

直接時間領域 BEM による地盤と構造物の動的相互作用場の波動論的考察

竹宮宏和¹・祐保芳樹²

¹正会員 工博 岡山大学教授 環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700 岡山市津島中 3)

²正会員 工修 元岡山大学大学院生 日立造船株式会社

本論文は、地盤-構造物系の載荷/地震波入射問題における地盤と構造物の動的相互作用場を波動の散乱現象に着目して捉えたものである。解析手法には、著者らの展開した帯状衝撃載荷に基づく遷移グリーン関数を導入した時間領域境界要素法(間接法)を用いた。解析例の隣接基礎間の相互作用解析では表層の周期と載荷周期の比をパラメータに、入射問題では基礎幅に対する入射波長の比の変化に伴う波動の散乱現象の変化に注目している。

Key Words : *dynamic soil-foundation interaction, soil stratum/half-space, wave propagation, direct loading, seismic wave incidence, time domain BEM*

1. ま え が き

地盤と構造物の動的相互作用の内容には、地震波の伝播と基礎の運動に関係するキネマチックな相互作用と、上部構造物の持つ質量によって発生する慣性力相互作用がある。これらを評価するに際して、地盤のモデル化を半無限地盤、あるいは剛基盤上の成層地盤と理想化することが多い。現実の複雑な層構成をなす地盤への対応は、離散化手法の発展に伴って、著しく発展した。1970年代以後の有限要素法、1980年代以後の境界要素法、およびそれらのハイブリット手法が挙げられる。しかしそれら多くの研究は、振動数領域での解析であり、地盤インピーダンス/コンプライアンス関数に注目して、地盤-構造物の相互作用系の応答の振動数依存性を示すことを強調している。

地盤と構造物の動的相互作用において、特に視点を地盤内の波動伝播におくと、衝撃応答^{1)~3)}を評価することによって定常調和震動解析で明らかにされる以上の内容が得られ、それらを視覚的に容易に理解できる。その意味で著者らは、前論文^{5)~8)}で帯状衝撃載荷下の弾性体のグリーン関数を誘導し、境界要素法(間接法)を用いて直接に時間領域で衝撃に対する基礎構造物の遷移応答を求めた。

複数の構造物が設置されている場合、それらの周辺の地盤応答は構造物の存在によって影響される。一つの基礎の散乱波動場は、他の基礎に対して入射波動場となる。地盤と構造物の動的相互作用による地盤内の波動散乱場

を時間領域で究明しておくことは、例えば、著者らの提案している基礎の制振設計法である WIB⁴⁾を開発する上で有用な情報を与える。

本論文では、遷移応答解析で相互作用系に及ぼす地盤の層状性の影響に注目した。そのため、竹宮・祐保⁵⁾による全無限解を利用して、規定された境界条件に適合する境界要素方程式を展開した。層状地盤内の波動伝播/遮断の様相を捉えるため、数値解析例として、基礎への直接載荷による(1)相互作用系の衝撃応答とコンプライアンス関数、(2)隣接基礎間のキネマチックな相互作用を扱った。そして半無限地盤仮定との対比の下で層状地盤仮定の特徴を把握している。つぎに(3)半無限地盤内の入射波を仮定してキネマチックな相互作用による地盤の散乱波動場を調べた。

2. 定 式 化

(1) 載荷問題

全無限体のグリーン関数を導入した境界要素法解析で、前論文⁵⁾において、半無限地盤と剛基盤上の成層地盤モデルの定式化を展開しているので、ここでは、より一般的に半無限基盤上の成層地盤モデル(Fig.1参照)の定式化を示す。

弾性体への載荷による遷移応答問題で、解法上、与えられた境界条件を満足させるための未知作用力 $f^{(m)}$ を導入する(以下では、肩添字 m はカーレント・タイムに対応した時間ステップ、 j はそれまでの時間ステップ

を指す)。その場合、境界は直線から構成され、境界上を微小要素に区分したときの変位および応力の変化は、空間的、時間的に要素内では一定値で変化するとする。

地盤節点を剛体基礎との境界 (添字 c)、自由地盤表面 (添字 s) および地盤層間のインターフェイス (上層のものを i_1 、下層のものを i_2 の添字) と区別する。

まず、衝撃载荷に対する変位 u 、表面力 t をそれぞれの影響マトリックス F 、 H をとおして離散合積分で表わすと

$$\begin{Bmatrix} u_s \\ u_c \\ u_{i_1} \\ u_{i_2} \end{Bmatrix}^{(m)} = \sum_{j=0}^m \begin{bmatrix} F_{ss} & F_{sc} & F_{si_1} & 0 \\ F_{cs} & F_{cc} & F_{ci_1} & 0 \\ F_{i_1s} & F_{i_1c} & F_{i_1i_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & F_{i_2i_2} \end{bmatrix}^j \begin{Bmatrix} f_s \\ f_c \\ f_{i_1} \\ f_{i_2} \end{Bmatrix}^{(m-j)} \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} t_s \\ t_c \\ t_{i_1} \\ t_{i_2} \end{Bmatrix}^{(m)} = \sum_{j=0}^m \begin{bmatrix} H_{ss} & H_{sc} & H_{si_1} & 0 \\ H_{cs} & H_{cc} & H_{ci_1} & 0 \\ H_{i_1s} & H_{i_1c} & H_{i_1i_1} & 0 \\ H_{i_2s} & H_{i_2c} & H_{i_2i_1} & H_{i_2i_2} \end{bmatrix}^j \begin{Bmatrix} f_s \\ f_c \\ f_{i_1} \\ f_{i_2} \end{Bmatrix}^{(m-j)} \quad (2)$$

ここでマトリックス F 、 H は特異性を処理した解となっている⁵⁾。

自由地表面を近似的に再現するため、条件として、

$$t_s^{(m)} = 0 \quad (3)$$

を有限幅で付与する。

表層と基盤層のインターフェイスの変位の適合性は

$$u_{i_1}^{(m)} = u_{i_2}^{(m)} \quad (4)$$

応力のつりあいは

$$t_{i_1}^{(m)} + t_{i_2}^{(m)} = 0 \quad (5)$$

基礎に対する動的つりあい式は、剛体基礎の変位 Δ の自由度において求められ、作用外力 P の下では

$$P - M\ddot{\Delta} = \alpha t_c \quad (6)$$

ここに M は質量マトリックス、 α は各要素における剛体結合条件からなるマトリックスである。

両式 (1)、(2) からカーレントタイムの未知力 $f^{(m)}$ を消去し、以上の境界条件式 (4)、(5)、(6) を用いて、次式の各タイムステップごとの応答の漸化式を得る。

$$\begin{aligned} & \begin{Bmatrix} 0 \\ M\ddot{\Delta} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}^{(m)} + \beta^T \bar{H}^0 [F^0]^{-1} \beta \begin{Bmatrix} u_s \\ \Delta \\ u_{i_1} \\ u_{i_2} \end{Bmatrix} \\ &= \begin{Bmatrix} 0 \\ P \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}^{(m)} + \beta^T \bar{H}^0 [F^0]^{-1} \sum_{j=1}^m F^{(j)} \begin{Bmatrix} f_s \\ f_c \\ f_{i_1} \\ f_{i_2} \end{Bmatrix}^{(m-j)} \\ & \quad - \beta^T \sum_{j=1}^m \bar{H}^{(j)} \begin{Bmatrix} f_s \\ f_c \\ f_{i_1} \\ f_{i_2} \end{Bmatrix}^{(m-j)} \quad (7) \end{aligned}$$

ただし

$$\begin{Bmatrix} f_s \\ f_c \\ f_{i_1} \\ f_{i_2} \end{Bmatrix}^{(m)} = [F^0]^{-1} \left(\begin{Bmatrix} u_s \\ u_c \\ u_{i_1} \\ u_{i_2} \end{Bmatrix}^{(m)} - \sum_{j=1}^m F^{(j)} \begin{Bmatrix} f_s \\ f_c \\ f_{i_1} \\ f_{i_2} \end{Bmatrix}^{(m-j)} \right) \quad (8)$$

$$F^{(j)} = \begin{bmatrix} F_{ss} & F_{sc} & F_{si_1} & 0 \\ F_{cs} & F_{cc} & F_{ci_1} & 0 \\ F_{i_1s} & F_{i_1c} & F_{i_1i_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & F_{i_2i_2} \end{bmatrix}^{(j)} \quad (9)$$

$$\bar{H}^{(j)} = \begin{bmatrix} H_{ss} & H_{sc} & H_{si_1} & 0 \\ H_{cs} & H_{cc} & H_{ci_1} & 0 \\ H_{i_1s} & H_{i_1c} & H_{i_1i_1} & H_{i_1i_2} \\ F_{i_1s} & F_{i_1c} & F_{i_1i_1} & -F_{i_2i_2} \end{bmatrix}^{(j)} \quad (10)$$

$$\beta^T = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix} \quad (11)$$

特別な場合として剛基盤を仮定すると、固定境界となるから、

$$u_{i_2}^{(m)} = u_{i_1}^{(m)} = 0 \quad (12)$$

よって上式 (9) (10) での F 、 H マトリックスは次式で置き換えられる。

$$\bar{H}^{(j)} = \begin{bmatrix} H_{ss} & H_{sc} & H_{si_1} \\ H_{cs} & H_{cc} & H_{ci_1} \\ F_{i_1s} & F_{i_1c} & F_{i_1i_1} \end{bmatrix}^{(j)} \quad (13)$$

$$\bar{F}^{(j)} = \begin{bmatrix} F_{ss} & F_{sc} & F_{si_1} \\ F_{cs} & F_{cc} & F_{ci_1} \\ H_{i_1s} & H_{i_1c} & H_{i_1i_1} \end{bmatrix}^{(j)} \quad (14)$$

一方、半無限基盤の場合は、節点として s 、 c のみを考慮して i に関する項を縮退させればよいので

$$F^{(j)} = \begin{bmatrix} F_{ss} & F_{sc} \\ F_{cs} & F_{cc} \end{bmatrix}^{(j)} \quad (15)$$

$$H^{(j)} = \begin{bmatrix} H_{ss} & H_{sc} \\ H_{cs} & H_{cc} \end{bmatrix}^{(j)} \quad (16)$$

(2) 入射問題

地盤-基礎系への地震波の入射状態を想定する。このとき、地盤-基礎系の応答解析手順にはつぎの2とおりの考え方がある。(1) 入射波 u_s^i とそれによって生じる地表面ならびに基礎からの散乱波の重ね合わせと、(2) 入射波に対する自然地盤応答 u_s^f と、基礎の運動からの散乱波の重ね合わせである。(1) の解法では、例えば、SV波の入射を対象とした場合、全無限グリーン関数を用いた間接境界要素法から直接に解を得られるが、(2) の解法では、例えばSV波の入射の場合、それに応じた自然地盤応答を求めるが、一方、レーリ波の場合はそのまま入力動としてとる。ただし、いずれも半無限グリーン関数を用いた境界要素法を適用する二段階法となる。一様地盤を想定した前者の解は次式から求められる。

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} 0 \\ M\dot{\Delta} \end{Bmatrix}^{(m)} + \beta^T H^0 [F^0]^{-1} \beta \begin{Bmatrix} u_s \\ \Delta \end{Bmatrix}^{(m)} \\ = \beta^T H^0 [F^0]^{-1} \left(\begin{Bmatrix} u_s^t \\ u_c^t \end{Bmatrix}^{(m)} + \sum_{j=1}^m F^{(j)} f^{(m-j)} \right) \\ - \beta^T \sum_{j=1}^m H^{(j)} f^{(m-j)} \end{aligned} \quad (17)$$

手順(2)の解は、節点*s*に関するものを除き、節点*c*のみの支配方程式で与えられる。自然地盤応答は式(7)から層間インターフェイスと剛体基礎節点を自由表面節点に置き換えて得られる。

3. 数値解析例

(1) 衝撃载荷応答とコンプライアンス関数

地盤は一般には層構成をなしているため、そのことを考慮して解析のモデル化をし、波動伝播特性を把握する必要がある。地盤と構造物の動的相互作用問題で、前論文^{4), 5)}においては、剛基礎の存在による成層内の波動伝播特性を調べた。そこでは、基礎面での反射による波動の影響が、载荷の終了後も減衰を伴って継続して構造物の応答に現われることを明らかにした。本節では、基礎を半無限体とした場合の無質量基礎の応答特性を、表層部分と基礎層のせん断剛性比 $\mu_1/\mu_2 = (\rho_1 v_s^2)/(\rho_2 v_s^2)$ をパラメータにして調べ、同比において基礎モデル化における剛基礎仮定と半無限体仮定の判断基準の限界値を明らかにする。なお、表層地盤の物性は密度 ρ 、せん断波速度 V_s 、ポアソン比 ν については使用値を、対象系の諸元と離散化を示す Fig.1 に記載した。

Fig.2 は剛性比 μ_1/μ_2 の変化による表面基礎の応答である。与えた衝撃力は、時間的に微小な無次元時間 $\Delta\tau = \Delta t \cdot V/(2H) = 0.025$ (V は対象とする場の卓越波動の伝播速度、S波の卓越する水平载荷では $\Delta t = 9.92 \times 10^{-2}$ [s]、P波の卓越する鉛直・回転载荷では $\Delta t = 4.96 \times 10^{-4}$ [s]) の矩形時間関数である。応答の継続時間を無次元化して $Vt/2H$ で表わしている。地盤が成層構成をなしていると、半無限地盤と異なり、共振周期を得る。剛基礎の場合 ($\mu_1/\mu_2 = 0$) の直接 BEM 解も併せて Fig.2 に描いた。 $\mu_1/\mu_2 = 1/2$ のときの基礎による反射波の効果は半無限モデルと剛基礎モデルの中間にある。遷移応答の様相から、共振状態へ進むのは、基礎面の反射波による地動と载荷の位相が同一となり、応答が増幅する過程と理解でき、その周期は水平並進では $V_s/4H$ 、鉛直並進と回転では $V_p/4H$ である。 Fig.2 からは水平と鉛直の並進は容易に共振に入るが、回転はそうでないことが判る。

$\Delta\tau = 0.025$ の衝撃载荷のフーリエ変換は、無次元振動数領域 $a_0 = \omega B/V < 2.5$ では、 $H/B = 2$ としてほぼ一定

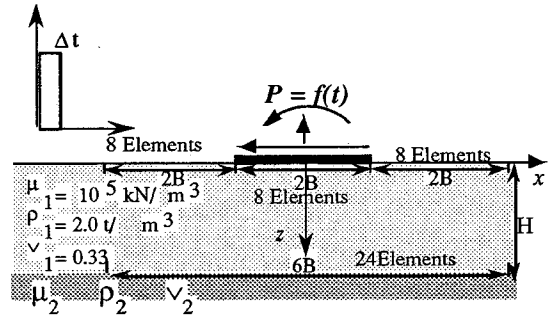


Fig.1 A rigid strip foundation on layered soil subjected to impulsive loading, Geometry and discretization

値と考えてよい。したがって、衝撃応答のフーリエ変換は、振動数領域における载荷力と変形の関係を与える、いわゆるコンプライアンス関数に相当する。衝撃応答のフーリエ変換から得られたコンプライアンス関数を Fig.3 に示し、振動数領域での直接解⁶⁾と比較した。用いた振動数領域解は、 $\exp(-i\omega t)$ の定常調和振動のため波数積分の部分に数値解を安定して得るため地盤の内部減衰 $\eta = 0.05$ を導入して複素ラメー定数

$$\lambda^* = \lambda(1 - 2ih), \quad \mu^* = \mu(1 - 2ih) \quad (18)$$

を仮定している。両解析結果の対応は、剛基礎のケースを除いて非常に良い。剛基礎のケースでは、時間領域 BEM (直接法) 解のフーリエ変換解⁷⁾も併せてプロットしている。共振状態は振動数領域では、 $H/B = 2$ のとき水平並進に対して $\omega B/V_s = \pi/4$ 鉛直並進と回転に対して $\omega B/V_p = \pi/4$ である。剛基礎の場合の本解と直接法解のコンプライアンス関数の間の差は、空間および時間離散化の手法の差が反映されたものと思われる。特に P波の伝播が卓越する共振時においてその差はかなりの程度現われているが、完全な剛基礎は現実には存在しないためそれほど問題としなくてよいと思われる。

(2) 隣接基礎間の連成効果⁸⁾

現実に構造物を建設する場合、単独よりもむしろ近距離で隣接している場合が多い。本節では、このような状況下においての地盤を介した2基礎間の連成相互作用を調べるため、加振基礎 (Active) と隣接基礎 (Passive) を Fig.4 のように配置した。層状地盤になると、半無限地盤上の隣接基礎効果に比べて、同効果は基礎面の存在によりさらに顕著になることが3.(1)の解析から推察できる。本解析では、次式で与えられる Ricker 波型载荷での加振・受振基礎 (いずれも無質量剛体) の応答を調べた。

$$R\left(\pi \frac{t-t_s}{T_0}\right) = \left[2\left(\pi \frac{t-t_s}{T_0}\right)^2 - 1\right] \exp\left[-\left(\pi \frac{t-t_s}{T_0}\right)^2\right] \quad (19)$$

同载荷状態では、代表周期 T_0 が付与されるので、成

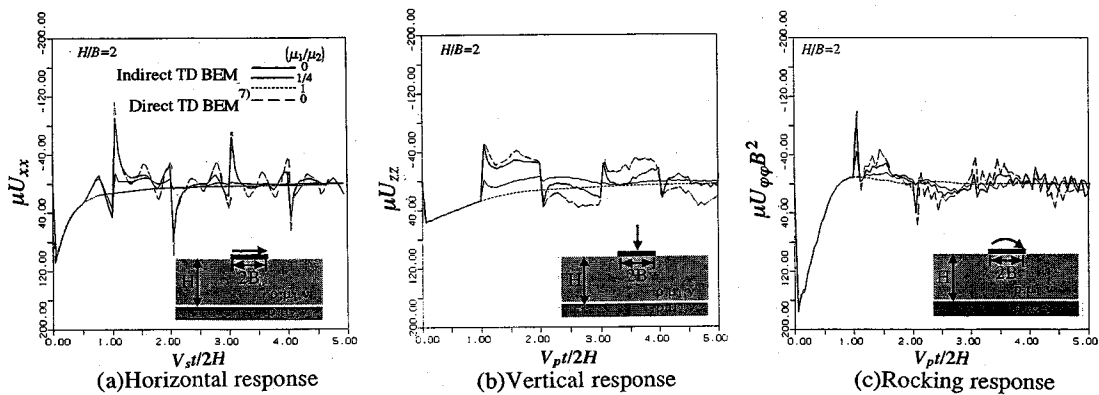


Fig.2 Normalized transient responses of a massless rigid strip foundation on layered soil due to impulsive loads

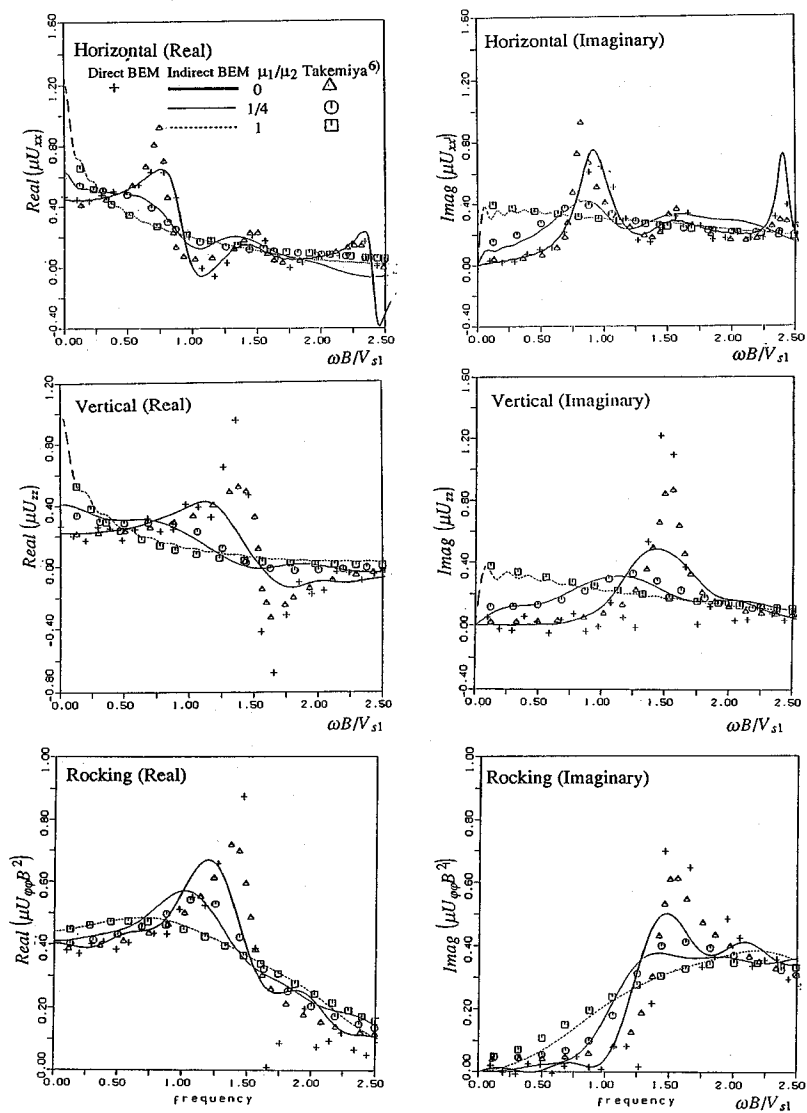


Fig.3 Normalized soil compliance functions for a rigid strip foundation, $H/B=2$, $\nu=0.33$

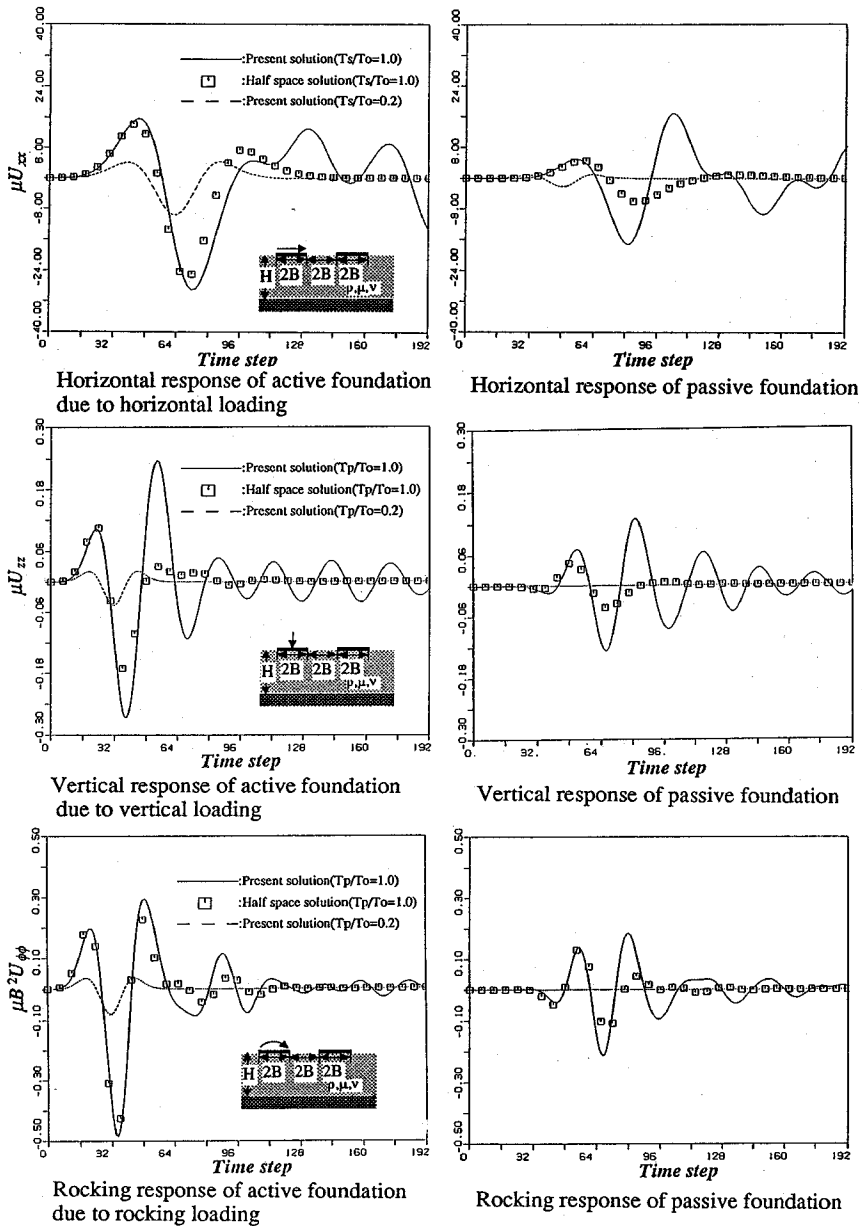


Fig.5 Cross interaction of a two-strip foundation system through soil due to Ricker wave type loading, Time increment $\Delta\tau=0.025$

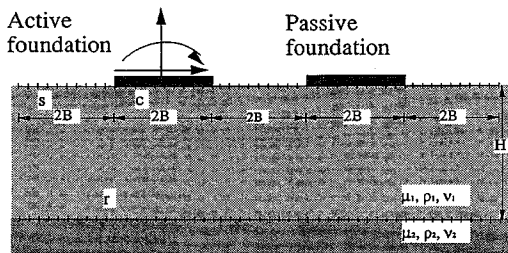


Fig.4 Two-strip foundation system on layered soil, 'Geometry and discretization', $2B=2.0$, $H/B=2$

層地盤でのS波を対象とした基本固有周期 T_s およびP波を対象とした基本固有周期 T_p のそれぞれとの比をパラメータとして応答解析する。著者の前論文⁴⁾を参照して、共振現象を誘発する周期比 $T_s/T_0=1$, $T_p/T_0=1$ と、波動伝播を抑制する周期比 $T_s/T_0=0.2$, $T_p/T_0=0.2$ に注目した。 t_s は最大値の生じる時刻に相当する。解析結果を Fig.5 に示す。半無限体上の基礎応答も併せて比較のために示した。 $T_s/T_0=1$, $T_p/T_0=1$ のときの

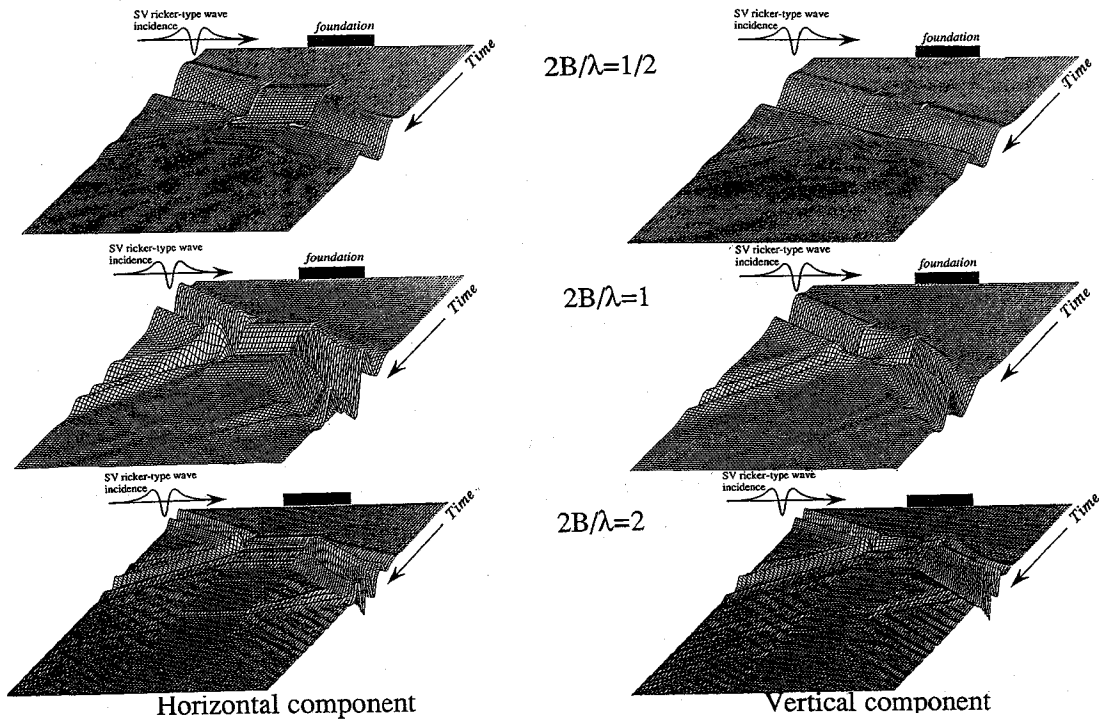


Fig.6 Surface motion including a strip foundation due to SV wave incidence, Angle of incidence $\theta = \pi/4$ from vertical, Use of fullspace Green function

成層地盤では地盤震動が誘発されて、半無限地盤と比較して、基礎間の隣接効果は全ての加振モードに対して大きく、受振基礎の応答は加振基礎応答の1/2~2/3程度の応答値となって現われている。半無限地盤は、放射波動にのみ支配されているため、成層地盤中の剛基盤からの反射波が到達するまでは、両者の解は一致する。一方、 $T_s/T_0=0.2$, $T_p/T_0=0.2$ のときは、加振基礎からの波動の伝播が抑制されるため、加振基礎自身の応答も小さく、受振基礎の応答には水平載荷でのみ僅か現われているに過ぎない。

(3) 入射波場のキネマチックな相互作用⁹⁾

半無限地盤へ理想化された地震波の入射を想定する。その場合の入射地震波として、S波(実体波)およびレリー波(表面波)を仮定し、その時間的変動を周期 T_0 及び波長 $\lambda = \beta T_0$, $\lambda = C_R T_0$ で与える。 β , C_R はそれぞれS波およびレリー波の伝播速度である。

水平面からの傾斜角 θ のSV波の入射を対象とすると、

$$\begin{Bmatrix} u_x^f(\tau) \\ u_z^f(\tau) \end{Bmatrix} = u_{sv}^f \begin{Bmatrix} \sin\theta \\ \cos\theta \end{Bmatrix} R\left(\pi \frac{\tau - \tau_0}{T_0}\right) \quad (20)$$

と記述することができる。ここに $R\left(\pi \frac{t-t_s}{T_0}\right)$ は式(19)

で定義されたRicker波型時間関数、 $\tau = t - x/\beta$, u_{sv}^f は振幅である。

一方レリー波は、衝撃載荷(力積 \bar{Q})によるLamb解 $u_j^R(t)$ と時間変動関数 $Q(t)$ の時間合積により、

$$u_j^R(t) = \int_0^t U_j^R(t-\tau) Q(\tau) d\tau, \quad (j=x, z) \quad (21)$$

Lamb解は近似的に次式で与えられる⁹⁾。

$$\begin{Bmatrix} U_x^R(t) \\ U_z^R(t) \end{Bmatrix} = -\frac{C_R^2/\beta^2}{4\pi\mu K(C_R)} \begin{Bmatrix} (2-C_R^2/\beta^2) \frac{\varepsilon t}{\tau^2 + \varepsilon^2} \bar{Q} \\ 2\sqrt{1-C_R^2/\alpha^2} \frac{\varepsilon^2}{\tau^2 + \varepsilon^2} \bar{Q} \end{Bmatrix} \quad (22)$$

ただし $\tau = t - x/C_R$

$$K(C_R) = C_R \begin{Bmatrix} \frac{1}{\beta^2} (2-C_R^2/\beta^2) \frac{\sqrt{1-C_R^2/\beta^2}}{\alpha^2 \sqrt{1-C_R^2/\alpha^2}} \\ \frac{\sqrt{1-C_R^2/\alpha^2}}{\beta^2 \sqrt{1-C_R^2/\beta^2}} \end{Bmatrix} \quad (23)$$

ここで α , β は、P, S波速度である。微小量 ε は、衝撃の時間変動の鋭さ、つまり振動数成分に関係するもので、帯状載荷(幅 $2W$)の場合に基づいて $\varepsilon = 2W/C_R$ で与えられる。

SV波の入射を想定した式(19)のRicker波形に対する無質量基礎を含む地表面応答をFig.6に示す。ここ

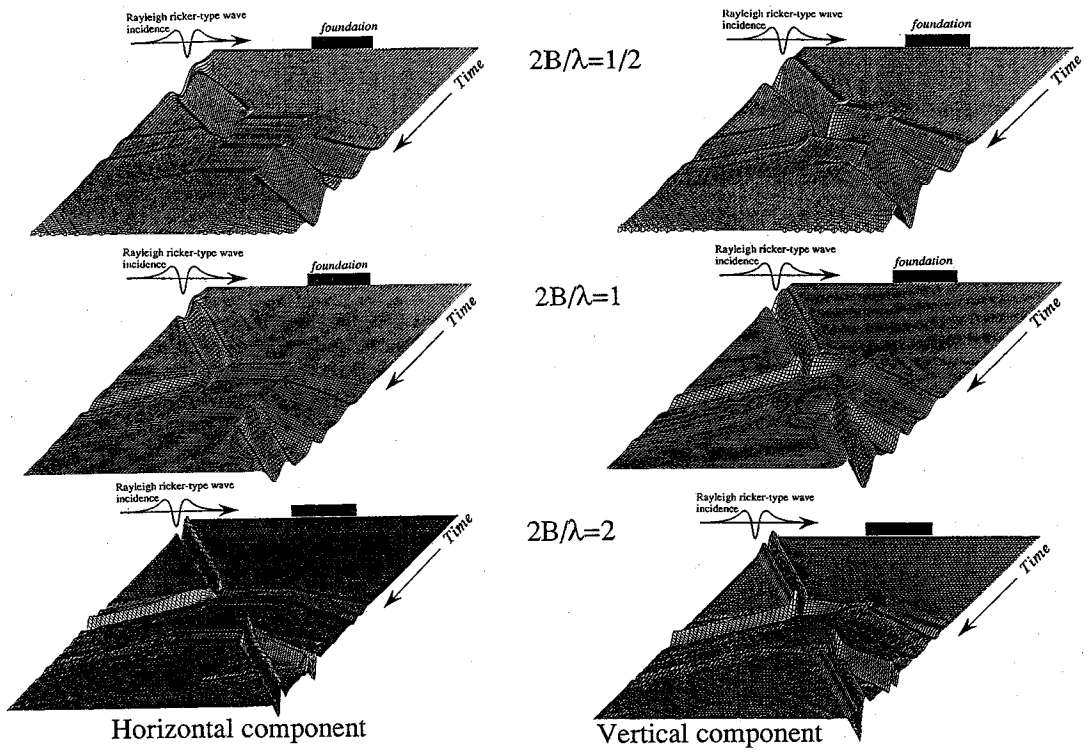


Fig.7 Surface motion including a strip foundation due to Rayleigh wave incidence, Use of fullspace Green function

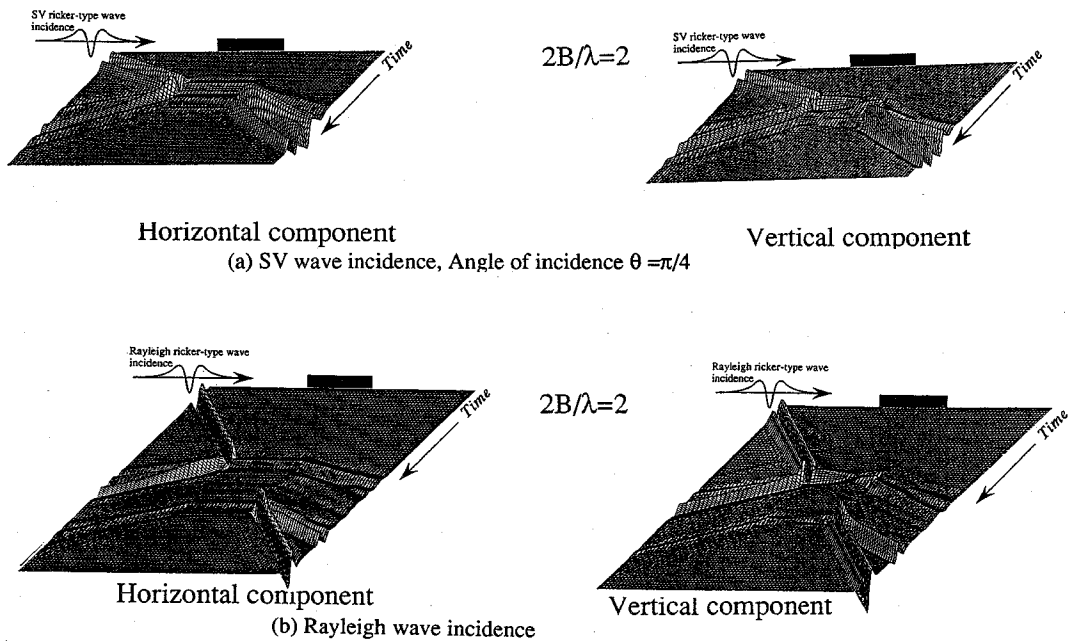


Fig.8 Surface motion including a strip foundation by use of halfspace Green function

では、基礎幅 $2B$ と入射波長 λ の比をパラメーターとした。SV 波の水平面から 45° の入射によるものは、 $2B/\lambda=1/2$ のとき、入射波に対する基礎からの反射現象は見られるもののキネマチックな相互作用は非常に小さく、基礎応答が自然地盤応答に追従しているため、基礎位置を通過後も入射波と同一の種類波が伝播している。 $2B/\lambda=2$ のときは、キネマチックな相互作用は顕著に現われ、基礎応答は自然地盤応答が平均化されてくるため、自然地盤応答より小さくなる。ただし、基礎応答成分のなかでロッキング成分は顕著に現われる。基礎による散乱現象では、P 波およびレーリー波が誘発される。単一の Ricker 波入射では、基礎前面よりも後方において大きい応答が現われる。 $2B/\lambda=2$ のときの波動伝播がモデルの右端の節点に到達した後に生じる微小な反射波は実際には存在しない波である。これは、全無限弾性体のグリーン関数を使用の場合、地表面に自由境界面を作成するために限られた範囲（基礎の両側に基礎幅をとった）に節点を配置したため、本解析の信頼限度が時間的にその波の発生までであることを示している。半無限解を用いた解析では、Fig.8.a から明らかなようにそのような現象は生じていない。

$\epsilon=4.8 \times 10^{-4}$ [s] を使用した式 (22) の Ricker 波形をレーリー波の入射としたときの応答結果を Fig.7 示す。式 (22) で与えられる変位成分は既にレーリー波の条件を満たすため、全無限解を用いた場合でも $u_s = u_s'$ と数値誤差の範囲でなっている。このときは、 $2B/\lambda$ の値によらず、基礎からの波動散乱の際にキネマチックな相互作用が顕著に生じる。基礎応答は、入射波の平滑化の様相を示し、伝播するレーリー波に加えて、P 波、SV 波が同応答の始まりと終わり近くで発生する。また、SV 波の場合と同様に、モデルの右端の節点に到達した後の生じる微小な波は、現実には存在しない波である。これも、SV 波入射のときと同様、Fig.8.b から半無限解を用いた解析では生じないことが判かる。

5. む す び

本論文では、地盤と構造物基礎の動的相互作用応答を直接時間領域における境界要素法を適用して、衝撃、リックカー波型の時間変動する作用力下、および地震入射波の下の遷移応答を評価した。以下に解析例を通して得られた結果を列挙する。

1) 成層地盤上の剛体基礎のコンプライアンス関数に関して

衝撃载荷による遷移応答をフーリエ変換することで、基礎コンプライアンスを精度よく求めることができる。この評価法は今後実験においても活用できる。

2) 基礎間のキネマチックな相互作用に関して

成層地盤上の隣接基礎の場合、载荷周期 (T_0) と地盤の卓越周期 (T_s, T_p) の比が $T_s/T_0, T_p/T_0=1$ で共振するときは、基礎間を基礎幅が離しても地盤震動を通しての基礎間の連成は大きい。一方、共振から離れて周期比が $T_s/T_0, T_p/T_0=0.2$ のときは、遮断振動数以下のため地盤震動が抑制され、この連成は無視できるほど小さい。

3) 地震波入射時の相互作用による波動散乱に関して

入射波長 (λ) と基礎幅 ($2B$) の比をパラメータとして、比 $2B/\lambda$ が 2 となるとキネマチックな相互作用効果は大きく、波動の散乱現象から明瞭に説明できた。

参考文献

- 1) Antes, H. and von Estorff, O. : Dynamic response analysis of rigid foundations and of elastic structures by boundary element procedures, *Soil Dyn. and Earthquake Eng.*, 8, 2, 68-74, 1989.
- 2) Spyarakos, C.C. and Beskos, D.E. : Dynamic response of rigid-strip foundations by a time domain boundary element method, *Int. J. Num. Meth. Engng.*, 23, 1547-1565, 1986.
- 3) Takemiya, H., Wang, C.Y. and Fujiwara, A. : 2-D Elastodynamic fundamental solution for distributed loads and BEM transient response analysis of halfplane problems, *Structural Eng./Earthquake Eng.*, JSCE, Vol.10, No.1, 23s-33s, 1992.
- 4) 竹宮, 藤原: 地盤一構造物系の制振法としての波動遮断ブロック (WIB) の導入, 土木学会論文集, No. 489/I-27, 243-250, 1994.
- 5) 竹宮, 祐保: 帯状载荷に対する全無限弾性体の遷移グリーン関数評価と半無限/層状地盤の表面载荷による波動伝播性状, 土木学会論文集, No. 483/I-26, 147-155, 1994.
- 6) Takemiya, H., Arioka, K. and Watanabe, K. : Compliance functions of strip foundation on layered half-plane soils, *8th Japan Earthquake Eng. Sym.*, 1167-1172, 1990.
- 7) Takemiya, H., Steinfeld, B. and Sukeyasu, Y. : Dynamic characteristics and seismic response of soil-structure Systems by Time Domain Boundary Element Methods, *2nd Int. Conf. Berlin*, 341-349, 1994.
- 8) Takemiya, H. and Sukeyasu, Y. : Transient response of rigid strip foundations on a half-space/stratum soil due to impulse loads, 8 IACMAG, Morgantown, West Virginia, U.S.A., 993-998, 1994.
- 9) Takemiya, H. and Sukeyasu, Y. Application of impulse response for evaluating dynamic SSI characteristics, *Proc. 9th Japan Earthquake Eng. Symp.*, 1129-1134, 1994.
- 10) 竹宮, 堀内: 衝撃帯载荷による半無限体の遷移応答と地盤-基礎系の動的相互作用の波動論的考察, 土木学会論文集, No. 525/I-33, pp. 345-350, 1995.10.

(1994. 6. 13 受付)

WAVE MOTIONS DURING SOIL-STRUCTURE INTERACTION BY TIME DOMAIN BEM

Hirokazu TAKEMIYA and Yoshiki SUKEYASU

This paper presents the BEM solution for soil-rigid foundation interaction under direct loading and under seismic wave incidence, focusing on the wave motions in soils. The method for analysis is based on the Green function developed by the authors in the previous paper. The parameter studies have been conducted : for the soil layering effect, the shear rigidity ratio between surface and base layers ; for the cross effect of two foundations, the ratio between the predominant period of soil stratum and the loading ; for the seismic wave scattering, the foundation width and the incident wave length.