

(23) 境界要素法による不整形地盤上の構造物の動的解析

○川 瀬 博^{*} 中 井 正 一^{*}

1. 序

構造物の耐震安全性の正確な評価のためには、構造物自体の動的性質のみならず、構造物と地盤との相互作用、構造物周辺の地盤の動特性、さらには地震の発生メカニズム・伝播経路といった問題に至るまでのトータルな性状の把握が不可欠であり、その為に多くの研究者により、種々の研究・解析が行われてきた。

しかし、現実には存在する系はいずれの問題をとってみても、非常に複雑であり、例えば相互作用問題に限っても現実の系に存在する様々な複雑さをすべて考慮出来る解析には至っていないのが現状であろう。

今日、建物に対する入力地震動を、下方から垂直入射するものとして、重複反射理論によって求めることは一般的に行われていることであるが、近年の地震被害状況の分析から、そのような単純な成層モデルから得られる解析結果では説明のつかない被害の局所的集中の存在が指摘されている。¹⁾ アメリカでは San Fernando Earthquake による Pacoima Dam の応答を契機として、地盤の不整形性の影響に対する研究が、1970年代の前半から今日に至るまで盛んに行われてきた。

Trifunac は半円形の Alluvial Valley が存在する地盤に SH 波が入射した時の地表面の変位を、変数分離の方法を用いて解析的に求め (1971)²⁾、その後同様な手法で半円形の Canyon に対して同解析を行なった (1973)³⁾。これらの論文では半円形を対象としているため、Hankel 関数 (或いは Bessel 関数) を用いているが、同様の方法を Mathieu 関数を用いることにより半楕円問題に拡張することが出来、Wong & Trifunac らは半楕円の Alluvial Valley 問題 (1974)⁴⁾、及び Canyon 問題 (1974)⁵⁾ を解析し興味深い結果を報告した。又 Boore は有限差分法により起伏のある地表面の応答性状を研究している (1970)⁶⁾ (1972)⁷⁾。Lysmer らは有限要素法を用いて解析した (1971)⁸⁾。

これらの研究とは全く別の観点から、積分方程式法 (Integral Equation Method) のアプローチが古くから試みられてきた。境界積分方程式法 (Boundary Integral Equation Method, B.I.E.M) によって、任意形状の 2 次元場における散乱波の解析を行なった初期の論文として、Baraugh & Goldsmith のものがある (1963)⁹⁾。その後 1970 年に Aki & Larner は、同じ形状の不整形が地表面上にくり返し存在していると仮定し、波数に関する積分方程式に定式化して解析しており (1970)¹⁰⁾、Bouchon もその手法によっていくつかの解析例を報告している (1973)¹¹⁾。又 Wong & Jennings は Pacoima Canyon に対するより実動的な解析のために Weber の積分公式に基づく定式化を用い、任意形状の谷に SH 波が入射した場合の応答波を求めている (1975)¹²⁾。さらに Sanchez-Sesma らは一重層ポテンシャルを用い、仮想境界法により SH 波入射の Canyon 問題 (1979)¹³⁾ 及び Alluvial Valley 問題 (1979)¹⁴⁾ を解析している。

一方、日本においては 小堀・篠崎 は Wong & Jennings と同様な手法を 2 つの異なる領域に適用し、

※ 清水建設 (株)

連立させて解くことにより, Alluvial Valley 或いは急峻な崖の変位応答を求め(1977)¹⁵⁾, さらにその後, 構造物も連成させ構造物の応答を求めている(1977)¹⁶⁾。又最近では実験結果と比較し, その解析結果の妥当性を検証しようとする研究報告がなされている(1981)¹⁷⁾¹⁸⁾。或いは, 土岐・佐藤は仮想境界法とFEMを結合することにより, 地表面上に突出した堤体の変位応答を求めた(1977)¹⁹⁾。

積分方程式法は, このような不整形地盤の解析のみならず, 以前から各方面で様々な応用がなされて来た。(例えば, Cruse & Rizzo (1968)²⁰⁾, Butterfield & Bannerjee (1971)²¹⁾, 丹羽・小林ら(1971)²²⁾を始めとする一連の論文参照) なかでも B.I.E.M は境界値のみが未知数となるため次元を1つ下げた取扱いが可能となること, 及び任意形状の境界を扱えることから非常に応用範囲の広い解析手法であるにもかかわらず, その数学的手続きの難解さ, 収束性に対する不安から, 近年に至るまで, 実務的にはほとんど活用されずに来た。

C.A.Brebbia は 工学的な立場から積分方程式法を見直し, その基本式は重み付き残差法の考え方から定式化出来ることを示し, 有限要素法・有限差分法・Ritz法などとともに積分方程式法も近似解法の1つとして統一的に再構成し, 境界要素法(Boundary Element Method, B.E.M.)と名付けた。(1978)²³⁾ 重み付き残差法の定式化によれば, 重み関数を完全系に選ぶことにより, 解の収束性に対する保証が与えられる。B.E.M. が従来のB.I.E.M. と異なる点の1つは, 境界条件を満足させるに際して有限要素法と同様に形状関数を導入した点であろう。その結果, 同じ自由度で解析精度をあげることが出来るようになるとともに, FEMとの結合も容易になる。²⁴⁾ これらの点から, B.E.M. は積分方程式法の一部にすぎないとしても, 工学的にはすぐれた特長をもち, た解析手法といえよう。

本論文は, Brebbia の定式化に基づく境界要素法を用いて, 構造物の近傍に不整形な境界や, トンネル等の地下埋設物が存在する場合に, それらが構造物の応答にどのような影響を与えるかについて解析したものである。ここでは解析上の容易さから面外振動の場合をとり上げ, 平面SH波が入射角 θ で入射する場合を対象としている。

2. 解析手法

2-1. 基礎式

線形等方弾性体を対象とし, 微小変形を仮定する。

右図の座標系において, まず釣り合い式は, 物体力を b_k ($k=1, 2, 3$)として

$$\sigma_{jk,j} + b_k = 0 \quad (1)$$

と表わされる。適合条件は

$$\epsilon_{jk} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

弾性法則は, 弾性定数マトリクスを $[E]$ として

$$\{\sigma\} = [E] \{\epsilon\} \quad (3)$$

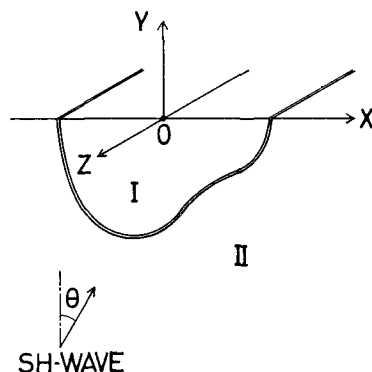


図1 概念図

と表わされる。応力境界条件は、 S_2 上で

$$p_k = \sigma_{jk} n_k = \bar{p}_k \quad \text{on } S_2 \quad (4)$$

n_k : 境界の外向き法線ベクトルの k 方向余弦

変位境界条件は S_1 上で、

$$u_k = \bar{u}_k \quad \text{on } S_1 \quad (5)$$

とする。ここで $\bar{}$ は既知量を表わす。

さて (4)(5) 式及び場の方程式 (1) 式に対する重み付き残差法の基本式は、

$$\int_V (\sigma_{jk,j} + b_k) u_k^* dV = \int_{S_1} (\bar{u}_k - u_k) p_k^* dS + \int_{S_2} (p_k - \bar{p}_k) u_k^* dS \quad (6)$$

である。ここで u_k^* は重み関数、 p_k^* は対応する表面力ベクトルである。(6) 式を 2 回部分積分し、その際 (2)(3) 式を用いることにより、

$$\int_V b_k u_k^* dV + \int_V \sigma_{jk,j}^* u_k dV = - \int_S p_k u_k^* dS + \int_S u_k p_k^* dS \quad (7)$$

が得られる。ただし (4)(5) 式を用いてある。 $(S = S_1 + S_2)$ 又 σ_{jk}^* は u_k^* に対応する応力場である。

ここで左辺第 2 項が消去されるような重み関数を選択すると都合がよい。それを例えば次式を満たす領域の Green 関数、

$$\sigma_{jk,k}^* + \delta^i = 0 \quad \delta^i: \text{Dirac's Delta function} \quad (8)$$

に選択すれば (7) 式は、

$$C_i \cdot u^i + \int_S u_k p_k^* dS = \int_V b_k u_k^* dV + \int_S p_k u_k^* dS \quad (9)$$

$$C_i = \begin{cases} 1 & i \text{ in } V \\ 0 < C_i < 1 & i \text{ on } S \\ 0 & i \text{ not in } V \text{ \& not on } S \end{cases} \quad (10)$$

ここで u^i は加振点 i 点における加振方向変位を表わす。 i 点が境界上にある時は C_i の値は i 点近傍の境界の状態によって異なるが、滑らかな境界では $1/2$ となる。その値は後述するように static な時の解析より求めることが出来る。

(9) 式は r 方向の成分についての sum up となるが、今回の対象である 2 次元面外変位場で、かつ物体力を考えない場合には 単に、

$$C_i \cdot u^i + \int_S u \cdot p^* dS = \int_S p \cdot u^* dS \quad (11)$$

となつて境界積分のみで表わされる。これが今回の解析の基礎式である。そして、この式は Green の公式に基づく定式化より得られる基礎式に一致している。¹⁵⁾

2-2. Green関数と要素積分

定常動弾性問題を対象にすれば、 ω 領域で(11)式を解けばよい。time factorとして $e^{-i\omega t}$ を用いれば、今回対象とする問題のGreen関数は、Sommerfeldの放射条件を考慮して、

$$u^* = \frac{i}{4\mu} H_0^{(u)}(\xi r) \quad (12)$$

で与えられる。ここで μ はせん断剛性、 i は虚数単位、 $H_n^{(u)}$ は第1種 n 次Hankel関数、 ξ は波数($=\omega/v_s$, v_s :せん断波速度)、 r は加振点と観測点間の距離である。これより表面力のGreen関数 p^* は、

$$p^* = -\frac{i\xi}{4} H_1^{(u)}(\xi r) \frac{\partial r}{\partial n} \quad (13)$$

で与えられる。次に半無限体のGreen関数は $y=0$ で $u_{yz}=0$ の条件から、鏡像ソースを重ね合わせるにより、

$$u^* = \frac{i}{4\mu} \{ H_0^{(u)}(\xi r) + H_0^{(u)}(\xi r') \} \quad (14)$$

$$p^* = -\frac{i\xi}{4} \{ H_1^{(u)}(\xi r) \frac{\partial r}{\partial n} + H_1^{(u)}(\xi r') \frac{\partial r'}{\partial n} \} \quad (15)$$

で与えられる。ここで r' は鏡像ソースと観測点間の距離である。

さて、(11)式を最も単純な一定要素—変位・表面力とも要素内で一定—を用いて離散化すれば、

$$C_i u_i + \sum_{j=1}^n \left(\int_{S_j} p^* dS \right) u_j = \sum_{j=1}^n \left(\int_{S_j} u^* dS \right) p_j \quad (16)$$

となる。これを n 個連立すれば結局、解くべき方程式は、

$$[C]\{u\} + [H]\{u\} = [G]\{p\} \quad (17)$$

$$H_{ij} = \int_{S_j} -\frac{i\xi}{4} \left(H_1^{(u)}(\xi r_i) \frac{\partial r_i}{\partial n} + H_1^{(u)}(\xi r'_i) \frac{\partial r'_i}{\partial n} \right) dS \quad (18)$$

$$G_{ij} = \int_{S_j} \frac{i}{4\mu} \left(H_0^{(u)}(\xi r_i) + H_0^{(u)}(\xi r'_i) \right) dS \quad (19)$$

となる。 $[C]$ は C_i を対角項とする対角マトリクスである。(18)式、(19)式ともGaussの4点数値積分公式で評価するが、 G_{ii} はHankel関数のArgumentが0になることによる特異性をもつので別途考慮する必要がある。ここではBaranagh & Goldsmith¹⁾の方法を特異点近傍の幅 Δ の領域に対して用いて、

$$G_{ii} = \int_{-\frac{\Delta}{2}}^{-\frac{\Delta}{2}} \frac{i}{4\mu} (H_0^{(u)}(\xi r) + H_0^{(u)}(\xi r')) d\eta + \int_{\frac{\Delta}{2}}^{\frac{\Delta}{2}} \frac{i}{4\mu} (H_0^{(u)}(\xi r) + H_0^{(u)}(\xi r')) d\eta \\ + \frac{i}{4\mu} \left\{ \Delta + \frac{2\Delta}{\pi} \left(\log \frac{\xi \Delta}{4} - 0.4228 \right) i \right\} \quad (20)$$

で求める。ここで η は i 要素上の局所座標、 Δ はその要素長である。 H_{ii} は r_i の法線方向微分が0になるので特異性はもたず、(18)式の第2項だけ求めればよい。

2-3. 入射波解析

図1のようなモデルに平面SH波が入射する問題を考える。Y軸とθの角度をなす入射波を、

$$u_i = e^{-i\omega[t - x/v_x + y/v_y]} \quad \begin{aligned} v_x &= V_s / \sin\theta \\ v_y &= V_s / \cos\theta \end{aligned} \quad (21)$$

と表わせば、自由地表面で反射する波を含めて入射波場は、

$$u_{in} = 2e^{-i\omega t} \exp(i\epsilon x \sin\theta) \cos(\epsilon y \cos\theta) \quad (22)$$

となる。図1においてII領域のtotalの変位 u_x を、境界による散乱波 u_{sc} を用いて、

$$u_x = u_{in} + u_{sc} \quad (23)$$

で表わす。さて、 u_{sc} に対して境界要素法の基礎式(11)式を適用すれば、

$$C_i \cdot u_{sc}^i + \int_S u_{sc} \cdot p^* dS = \int_S p_{sc} \cdot u^* dS \quad (24)$$

が成立する。一方領域Iに対しては、

$$-C_i \cdot u_{in}^i + \int_S u_{in} \cdot p^* dS = \int_S p_{in} \cdot u^* dS \quad (25)$$

が成立しなければならない。ここで C_i の前の負号は外向き法線ベクトルが逆向きであることによる。

(24),(25)式を加え合せて(23)式を考慮すると、

$$C_i \cdot u_x^i + \int_S u_x \cdot p^* dS - \int_S p_x \cdot u^* dS = 2C_i \cdot u_{in} \quad (26)$$

がII領域に対するBEMの基礎式となる。一定要素を用いて離散化し、マトリクスで表現すると、

$$[C]\{u_x\} + [H]\{u_x\} - [G]\{p_x\} = 2[C]\{u_{in}\} \quad (27)$$

これが解くべき複素連立方程式である。もしもI領域がII領域と異なる材料定数を有する媒体である時にはI領域におけるBEMの基礎式、

$$C_i \cdot u_i^i + \int_S u_i \cdot p^* dS - \int_S p_i \cdot u^* dS = 0 \quad (28)$$

を(26)式と連立させて解けばよい。そのとき変位と応力の連続条件、即ち

$$\begin{aligned} u_I &= u_{II} \\ p_I &= -p_{II} \end{aligned} \quad (29)$$

を用いる。 $[C]$ マトリクスの対角項 C_{ii} は滑らかな境界では $1/2$ となるが隅角部の要素などでは隣接要素の影響を受けて異なる値をもつ。その場合 static な場合の $[H]$ マトリクスを求め、それに対して剛体移動許容条件を課すことにより、次式で求めることが出来る。

$$C_{ii} = -\sum_{j \neq i} H_{ij} - H_{ii} \quad (30)$$

3. 結果と考察

3-1. 精度の検討

まず解析手法の妥当性を検証するため種々の検討を行なった。1例として、地表面上の巾2Bの領域に一樣せん断力 q_0 が分布している時の中央点の変位を解析的に求め、今回の手法と比較したものを図2に示す。解析解は

$$u(x,y) = -\frac{2q_0}{\pi\mu} \int_0^{\infty} \frac{\sin B\tau \cdot \cos x\tau}{\tau\sqrt{\tau^2 - \xi^2}} \exp(-\sqrt{\tau^2 - \xi^2}y) d\tau$$

と表わされるがこれを特異点に注意して数値積分した。今回の手法では地表面上に要素を切り、一樣せん断力を与えて中心の要素の変位を求めた。図2は巾2Bの領域を10分割した時の結果であるが、両者はよく一致している。その他にもLucco²⁵⁾の解析解や井口ら²⁶⁾の結果とも照合したが、比較的少ない要素でも充分な精度が得られた。その点にも有限要素法に比べ、領域の方程式を完全に満足する関数を用いるB.E.M.の利点が現われているといえる。尚、図で横軸は $\alpha_0 = \omega B/v_s$, 縦軸は $\mu u/2Bq_0$ 。

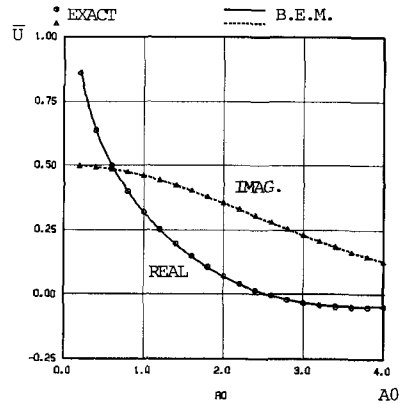


図2 解析解との比較

3-2. 不整形境界近傍の構造物の応答

さて次に図3に示すような鉛直境界が地盤中に存在している時の構造物の応答を考える。現実の地盤にこのような鉛直境界をもつ不整形性が存在することは想定しにくい、急峻な崖、或いは硬質地盤との境界近傍にある構造物への、それらの不整形性が与える影響が最も明確に、かつ強調されて現われると考え、まずその基本特性を押える意味でこのモデルを考えた。(モデルA)

まず、図4に鉛直境界が自由表面である場合の剛基礎のインピーダンスの周波数特性を示す。境界位置を $L=3.0B$ とした時に、根入れ深さ H/B をパラメータとして、半無限地盤上の場合と比較した。上が実部、下が虚部で横軸は α_0 、縦軸は k/μ で以下、図5・6及び図11-12とも同様である。図4から、自由境界面の存在によりインピーダンスは半無限地盤の時には見られない周期性を帯びるが、その度合いは根入れ深さに強く影響を受けることがわかる。

図5は自由境界の位置による差を比較したものであるが、 L/B が増大するにつれその影響が少なくなると同時に、変動の周期が短くなっているのがわかる。図6には剛境界の場合を示すが、山と谷が入れかかっていること以外は同様な傾向を呈している。これらの傾向は既に報告した結果と類似している。²⁷⁾

尚、このような外部問題に対しても内部領域の固有値が現われてくるので注意が必要だが、今回はその点を避

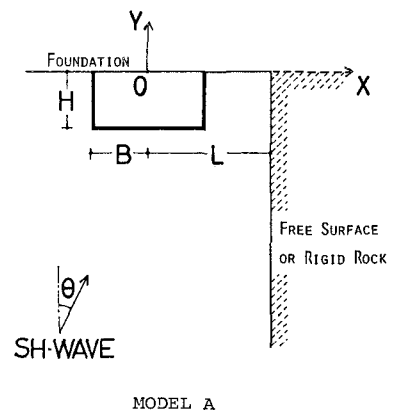


図3 モデル図

けて計算し、内挿した。

図7は $L/B=5.0$ に自由境界が存在している時の、SH波による、剛基礎の変位応答の絶対値を示している。基礎の無次元質量 $M/2\rho_s B H = 2.36$ である。 $(\rho_s$ は地盤密度) いずれの入射角でも複雑な周波数特性を呈し、全体に盛りあがる。一方、剛境界が存在する場合には、図8に示すように、 $\theta = 0^\circ$ の時には応答が抑制され、 $\theta = 45^\circ, 90^\circ$ の時には、特に系の固有振動数付近で励起されている。

図9には $\theta = 45^\circ$ の時の自由境界・剛境界・半無限の各地盤の場合を比較した。

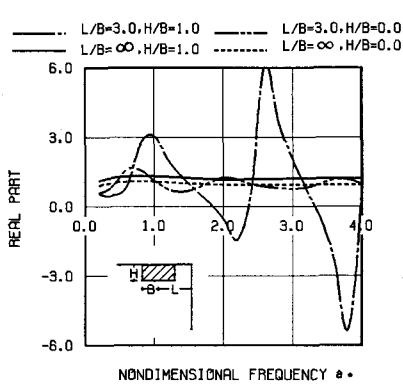


図4 インピーダンス関数 (MODEL-A)

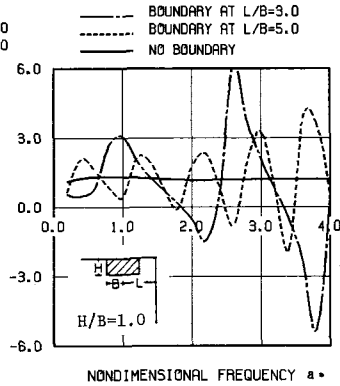


図5 インピーダンス関数 (MODEL-A)

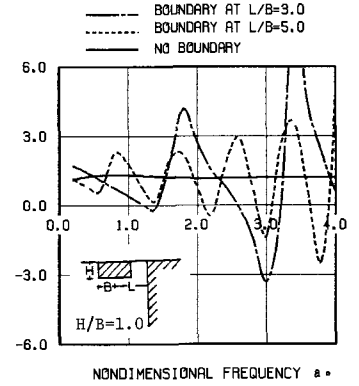


図6 インピーダンス関数 (MODEL-A)

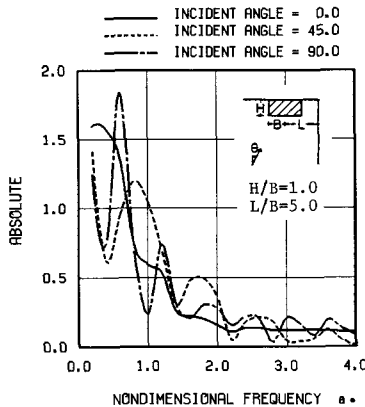


図7 変位応答 (MODEL-A)

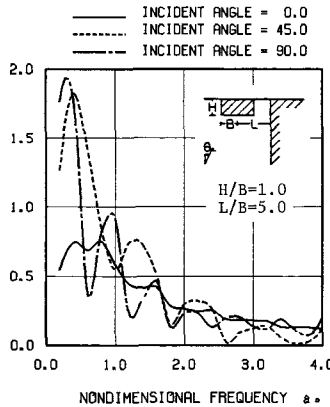


図8 変位応答 (MODEL-A)

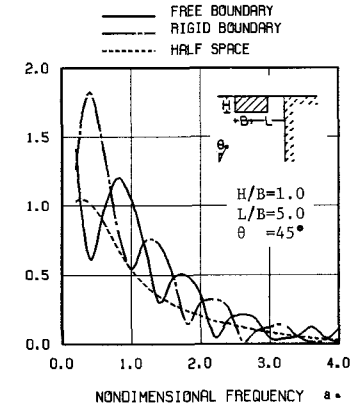


図9 変位応答 (MODEL-A)

3-3. 埋設物直上の構造物の応答

今日まで、地中埋設物そのものに着目した研究は種々行なわれてきたが、埋設物が構造物に与える動的影響についてはほとんど報告されていない。そこで我々は、図10に示すモデル(モデルB)を考え、(1)埋設物が円形空洞の場合 (2)基礎の1/2の質量を有する剛体の場合 をとり上げて解析した。

図11,12 にモデルAと同様な剛基礎のインピーダンスを示す。図11は空洞がある時の、根入れの有無による差を比較したものである。図12には埋設物が剛体の場合のインピーダンスを L/B をパラメータとして表わした。やはりモデルA同様、2つの境界内に存在するせん断土柱の共振現象が明確に現われており、よく似た傾向を示しているが、この場合には根入れの有無による影響度の差は少ないことがわかる。

図13,14は、入射SH波による応答の絶対値を現わしたもので、図13には入射角 θ をパラメータとして剛埋設物がある場合の基礎の応答を示し、図14には $\theta = 45^\circ$ の時の剛埋設物と空洞による影響を、一様地盤の場合と比較した図を示す。これらの結果から、剛埋設物によって下方入射波に対しては遮蔽効果が期待出来ること、又空洞の存在によって特定の周波数での応答が増大すること、などがわかる。

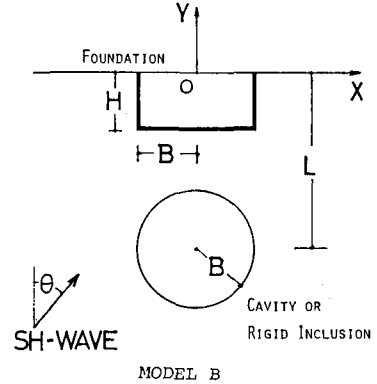


図10 モデル図

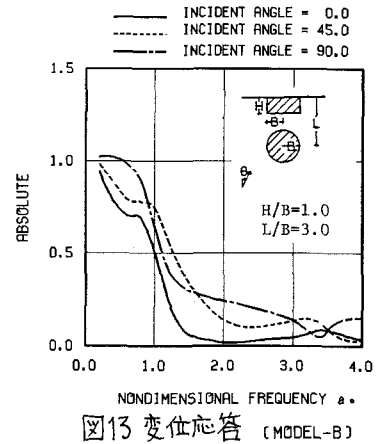


図13 変位応答 (MODEL-B)

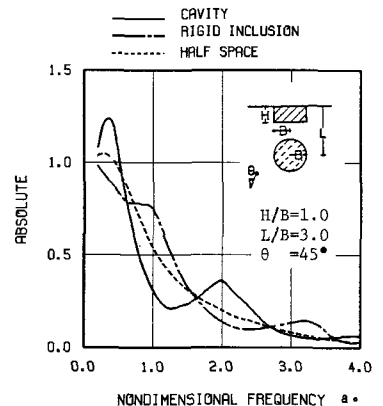


図14 変位応答 (MODEL-B)

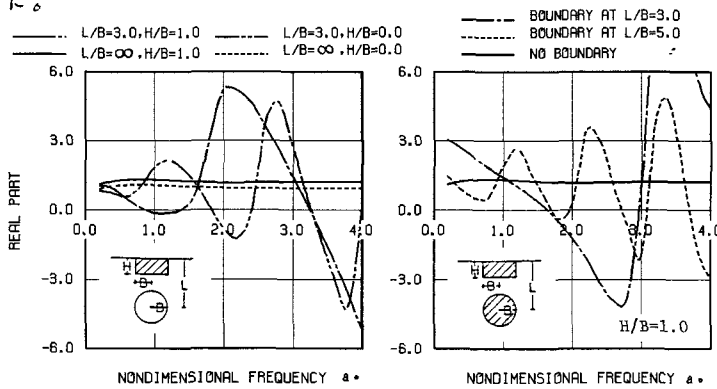


図11 インピーダンス関数 (MODEL-B)

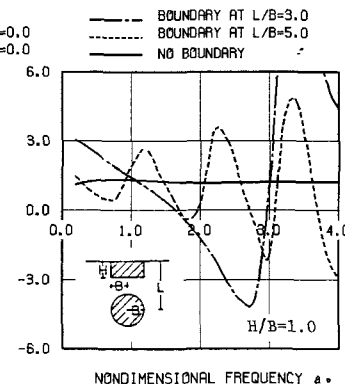


図12 インピーダンス関数 (MODEL-B)

4. 結語

本論文は境界要素法を用いて、地盤の不整形性が近傍の構造物に及ぼす影響を平面SH波入射の場合について解析したものである。限られた解析例からではあるが、まとめると

- (1) 構造物のインピーダンス関数においては、基礎と不整形境界の間に存在する土柱の共振に起因するピーク・ディップが発生し、その影響はかなりの大きい。
- (2) 構造物の入射波に対する不整形境界の影響は、入射角・相対的位置・質量等のパラメータに強く依存するが、一般的に言て、基礎の固有振動数近傍のピークは増大する傾向にあり、又不整形境界の存在による新たなピークが高振動数領域に現われること、及び、入射角が浅くなる程これらの傾向は強調されることがわかった。

又、以上のように、B. E. M. は、内部固有値の問題など若干の要注意点はあるが、無限 或いは半無限領域の解析に通じているといえ、今後とも研究を続けていく予定である。

最後に、末筆ながら常日頃から多大な御教示を頂いております、京大 小堀鐸二教授・篠崎祐三助手に深く感謝致します。又、本論文をまとめるに際し、惜しめない御協力を頂きました清水建設(株)の諸兄に感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 例えば、Hudson, D. E., 1972, Bull. Seism. Soc. Am., 62, 1765-1786
- 2) Trifunac, M. D., 1971, Surface Motion of a Semi-cylindrical Alluvial Valley for Incident Plane SH Waves, Bull. Seism. Soc. Am., 61, 1755-1770
- 3) Trifunac, M. D., 1973, Scattering of Plane SH Waves by a Semi-cylindrical Canyon, Earth. Eng. Struct. Dyn., 1, 267-281
- 4) Wong, H. L. & M. D. Trifunac, 1974, Surface Motion of a Semi-elliptical Alluvial Valley for Incident Plane SH Waves, Bull. Seism. Soc. Am., 64, 1389-1403
- 5) Wong, H. L. & M. D. Trifunac, 1974, Scattering of Plane SH Waves by a Semi-elliptical Canyon, Earth. Eng. Struct. Dyn., 3, 157-169
- 6) Boore, D. M., 1970, J. Geophys. Res., 75, 1512-1527
- 7) Boore, D. M., 1972, A Note on the Effect of Simple Topography on Seismic SH Waves, Bull. Seism. Soc. Am., 62, 275-284
- 8) Lysmer, J. & L. A. Drake, 1971, Bull. Seism. Soc. Am., 61, 1233-1251
- 9) Banaugh, R. P. & W. Goldsmith, 1963, J. of Acoust. Soc. Am., 35, 1590-1601, 及び, J. of Appl. Mech., 30, 589-597
- 10) Aki, K. & K. Larner, 1970, Surface Motion of a Layered Medium Having an Irregular Interface due to Incident Plane SH Waves, J. Geophys. Res., 75, 933-954
- 11) Bouchon, M., 1973, Bull. Seism. Soc. Am., 63, 1779-1786
- 12) Wong, H. L. & P. C. Jennings, 1975, Effects of Canyon Topography on Strong Ground Motion, Bull. Seism. Soc. Am., 65, 1239-1257
- 13) Sanchez-Sesma, F. J. & E. Rosenblueth, Ground Motion at Canyons of Arbitrary Shape under Incident SH Waves, Earth. Eng. Struct. Dyn., 7, 441-450
- 14) Sanchez-Sesma, F. J. & J. A. Esquivel, Bull. Seism. Soc. Am., 69, 1107-1120
- 15) 小堀鐸二・篠崎祐三, 不整形地盤の振動特性, 地震, 第2輯, 第30巻, 1977, 127-142
- 16) Kobori, T. & S. Shinozaki, Theoret. Appl. Mech., 27, 1977, 299-313
- 17) 小堀 他, 1981, A. I. J. 近畿支部研究報告集, 125-132
- 18) 小堀 他, 1981, A. I. J. 九州大会梗概, 593-596
- 19) Toki, K. & T. Sato, 1977, 6th W. C. E. E., 409-415
- 20) Cruze, T. A. & F. J. Rizzo, J. of Math. Anal. and Appl., 22, 244 & 22, 341
- 21) Butterfield, R. & Bannerjee, P. K., Geotechnique, 21, 43-60 & 135-142
- 22) 丹羽 他, 土木学会論報, 195, & 同 248
- 23) C. A. Brebbia, The Boundary Element Method for Engineers, 1978, Pentech Press, (邦訳 境界要素法入門, 神谷 他 共訳 培風館)
- 24) C. A. Brebbia, & S. Walker, Boundary Element Techniques in Engineering, Newness - Butterworth, London, 1980
- 25) Luco, J. E. et al, 1975, Earth. Eng. Struct. Dyn., 4, 119-127
- 26) 井口 他, 1980, A. I. J. 関東支部研究報告, 9-12
- 27) 川瀬 博 & 中井 正一, 1981, A. I. J. 九州大会梗概, 689-690
- 28) 川瀬 博 & 中井 正一, 境界要素法による複数基礎-地盤系の動的相互作用解析, 第31回応力連合講演論文抄録, 1981, 145-146

Boundary Element Analyses for Effect of Irregular Topography on Dynamic Soil-Structure Interaction

Hiroshi Kawase* and Shoichi Nakai*

A detailed effect of topographic features upon soil-structure interaction under the earthquake loading would be of great value to the security of structures. Numerous attempts for several simple problems have been made theoretically or numerically by the numbers of investigators. In those studies, the boundary integral equation method (BIEM), the finite element method (FEM), or the finite difference method (FDM) have asserted their efficiency. In recent years, however, a new technique of the boundary solution method called "the boundary element method" have been presented as a case of weighted residual formulations. Boundary element solutions offer important advantage over domain type methods, such as FEM and FDM, because of the smaller resulting systems of equations and the considerable reduction in the data required to solve a problem. The purpose of the present study is to introduce a boundary element approach for calculating the two dimensional soil-structure interaction including irregular topographies, such as a vertical boundary, a circular cavity, and a circular rigid inclusion.

By the weighted residual technique the equation of motion of the linear isotropic elastic body, Eq.(1), can be represented as a integral form, Eq.(6). We can obtain Eq.(7) integrating Eq.(6) by parts. If we choose a weighting function as the fundamental solution defined by Eq.(8), the problem is reduced to a boundary problem with the non body forces, as indicated by Eq.(11), which can be easily solved by the introduction of the finite element discretization scheme ((Eq.(17))). The method is essentially suited for solving two dimensional anti-plane problems by the use of a semi-infinite Green's function.

In the present study, the responses of

(1) a foundation located near the vertical free surface or the rigid rock (Fig.3), and

(2) a foundation located above the circular cavity or the circular rigid inclusion (Fig.10)

due to incident SH waves are analyzed by the boundary element method. From these analyses, it is pointed out that

- (a) the impedance function of a foundation located near the irregular topography is very sensitive to the change of frequency compared to the case of the half plane, and
- (b) the existence of the irregularity increases the first resonant peak at the natural frequency of the foundation-soil system and the additional peak excitations occur at rather high frequencies which coincide with the natural frequencies of a shear beam assumed to be located between the foundation and the irregularity.

* Shimizu Construction Company, Ltd.