac{x^{(i)} - l}{R} \right) n \left(x^{(i)} + \frac{M_y}{P_z} \right) = 0 \quad (11)$$

ただし、接触要素の集合を NU とした。この n に関する非線形方程式を数値計算で解き、求まった n を式 (8) (9) (10) に代入して a を決定する。求まった a と n を式 (10) に代入し、浮上りを考慮した表面力分布の補正值とした。なお、後述のモデル 1 (加振角振動数 $\omega = 2\pi$) の場合には、第 1 回目の反復においては、 $a = 0.605$ 、 $n = 2.76$ (Time step = 0 のとき) となり、約 10 回目の反復においては、 $a \approx 1.0$ 、 $n \approx 0$ となり式 (10) より収束していることがわかる。

もとより、上述の表面力補正は、表面力が単調に変化する様な主に低振動数加振による表面力分布を想定しているものであり、高振動数で予想されるような基礎の両端あるいは中央部のみが浮上る場合の補正は考えていない。これについては、異なる検討が必要であると考ええる。

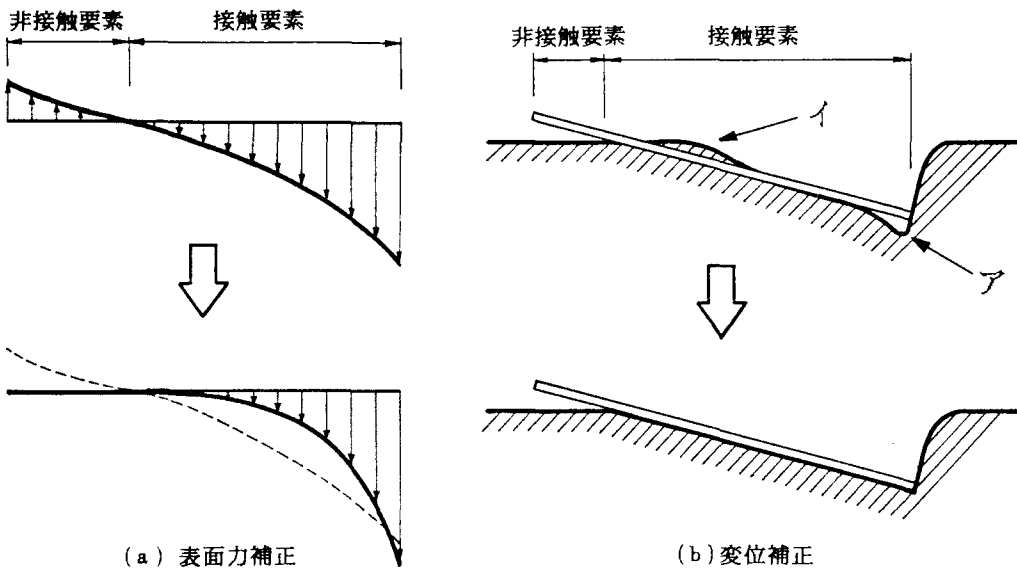


図-3 境界条件の満足

(4) 変位補正 (手順⑦)

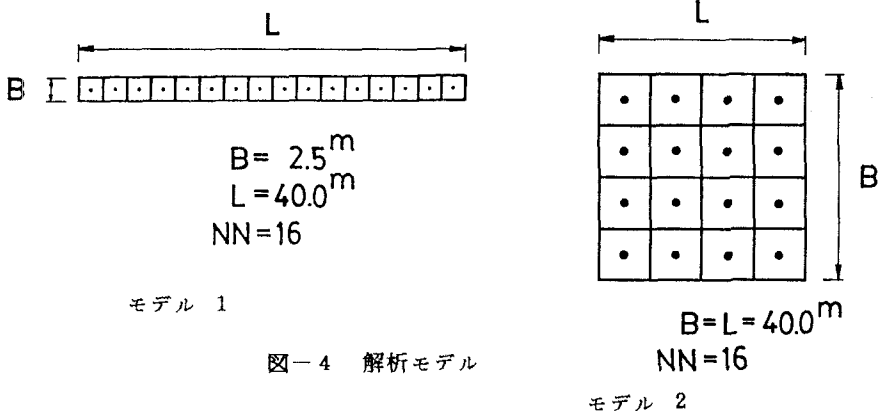
表面力補正時に非接触要素と判断された要素では、地盤と基礎の変位は一致しないで離れているが、それ以外の接触要素では両者の変位は等しくなければならない。浮上りを考慮した表面力分布から BEM によって求めた地盤変位と基礎の変位は、この適合条件を満足していなければならない。概念的には、変位補正は図-3 (b) に示されているように、非接触要素の地盤変位はそのまま、接触要素の地盤変位は、浮上っていても (図-3 (b) のアの部分)、あるいは基礎の変位と重なり合っていても (同図のイの部分)、基礎の変位と等しい値に補正するものとした。ただし、非接触要素で地盤変位と基礎の変位が重なり合っている場合には、その要素は接触している要素であると判断を変更した。適合条件を満足する反復計算の過程における近似解としては、様々な変位分布の解を考えることができ、これは収束に必要な反復計算回数または収束の可能性に影響を及ぼすと考えられるが、本解析では、基礎の変位を基礎下の接触要素の地盤変位から最小二乗法を用いて算定した。すなわち、基礎が平面を保つ剛板であるという条件より、基礎の回転角を ϕ_y 、座標原点での基礎の鉛直方向変位を Δz と置くと、要素 i 上の基礎の z 方向の変位は、 $\Delta z - \phi_y \cdot x^{(i)}$ で表される。この値と接触要素 i 下の地盤の鉛直 (z) 方向変位 $u_z^{(i)}$ ($i \in NU$) との差が最も小さくなるように、

次式を満足する ϕ_y と Δz を計算して、収束反復の過程における基礎の変位及び地盤の鉛直方向の変位を決定した。

$$\sum_{i \in NU} (u_z^{(i)} - \Delta z + \phi_y x^{(i)})^2 \rightarrow \text{Min} \quad (12)$$

3. 解析例

解析に当たっては図-4に示す二つの矩形の基礎のモデルを用いた。Bは基礎の幅、Lはその長さ、そしてNNは要素分割総数を表す。基礎の浮上り現象が理解しやすいように、先ず、要素が一行に並んだモデル1を用いて計算した。本モデルは二次元的ではあるが従来の二次元の奥行きが無限大の帯基礎の問題とは異なり、弾性地盤は三次元として扱っているため、明らかに奥行き(幅)が有限(B)の三次元問題である。そして、次に正方形の基礎としてモデル2について解析し、本手法の妥当性を検討している。ただし、図-1のように基礎の中心を原点とする座標系を用い、そこに静的な鉛直荷重 P_z 、動的な正弦加振偶力 M_y が働く定常加振問題を考えた。その結果、何れの場合にも10回程度の反復計算で、比較的容易に以下に示す収束解が求められた。



(1) モデル 1

a) 静的な場合

前章で提案した本方法の特別な場合として、基礎に与える偶力が時間によらず一定である場合に対して計算を行った。この静的な場合は、偶力の加振振動数 ω が零であり、式(5)(6)で $N=1$ の(フーリエ変換を行わない)場合に相当している。

図-5には、鉛直荷重 P_z を一定 ($0.10 \times 10^{11} \text{ kgf}$) に保ったまま偶力の大きさ M_y を変化させた各場合の基礎と地盤との変位状態が示してある。その結果、 M_y と ϕ_y (基礎の回転角) との関係は図-6に描かれているようになり、浮上りにより地盤の剛性は、軟化ばねの様子を示すことがわかる。 M_y が約 $0.78 \times 10^{11} \text{ kgf} \cdot \text{m}$ 辺りで浮上りが発生して、 M_y の増加に伴い基礎の中央部分の上下変位が急速に増加することがわかる。これは、半谷ら²⁾が指摘していることと定性的に一致している。

b) 動的な場合

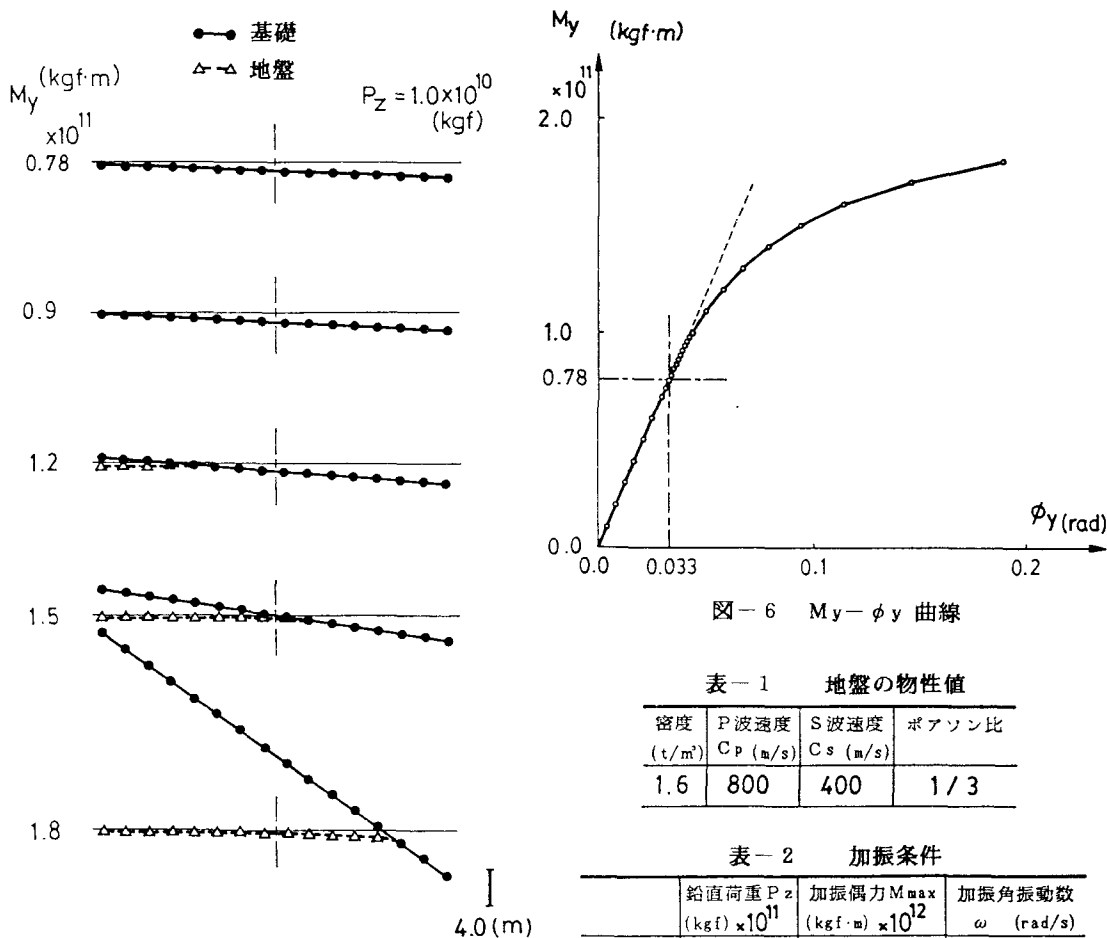
図-7、8には、表-1に示すような物性を有する地盤上の基礎を表-2のような条件で加振した場合の

それぞれ、表面力分布、変位分布の応答の収束解の半周期分が描かれている。ただし、加振偶力は図－１に示すように $M_y = M_{\max} \cdot \cos(\omega t)$ としている。

先ず表面力分布について見ると、基礎の浮上りを考慮することによって浮上っている領域は、考慮しない場合に引張が生じている領域より二倍程度広くなり、基礎端部での表面力（応力）集中が一層著しくなっていることが分かる。なお、各瞬間において基礎下の表面力分布より直接積分して求めた合力と加振外力とはつりあっていて、剛体の運動方程式（つりあい式）は常に満足されている。

変位分布については、浮上りを考慮しなければ、地盤と基礎は図－８に示されているように常に密着して運動している。しかし、浮上りを考慮すると、基礎は平面を保持しながらも（剛板条件の満足）回転角は大きくなる。一方、破線で表されている地盤変位は、浮上っていない領域では基礎の変位と等しく、浮上っている領域では接触部と浮上り部との境界から緩やかにカーブを描きながら零の変位に漸近している。図－７と図－８とを比較すると、浮上っている領域では表面力は零となり、浮上っていない領域では、地盤と基礎の変位は一致し、圧縮力が生じていることが認められる。

基礎上の要素に働く表面力の時刻歴応答を調べると（図－９参照、下向きが圧縮、上向きが引張を示している）、浮上りを考慮する場合には、引張は生じておらず、また波形も加振偶力の単一振動数の正弦波応答ではない。加振振動数以外の高振動数成分の応答が加わった振動をしていることが認められる。



図－６ $M_y - \phi_y$ 曲線

表－１ 地盤の物性値

密度 (t/m^3)	P波速度 C_p (m/s)	S波速度 C_s (m/s)	ポアソン比
1.6	800	400	1/3

表－２ 加振条件

	鉛直荷重 P_z ($kgf \times 10^{11}$)	加振偶力 $M_{\max}$ ($kgf \cdot m \times 10^{12}$)	加振角振動数 ω (rad/s)
モデル 1	0.13	0.20	2π
モデル 2	0.16	0.20	2π

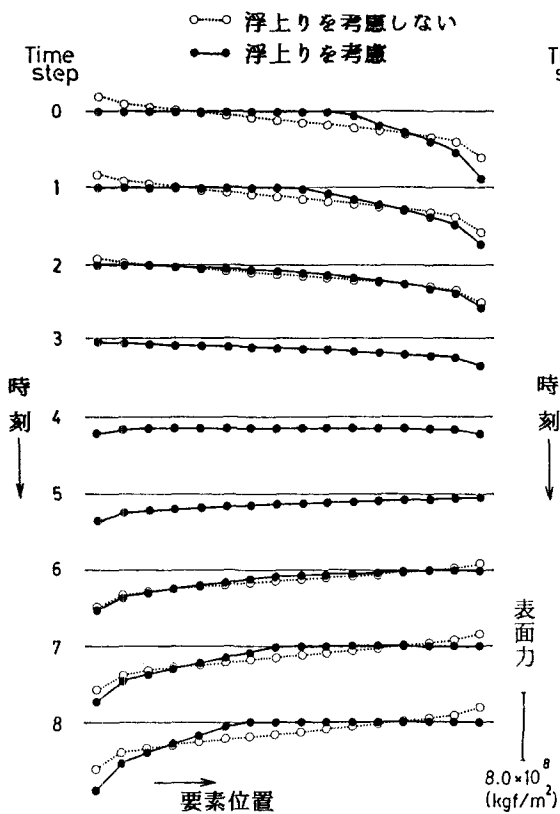


図-7 表面力分布の変化 (モデル 1)

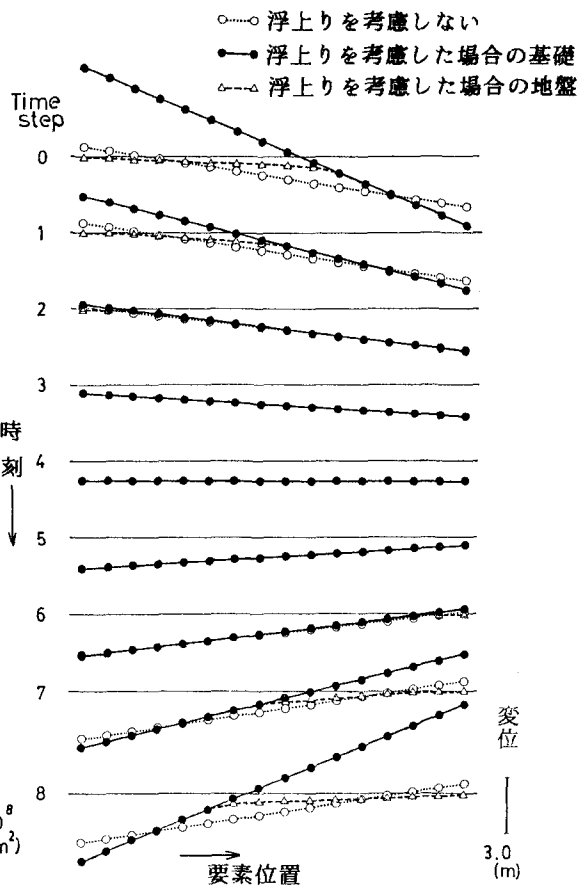


図-8 変位分布の変化 (モデル 1)

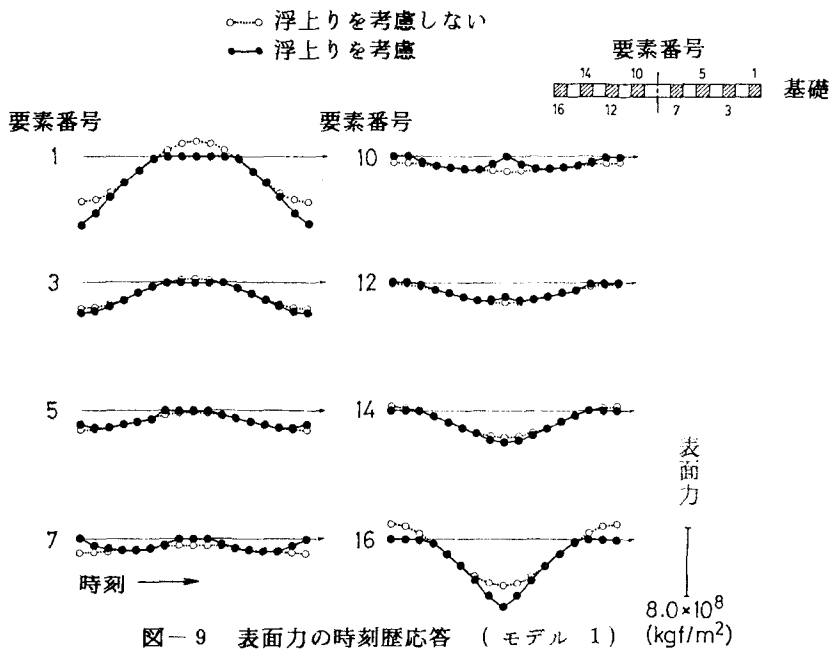


図-9 表面力の時刻歴応答 (モデル 1)

(2) モデル 2

このモデル 2 では、地盤定数としてはモデル 1 の場合と全く同じ表-1 に示すデータを用いて、表-2 の下段に示す条件で定常加振した場合を考えた。図-10 (a) (b) には加振偶力が最大値を示す時刻における表面力分布と変位分布の収束解が描かれている。

まず、図-10 (a) の表面力分布について見ると、基礎の浮上りを考慮しない場合には、基礎の左端の 4 要素だけに引張が生じているが、浮上りを考慮することによって左端から 2 列目の内側の 2 要素が浮上っている。モデル 1 の結果と同様に、浮上る領域は、浮上りを考慮しない場合に引張が生じている領域より広くなり (図-10 (c) 参照)、一方、基礎の右端部では表面力 (応力) 集中が一層著しくなっている。

次に図-10 (b) の変位分布を見ると、表面力が零であると補正された 6 つの非接触要素では剝離が生じ、その他の接触要素では、基礎と地盤との変位は等しくなっている。基礎は剛板条件 (平面保持する) を満足しており、浮上りを考慮しない場合に比べて基礎の回転角が増大していることが認められる。

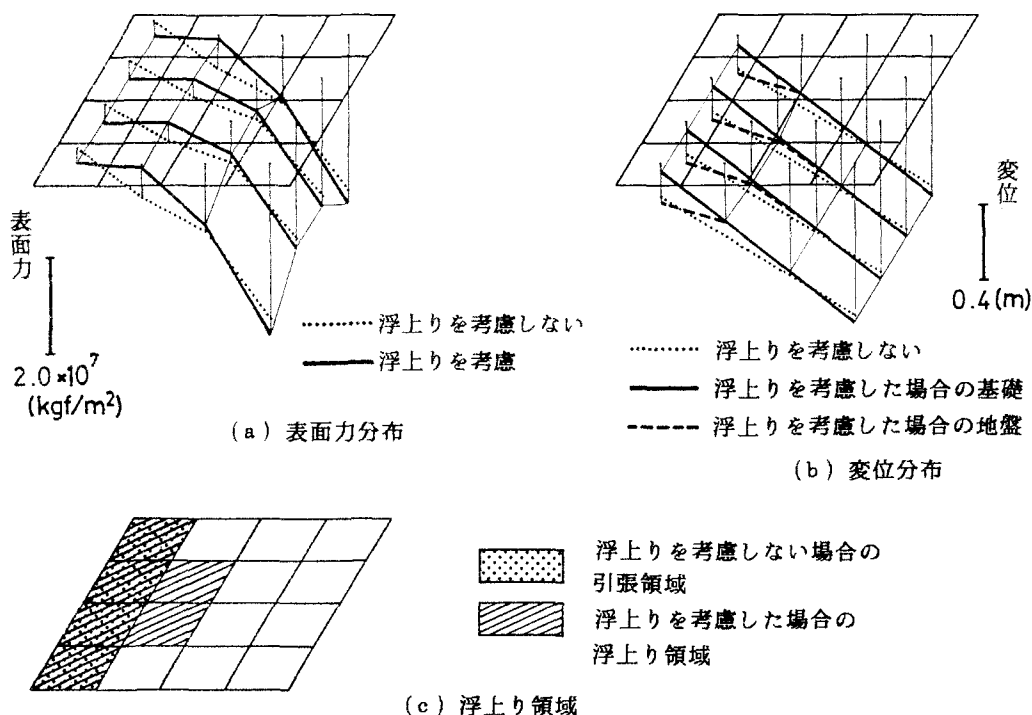


図-10 加振偶力が最大値を示す時刻の表面力分布と変位分布 (モデル 2)

4. 結論

(1) 基礎を加振源とする場合の基礎の浮上り・ロッキング現象を解析するための境界要素法を用いた反復計算による一つの解析方法を提案した。まず、浮上りのある場合の、従来の地盤の動的コンプライアンスに相当する値を算定するため、基礎は半無限弾性地盤上に置かれた質量の無い剛板を想定し、基礎に自重に相当する鉛直方向の静的な力及びロッキングを起こさせる動的な正弦波形の偶力が作用する場合の定常ロッキング振動を扱った。解析は、振動数、及び時間領域双方で行い、高速フーリエ変換により解の受け渡しを行った。前者においては境界要素法で表された弾性体の運動方程式を満足させ、後者では浮上りを考慮して表面力補正、変位補正を行った。表面力補正では、引張を負担せず、かつ剛体の運動方程式の成立を乱さな

いように表面力に適当な関数を乗じて表面力の再配分を図った。変位補正は、表面力補正時に浮上っていないと判断された基礎の部分の地盤変位より剛板条件(平面保持)を考慮して、最小二乗法によって基礎の変位を算定し、これを用いて両者が適合するように浮上っていない部分の地盤変位を補正した。そして、図-2に示されたような反復計算によって所要の解を算定した。

(2) 本手法を2つのモデル基礎に適用した。本手法は、必ずしも正解もしくは唯一解への収束を保証するものではないが、何れの場合にも収束する解が10回程度の反復計算で比較的容易に求められた。浮上り問題に関する理論解が求められていないため、理論解との比較は行えないが、得られた解は地盤及び剛板の運動方程式、両者の境界での表面力の条件、変位の適合条件を満足しているため正しい解であるものと考えられる。

(3) 浮上りにより地盤ばねは軟化特性を示すこと、基礎の浮上りを考慮すると浮上っている領域は、浮上りを考慮していない場合に引張が生じている領域よりもかなり広くなり、基礎端部での表面力(応力)集がが一層著しくなることが示された。

(4) 浮上りを考慮すると基礎の中心に上下振動が発生することが確認された。また、浮上りを考慮すると基礎の変位応答、基礎下の地盤の表面力応答には、加振偶力の振動数だけでなく、高振動数成分が加わる現象が認められた。

今後さらに加振角振動数の変化に伴う浮上りの応答への影響、任意形状の基礎への適用性の検討、基礎の質量及び地盤の層構造の考慮、高振動数加振で予想される基礎の両端が浮上る場合等の表面力補正の検討、弾性体からの波動の伝播により基礎が加振される場合の挙動の解析への拡張、転倒の問題への応用等、様々な問題が残されている。さらに検討を加える余地は多いが、加振源を有する基礎の浮上りを考慮した定常ロッキング振動解析が本手法により新しく可能になったものとする。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、埼玉大学工学部久保慶三郎先生、渡辺啓行先生に貴重な御助言を頂きました。記して、深く感謝致します。

参考文献

- 1) 土岐憲三・三浦房紀・大竹敏雄: 3次元ジョイント要素による地盤-構造物系の非線形震動解析, 土木学会論文報告集, 第322号, pp. 51~61, 1982.
- 2) 半谷裕彦・後藤博司: 連続分布のバネ上にある梁の接触振動, 第31回応力連合講演論文集, pp. 133~134, 1981.
- 3) 対馬義幸・野嶋 治・今沢民雄・佐々木幸男: 原子炉建屋の弾塑性地震応答解析(その1)-基礎の浮上りを考慮した基礎底盤ばねの算定, 竹中技術研究報告, 第24号, pp. 35~52, 1980.
- 4) Kobori, T., Hisatoku, T. and Nagase, T.: Nonlinear uplift behavior of soil-structure system with frequency-dependent characteristics, 8th WCEE, Vol. 3, pp. 897~904, 1984.
- 5) Wolf, J. P. and Obernhuber, P.: Nonlinear soil-structure interaction analysis using dynamic flexibility of soil for impulse forces, 8th WCEE, Vol. 3, pp. 969~976, 1984.
- 6) Wong, H. L. and Luco, J. E.: Dynamic response of rectangular foundations to ob-

- liquely incident seismic waves, Earthq. Engng Struct. Dyn. Vol. 6, pp. 3~16, 1978.
- 7) Brebbia, C. A. (神谷紀生・田中正隆・田中喜久昭 共訳): 境界要素法入門, 培風館, 1980.
 - 8) 川瀬 博・吉田一博・佐藤俊明: 境界要素法による地表面上剛基礎の相互連成系解析, 清水建設研究報告, 第39号, pp. 11~21, 1984.
 - 9) Wong, H. L. and Luco, J. E. : Dynamic response of rigid foundations of arbitrary shape, Earthq. Engng Struct. Dyn. , Vol. 4, pp. 579~587, 1976.
 - 10) 篠崎寿天・富山薫順・若林敏雄: 現代工学のための応用フーリエ解析, 現代工学社, pp. 34~43, pp. 116~136, 1983.

(1985年10月18日受付)