

岡山大学大学院 学生員 祐保芳樹
岡山大学 正会員 竹宮宏和

1. まえがき

近年、鉄道輸送、特に新幹線による振動公害に代表されるような構造物の振動による振動障害が増加している。その場合の構造物の振動性状を把握する場合、設置された地盤の動特性及び隣接基礎間の動的連成効果が密接に関係してくる。本研究では、地盤と構造物の動的相互作用の観点から、多層地盤上に設置された複数剛体基礎構造物の交差動的相互作用場における遷移波動性状を解析することを計画した。解析手法として時間領域BEM（間接法）を用いた。基本解として論文¹⁾において報告した、2次元平面モデル（平面歪状態）での全無限弾性体内部一様分布衝撃力に対する時間領域グリーン関数を導入している。

2. 定式化

一般に地盤は、多様な層厚と物性値からなる多層構造で構成されている。但し、下部層の剛性に対して表層の剛性が低い軟弱地盤の場合には、半無限剛基盤上に堆積した表層地盤と仮定することが可能である。よって解析対象Modelとして、Fig.1に示すような、下部に半無限／剛基盤を有する一様、等方、均質な線形弾性体上に、隣接した2基の無質量剛体基礎構造物を設置した場合を想定する。

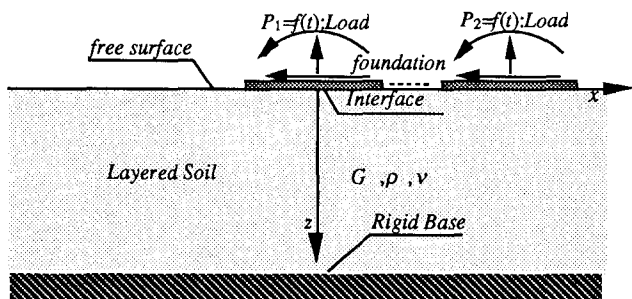


Fig.1.a Multiple rigid foundations on layered soil

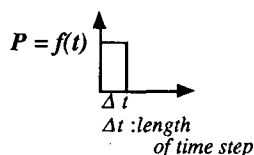


Fig.1.b Impulse load

剛体に作用する衝撃外力として水平、鉛直、回転の3成分が、それぞれ独立に作用するものとする。解析手法として、地表面(s)、剛体と表面のインターフェイス(c)及び剛基盤面(r)を境界要素に離散化し、各要素内では、強度一定の変位、表面力を想定して、本グリーン関数を初期境界値問題の時間領域BEM（間接法）に導入した。従って、各境界要素の変位と表面力は、次の時間合積(1)で与えられ、時間刻み Δt 対して

$$\begin{pmatrix} u_s \\ u_{c1} \\ u_{c2} \\ u_r \end{pmatrix}^{(m)} = \sum_{j=0}^m \begin{bmatrix} F_{ss} & F_{sc1} & F_{sc2} & F_{sr} \\ F_{c1s} & F_{c1c1} & F_{c1c2} & F_{c1r} \\ F_{c2s} & F_{c2c1} & F_{c2c2} & F_{c2r} \\ F_{rs} & F_{rc1} & F_{rc2} & F_{rr} \end{bmatrix}^j \begin{pmatrix} f_s \\ f_{c1} \\ f_{c2} \\ f_r \end{pmatrix}^{m-j} \quad (1.a)$$

$$\begin{pmatrix} t_s \\ t_{c1} \\ t_{c2} \\ t_r \end{pmatrix}^{(m)} = \sum_{j=0}^m \begin{bmatrix} H_{ss} & H_{sc1} & H_{sc2} & H_{sr} \\ H_{c1s} & H_{c1c1} & H_{c1c2} & H_{c1r} \\ H_{c2s} & H_{c2c1} & H_{c2c2} & H_{c2r} \\ H_{rs} & H_{rc1} & H_{rc2} & H_{rr} \end{bmatrix}^j \begin{pmatrix} f_s \\ f_{c1} \\ f_{c2} \\ f_r \end{pmatrix}^{m-j} \quad (1.b)$$

ここに、 j は、時間ステップ、 F^j, H^j は、変位、表面力のグリーン関数から得られる境界要素マトリックスであり $\{f\}^{m-j}$ は各境界要素に設定する作用力ベクトルである。(1)においてCurrent Timeでの作用力ベクトル $f^{(m)}$ を消去すると

$$\bar{H}^0 [\bar{F}^0]^{-1} \begin{pmatrix} u_s \\ u_{c1} \\ u_{c2} \\ t_r \end{pmatrix}^{(m)} = \begin{pmatrix} t_s \\ t_{c1} \\ t_{c2} \\ u_r \end{pmatrix}^{(m)} + \bar{H}^0 \left([\bar{F}^0]^{-1} \sum_{j=1}^m \bar{F}^j f^{m-j} - [\bar{H}^0]^{-1} \sum_{j=1}^m \bar{H}^j f^{m-j} \right) \quad (2)$$

$$\text{where } \bar{F}^j = \begin{bmatrix} F_{ss} & F_{sc1} & F_{sc2} & F_{sr} \\ F_{c1s} & F_{c1c1} & F_{c1c2} & F_{c1r} \\ F_{c2s} & F_{c2c1} & F_{c2c2} & F_{c2r} \\ H_{rs} & H_{rc1} & H_{rc2} & H_{rr} \end{bmatrix} \quad \bar{H}^j = \begin{bmatrix} H_{ss} & H_{sc1} & H_{sc2} & H_{sr} \\ H_{c1s} & H_{c1c1} & H_{c1c2} & H_{c1r} \\ H_{c2s} & H_{c2c1} & H_{c2c2} & H_{c2r} \\ F_{rs} & F_{rc1} & F_{rc2} & F_{rr} \end{bmatrix}$$

境界条件として次の(3)、1. 自由表面上での零表面力条件、2. 剛基盤面上での零変位条件を与える。

$$\{t_s\}^{(m)} = 0 \quad (3.a) \quad \{u_r\}^{(m)} = 0 \quad (3.b)$$

さらに剛体インターフェイスを、剛体内部中心点で表現する。

$$\begin{pmatrix} u_s \\ u_{c1} \\ u_{c2} \\ t_r \end{pmatrix}^{(m)} = \beta^T \begin{pmatrix} u_s \\ \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ t_r \end{pmatrix}^{(m)} \quad (4.a) \quad \begin{pmatrix} t_s \\ P_1 \\ P_2 \\ u_r \end{pmatrix}^{(m)} = \beta \begin{pmatrix} t_s \\ t_{c1} \\ t_{c2} \\ u_r \end{pmatrix}^{(m)} \quad (4.b)$$

$$\text{where } \beta = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad \alpha = [\alpha_1 \dots \alpha_n] \quad \alpha_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & z_c \\ 0 & 1 & x_i \end{bmatrix}$$

ここに、Pは外力3成分、 Δ は、それに応じた3自由度の剛体基礎変位、 X_i は、剛体インターフェイスの境界要素座標、 z_c は、剛体基礎の重心座標である。以上全ての条件を考慮して次の(5)のように変位と表面力の式を結合することができる。

$$\beta \bar{H}^0 [\bar{F}^0]^{-1} \beta^T \begin{pmatrix} u_s \\ u_{c1} \\ u_{c2} \\ t_r \end{pmatrix}^{(m)} = \begin{pmatrix} t_s \\ P_1 \\ P_2 \\ u_r \end{pmatrix}^{(m)} + \beta \bar{H}^0 \left([\bar{F}^0]^{-1} \sum_{j=1}^m \bar{F}^j f^{m-j} - [\bar{H}^0]^{-1} \sum_{j=1}^m \bar{H}^j f^{m-j} \right) \quad (5)$$

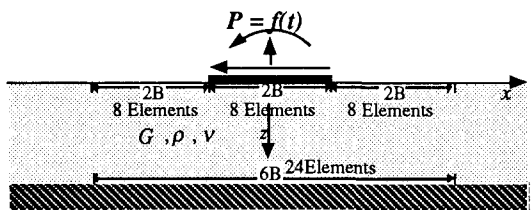
$$\text{where } \begin{pmatrix} f_s \\ f_{c1} \\ f_{c2} \\ f_r \end{pmatrix}^{(m)} = [\bar{F}^0]^{-1} \left(\begin{pmatrix} u_s \\ u_{c1} \\ u_{c2} \\ t_r \end{pmatrix}^{(m)} - \sum_{j=1}^m \bar{F}^j \begin{pmatrix} f_s \\ f_{c1} \\ f_{c2} \\ f_r \end{pmatrix}^{(m-j)} \right)$$

以上、2基の隣接基礎載荷の場合の定式化を示したが、さらに複数の基礎載荷に拡張することも可能であり、また層数を増やすことも可能である。

3. 数値解析例

比較対象として、Fig.2のAntes& Estorff モデル²⁾と直接時間領域BEM⁴⁾の結果を用いて、本解析手法の妥当性を検証した。Fig.3a,bは、成層地盤上の剛体基礎に水平衝撃載荷を層厚別に加えた場合の水平遷移応答である。但し3者一斉比較は、Fig.3.aにおいてのみ行っている。三者とも $T=2H/V_s$ の周期性を完全に満足しており、S波による波動増幅が卓越しているがAntes&Estorffの解だけは、他の2者に比べて極めて反射波の減衰度が、大きい結果を与えている。Fig.2.aにおいては、本解と4)の結果が、極めて類似した結果を与えていることから、本解の信頼性は、極めて高いものと思われる。

次に、Fig.4のモデルを用いて、隣接基礎構造物の交差動的相互作用の考察を行う。地盤物性値及び基礎構造物のサイズは、Antes& Estorff モデル²⁾に準拠している。Fig.5は、基礎1に水平衝撃力が作用した時の1と隣接基礎2の水平遷移応答である。1から2へは、表面を介しての実体波と表面波による影響と実体波のみから構成される剛基盤面からの反射波による影響が顕著に見られる。表面ではP波、Rayleigh波が、反射波では、S波が卓越した影響を及ぼす。但し2から1への影響はごく軽微にとどまり、無視しうるものであることがわかる。Fig.6は、基礎1に鉛直衝撃力が作用したとき応答である。水平力載荷の時とは逆に、表面では、S波、Rayleigh波が反射波動場ではP波が、卓越波動としてあらわれる。本論文では、1ケースのみの解析結果を報告したが、発表当日には、基礎幅に対する隣接間距離及び層厚比の変化におけるモデル化の特徴及び遷移波動性状についての考察を行う予定である。



G	$10^5 \text{ [KN/m}^2\text{]}$
ρ	$2.0 \text{ [t/m}^3\text{]}$
ν	0.33
V_p	443.9 [m/s]
V_s	223.6 [m/s]
P	1776 [KN/m]
$2B$	2.0 [m]
Δt	$5.63 \times 10^{-4} \text{ [s]}$

Fig.2 Antes & Estorff Model

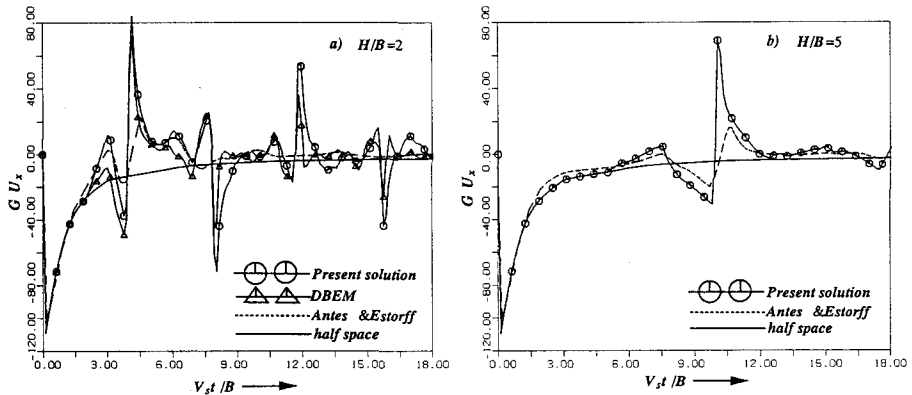
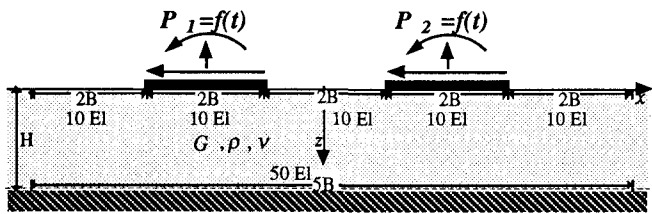


Fig.3 Horizontal displacement of a rigid foundation on a stratum/half space due to horizontal impulse



G	$10^5 \text{ [KN/m}^2\text{]}$
ρ	$2.0 \text{ [t/m}^3\text{]}$
ν	0.33
V_p	443.9 [m/s]
V_s	223.6 [m/s]
P_1	1776 [KN/m]
P_2	$0 \text{ [KN/m}^2\text{]}$
$2B$	2.0 [m]
Δt	$5.63 \times 10^{-4} \text{ [s]}$

Fig.4 Multiple foundations model on a stratum

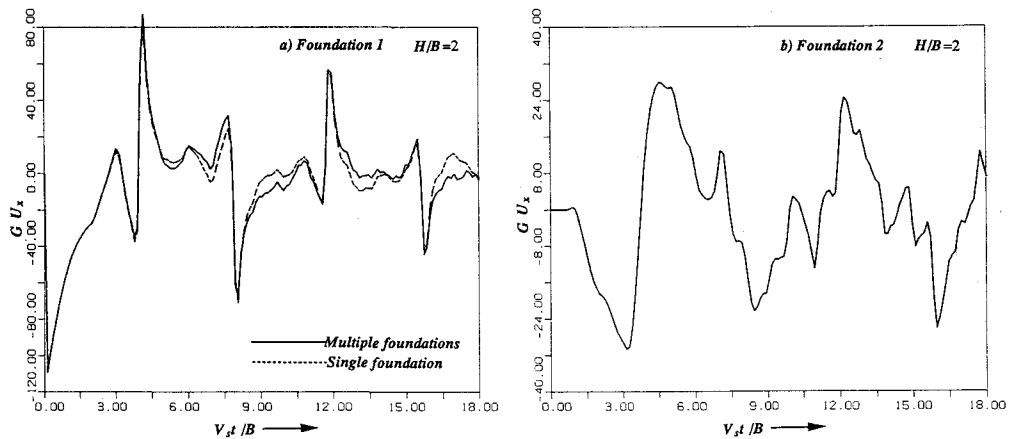


Fig.5 (a) Horizontal displacement of multiple foundations on a stratum/halfspace due to horizontal impulse

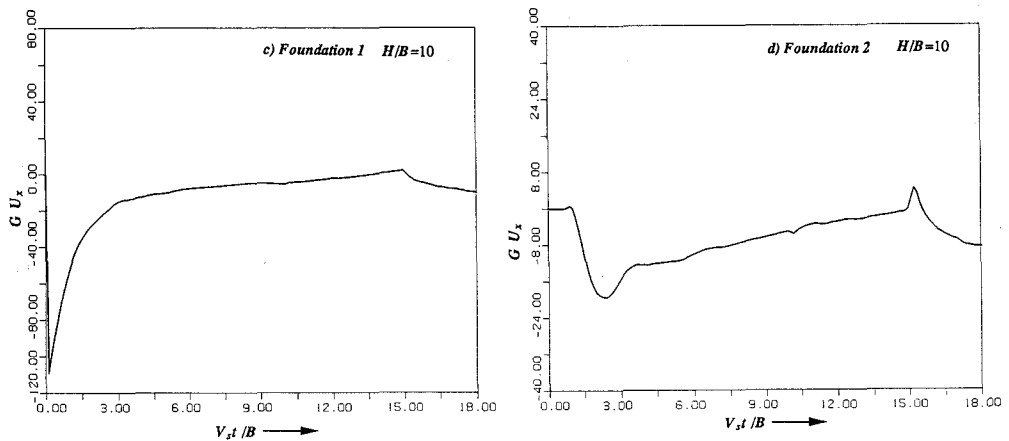


Fig.5(b) Horizontal displacement of multiple foundations on a stratum due to horizontal impulse

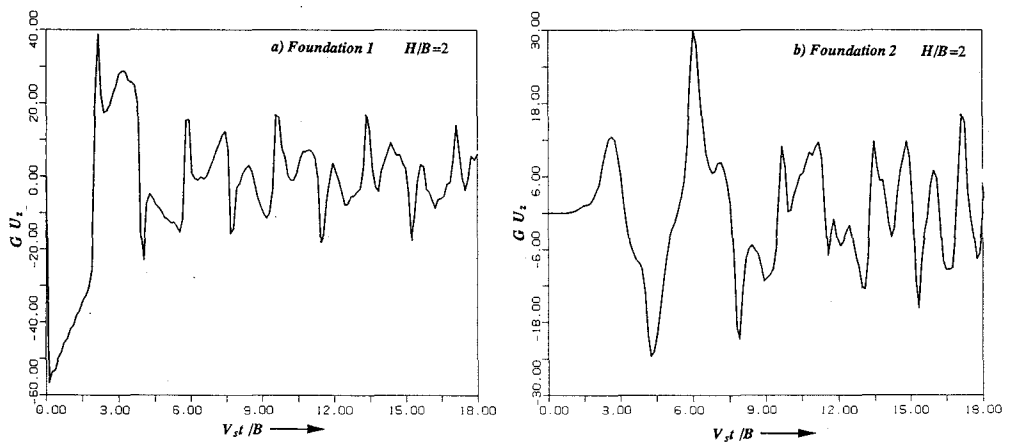


Fig.6 Vertical displacement of multiple foundations on a stratum due to vertical impulse

参考文献

- 1) 竹宮祐保、分布帯上載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／層状地盤の表面載荷に対する波動伝播性状、土木学会論文集投稿中(1993)
- 2) H.Antes and O.von Estorff,'Dynamic response analysis of rigid foundations and of elastic structures by Boundary Element Procedures',Soil Dynamics and Earthquake Engineering,1989,Vol.8,No.2
- 3) Takemiya,H.,Guan,F.and Sukeyasu,Y.,'Transient Wave Propagation in soils through interaction with structures' submitted to E.E.S.D(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の導入、土木学会論文集投稿中(1993)