

基礎構造物と地盤の動的相互作用の簡便な解析法について

Simple Approach for Evaluation of Soil-Structure Interaction

小長井 一 男*

Kazuo KONAGAI

基礎構造物と地盤の動的相互作用は構造物の耐震性に大きな影響を与えるものであるが、三次元的に複雑な地形条件、波動の地下逸散、基礎構造物周辺の地盤の非線形性などを等しく取り上げ、相互作用を検討することは容易でない。本稿では基礎構造物より地中に放射される波動逸散の幾何学的形状等に着目した相互作用の簡便な評価手法について概説する。

1. はじめに

長大橋梁や海上プラットフォームなどの大規模構造物を支えるべく地盤内に深く埋め込まれた基礎構造物の動的挙動は、上部構造物の地震応答に大きな影響を及ぼすものであり、基礎構造物と地盤の動的相互作用の解明は、耐震工学上重要な検討課題である。この動的相互作用を検討する場合、構造物の規模に比べ、著しく大きな地盤の広がりや三次元的に考慮しなければならず、この中で地形、地質構成、構造物近傍の土の非線形性など構造物の応答を支配する数多くの要因を等しく取り上げ議論することは一般に極めて困難である。こうしたことから従来の研究は、地盤を連続体と仮定し弾性波動論に基づき解析を行うもの、離散的なモデルで解析を行うもの、あるいはこれらを複合したもの大きく三つの立場に分かれている。

弾性波動論を用いた手法は構造物に較べて大きな広がりや有する地盤内への波動の逸散の影響を重視する立場にたつものであり、これまでに杭、フーチング（直接基礎）、ケーソン（井筒基礎）等、さまざまな構造形式に対し、特にこれらの構造の応答の周波数依存性等について多くの興味ある研究成果が発表されている¹⁾。しかし数理解析上の困難さから基礎の形状、地盤のプロファイルをかなり単純化して考えざるをえず、このため現実の複雑な地盤、構造系への適用上難がある。基礎は円筒、円盤状か矩形であり、地盤は半無限等方弾性体、あるいは剛な水平岩盤上に一様な厚さで堆積する無限粘弾性体とするのがこれらの多くの研究に共通して見られる仮定である。

これに対して有限要素法（FEM）などに代表される、離散系モデルによる方法は、主に不均質な地質構成や構造周辺の地盤の非線形化などの影響を評価する立場にた

つものである。この手法は対象とする地盤、構造物のさまざまな状況の変化に応じ自由にモデルを構築することができるため実用的に耐震性の検討などに用いられている。しかし離散化されたモデルの各要素の物性値と構成則にどのようなものを採用するかは必ずしも体系化されてはならず、設計担当者は膨大な入力データと構成則をどの様な指針のもとに設定するか腐心しているのが実状である。

第三の立場は離散系モデルの境界から遠方への波動の逸散を考慮するものである。すなわち構造近傍地盤は離散系モデルで表現し地盤の非線形性の影響を考慮すると同時に、連続体モデル（たとえばBEM）、あるいは特殊な逸散境界をこの境界に接続することで波動の逸散を表現する。モデル境界に粘性境界を置いたり²⁾固定と自由という正反対の境界条件のもとで解かれた解を重ね合わせる³⁾などは厳密さには欠けるが巧妙な工夫の好例であろう。この手法は上記2つの手法の利点をあわせ持つことからきわめて汎用性に富むものであるが反面、離散系モデルの煩雑さと連続体モデルや逸散境界の数理解析の困難さという両者の欠点をもそのまま引き継いでいることもあり、実用に供するまで解決しなければならない課題も数多い。

著者は、基礎構造物が一般に周辺地盤に比べ著しく固いことから、これより地中に逸散する波動のパターンが、構造の地下部分の形状に強く依存することに着目し、構造形式を特定して、これらの構造を支える地盤の剛性評価のための簡便な数学モデルの開発に当たってきた。そしてモデルを簡便化した分、従来大きく検討の俎上に載ることのなかった地形、および広範な領域の地盤の非均質性等の影響の検討に力を注いでいる。ここに紹介する数学モデルで対象とする基礎形式は、杭、直接基礎、ケーソン（井筒基礎）等である。またこれらの数学モデルを開発するうえで重要な示唆を与えた、模型地盤内部の波

*東京大学生産技術研究所 第1部

動伝播の可視化実験についても触れる。

2. 杭基礎

杭基礎は井筒基礎などと較べ施工が容易でありまた経済的であることから特に軟弱な地盤での構造基礎として多用されてきたが、水平方向にはたわみやすく、上部に構造物を載せた状況での耐震性が常に問われることになる。このため動的相互作用に関する理論解析、数値解析例は数多く、著者らも過去にいくつかの数値解析モデルを提案してきた^{4),5)}。一般にこのような解析モデルの妥当性をなんらかの実験的手段で検討しておくことは極めて重要である。このために著者は森地、田村の研究⁶⁾を参考に動的な現象の観測が容易なゲル状材料の地盤模型を作製しこのなかに打設された模型杭の動的載荷試験を実施した^{7),8)}。入力はいんパルスの形で杭頭に与えることにした。図1はインパルスの発生装置の概略図であり、杭頭に置かれたアルミニウム板にコイルを近接させこれに瞬間的に大電流を流すことで電磁誘導により杭を打撃するものである。インパルスを用いることのメリットは、瞬間的に発生する波頭が模型境界に到達した戻ってくるまでの時間の現象の解析を行うか、あるいは模型境界からの解析上有害な反射波を強制的に除外することで模型境界の影響を除外しえることである。図2に模型地盤の作製手順を示す。ゲル状材料として水硬性ウレタンを用い、この水硬性ウレタンと同じ力学的特性を持つゼラチンの薄板内に模型杭(硬質ウレタン製)をあらかじめ埋め込んだものを用意し、これを硬化前のウレタン水溶液中に浸漬し硬化を待って模型の完成となる。このような手順を踏むことで、光弾性感度の高いゼラチンの挿入された断面内の波動伝播の状況を光弾性手法により観測することができる。

設定された実験ケースを図3に、これらに対応する模型内の等色線(光弾性)の写真を図4に示す。CASE 1は一様な地盤中の単杭、CASE 2は2層地盤中の単杭、CASE 3は互いに隣接する2本杭の内の一方から逸散する波頭の状況が明瞭に撮影されている。ここで特徴的な

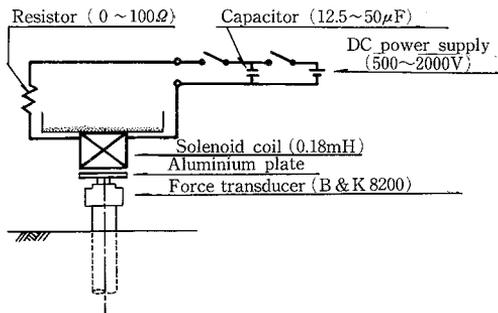


図1 電磁誘導型インパルス発生装置

事はたとえばCASE 2での2層地盤境界に各層内のせん断波の伝播速度の違いによる2次的な波頭の発生が認められるものの主要なせん断波頭は杭周面からほとんど同時に、放射されていることである。これは杭そのものが地盤に比べて著しく固い様子を示すものにほかならない。この一見単純な波頭の写真は構造物を支える地盤の剛性の簡便なモデル化についての著者の研究に重大なヒントを与えるものとなった。

図5に杭から放射されるせん断波頭を模式的に示す。杭およびこれを取り巻く地盤は水平方向に輪切りにされているが、これは杭から放射される円筒状の、あるいは杭先端から放射される球面状の波頭のみ考慮することが許されるなら、輪切りにされた各要素間の相互作用は無視しうることを示すものである。すなわちこの杭を、離散的に分布しおのおの独立のばねに支えられるいわゆるWinkler地盤上の梁としてモデル化しうることを示唆している。これは地盤内の動的荷重載荷によるGreen関数を求め、地盤のばね相互間の影響を考慮するといった境界要素法的手法に比べ、はるかに単純な手法である。

地盤をこのように単純に扱う場合、波動の幾何学的拡散形状に応じたモデル化を行う必要がある。図6に示すように断面積が変化する半無限の土のロッド内(せん断弾性係数; G)を軸(r)方向にせん断波が伝播していく状況を考える。この場合の支配方程式は以下のようになる。

$$\rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial r} \left(GA \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (1)$$

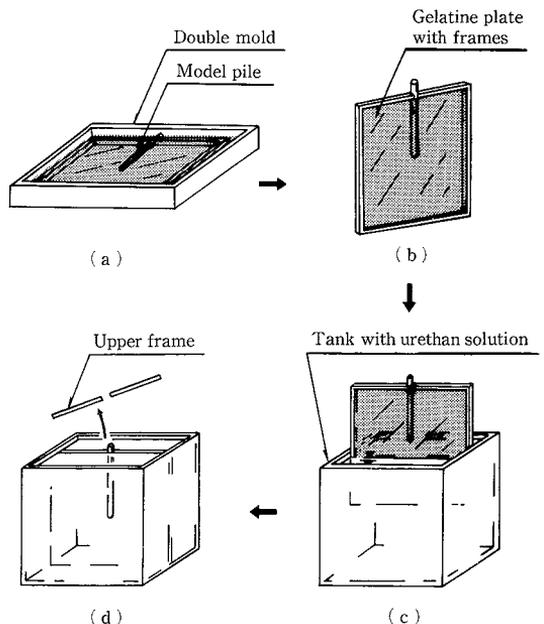
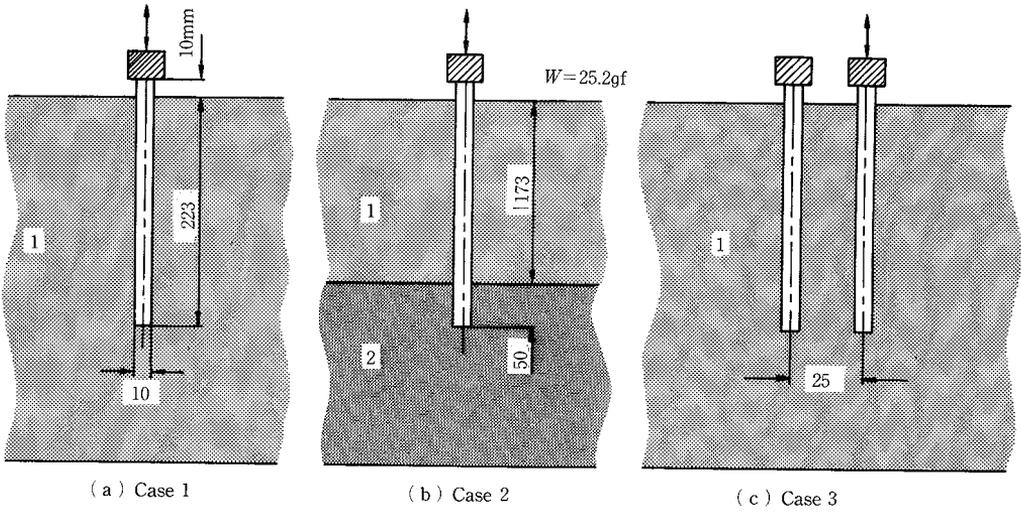
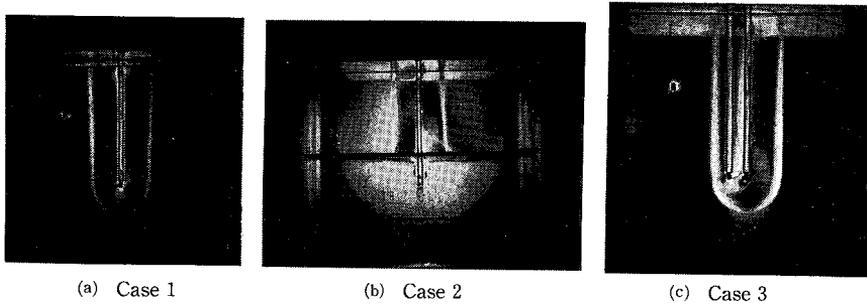


図2 ゲル状材料による模型地盤の作製手順



Pile	Layer 1	Layer 2
$E_p = 390 \text{ kgf/cm}^2$	$V_s = 2.6 \text{ m/s}$	$V_s = 4.3 \text{ m/s}$
$\gamma_p = 1.2 \text{ g/cm}^3$	$\nu = 0.49 \sim 0.5$	$\nu = 0.49 \sim 0.5$
	$\gamma_s = 1.1 \text{ g/cm}^3$	$\gamma_s = 1.1 \text{ g/cm}^3$
	ν ; Poisson's ratio	

図3 模型杭, 地盤の実験ケース



(Dark field, 14.0ms after an impulse is started)

図4 せん断波頭の光弾性写真

- ここに ρ : ロッドの密度
 A : ロッドの断面積
 u : ロッドのせん断変位
 G : ロッドのせん断弾性係数

断面積 A は r の関数であるが,ここでは,(1) A が一定の場合(平面波),(2) A が r に比例する場合(円筒波),(3) A が r の自乗に比例する場合(球面波)の3つのケースを想定する.そしておのおの状態でロッド端面($r=r_0, A=A_0$)のせん断力 S とせん断変位 u の比から周波数領域での動的剛性 k を誘導すると図6下段に示すような結果がえられる.ここで a_0 は $\omega r_0 / V_s$ で定義される無次元化振動数であり, ω, V_s はそれぞれ,加振円振動数,ロッド内のせん断波速度である.

(1)の平面波の場合,ロッド端面の複素剛性 k は純虚数で無次元化周波数 a_0 に比例して増加しているため,図に示すように速度に比例する粘性抵抗を有するダッシュポットをもってこれを表現することができる.(3)の球面波のばあいは,平面波を想定した時の複素剛性 k に周波数に依存しない定数項が加えられた形になっているので,等価な力学モデルは図に示すようなVoigtモデルとなる.(2)の円筒波の場合は,上記の2つのケースに比べて,力学モデルによる置き換えは困難であるが,著者ら^{9),10)}はこれが図に示すようにVoigtモデルが直列に連結された一般化Voigtモデルによってかなりの精度で近似しえることを示した.

地盤の加振の仕方によっては波動の拡散のパターンを

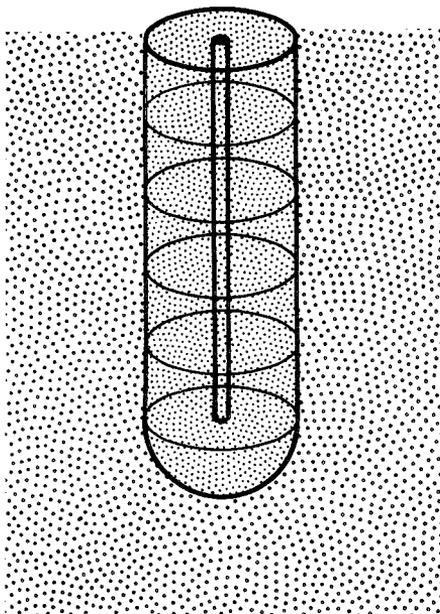


図 5 杭より放射される波動

前述の3つの形式に分類し難いこともある。たとえば図5に示すような杭が鉛直ではなく水平に加振された場合は平面歪み状態の無限に広がる薄板上の剛な円盤から放射される波動の拡散形状を考慮しなければならない。この円盤を支持する無限平面の水平方向の複素剛性は以下の形で与えられる。

$$k_x(a_0) = \pi G (i a_0)^2 T \tag{2}$$

ここに

$$T = \{4K_1(ib_0)K_1(ia_0) + ia_0K_1(ib_0)K_0(ia_0) + ib_0K_0(ib_0)K_1(ia_0)\} / \{ib_0K_0(ib_0)K_1(ia_0) + ia_0K_1(ib_0)K_0(ia_0) - a_0b_0K_0(ib_0)K_0(ia_0)\}$$

$$a_0 = \frac{\omega r_0}{V_s}, \quad b_0 = a_0 / \eta,$$

$$\eta = \sqrt{2(1-\nu)/(1-2\nu)}, \quad i = \sqrt{-1}$$

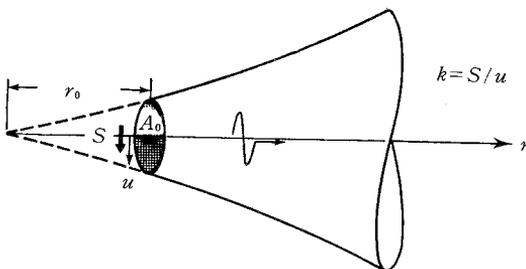
K_i : i 階の変形Bessel関数

ν : 土のPoisson比

G : 土のせん断弾性係数

式(2)は相当複雑な表現となっているものの、Poisson比を0.5とすると以下2項の和の形になる。

$$k_x(a_0) = 2 \left\{ 2 \pi G \frac{i a_0 K_1(i a_0)}{K_0(i a_0)} \right\} - \pi G a_0^2 = 2 k_z(a_0) - \rho_s \pi r_0^2 \omega^2 \tag{3}$$



1. $A = \text{constant value}$

$$k = \frac{G A_0}{r_0} i a_0$$

2. $A = \alpha r$

$$k = \frac{G A_0}{r_0} i a_0 \frac{K_1(i a_0)}{K_0(i a_0)}$$

3. $A = \alpha r^2$

$$k = \frac{G A_0}{r_0} (1 + i a_0)$$

where $i = \sqrt{-1}$, $a_0 = \frac{\omega r_0}{V_s}$, $V_s = \sqrt{G/\rho}$

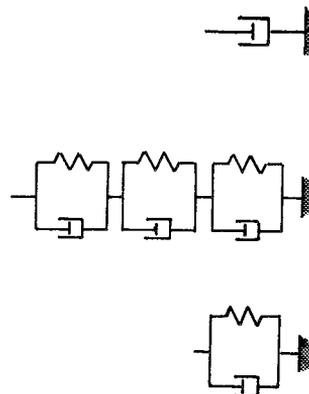


図 6 波動逸散の幾何学的形状と等価な力学モデル

ここで注目すべきことは第1項が前に述べた円筒状の波動拡散を想定した時の複素剛性のちょうど2倍の値となっていること、また第2項は円盤部分を土で置き換えたときの質量の慣性力と一致していることである。すなわちこの場合の等価な力学モデルは図6に示す一般化Voigtモデルの剛性を2倍とし、この先に杭要素の排除した分の土の質点を付加したものとなる。Poisson比が他の値をとる場合でも、第1項、第2項にかかる係数をPoisson比の関数とすることで容易に精度良く表現することが可能である。

図7は2本の群杭の頭部を同時に鉛直に加振したときの、杭頭剛性の周波数依存性を、また図8は先端で剛体基盤に支持される単杭の杭頭の回転を拘束しこれを水平方向に加振したときの杭頭剛性の周波数依存性を提案するモデルで計算し厳密解と比較したものである。両者は良く一致するが、図7、8の厳密解の低周波数領域に一部、剛性のわずかに低下するところ(↓で表示)が認められる。これは表層地盤の共振振動によるものである。近似解では地盤の深さ方向に相互の影響を考えていないので、このような剛性の低下は発生しない。杭は一般に径が小さく地盤に若干の材料減衰があれば地盤全体の共振を励起する状況は考えにくく、提案する手法の適用はおおむね妥当である。しかし基礎形式が井筒基礎のように大口径の場合、本手法の低周波領域への適用には慎重

な配慮が必要となる。

このように地盤の剛性を波動拡散のパターンに応じて分類し、これを簡便な力学モデルで表現することのメリットは単に計算手続きが簡単になるのみならず、モデル構成要素の定数を時々刻々変化させることで、地盤の非線形化を時間領域で解析しうることである。さらにこのモデルに構造物近傍地盤の地盤の強い非線形挙動を表現するモデルを直列につなぐことで、杭と地盤の接触面での剝離、滑りも含めた解析を行うことが可能になる¹¹⁾。

3. 直接基礎

直接基礎は地盤を比較的浅く広く掘削し、フーチングまたは基礎板を設置し荷重を直接良好な支持地盤に伝えるものである。ここでは均質様な支持地盤上に相当固い直接基礎が置かれた状況を想定し地盤剛性の簡便なモデル化を検討する。図9は半無限弾性体上の円形の直接基礎を水平に加振したときの波頭の拡散状況を概念的に示したものである。基礎縁辺部からは球面状の波頭が、また接地面全体からは平面状の波頭の逸散が考えられる。したがって先に述べた波動の拡散のパターンに従えば、基礎縁辺部にはVoigtモデルを、底部の接地面にはダッシュポットを割り当てることになる。したがって全体的にはこれらをまとめてばね K 、ダッシュポット C からなる1つのVoigtモデルによって表現することができ、こ

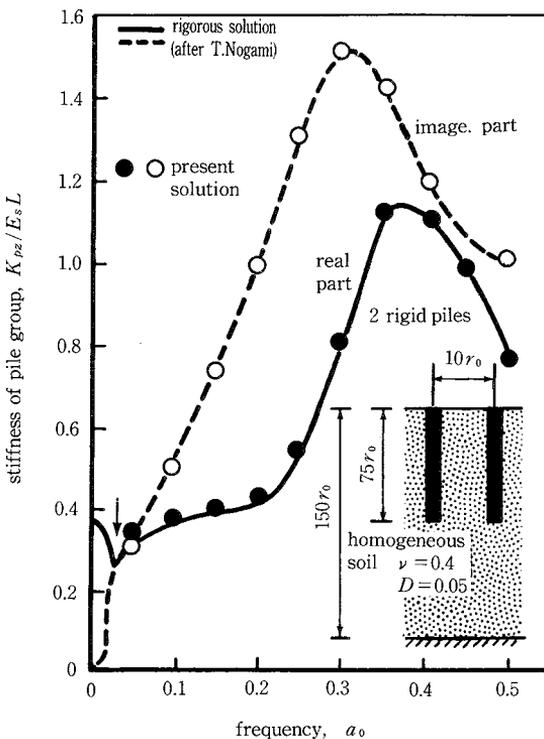


図7 鉛直加振を受ける杭頭剛性の周波数依存性

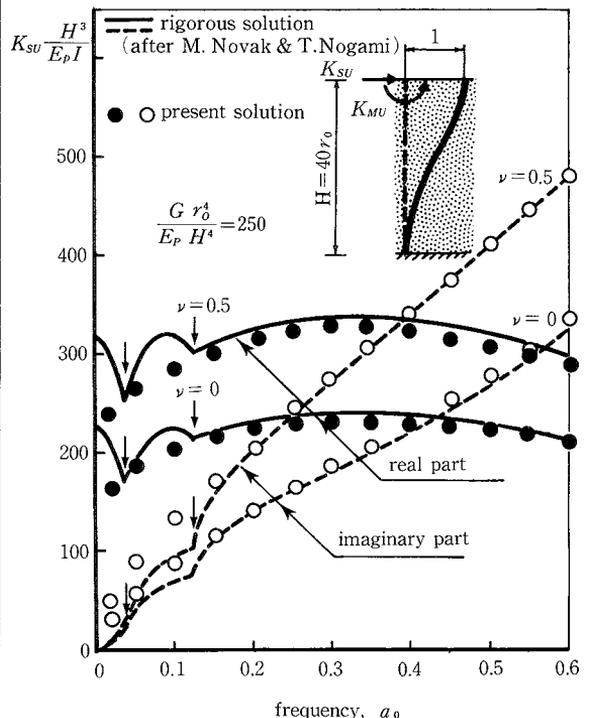


図8 水平加振を受ける杭頭剛性の周波数依存性

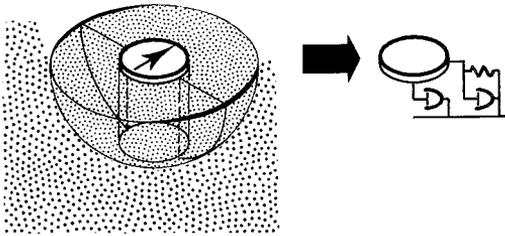


図9 円形フーチングよりの波動逸散と等価モデル

のことは弾性波動論による研究でもその妥当性が確認されている。ただここで着目すべきことは、ダッシュポットは接地面全面に分布している反面、ばねは基礎縁辺部にのみ付加されているということである。したがっておおまかな見方をすれば以下のような見解を示すことができる。

(1)等価Voigtモデルのばね定数 K は直接基礎の周長により決定される。(2)ダッシュポットの粘性減衰係数 C は直接基礎の接地面積より決定される。

静的に剛体円盤を半無限の弾性体上に押し付ける状況を考えて、いわゆるBoussinesq型の縁辺部に大きな応力の集中する接地圧分布が現れるが、これは縁辺部にのみばね要素が集中しているという見解と符合する。実際の直接基礎には円形のものも少なく矩形、あるいは矩形をいくつか組み合わせた形状のものが多い。剛体直接基礎を支持する地盤の複素剛性を厳密に求めるためには、dual integral equations法によらなければならない。これによって得られた煩雑なFredholmの積分方程式を複雑な境界条件のもとに解く必要がある¹²⁾。W. Ruckerは矩形剛体基礎の接地面を有限個の小片に分割し、各要素上での接地圧を一様と近似的し、幅広い細長比の変化に対して矩形基礎を支持する地盤のコンプライアンス(たわみ性)がどのように変化するか算定している¹³⁾。このコンプライアンスの逆数を取り複素剛性を求め、これと等価Voigtモデルの K と C を算定し、おのおのをそれぞれ基礎の周長 ℓ 、接地面積 A で割ったものを図10に示す。ともに矩形の細長比 b/a の関数として表現されているが、明らかにこれらの量は矩形の形状に強く依存せず、ほぼ一定の値を示している。厳密に考えれば矩形板の場合、同じ縁辺部でもコーナーに近い部分とこれから離れた部分とでは波動拡散のパターンが異なるため、複素剛性に与える影響は異なってくるが、図10は実用上先に述べた2つの見解が矩形板を支える地盤の複素剛性を評価するうえで役立つことを示唆している。

4. 井筒基礎

井筒基礎は、条件の悪い地盤中に置かれた場合でも、大きな支持力や水平抵抗力が期待できるため、重量構造物の基礎として用いられる基礎構造物の一つである。井

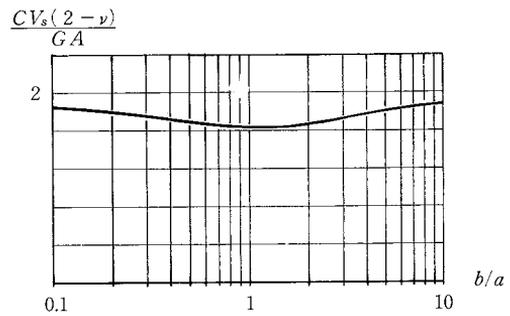
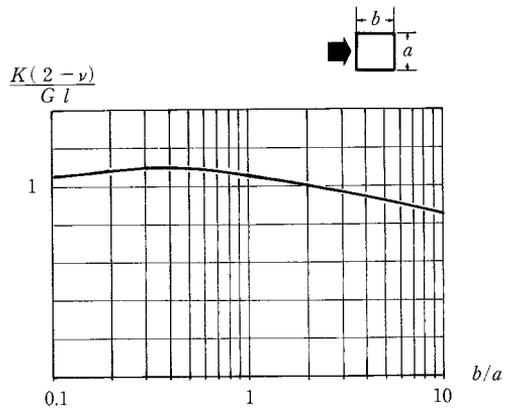


図10 等価Voigtモデルの K 、 C の細長比依存性

筒基礎は杭基礎同様地中に深く埋め込まれるが、図5に示すように構造を支持する地盤のばねを深さ方向に影響しあわない離散的なものとして扱うことは適切でない。これは井筒基礎の径および剛性が著しく大きいことから地盤全体の共振振動数付近で側方地盤の剛性が大きく低下する影響が無視しえなくなるからである。このため側方地盤の剛性評価のためのモデルはこれまでの波動の拡散パターンによる方法とは、別の観点で構築しなければならない。

さきに田村、鈴木¹⁴⁾は三次元的に複雑な形状を有する表層地盤の地震時挙動を検討するために、平面の有限要素モデルとそれを支える質点-ばね系からなる疑似三次元地盤モデルを提案した。このモデルは、基礎岩盤上の軟弱な表層地盤(図11(a))を、地表面と基盤面を端面とする三角、あるいは四角柱状の要素に分割して(図11(b))、それぞれの要素をその土柱のせん断一次振動に注目し一質点系の振動子に置き換え、振動子の質量部分を表層全体にわたり有限要素網で連結するものである。井筒基礎の動的解析では、地盤のせん断一次の固有振動数を大幅に越える振動数領域まで考慮する状況も考えられるので、この疑似三次元地盤モデルを直接適用すると精度が低下することが予想される。しかし剛性の大きい井筒基礎が、底面を中心としてロッキング振動をする場

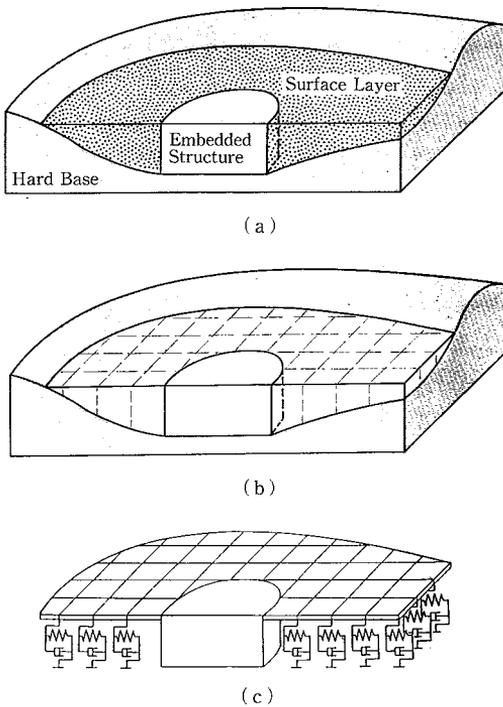


図11 表層地盤のモデル化

合これを取り巻く地盤の変形は井筒基礎の剛性によって強く拘束される。つまり、深さ方向の動的変位に及ぼす高次モードの寄与は著しく小さなものとなる。このため、表層地盤部分を疑似三次元地盤モデルに置き換えることが期待される。有限要素網の境界は、堅固な洪積台地などと接する所で固定とし、同様の表層がさらに遠方まで続く所は、波動の逸散を考慮した境界を設けることにすれば、複雑な地形条件を容易にモデルに組み込むことができる。

図12はCASE 1~CASE 3の3種類の有限要素網を用いて、周波数領域において井筒基礎のロッキング振動に対する側方地盤の動的剛性を算出し、田治見¹³⁾が導いた厳密解と比較したものである。横軸には振動数 ω と表層の固有振動する ω_0 の比(ω/ω_0)、縦軸に複素剛性を示している。要素の寸法を小さくすることで、本手法による近似解は次第に厳密解に接近していく様子が確認できる。

図13は表層厚が(a)、(b)の様に、井筒基礎の中心から同心円状に変化する場合を考え、地形条件が側方地盤剛性に与える影響を誘導し、層厚一定の場合と比較したものである。複素剛性の絶対値が最小となる周波数が層厚一定の場合に比べ高くなっている。これは表層地盤の共振振動数が高くなったものに対応するものである。この共振振動数を境に、低い振動数領域では複素剛性の値に大きな変化は見られないが、これより高い振動数領域では、複素剛性が周波数の変化に応じ、大きく脈動する

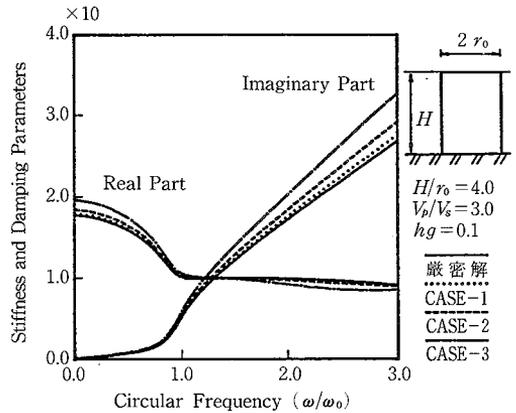
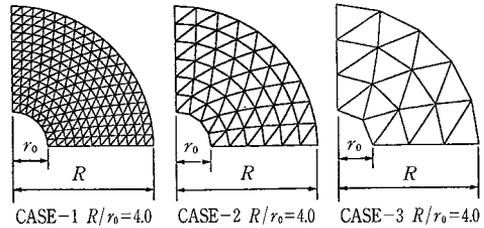


図12 側方地盤の複素剛性の周波数依存性 (表層厚一定)

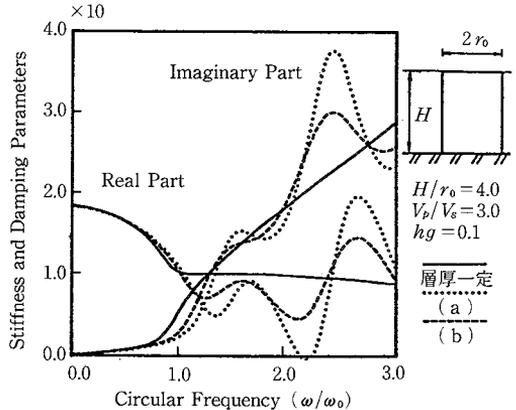
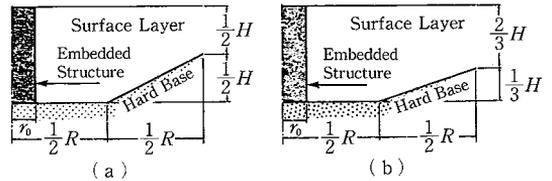


図13 側方地盤の複素剛性の周波数依存性 (表層厚変化)

様子が認められる。これは、共振振動数以上の周波数領域で波動の逸散が大きくなるため、地形の変化による波動の反射の影響が強く現れたことによるものである。

5. ま と め

ここでは地盤と構造物の動的相互作用を検討する上で重要な、基礎構造物を支持する地盤の剛性の簡便な評価

法についての研究成果を中心に取りまとめた。主要なものを列記すると以下のようになる。

1) 基礎構造物の剛性が地盤のそれに比べて大きい場合、地盤を近似的に相互の関連がない離散的なばねの並ぶいわゆるWinkler地盤としてモデル化することができる。この方法は杭基礎などには有効であるがたとえば井筒基礎の共振時の挙動を検討する場合等、離散化されたばね相互の影響を無視できなくなる場合には適用すべきではない。

2) Winkler地盤の構成要素であるばねは構造物からの波動の逸散の幾何学的パターンによってモデル化できる。波動が平面的に伝播する場合はダッシュポットで、円筒状に逸散する場合は一般化Voigtモデルによって、球面的に逸散する場合はVoigtモデルによってその剛性を表現することができる。このように機械的要素で地盤の剛性を表現することで地盤の非線形化を考慮した時刻歴応答解析をも簡単に行うことができる。

3) 直接基礎の剛性を検討する場合にも接地面からの波動の逸散の幾何学的形状を検討することでこれを容易に評価しえる。直接基礎を水平に加振する場合の地盤の剛性はVoigtモデルで近似しようが、そのばね定数は基礎の周長に、粘性減衰係数はその接地面積に強く依存する。

4) 井筒基礎の側方地盤の剛性評価のために、田村らによる疑似三次元地盤モデルを用いることができる。これは表層地盤を、一質点系の振動子にその節点を支えられる平面の有限要素網で表現するモデルである。

以上は構造物の形式を具体的に特定してモデルの簡略化を進める立場に立った研究成果であり、汎用手法の開発を目指す立場のものとの互いに相異なる利点欠点を有している。ここに紹介したモデルの多くのものがパーソナルコンピュータ上で実行できるほど簡略化されたものであるが、簡略化に伴う制約条件にも十分留意してその活用を図りつつ、さらにモデルの改良を図っていく必要があろう。

(1988年4月28日受理)

参考文献

- 1) たとえば、田治見宏；耐震理論に関する基礎的研究，東京大学生産技術研究所報告第8巻，第4号，1959
- 2) Lysmer, J. and R.L. Kuhlemeyer: Finite Dynamic Model for Infinite Media, Proc. ASCE, EM4, pp. 859-877, 1969
- 3) 田村重四郎，中村豊，加藤勝行：地中坑道に発振源があ

- る場合の周辺地盤の震動の解析方法，土木学会論文報告集，No. 281, pp. 41-54, 1979
- 4) 小長井一男：鉛直加振を受ける杭の応答特性に関する研究，土木学会論文報告集，No. 325, pp. 11-21, 1982
- 5) 小長井一男，谷 巖：水平加振を受ける杭の応答特性に関する研究，土木学会論文報告集，No. 338, pp. 49-58, 1983
- 6) 森地重暉，田村重四郎：ゲル状材料を用いた動力学的模型実験解析の一方法について，土木学会論文報告集，No. 310, pp. 33-44, 1981
- 7) Konagai, K., Takahashi, M. and S. Ogawa: Experiments on Soil-Structure Dynamics using Electromagnetic-Induction-Type Shock Wave Source, Proc. JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng. Vol. 2 No. 1, pp. 175-184, 1985
- 8) Konagai, K., Koizumi, Y. and S. Ogawa: Experiments on Soil-Pile Interaction using Electromagnetic-Induction-Type Impulse Generator, Geotechnical Special Technical Publication on "Dynamic Behavior of Pile Foundations (Experiments Aspects)", ASCE, No. 11, pp. 91-101, 1987
- 9) Nogami, T. and K. Konagai: Time Domain Axial Response of Dynamically Loaded Single Piles, Jour. Engineering Mechanics Div., ASCE, Vol. 112, No. 11, pp. 1241-1252, 1984
- 10) Konagai, K. and T. Nogami: Time Domain Axial Response of Dynamically Loaded Pile Groups, Jour. Engineering Mechanics Div., ASCE, Vol. 113, No. 3, pp. 417-430, 1985
- 11) 小長井一男，野上仁昭：鉛直加振を受ける杭基礎の時刻歴応答，第7回日本地震工学シンポジウム論文集，pp. 1051-1056, 1986
- 12) Robertson, I.A.: Forced Vertical Vibration of a Rigid Circular Disc on a Semi-Infinite Elastic Solid, Proc. of Camb. Phil. Soc., Vol. 62, Series A, 1966
- 13) Rucker, W.: Dynamic Behaviour of Rigid Foundations of Arbitrary Shape on a Half Space, Int. Jour., Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 10, pp. 675-690, 1982
- 14) Tamura, C. and T. Suzuki: A Quasi-Three-Dimensional Ground Model for Earthquake Response Analysis of Underground Structures—Construction of Ground Model—, "SEISAN-KENKYU" (Monthly Jour. Inst. of Industrial Science, Univ. of Tokyo), Vol. 39, No. 1, pp. 37-40, 1988
- 15) Tajimi, H.: Dynamic Analysis of a Structure Embedded in an Elastic Stratum, Proc. IVth WCEE, A-6, pp. 54-69, 1969