

レーリー波による不整形地盤の挙動

SURFACE MOTION OF A LAYERED MEDIUM HAVING AN
IRREGULAR INTERFACE DUE TO RAYLEIGH WAVES

大 槻 明*・山 原 浩**・春 海 佳 三 郎***

By Akira OHTSUKI, Hiroshi YAMAHARA and Kasaburo HARUMI

1. ま え が き

過去の震害例をみると、ある特定の場所に集中して大きな被害が起こることがしばしばある。たとえば、1968年十勝沖地震では、八戸市内の崖縁に建った八戸タワー、図書館、異種地盤上に建った八戸東高校に大きな被害が生じた。また、1976年イタリア地震では、その被害の多くは扇状地のうち山沿いの地域、特に崖に近かったり、急峻な崖の上にあった建物が大きな被害を受けた。これらの被害例のおもな原因の一つとしては、地形地質の局所的な変化、つまり、不整形地盤がその震害に大きな影響を及ぼしたことが考えられる。

この不整形地盤の地震波への影響を調べた研究は、今日に至るまで、幾多の研究者によってなされてきている。たとえば、積分方程式を用いて、Trifunac (1973)¹⁾、Wong (1982)²⁾ らは、おもに SH 波、P 波、SV 波入力あるいはレーリー波に対する半円形あるいは半楕円形の谷の応答を調べた。小堀 (1981)³⁾ らは、同様な手法により、不整形地盤やその周辺地盤に建つ建物の動特性を実体波を中心に検討した。また、小牧 (1970)⁴⁾、入倉 (1977)⁵⁾ らは、地震観測あるいは理論両面から地形の影響を調べた。一方、差分法を用いて検討した例としては、Alterman (1968)⁶⁾、Boore (1970, 1972)^{7), 8)} らは、SH 波、P 波、SV 波、ラブ波に対する地形の影響を調べた。また、Smith (1977)⁹⁾、Reimer (1974)¹⁰⁾ らは、同様な問題を有限要素法を用いて解析した。著者(1981)^{11), 12)} らも、崖地あるいは軟質地盤と硬質地盤が互いに傾斜して接する地盤における SV 波の増幅度やその波動伝播メカニズムを検討した。その結果、Fig. 1, 2 に示すように、崖地や軟質および硬質地盤が斜めに接する付近から

レーリー波が発生し、その振幅は無視できない大きさであること、さらに、このレーリー波は、周囲の地盤の応答に大きな影響を与えることを指摘した。

以上述べた研究は、おもに実体波が入射したときの不整形地盤の影響を調べたものである。しかしながら、今日の構造物を見ると、各種の地中構造物や面的広がりをもった大型構造物が、地形地質が急変する地盤に隣接して建設されることが多いように思われる。また、最近の研究では、強震時における表面波の重要性がさげばれており、たとえば、Bouchon, Aki (1977)¹³⁾ は、1971年のサンフェルナンド地震の際、レーリー波がパコイマダムの記録に大きな影響を与えたことを指摘している。このような現状を考えると、SH 波や SV 波ばかりでなく、表面波が入力した際の挙動を十分に検討する必要があるものと思われる。

ところで、表面波、特にレーリー波による地形の影響

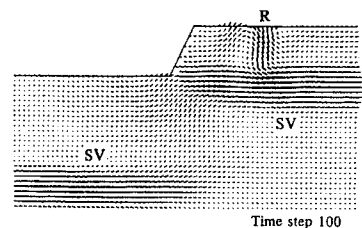


Fig. 1 Wave propagations in cliff induced by an SV sine wave.

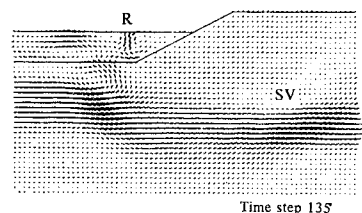


Fig. 2 Wave propagations in cliff with a soft layer induced by an SV sine wave.

* 正会員 清水建設(株)大崎研究室研究員

** 正会員 工博 清水建設(株)大崎研究室部長

*** 正会員 理博 群馬大学教授 工学部

を調べた研究には、次のようなものがある。Lapwood (1961)¹⁴⁾ は、実験によりレーリー波のコーナ部における波動伝播の挙動を研究した。Kuo と Tompson (1963)¹⁵⁾ は、地層が傾斜している地盤中レーリー波の挙動について実験を行った。また、Mal と Knopoff (1965)¹⁶⁾ は、グリーン関数を使い地形が垂直に変化する地盤のレーリー波を調べた。さらに、McGarr Alsop (1967)¹⁷⁾ は、地形地質が垂直に変化する地盤中のレーリー波の反射透過率を解析的に求めた。一方、Drake (1972, 1980)^{18), 19)} は、新しく提案した FEM を使い、また、座間 (1982)²⁰⁾ は FEM を用い波動方程式を逐次解き、レーリー波の不整形地盤中の基本的挙動を検討している。神山 (1976)²¹⁾ は、表面波の地盤中のひずみや不整形地盤中の動特性を実地震波を用いて解析的に調べた。

しかしながら、これらの研究の数は、実体波の場合に比べて少なく、しかも、工学的立場からの研究は少ないように思われる。そこで、本研究では、すでに文献 11) で用いた質点系モデルと有限要素法を融合した手法をさらに改良し、レーリー波が崖地や軟質硬質地盤が互いに傾斜して接している地盤に入力されたときの動特性や波動伝播メカニズムを調べることにする。また、実地震波を使い、崖地におけるレーリー波の地震応答解析を行う。このときの入力地震波としては、八戸で観測された十勝沖地震波の地表における鉛直成分をすべてレーリー波成分とみなし、入力波を作成する。以上の検討結果から、レーリー波の不整形地盤における基本的な挙動を明らかにする。

2. 解析手法

質点系モデルの詳しい式の誘導過程、FEM と質点系モデルの接続方法等については、文献 22), 23) に譲ることにして、ここでは、解析手法の概略を述べるとともにレーリー波の入力方法等についてふれることにする。

(1) 質点系モデル

弾性体は通常連続体として取り扱われ、そのため運動方程式は微分方程式の形で与えられる。この微分方程式を解く方法の1つとして差分法が従来より使われてきている。一方、得られる式は結局差分法によって求められる式と似たものとなるが、立場を変えて連続体を規則正しく並ぶ質点系と考え、その力学的モデルを組み立てることも可能である。質点系は連続体の表現としては十分でないが、連続体に働く力は正しく取り扱える。このため物理的な解釈は容易である。本論では後者の立場に立って議論を進めることにする。

今までに、質点系モデルを動的弾性問題に適用したい

くつかの研究がある。たとえば、Smith と Newmark (1958)²⁴⁾ は、一次元波動伝播問題を質点系モデルとしてはじめてモデル化した。その後、Ang (1964)²⁵⁾ は、地中の波動伝播問題を解くため軸対称の質点系モデルを提案した。このモデルは、各質点間を縦、横、斜めの方向のばねで結ばれており、数学的には差分法によって求められた式と一致している。一方、佐藤 (1978)²⁶⁾ は、半無限地盤中の P 波や SV 波の反射回折問題を取り扱うため、同様に各質点間を縦、横、斜め方向のばねで結んだモデルを考えた。このモデルでは、媒質中のラーメの定数 λ, μ が $\lambda \leq \mu$ の条件下で適用される。しかし、多くの地盤では $\lambda > \mu$ の場合が多い。そこで任意の λ, μ に対し適用可能にするため、ポテンシャルをばねにもたせた質点系モデルを考えた。これにより Fig. 3 に示すように、縦および横方向の各質点を結ぶ要素はばねに、また、斜め方向を結ぶ要素は、弾性棒に置き換えられたことになる。

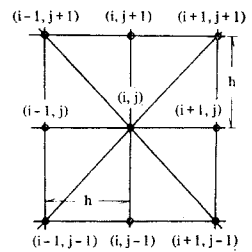


Fig. 3 Particle model grid.

質点系モデルの質点 (i, j) に関する式は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 u(i, j, n+1) = & 2u(i, j) - u(i, j, n-1) \\
 & + (C_L^2 - C_T^2)K^2/h^2[u(i+1, j) - 2u(i, j) \\
 & + u(i-1, j)] + ((C_L^2 - C_T^2)/4)K^2/h^2 \\
 & \cdot [v(i+1, j+1) - v(i+1, j-1) \\
 & - v(i-1, j+1) + v(i-1, j-1)] \\
 & + (C_T K/h)^2/2[u(i+1, j+1) + u(i+1, j-1) \\
 & + u(i-1, j+1) + u(i-1, j-1) - 4u(i, j)] \\
 & \dots\dots\dots(1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 v(i, j, n+1) = & 2v(i, j) - v(i, j, n-1) \\
 & + (C_L^2 - C_T^2)K^2/h^2[v(i, j+1) - 2v(i, j) \\
 & + v(i, j-1)] + ((C_L^2 - C_T^2)/4)K^2/h^2 \\
 & \cdot [u(i+1, j+1) - u(i+1, j-1) \\
 & - u(i-1, j+1) + u(i-1, j-1)] \\
 & + (C_T K/h)^2/2[v(i+1, j+1) + v(i+1, j-1) \\
 & + v(i-1, j+1) + v(i-1, j-1) - 4v(i, j)] \\
 & \dots\dots\dots(2)
 \end{aligned}$$

ここで、 C_L は縦波速度、 C_T は横波速度、 K は時間間隔、 h は格子間隔である。なお上式で $t=nK$ の場合の n は省略してある。

(2) FEM と質点系モデルの融合

本論では、有限要素法 (FEM) と質点系モデルとを混合させて使うことにより、それぞれの手法のよい点を利用する^{22), 23), 27)}。つまり、Fig. 4 に示すように内部境

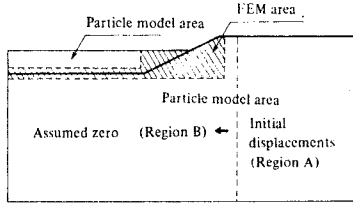


Fig. 4 Analytical model combining FEM with particle model and locations of initial displacements.

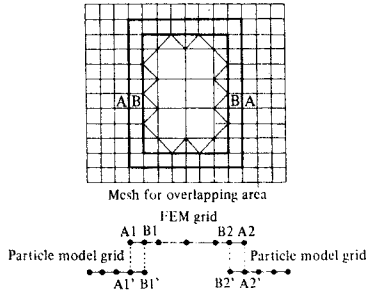


Fig. 5 Idealized model combining particle model grid with finite element grid.

界面や地形の複雑な部分に FEM を適用することにより、複雑な境界処理を避け、また、プログラミングをしやすくする。さらに、電算機の計算時間、容量、データ作成作業の短縮を図るため、FEM は不規則領域のみに使用し、その他の領域は質点系モデルを適用する。FEM 領域に用いる式は次式を用いる。

$$\{u\}_{n+1} = 2\{u\}_{n-1} - [M]^{-1}[K]\{u\}_n \Delta t^2 \dots \dots (3)$$

ここで、 $\{u\}$ は変位ベクトル、 $[M]$ はランプド マスマトリックス、 $[K]$ は剛性マトリックス、 Δt は時間間隔、 n は計算ステップである。式 (3) は式 (1) および式 (2) に対応する。

FEM と質点系モデルを融合するためには、互いの領域の端を重ね合わせる (Fig. 5 参照)。これにより、式 (1)~(3) では計算できないおのおのの領域の端の節点変位 (A_1, B_1') は、もう一方の領域の重ね合った点の節点変位 (A_1', B_1) を用いて推定できる。

(3) 逸散境界

Smith (1974)²⁸⁾ が提案した逸散境界は、実体波、表面波の区別なく、しかも、入射角に関係なく逸散波を吸収できることが知られている。しかしながら、Dirichlet と Neumann 条件下の解を 2ⁿ 回重ね合わせなくてはならないため、計算量が非常に多くなる欠点もっている。ところで本手法では、1 ステップの計算によって波が進む割合は、1 メッシュ以下である。このことを利用すると、Kunar (1980)²⁹⁾ らと同様に、境界近傍に 5~6 メッシュ程度の領域を取り、この領域内で Dirichlet

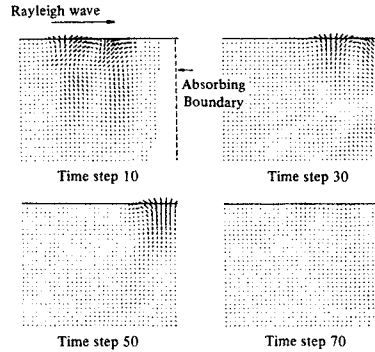


Fig. 6 Absorbing boundary conditions for Rayleigh wave.

および Neumann 条件下の解を 1 回重ね合わせるにより、逸散波の吸収が可能となり、さらに、計算量をおさえることができる。また、上述の方法に併用して、速度項に比例する減衰を含んだ波動方程式をこの領域内に適用し、解の精度、安定性の向上を図った。Fig. 6 には、本手法を用いることにより、半無限均一地盤中のレーリー波が左から右に進行し、側方境界部で波が逸散している様子が認められる。

(4) レーリー波の入力方法

式 (1), (2), (3) の解を求める際の初期条件は、与えられた解析モデルの全節点に対し、時刻 $t=0, t=\Delta t$ における変位を Fig. 4 に示すように与える。その際、各節点のレーリー波の変位は次のようにして求める。

地表面 (x 軸) に沿って進行する半無限均一地盤中のレーリー波を考える。地中に生じる水平、鉛直変位、 u, v の調和波形に関する解は、次のように表わすことができる。ここで、地中に向かって深さ方向に z 軸を取ることにする。

$$u = A \left\{ -e^{-2\pi\xi\sqrt{1-\alpha^2K^2}} + \frac{2\sqrt{(1-\alpha^2K^2)(1-K^2)}}{2-K^2} \cdot e^{-2\pi\xi\sqrt{1-K^2}} \right\} \cos \omega \left(t - \frac{x}{V_R} \right) \dots \dots (4)$$

$$v = A \left\{ \frac{2\sqrt{1-\alpha^2K^2}}{2-K^2} e^{-2\pi\xi\sqrt{1-K^2}} - \sqrt{1-\alpha^2K^2} \cdot e^{-2\pi\xi\sqrt{1-\alpha^2K^2}} \right\} \sin \omega \left(t - \frac{x}{V_R} \right) \dots \dots (5)$$

ただし、 A : 振幅に関する係数、 L_R : レーリー波の波長、 $\xi = z/L_R$ 、 ν : ポアソン比、 $\alpha^2 = (1-2\nu)/(2-2\nu)$ 、 $K = V_R/V_S$ 、 V_R, V_S : レーリー波および S 波の伝播速度。

次に地表のある観測点において、ランダムなレーリー波の上下動変位成分 $Z(t)$ が与えられたとする。 $Z(t)$ は次のようにフーリエ級数に展開することができる。

$$Z(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \{ A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t \} \dots (6)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T Z(t) \cos \omega_n t \, dt$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T Z(t) \sin \omega_n t \, dt$$

ここで T は考える地震波の全長である。地中の任意の深さにおける変位は、調和波形に展開された各成分波に対する解を合成し、それらをフーリエ逆変換することによって次のように表わすことができる。

$$u(t) = \frac{C_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \{C_n \cos \omega_n t + D_n \sin \omega_n t\} \dots (7)$$

$$C_n = A \left\{ -e^{-2\pi\xi\sqrt{1-\alpha^2K^2}} + \frac{2\sqrt{(1-\alpha^2K^2)(1-K^2)}}{2-K^2} \cdot e^{-2\pi\xi\sqrt{1-K^2}} \right\} B_n$$

$$D_n = -A \left\{ -e^{-2\pi\xi\sqrt{1-\alpha^2K^2}} + \frac{2\sqrt{(1-\alpha^2K^2)(1-K^2)}}{2-K^2} \cdot e^{-2\pi\xi\sqrt{1-K^2}} \right\} A_n$$

$$v(t) = \frac{E_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \{E_n \cos \omega_n t + F_n \sin \omega_n t\} \dots (8)$$

$$E_n = A \left\{ \frac{2\sqrt{1-\alpha^2K^2}}{2-K^2} e^{-2\pi\xi\sqrt{1-K^2}} - \sqrt{1-\alpha^2K^2} e^{-2\pi\xi\sqrt{1-\alpha^2K^2}} \right\} A_n$$

$$F_n = A \left\{ \frac{2\sqrt{1-\alpha^2K^2}}{2-K^2} e^{-2\pi\xi\sqrt{1-K^2}} - \sqrt{1-\alpha^2K^2} e^{-2\pi\xi\sqrt{1-\alpha^2K^2}} \right\} B_n$$

となる。ただし、係数 A は $z=0$ のとき $v=1$ として $A = \{2\sqrt{1-\alpha^2K^2}/(2-K^2) - \sqrt{1-\alpha^2K^2}\}^{-1}$ より決まる。

以上より、 z 方向の変位分布は入力波として調和波形を考える場合、式 (4)、(5) を使い、また、入力波としてランダム波を考える場合は、式 (7)、(8) を使う。 x 方向の変位分布は、レーリー波速度で進むものとして求める。

3. 解析モデル

本研究では、2つの解析モデルを使用す

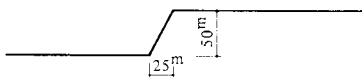


Fig. 7 Model 1 Analytical model of a cliff.

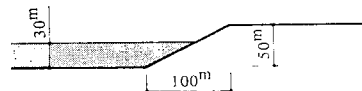


Fig. 8 Model 2 Analytical model of a cliff with a soft layer.

Table 1 Soil properties.

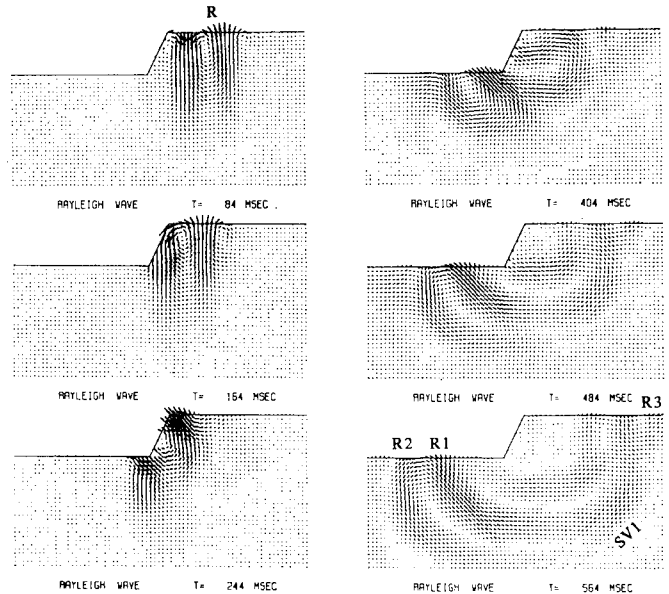
	Model 1	Model 2	
		Surface layer	underlying half-space
Shear Velocity (m/s)	200	100	200
Compressional Velocity (m/s)	600	300	600
Density (g/cm ³)	1.6	1.6	1.6

る。第1のモデル (Model 1) は、崖地を想定したもので Fig. 7 に示すとおりである。また、第2のモデル (Model 2) は、Fig. 8 に示すように、地盤定数が異なる地盤が、互いに傾いて接しているモデルである。これらのモデルの諸元を Table 1 に示す。

4. 不整形地盤の波動伝播特性

崖地 (Model 1) および地層が傾いて接している地盤 (Model 2) の波動伝播を明らかにするため、継続時間の短い sine 波形のレーリー波を一波長 ($\lambda/h=2$, λ : 波長, h : 崖の高さ) 与え、地盤を無減衰として解析した。この解析では、レーリー波は、半無限均一地盤に対するレーリー波の解を使用した。

まず、Model 1 について調べてみる。Fig. 9 をみると、モデル右側 (崖背面) から伝播してきたレーリー波 (R) は、斜面に入射すると、コーナー部で反射し、右側に伝播する反射レーリー波 (R3) とそのまま斜面に



R : Incident Rayleigh wave.
 R1, R2 : Transmitted Rayleigh wave.
 R3 : Reflected Rayleigh wave.
 SV1 : Reflected SV wave.

Fig. 9 Wave propagation near cliff due to Rayleigh wave.

沿って左側に進む透過レーリー波 (R1) が生じている。これに対し、R2 波は、入力レーリー波がそのまま下層地面に沿って伝播する波である。また、斜面上端部のコーナー付近からは反射せん断波 (SV1) が生じている。このほかに P 波など種々の波が発生しているが、その量は少ないため、ここでは、特に耐震的に問題となるであろう波についてのみ注目した。Model 1 では、反射レーリー波 (R3) の量が比較的大きく無視できない量となっている。このため、この反射レーリー波は、後述する調和波形および実地震

波に対する Model 1 の応答に大きな影響を与える要因となっている。ところで、Model 1 と同様なモデルについて、すでに McGarr と Al-

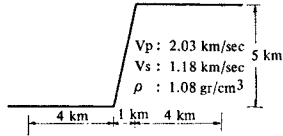
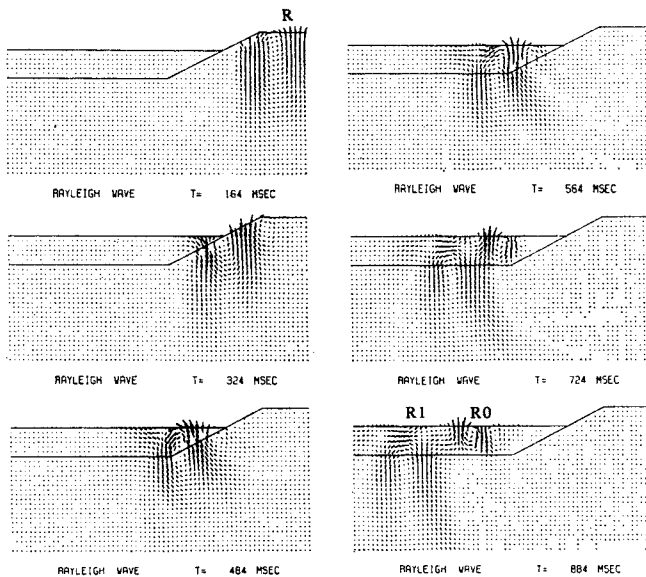


Fig. 10 A half-space with a step at its surface. This model is similar to models analyzed by McGarr and Alsop (1967), and Drake (1972).

Table 2 Half-space with a step elevation (Drake, 1971).

	Reflection Factors			Transmission Factors		
	McGarr and Alsop	FEM (Drake)	Present Solution	McGarr and Alsop	FEM (Drake)	Present Solution
Lower side to upper side (Fig. 10)	-0.03	-0.13	-0.13	0.36	0.53	0.50
upper side to lower side	-0.07	-0.35	-0.36	0.51	0.57	0.53
Period = 13.312 s						



R: Incident Rayleigh wave.
R0: Transmitted wave with fundamental mode.
R1: Transmitted wave with first mode.

Fig. 11 Wave propagation near cliff with a soft layer due to Rayleigh wave.

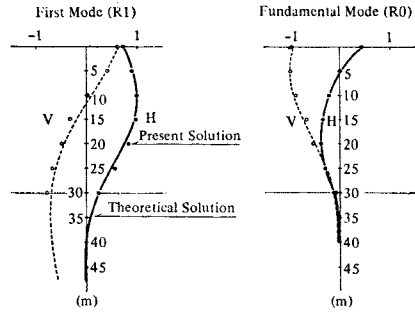


Fig. 12 Shapes of first two Rayleigh modes for a soft layer of 30 m thick overlying a half-space obtained by Haskell model, and present solutions.

sop¹⁷⁾, Drake¹⁸⁾ は、崖地での反射、透過率について検討している。このときのモデルは、Fig. 10 に示すものである。彼らの結果と本解析手法で求めた結果を Table 2 に示す。ほぼ Drake の FEM 解と本手法の解が一致していることがわかる。また、この結果でも、反射レーリー波の量が大きいことがわかる。

次に Model 2 について同様に調べてみる。Fig. 11 をみると、硬質一層地盤中を伝播してきたレーリー波は、硬い地盤と軟らかい地盤とが接する傾斜境界面に到達すると、おもに 2 つの異なる位相速度をもつレーリー波に分かれ、さらに、軟らかい表層をもつ二層地盤中を伝わっている。これらのレーリー波成分を調べてみるため、まず、本解析により求められた R0 波、R1 波の水

平および上下方向の振動モードを Fig. 12 にプロットした。当図で実線および破線で示した振動モードは、二層成層地盤 (各定数は、Model 2 と同じ) と仮定し、Haskell の方法³⁰⁾により解析的に求めたものである。R0 波は、解析的に求めた基本モードに、また、R1 波は 1 次モードにほぼ一致していることがわかる。このときの位相速度を波の伝播遅れから調べてみると、Fig. 13 に示すように R0 波は、基本モードの分散曲線上の振動数 2 Hz ($\lambda/h=2$) に対する位相速度に一致している。また、R1 波は、1 次モードの位相速度に対応している。以上のことから、均一地盤中を伝播してきたレーリー波は、傾斜境界面を境として二層地盤中に入ると分散性を示し、おもに二層地盤の基本モードおよび 1 次モードと思われるレーリー波成分に分かれ伝播することがわかった。また、このときの基本モードは、1 次モードに比べ表層内で振幅が卓越しており、しかも、水平振幅に比べ

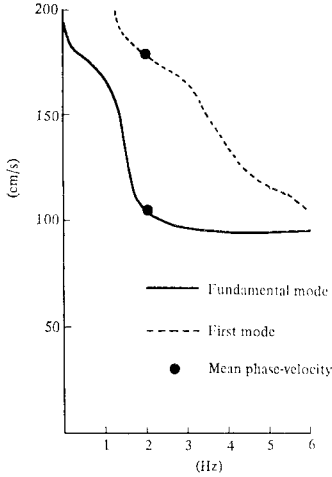


Fig. 13 Phase-velocity curves of Rayleigh wave for a soft layer of 30 m thick overlying a half-space obtained by Haskell model, and mean phase-velocity obtained by present method.

上下の振幅は大きい。これに対し、1次モードは、下層の影響が強く現われており、表層では水平振幅が鉛直振幅よりも大きく、下層では、鉛直振幅が水平振幅に比べ大きくなっている。

5. 不整形地盤における増幅度

不整形地盤での増幅度を調べるため、まず、sine 波形のレーリー波を Model 1 および 2 に入力し、そのときの地層各点に生じる最大変位を調べる。なお、各ケースに用いる入力波は、入力地盤における地表での水平振幅の最大変位を 1 とする。

(1) Model 1 の応答

Fig. 14 には、 $\lambda/h=4$ (入力振動数 1 Hz, λ : 波長, h : 崖の高さ) および $\lambda/h=2$ (2 Hz) に対する地層各点の最大変位を示してある。崖斜面背後からレーリー波が伝播するため、崖斜面およびその上端部付近の振幅は、かなり大きくなっている。特に波長の短い $\lambda/h=2$ の場合、入力波の水平振幅に対し、鉛直振幅は最大で 3 倍以上になっており、また、 $\lambda/h=4$ の場合でも、入力振幅に対し 2.5 倍程度になっている。いずれの場合も、崖上端部付近では、水平振動とともに鉛直振動が卓越している。また、斜面上端部より離れた地表面でも周期的に最大振幅が変化している。これらの結果は、崖上端部付近が一種の 1/4 自由面であるほかに、崖上端部付近より反射してくる反射レーリー波と入力波との干渉が原因であろう。一方、崖下の地盤では、崖上の地盤ほど大きな増幅は認められない。

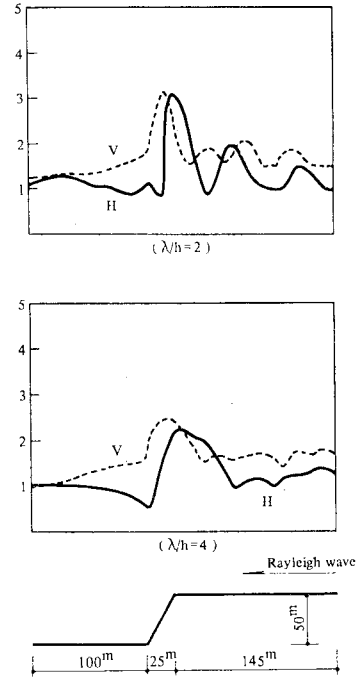


Fig. 14 Distributions of maximum horizontal and vertical surface displacements by harmonic Rayleigh waves for $\lambda/h=2$ and $\lambda/h=4$. ($h=50$ m, λ : wavelength)

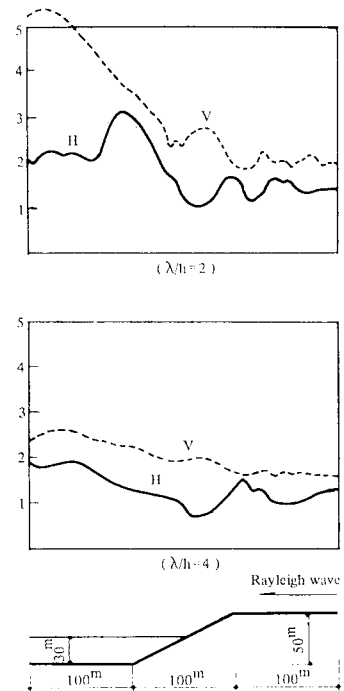


Fig. 15 Distributions of maximum horizontal and vertical surface displacements by harmonic Rayleigh waves for $\lambda/h=2$ and $\lambda/h=4$. ($h=50$ m, λ : wavelength)

(2) Model 2 の応答

Fig. 15 には、レーリー波が硬い一層地盤から軟らかい二層地盤に伝播する場合の地表各点の最大値をプロットしたものである。硬い地盤を伝播してきたレーリー波は、軟らかい表層をもつ二層地盤に入ると振幅が大きくなり、さらに、傾斜境界面よりある程度離れた二層地盤中では伝播速度の違い波と速い波が重なり合い、大きな振幅が生じている。 λ/h が 4 (入力振動数 1 Hz) では、二層地盤の地表に生じる鉛直振幅は、入力波の水平振幅の 2.5 倍程度になっている。一方、 λ/h が 2 (入力振動数 2 Hz) では、 $\lambda/h=4$ のときに比べかなり大きな増幅度となっており、入力波の 5 倍以上の値が鉛直振幅に生じている。ところで、二層成層地盤の群速度を調べてみると、**Fig. 16** に示すように求められた。当図をみると、基本モードに対する群速度は、1.6 Hz 付近で極小値 (Airy phase) を示している。一方、1 Hz ($\lambda/h=4$) に比べ 2 Hz ($\lambda/h=2$) における群速度は、この極小値の群速度に非常に近い。このため、Model 2 の応答では、1.6 Hz 付近の Airy phase の影響で $\lambda/h=4$ よりも $\lambda/h=2$ の方が振幅が大きくなったことが考えられる。斜面近傍の軟らかい表層地盤では、鉛直および水平振動は、ともに卓越している。また、傾斜境界面上端の硬い地盤では、軟らかい表層地盤ほど大きな増幅は認められない。このことは Model 1 の場合とまったく逆の現象となっている。

Fig. 17 には、**Fig. 15** とは逆に、レーリー波が軟らかい表層をもつ二層地盤から硬い地盤に伝播する場合の地表各点の最大振幅をプロットしてある。この際、入力波は、軟らかい表層地盤の地表での水平振幅を 1 として

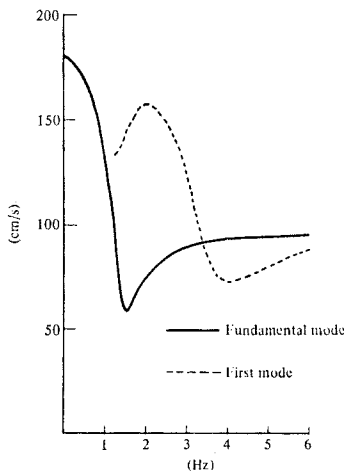


Fig. 16 Group-velocity curves of Rayleigh wave for a soft layer of 30 m thick overlying a half-space obtained by Haskell model.

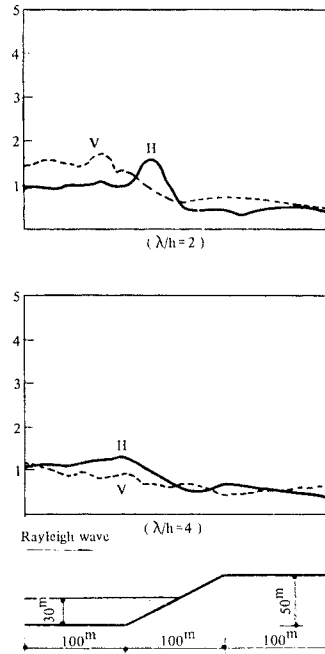


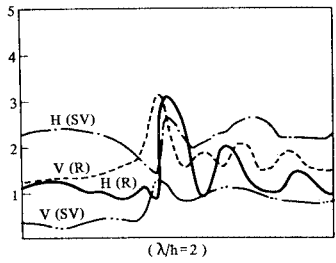
Fig. 17 Distributions of maximum horizontal and vertical surface displacements by harmonic Rayleigh waves for $\lambda/h=2$ and $\lambda/h=4$.

入力する。**Fig. 17** をみると、顕著な振幅の増幅が認められない。軟らかい地盤から硬い地盤に波が伝わるため、硬い地盤中の振幅は、入力波の水平振幅に対し、 λ/h が 4 (入力振動数 1 Hz) では 0.7 倍程度、また、 λ/h が 2 (入力振動数 2 Hz) では、0.5 から 1.0 倍程度となっている。一方、傾斜境界面近傍の軟らかい表層地盤中の振幅は、境界面からの反射波の影響が認められるが、波動インピーダンス比が 2 であるため、その量は比較的小さい。境界近傍の表層地盤地表における最大変位は、 λ/h が 2 の場合、入力振幅の 1.5 倍程度であった。今回の計算では、入力方向が、モデルの右側 (硬い一層地盤から軟らかい二層地盤) からレーリー波が伝播する方が、左側からよりも不整形地盤の影響を受けやすいことがわかる。

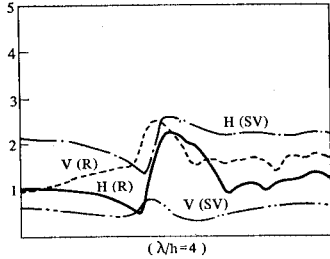
6. SV 波とレーリー波の応答比較

Model 1 および 2 に SV 波が垂直入射したときの地表各点の最大値をレーリー波の場合のそれと比較し **Fig. 18, 19** に示す。ここでは、入力波としての SV 波は、その水平振幅の最大値を 1 として入力する。

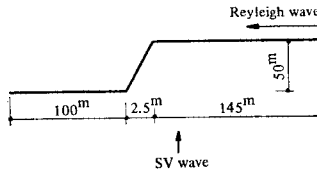
まず Model 1 の場合を調べてみる。レーリー波、SV 波ともにその最大値は、崖上端部近傍に生じている。しかし、その値をみると波長が短い場合 ($\lambda/h=2$) では、



($\lambda/h=2$)

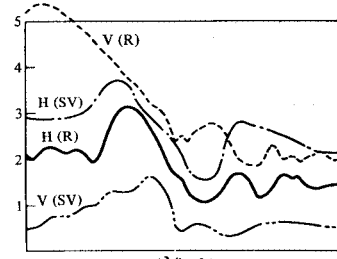


($\lambda/h=4$)

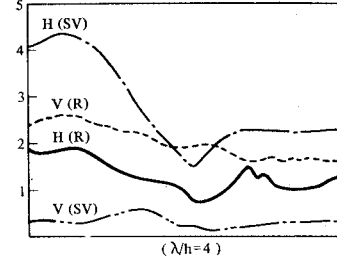


H(SV) : horizontal displacement due to SV wave.
 V(SV) : vertical displacement due to SV wave.
 H(R) : horizontal displacement due to Rayleigh wave.
 V(R) : vertical displacement due to Rayleigh wave.

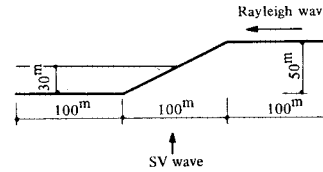
Fig. 18 Distributions of maximum horizontal and vertical surface displacements for $\lambda/h=4$ and $\lambda/h=2$.



($\lambda/h=2$)



($\lambda/h=4$)



H(SV) : horizontal displacement due to SV waves.
 V(SV) : vertical displacement due to SV waves.
 H(R) : horizontal displacement due to Rayleigh wave.
 V(R) : vertical displacement due to Rayleigh wave.

Fig. 19 Distributions of maximum horizontal and vertical surface displacements for $\lambda/h=4$ and $\lambda/h=2$.

レーリー波入力の方が、SV 波入力よりも振幅が大きくなり、波長が長い場合 ($\lambda/h=4$) では、両者同程度の値となっている。レーリー波の場合、崖近傍の鉛直振幅と水平振幅はほぼ同程度で、ともに卓越している。一方、SV 波でも崖付近で水平および鉛直振幅はともに卓越している。

次に、Model 2 の場合について検討する。ここでは、レーリー波が硬質一層地盤から軟らかい表層をもつ二層地盤に伝播する場合と SV 波が垂直入射する場合を比較する。

SV 波およびレーリー波により生じる最大値は、傾斜境界面より少し離れた二層地盤中に生じている。波長が長い場合 ($\lambda/h=4$) では、SV 波による最大値は、レーリー波のそれよりも 1.5 倍程度大きく、また、波長が短い場合 ($\lambda/h=2$) には、逆にレーリー波による最大値の方が 1.5 倍程度 SV 波よりも大きくなっている。このようにレーリー波に対する地盤の動特性と SV 波による動特性とは異なっており興味深いものがある。ところで、傾斜境界面より十分離れた地点の二層地盤と等しい

Table 3 Comparison of Model 2 and 1-Dimensional Model.

	Model 2				1-Dimensional Model	
	SV wave		Rayleigh wave		SV wave	
	$\lambda/h=4$	$\lambda/h=2$	$\lambda/h=4$	$\lambda/h=2$	$\lambda/h=4$	$\lambda/h=2$
maximum horizontal displacement	4.4	3.7	1.9	3.1	3.6	2.9
maximum vertical displacement	0.6	1.6	2.6	5.3	—	—

一次元モデルを考え、一次元波動論を用いて入力波に対する地表の応答を求めてみると **Table 3** のようになる。この表をみるとレーリー波、SV 波ともかなり不整形地盤の影響を受けていることがわかる。

7. 不整形地盤の地震応答解析

いままでの議論では、調和波形を用いて不整形地盤のレーリー波に対する影響を調べた。ここでは、実地震波

を用いて不整形地盤の動的挙動を検討してみる。

Model 1 について崖背面よりレーリー波が入力したときの地震応答解析を行う。既往の地震記録波形からレーリー波成分を分離することは、現在では不可能に近い。そこで本研究では、八戸で観測された十勝沖地震の強震計記録から、上下動の記録波形がすべてレーリー波の上下動成分を表わすものと仮定した。実際に上下動成分を有する波として、P 波、SV 波、それにレーリー波

が考えられる。初期微動における上下動成分は、P 波によるものであろうが、一般に振幅が小さく設計上は問題にならないであろう。SV 波による上下動成分は、実体波が地表面に対しほぼ垂直に到達するという定説が正しければ、ごくわずかなものとなろう。特に主要動を過ぎた後の上下動成分は、そのほとんどがレーリー波成分と思われる。したがって、上下動の記録がレーリー波の特性に最も近いものと考えられる。入力波形は、すでに述べた方法により作成し、無減衰で 20 秒間の応答計算を行った。Fig. 20 には、地表で観測された十勝沖地震の加速度波形を積分した上下動成分の変位波形 ($V_{max} = 7.99$ cm) と、すでに述べた方法により得られた地表および地中 -100 m 点での水平および上下動変位を示す。Fig. 21, 22 には、崖上端部およびその近傍の応答変位波形を示す。また、このときの地表に生じた最大変位を Fig. 23 に示す。最大値の分布図をみると、崖近傍の地表の応答は、入力波の振幅に対し 2 から 3 倍程度の増幅

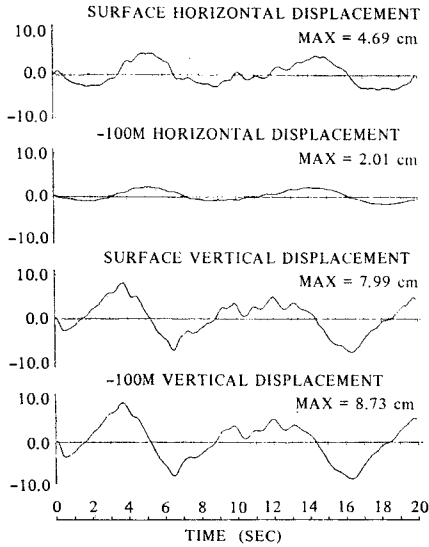


Fig. 20 Incident Rayleigh waves at surface and -100 m depth calculated from vertical component of Tokachi-oki Earthquake.

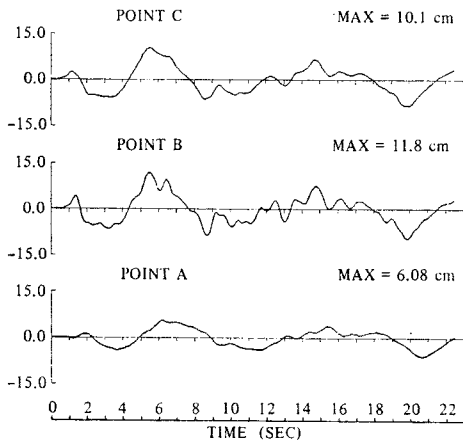
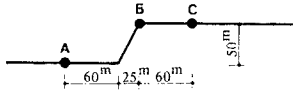


Fig. 21 Horizontal displacements at points (A, B, C) near cliff subjected to Tokachi-oki Earthquake.

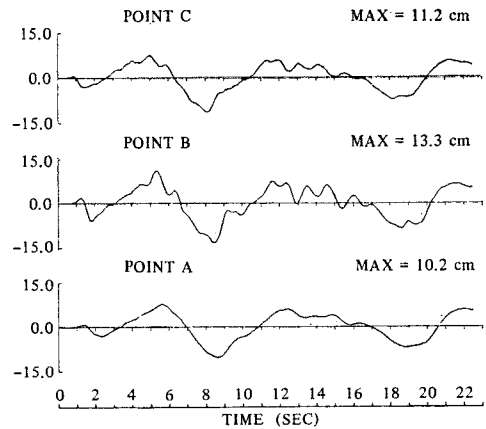


Fig. 22 Vertical displacements at points (A, B, C) near cliff subjected to Tokachi-oki Earthquake.

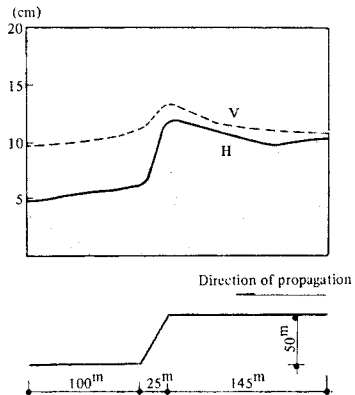


Fig. 23 Distribution of maximum horizontal and vertical surface displacements subjected to Tokachi-oki Earthquake.

が認められ、その最大値および分布のしかたはすでに Fig. 14 に示した調和波形 ($\lambda/h=4$) に対するものと類似している。

8. 結 言

従来定量的検討が十分でなかった不整形地盤中のレーリー波の挙動を明らかにするため、有限要素法と質点系モデルを融合したハイブリット手法を新たに用いた。これによって、崖地や軟質硬質地盤が互いに傾斜して接する地盤中のレーリー波の波動伝播メカニズム、増幅度、分散性について明らかにした。その結果、不整形地盤が、SV 波やレーリー波に与える影響は、入力波長と不整形地盤の幾何学的寸法の関係や地質条件などの違いによって異なるが、その影響は無視できないことがわかった。不整形地盤付近では、大きな鉛直振動を伴ったレーリー波が卓越しやすいため、大地震時には大きな変位振幅が予想される。不整形地盤近傍に建つ構造物、特に面的広がりをもつ構造物にとっては、地形の影響を十分に考慮する必要がある。

参 考 文 献

- 1) Trifunac, M.D.: Scattering of plane SH-waves by a semi-cylindrical canyon, *Earthquake Eng. and Struct. Dyn.*, Vol. 1, pp. 267~281, 1973.
- 2) Wong, H.L.: Effect of surface topography on the diffraction of P, SV and Rayleigh waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 72, pp. 1167~1183, 1982.
- 3) 小堀鐸二・篠崎祐三・三田 彰: P 波及び SV 波入射による不整形地盤—構造物系の振動特性, 日本建築学会 近畿支部研究報告, pp. 133~136, 1981.
- 4) 小牧昭三・毎熊輝記・音田 功: 崖の近傍における震動特性 SH 波による実験, 第 3 回日本地震工学シンポジウム, pp. 301~308, 1970.
- 5) 入倉孝次郎: 地盤の震動特性評価の際の地形の影響, 京大防災研究所年報, 第 20 号 B-1, pp. 1~11, 1977.
- 6) Alterman, Z. and F.C. Karal: Propagation of elastic waves in layered media by finite difference method, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 63, pp. 615~632, 1968.
- 7) Boore, D.M.: Love waves in nonuniform wave guides finite difference calculations, *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, No. 8, pp. 1512~1527, 1970.
- 8) Boore, D.M.: A note on the effect of simple topography on seismic SH-waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 62, pp. 275~284, 1972.
- 9) Smith, W.D.: The application of finite element analysis to body wave propagation problems, *J. Geophys. Res.*, Vol. 44, 1977.
- 10) Reimer, R.B., W. Clough and J.M. Raphael: Seismic response of Paoima Dam in the San Fernando Earthquake, *Proc. World Conf. Earthquake Eng.*, 5th, Rome 2, pp. 2328~2331, 1974.
- 11) Ohtsuki, A., H. Yamahara and K. Harumi: Effect of topographies and subsurface inhomogeneities on surface motion for incident SV waves, *Proceedings of the 6th Japan Earthquake Engineering Symposium*, 1982.
- 12) Ohtsuki, A. and K. Harumi: Effect of topography and subsurface inhomogeneities on seismic SV waves, *Earthquake Eng. and Struct. Dyn.*, Vol. 11, 1983 (accepted for publication)
- 13) Bouchon, M. and K. Aki: Discrete wave-number representation of seismic-source wave fields, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 67, pp. 259~277, 1977.
- 14) Lapwood, E.R.: The transmission of a Rayleigh pulse round a corner, *Geophys. J.*, Vol. 4, pp. 174~196, 1961.
- 15) Kuo, J.T. and G.A. Thompson: Model studies on the effect of a sloping interface on Rayleigh waves, *J. Geophys. Res.*, Vol. 68, pp. 6187~6197, 1963.
- 16) Mal, A.K. and L. Knopoff: Transmission of Rayleigh waves past a step change in elevation, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 55, pp. 319~334, 1965.
- 17) McGarr, A. and L.E. Alsop: Transmission and reflection of Rayleigh waves at vertical boundaries, *J. Geophys. Res.*, Vol. 72, pp. 2169~2180, 1967.
- 18) Drake, L.A.: Love and Rayleigh waves in nonhorizontally layered media, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 62, pp. 1241~1258, 1972.
- 19) Drake, L.A.: Love and Rayleigh waves in an irregular soil layer, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 70, pp. 571~582, 1980.
- 20) 座間信作: 不規則構造に対する地震波の挙動, 地震研究所彙報, 57 号, pp. 379~399, 1982.
- 21) 神山 真: 地震時における地盤内の応力, ひずみの評価, 土木学会論文報告集, 250 号, pp. 9~23, 1976.
- 22) 大槻 明・春海佳三郎・山原 浩・広瀬道孝: 波動論的考察による地震時の地盤振動シミュレーション, 第 27 回構造工学シンポジウム, pp. 67~76, 1981.
- 23) Ohtsuki, A., H. Yamahara and M. Hirose: Computer simulation of seismic waves near a foundation through use of a new analytical model, *Shimizu Tech. Res. Bull.*, No. 1, pp. 19~27, 1982.
- 24) Smith, R.H. and N.M. Newmark: Numerical integration for one-dimensional stress waves, *Structural Research Serles No. 162, Civ. Engrg. Studies, Univ. of Illinois, Urbana*, III, 1958.
- 25) Ang, A.H.-S. and T.H. Rainer: Model for wave motions in axi-symmetric solids, *A.S.C.E., EM 2*, pp. 195~223, 1964.
- 26) 佐藤泰夫: 弾性波動論, 岩波書店, pp. 438~450, 1978.
- 27) Harumi, K., J. Kano, H. Okada and A. Ohtsuki: A new method combining a finite element method with a finite difference method for tidal flow computations, *4th International Symposium on Finite Element Methods in Flow Problems*, pp. 1011~1018, 1982.
- 28) Smith, W.D.: A nonreflecting plane boundary for wave propagation problems, *J. Comp. Phys.*, Vol. 15, pp. 492~503, 1974.
- 29) Kunar, R.R. and L. Rodriguez-Ovejero: A model with non-reflecting boundaries for use in explicit soil-structure interaction analyses, *Earthquake Eng. and Struct. Dyn.*, Vol. 8, pp. 361~374, 1980.
- 30) Haskell, N.A.: The dispersion of surface waves on multilayered media, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 43, pp. 17~34, 1953.