

38. 不規則構造に対する地震波の挙動

その 1. 崖地形が地震動に及ぼす影響

地震研究所 座間 信作

(昭和 56 年 10 月 31 日受理)

1. はじめに

1974 年伊豆半島沖地震 ($M=6.9$) は伊豆半島南部を中心として、死者・行方不明 29 名という大きな災害をもたらした。地震の規模はそれ程大きくなかったにも拘らず死傷者が多かったのは、地震に伴って大小の崖くずれが発生したためである。1978 年伊豆大島近海地震 ($M=7.0$) においても崖くずれによる被害が発生しており、伊豆半島に多く見られる崖地形に特有な災害であったということができよう。崖縁で地震動が大きい事は、1968 年十勝沖地震 ($M=7.9$) の際、崖縁にあった八戸高専が大きな被害を受けた例が有名であり、経験的には良く知られていたことである。しかしながらこの様な問題の重要性にも拘らず、崖における地震動の挙動を波動論の立場から厳密に解くことは、境界条件に対する数学的取扱いの困難さのため最も簡単なステップ状の崖の場合すらなされていない。境界の形が任意の連続体を伝播する波動の問題は数値的方法を用いて扱うのが便利であり、従来地震学では差分法が利用され成功を納めてきた (BOORE, 1970, 1972)。

ここでは基本的に全く異ったアプローチによる有限要素法 (F. E. M) を用いた。この方法は変分法から導かれる過程に於いて、Neumann condition (応力に関する条件) が自動的に満たされるため、複雑な形状をもつ連続体の境界条件に対し何ら仮定を必要としないという利点を有しているからである。更に他の数値解法では困難な各種の複雑な媒質の性質を表現する事も容易で、この種の問題を究明するためには有力な手法といえる (座間, 1981a, 1981b)。

本報は有限要素法を用いて、波動論的立場から崖近傍の地震動の挙動を明らかにするための予備的考察を示すものである。

2. 波動伝播問題に対する有限要素法の実際と精度

波動伝播の問題に対する有限要素方程式は次の様に書くことができる (ZIENKIEWICZ, 1971; DESAI and ABEL, 1972)。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\}$$

ここで $[M]$, $[C]$, $[K]$ は質量, 減衰, 剛性マトリックス, $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$, $\{u\}$ 及び $\{F\}$ は加速度, 速度, 変位, 外力を表わすベクトルである。上式は多元連立常微分方程式であり、その解法には大別して時間領域で解くものと、周波数領域で解くものがある。ここでは波形, 散乱場などをみるために時間領域で解く方法を採用した。解法はタイムステップ (Δt)

を多少大きくとっても安定性が保証される Wilson の θ 法を用いた。境界条件については前節で述べた様に Neumann condition は導入する必要がなく, Dirichlet condition (変位に関する条件) のみを考慮すればよい。節点変位を拘束する場合にはその節点に対応する質量マトリックスの成分を ∞ にすればよいし, 節点の運動を自由にする時は何も操作する必要はない。波の励起に関しては外力, あるいは変位・速度を初期値として与えればよい。ここでは SMITH (1975) に従い矩形パルスを変位で与えた。但し散乱波の影響を把握しやすくするためにパルス幅を $2\Delta t$ と小さくとった。励起される節点では剛として扱い, その節点に与えられた運動以外の動きを防ぐようにした。本報では平面波を扱うがその発生は, 境界上の節点に同時に等しくパルスを与えることでなされる。P・SV 波入力に際しては有限要素モデル側端の境界面に沿って Rayleigh 波が発生・伝播するのを防ぐために, 望む弾性波の運動以外の変位成分を零に固定しておく必要がある。

さて, このようにして励起された波はメッシュを通して伝播して行き, ある点で矩形パルス入力に対する波形が得られるが, 他の任意の入力波に対しては convolution を施すことにより波形を得る事が可能である。

ところで有限要素法では連続体を有限個の要素に分割し, 簡単な形状関数を導入することにより精度が異なる。即ち 1 波長当りに含まれる要素数が少くなるにつれ, 極端に振幅は減衰し, 分散性も生じてくる。一次元平面波伝播の問題に対し, 精度的に満足できる要素サイズは波長の $1/8$ から $1/12$ 以下が適当である事が知られている (KUHLEMEYER and LYSMER, 1973; SMITH, 1975)。これに基づき, 形状のやや複雑な媒質を伝播する波動の問題について, 他の手法による解との比較を通して精度を検討してみた。

(a) 山 地 形

Boore (1972) は差分法を用いて SH 波が垂直入射した場合について議論している。Fig. 1 の右下には使用したモデルの概略図を示してある。同様の問題を SMITH (1975) は F. E. M を用いて傾斜角 20° の場合を扱っているが, ここでは筆者の作成したプログラムのチェッ

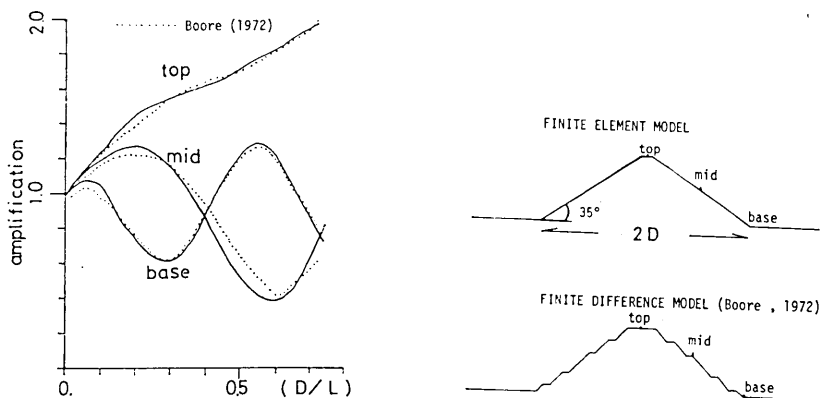


Fig. 1. Comparison of spectral ratios (mountain present over mountain absent) between the finite difference solutions after BOORE (1972) and the finite element solutions for vertically incident SH waves at the base, mid-point, and the peak of a mountain. Models used in these calculations are also shown on the right side.

クとその精度を検討するために Fig. 1 の右上のモデル (傾斜角 35°) の場合について計算を試みた. Fig. 1 の左には山地形の存在する場合の半無限に対する記象のスペクトル比 (増幅度) を示してある. ここで横軸は (山の幅)/2 を波長で除したものを単位としてある. 以下の議論に於いても同様であるが, 最小波長は最大要素サイズの 8 倍程度となるように解析範囲を制限している. Fig. 1 から明らかな様に, この解析範囲内では両者は若干の相違はあるもののほぼ一致している.

(b) 谷地形

SÁNCHEZ-SESMA and ROSENBLUETH (1979) は Fredholm 積分方程式を解く際, 境界条件を最小二乗法的に満足するように点振源を分布させる方法を用いて, 谷地形に SH 波が垂直入射する場合を扱った. 彼らの方法は TRIFUNAC (1973) が “Semi-cylindrical canyon” の問題で与えた厳密解と比較し, 十分精度の良い事が確認されている. Fig. 2 は谷幅, 谷の深さ, 入射波の波長をそれぞれ $2D, h, L$ とした時の $D/L=0.5, h/D=0.4$ で与えられる形状をした谷地形に波が垂直入射した場合の増幅度の空間分布である. 実線は F. E. M 解, 点線は SÁNCHEZ-SESMA *et al.* による解を示しており, 両者は良く一致しているのが知れる.

以上の検討から有限要素解が十分その目的にたえる精度をもっている事が確認された.

3. 崖地形に対するモデル計算

崖地形に関する被害としてよく見られる崖くずれの問題はもはや連続体の弾性論では扱う事ができない. ここでは崖という形状のみに注目し崖の振動性状を議論することにする. これにより崖のどの部分にどのような地震力が働くかが明らかにされ, 崖くずれの問題の解決の手がかりとなる事が期待される.

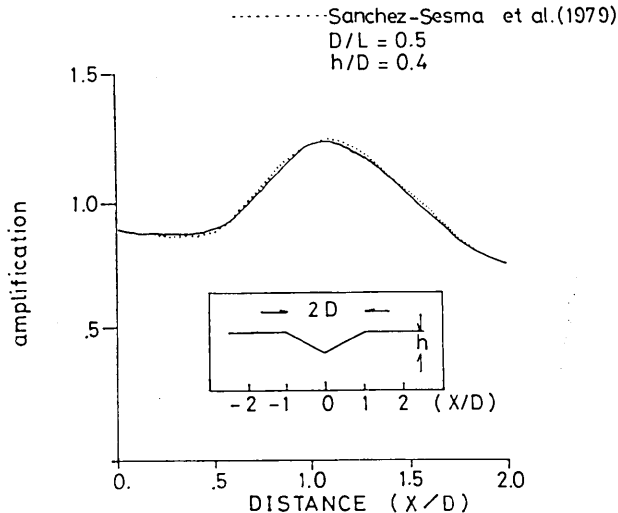


Fig. 2. Amplification characteristics along the surface of a triangular canyon for vertically incident SH waves. $D, h,$ and L is a half-width, depth of a canyon and incident wavelength, respectively. X is the distance from the center of a canyon. The dotted line shows the results after SÁNCHEZ-SESMA and ROSENBLUETH (1979).

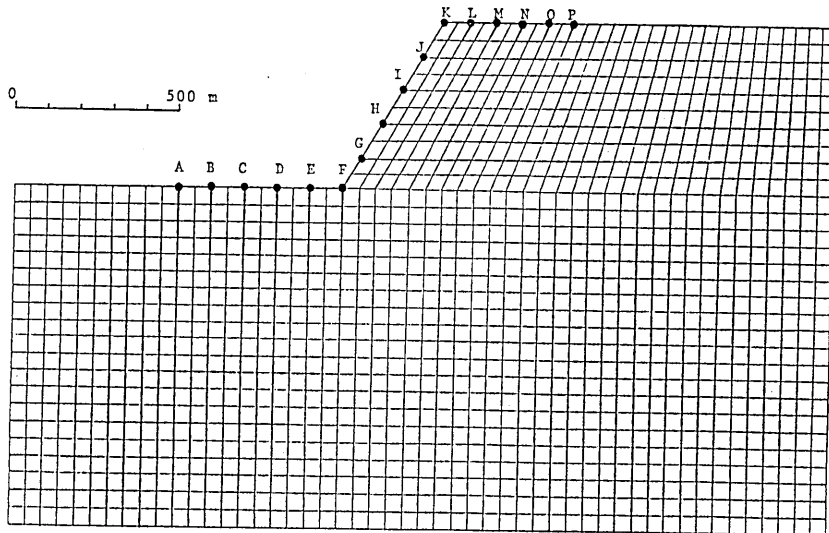


Fig. 3. Schematic finite element model of cliff. The slant angle is 60° . A pulse is applied at the base and it propagates up to the surface as a plane wave. The velocities of P and S waves are 5.5 and 3.0 km/s, and the density is 2.5 g/cm^3 .

Table 1. Parameters used in the calculations.

Number of elements	1300
Number of nodal points	1381
Velocity of S wave	3.0 km/sec
Velocity of P wave	5.5 km/sec
Density	2.5 g/cm^3
Time step	0.01 sec
Number of time steps	90
Height of cliff	500 m
Slant angle	60°
Pulse width	0.02 sec
Amplitude of pulse	5.0

Fig. 3 は計算に用いた崖地形の有限要素モデルであり、媒質は均質であるとする。媒質定数、source、その他の情報はまとめてTable 1 に掲げてある。但し減衰は無視するものとする。ここでは平面 SH・SV 波が垂直入射する場合について議論する。これは短周期強震地動は主に S 波が重要な役割を果たしていること、地表付近には実体波はほぼ垂直に入射すると

考えられること、非常に局所的な領域を対象とするため入射波は平面波とみなせることに基づいている。平面 S 波の発生は前節で述べた様に Fig. 3 のモデル底面の節点に同振幅の矩形パルスと同時に与える事によってなされる。計算時間は地表からの反射波が下面で反射し再び地表へ入射する前に打切るようにした。SH 波の振動方向は紙面に垂直で SV 波のそれは紙面内でモデル底面に平行である。ところで要素サイズはほぼ $50 \times 50 \text{ (m}^2\text{)}$ であるから、1 波長当り 8 ヶ程度の要素を考えるならば、最小波長は 400 m となり、周波数域で議論する場合の周波数の上限は 7.5 Hz となる。また崖の高さは 500 m で要素は 10 ヶ含まれるから崖の高さと同程度の波長までは精度の点で問題なく扱える。

Fig. 4 は傾斜角 60° の崖に SH 波が入射した場合の自由表面での変位波形である。但し ringing 現象を除くためチェビシェフのハイカット・フィルターを通してある。こ

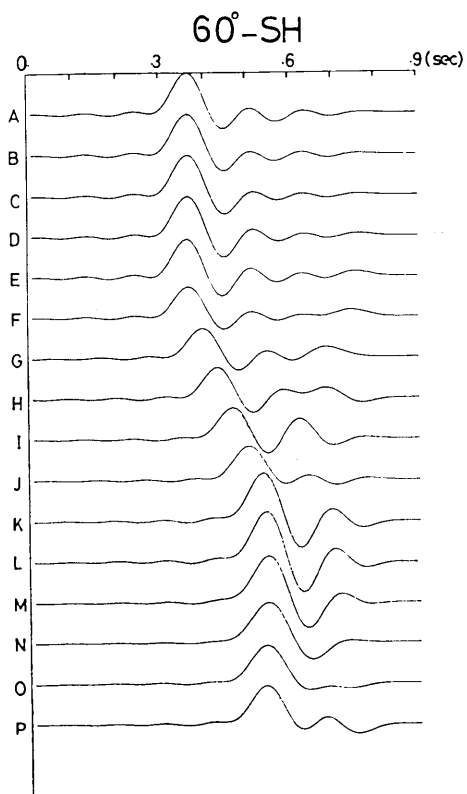


Fig. 4. Seismogram of displacements observed at selected sites A through P in Fig. 3 for SH incidence. Traces are low-pass filtered to remove the ringing phenomenon.

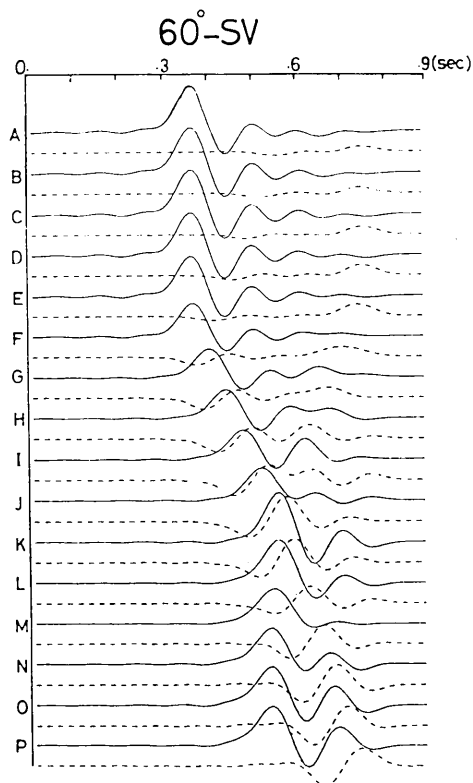


Fig. 5. Computed seismograms for SV incidence. The solid and the broken lines indicate the horizontal and vertical components, respectively.

れから次の事がいえる。

- i) 明らかに崖縁 (K) で振幅が大きい。
- ii) 崖下 (F) 付近では抑制される。

iii) 崖縁から遠ざかるにつれ振幅は小さくなる。この事は崖縁で被害が大きく、離れるに従い被害が小さくなるという経験的事実と調和的である。

- iv) 崖縁からの散乱波が斜面・平坦部に沿って伝播しているのが見られる。

Fig. 5 に SV 波垂直入射に対する変位波形を示す。水平動 (実線) に関しては、SH 波の場合と同様の事がいえる。上下動 (破線) に関しては特に崖縁から P 点に向う波が顕著で、水平動の main pulse の約 0.5 倍もの振幅をもっている。又同じ崖縁から崖下方向へ伝播する波も見られるが、その振幅はやや小さい。更に僅かながら崖下から A 点方向へ伝播する散乱波も存在する。

次に地震波の挙動を崖地形全体にわたり視覚的に把握するために、ある time step での変位場をみしてみる。Fig. 6 は SH 波入射に対する変位場を表示したもので、その表示法は各節点変位をその時刻 (T) での最大変位で規格化し、正值を右 45° 上向き負値を左

45° 下向きにとる様にした。これは目を紙面に近づけ、紙面に沿って見る事により、その時刻での鉛直、水平方向の変位分布を確認できるという利点をもっている。(佐藤, 1978). 但し $T > 70\Delta t$ ではモデル下面付近で下端からの反射波が伝播してきているので、注意す

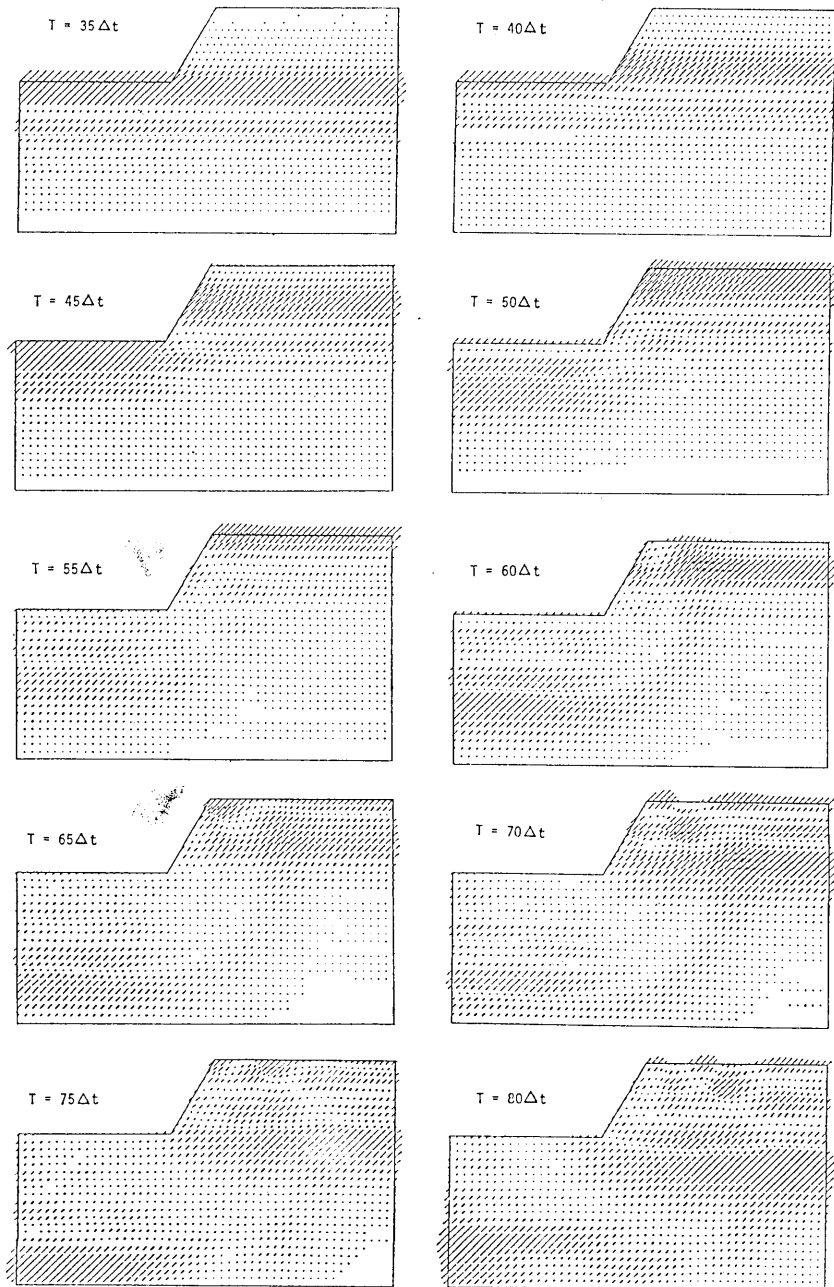


Fig. 6. Wavefields for SH incidence. The motion at a nodal point, whose direction is normal to this space, is represented by a segment of a line.

る必要がある。尚、 $T=0$ はモデル下端で波を発生させた時刻を意味する。以下時刻に従い順にみていく。

$T=35\Delta t$ で下部平坦部に波が到達しており、 $T=50\Delta t$ では下部平坦部からの反射波及

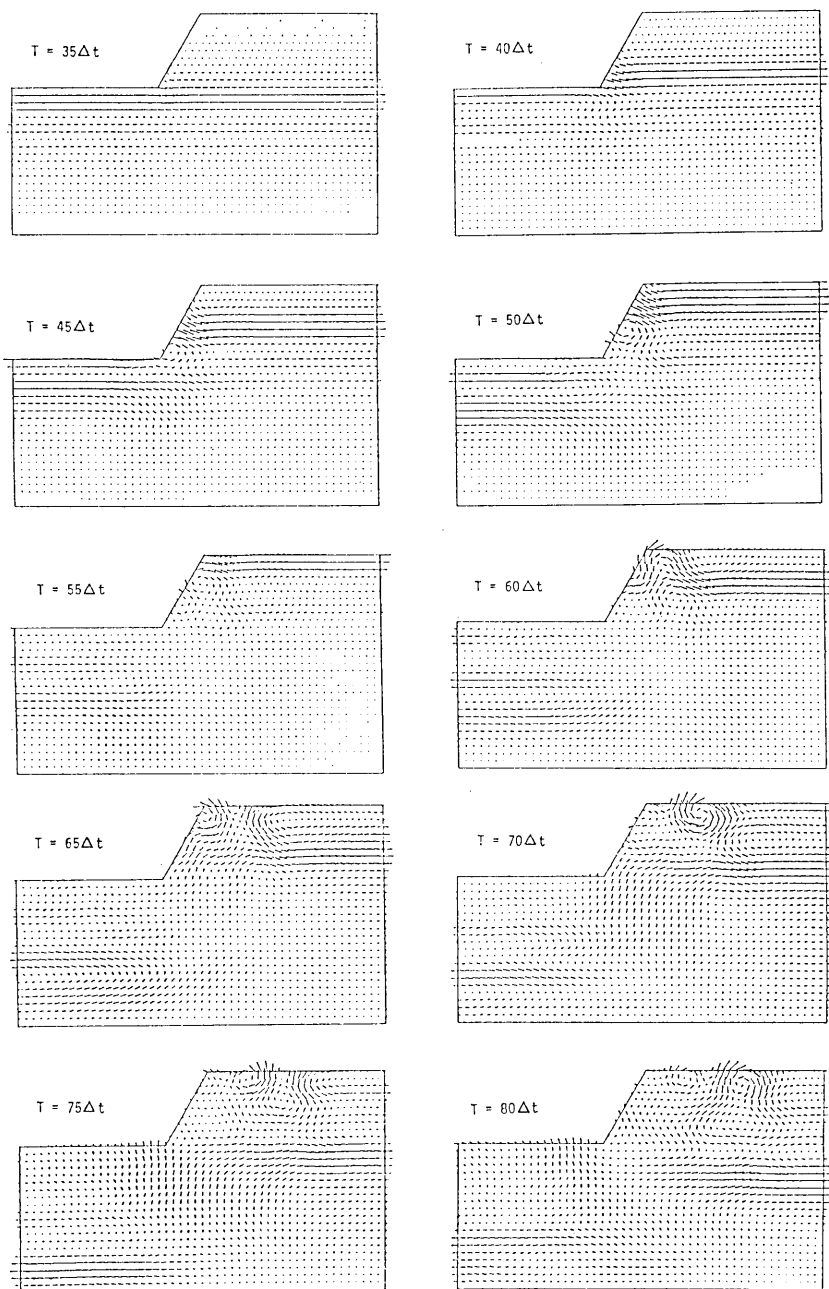


Fig. 7. Wavefields for SV incidence. The motion at a nodal point is represented by a segment of a line as a vector.

び上部平坦部へ到達した波を見ることができる。 $T=60\Delta t$ では下部平坦部からの反射が更に下方へ伝播し、上部平坦部へ入射した波も反射され下方に向っている。更に斜面からの反射波、上部平坦部を水平方向に伝播する散乱波もみられる。 $T=70\Delta t$ では最大変位そのものが小さいため、各節点での振動が大きく見えてしまうが、逆に変位場の状態がよくわかる。即ち崖縁付近での振動は大きく複雑で、上部平坦部に沿って伝播する波はかなり大きな振幅をもっている。また崖内部に振幅の大きな場所があるなどが確認できるだろう。

SV波入射に対する変位場については Fig. 7 に示されている。これは各時刻の最大変位で各節点変位を規格化し、水平・上下動を成分とするベクトルで表現したもので、SH波の場合と同様に水平・鉛直方向の空間変位分布をみることができる。 $T=45\Delta t$ で崖下付近に Rayleigh 波的な粒子運動をしている回転場が発生し、 $T=55\Delta t$ まで斜面に沿って上方に伝播していく様子が見られる。この時平面 SV 波は既に上部平坦部まで達している。 $T=60\Delta t$ では崖縁で非常に複雑でかつ大きな振動がみられる。 $T=70\Delta t$ から $80\Delta t$ にかけては崖縁から上部平坦部に沿って回転場が移動している。この回転場を構成している波の位相速度を調べると $0.92 V_s$ (V_s は S 波速度) であった。このモデル計算に用いた速度比

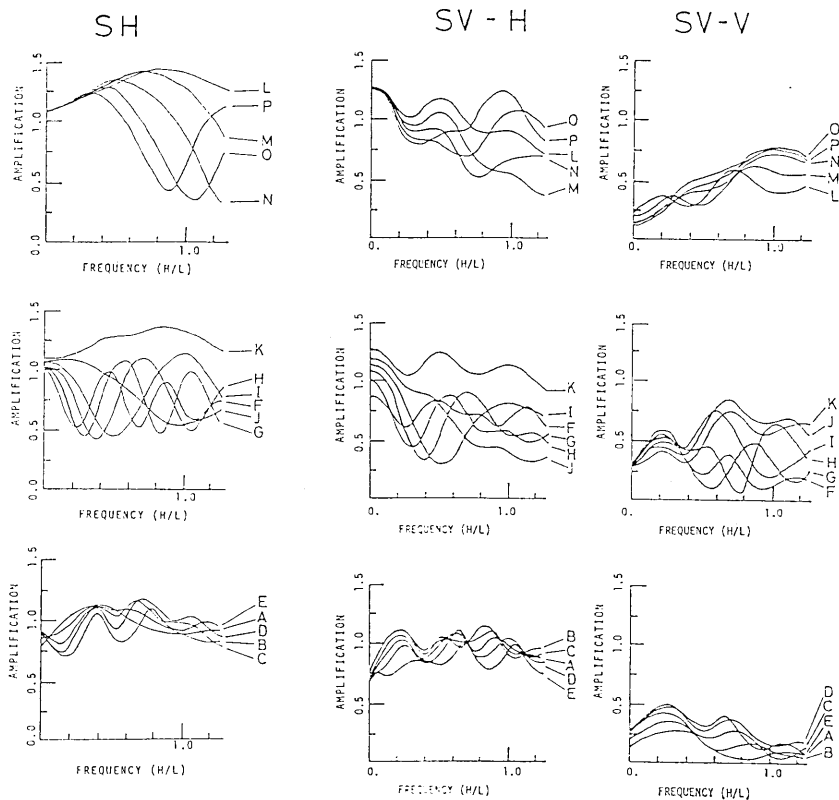


Fig. 8. The amplification at various sites along the surface. Frequency is given in dimensionless units, as the ratio of the height of the cliff (H) to the incident wavelength (L). SV-H and SV-V are the horizontal and the vertical components for SV incidence, respectively.

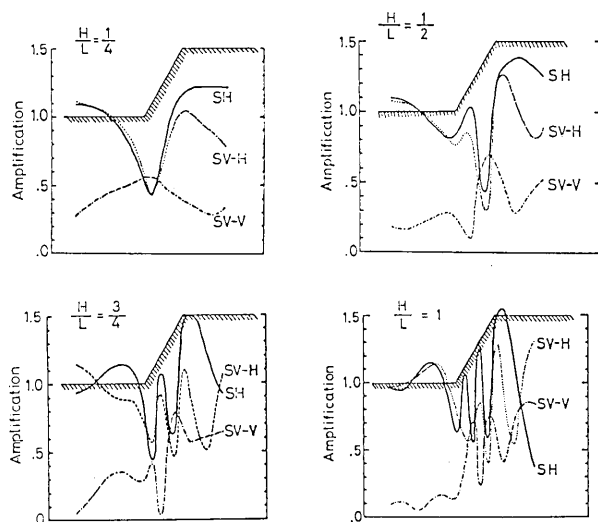


Fig. 9. The space distribution of the amplification along the surface. H and L are height of the cliff and the incident wavelength, respectively.

$V_P/V_S=5.5/3.0$ (V_P は P 波速度) に対する Rayleigh 波の位相速度 C_R の理論値は, $C_R=0.9256 V_S$ であることから, この自由表面に沿って伝わる回転場は Rayleigh 波によるものと考えてよい.

次に地震動災害を考える上で重要な増幅度について議論する. 入射波の崖地形の影響による増幅度は, 半無限体に対する記象のスペクトルと崖地形の存在する場合のそれとの比で source function によらず求める事ができる. 但し本稿での計算例は特定の媒質定数に対するものであるから, 異なった媒質に対しては直接適用できない. そこで増幅度を崖の高さ (H) を波長 (L) で除した無次元量を横軸の単位として示す事にした. これにより傾斜角 60° の場合には弾性体として扱える限り異なった V_S の媒質についても増幅度を知る事ができる. 但し SV 波入射に対しては Poisson 比が等しい場合に限られる. Fig. 8 は各点に於ける増幅度を示しており, SV-H, SV-V は SV 波入射の場合の水平動・上下動に関するものである. SV-V は便宜上, 半無限体に垂直入射した場合の水平動とのスペクトル比で与えた. これから次の事がいえる. SH 波の場合,

- i) 増幅度は波長・場所に大きく依存する. 特に崖下 (F) 付近では $H/L \sim 0.1$ から影響が出始める.
 - ii) 崖縁 (K) 付近は, この周期帯では 1.0 より大きく最も増幅を受ける所で, $H/L \sim 0.8$ で最大となり 1.4 倍程度である.
 - iii) 崖下から崖縁にかけての斜面上 (F-K) での増幅度の変動パターンは長周期になり, その振幅も大きくなる傾向がある.
 - iv) A 点付近では, ほぼ 1.0 であるから崖の影響は小さい.
 - v) 崖下 (F) では 1.0 より小さく抑制されている.
- SV-H に関しても同様の事がいえるが,
- vi) 崖縁 (K) での増幅度は SH の場合より小さく, また全体的にも小さい.

SV-V については、

vii) 上部平坦部でのパターンはほぼ同じで、Rayleigh 波の寄与がほぼ等しくなされたと考えられる。

viii) 崖縁付近、及び上部平坦部では $H/L > 0.5$ で増幅度は 0.5 以上と大きい値を示す。

次に増幅度を波長を固定して空間的にみてる (Fig. 9). 気付く事を列挙すると、

i) $H/L=1/4$ SH の場合は崖下で 0.4, 崖縁で 1.2 程度でその間はほぼ直線的に変化する。SV-H の場合も同じ事がいえるが、上部平坦部では縁から遠ざかるにつれ小さくなっている。SV-V は SV-H が極小となるところで極大となっており崖下で最大で 0.5 程度である。

ii) $H/L=1/2$ この時 SH, SV-H は崖中央で極小となり、その値は 0.5 以下である。

iii) $H/L=3/4$ 変動パターンはより小刻みになっている。最大となる所は崖縁よりわずかに右側で、SH の場合約 1.5 倍であり、遠ざかるにつれ急速に減衰している。SV-H のパターンは斜面上で SH のそれと似ているが、平坦部でかなり相違が大きくなっている。

iv) $H/L=1$ SH, SV-H とも崖下から僅か左の所で 1.2 程度になっている。また SH の場合崖縁付近で 1.5 倍を超えている。斜面上でのパターンは両者間に相違が生じてきている。

全体的にみて、崖下で抑制され約 0.5, 崖縁では増幅され 1.5 程度である。斜面に沿った変化は波長に依存するが、短波長になる程 SH と SV-H との相違が大きくなり、SV-V が卓越してくる。また SV-H と SV-V の増幅度パターンは位相が逆であり、互いに相補的であるといえる。

4. おわりに

崖に対する地震動の挙動を解明する研究の第一歩として簡単な形状の崖に対する地震動の影響を調べてきた。しかし実際に見られる崖地形は外観上も大変複雑な形状をしており、かつ表面付近は風化の度合いが著しいのが普通であろう。崖縁や崖下の様な特異点上の表層周辺では地震波エネルギーの集中、発散が起る事が予想され、地動は大変複雑な様相を呈する事が考えられる。実際の地震動に対するこれらの影響を解析的に求める事は困難であろうから、地下の弾性波速度分布を詳しく調査した上で、崖周辺に於いて三次元的アレイによる地震観測を実施し表層の地震動に及ぼす影響を調べ、何が最も支配的な要素となるかを知る事が今後の研究に重要な手がかりを与えられると思われる。当然の事ながら、アレイ観測のデザイン、地震観測結果の整理にあたっては、今回得られた様な結果を参照しつつなされるのが望ましい。

謝 辞

本稿をまとめるにあたり、地震研究所嶋悦三教授には終始懇切な御指導を賜った。東京大学理学部佐藤良輔教授には折ある毎に有益な御教示を頂いた。また地震研究所嶋研究室の皆様には色々御協力して頂いた。以上の方々に深甚の謝意を表します。尚、計算は東京大学大型計算機センター HITAC 8700/8800, M-200 H によった。

文 献

- BOORE, D. M., 1970, Love waves in nonuniform wave guides: finite difference calculations, *J. Geophys. Res.*, **75**, 1512-1527.
- BOORE, D. M., 1972, A note on the effect of simple topography on seismic SH waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **62**, 275-284.
- DESAI, C. S. and J. F. ABEL, 1972, *Introduction to the finite element method*, Van Nostpand
- KUHLEMEYERE, R. L. and J. LYSMER, 1973, Finite element method accuracy for wave propagation problems (Technical note), *J. Soil. Mech. Found. Div., Proc. ASCE*, **99**, SM 5, 421-427.
- SÁNCHEZ-SESMA, F. J. and E. ROSENBLUETH, 1979, Ground motion at canyons of arbitrary shape under incident SH waves, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **7**, 441-450.
- 佐藤泰夫, 1978, 弾性波動論, 岩波書店.
- SMITH, W. D., 1975, The application of finite element analysis to body wave propagation problems, *Geophys. J. Roy. astr. Soc.*, **42**, 747-768.
- TRIFUNAC, M. D., 1973, Scattering of plane SH waves by a semi-cylindrical canyon, *Int. J. Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **1**, 267-281.
- 座間信作, 1981a, 不規則構造に対する地震波の挙動. その 2. 1944 年東南海地震による静岡県太田川下流域・浅羽町付近の被害について, *地震研究所彙報*, **56**, 753-760.
- 座間信作, 1981b, 不規則構造に対する地震波の挙動. その 3. 水平方向に不均質な媒質を伝播する Love 波, *地震研究所彙報*, **56**, 761-777.
- ZIENKIEWICZ, O. C., 1971, *The finite element method in Engineering Science*, McGraw-Hill, Maidenhead.

38. *Behavior of the Elastic Waves Propagating through the Irregular Structures. I. Effects on Cliff by Earthquake Ground Motions.*

By Shinsaku ZAMA,

Earthquake Research Institute.

It is very important to clarify the earthquake ground motion characteristics on and around cliffs, since we have experienced heavy damage near cliffs due to earthquakes. Recent good examples are the disaster at many cliffs in the Izu Peninsula due to the 1974 Izu-Hanto-Oki earthquake and the 1978 Izu-Ohshima-Kinkai earthquake. The finite element method which is a powerful tool for determining the effect of structural irregularities on the wave propagation was employed to clarify the problems. Both the characteristics associated with time and frequency domains for plane SH and SV waves which propagate in a uniform and linear-elastic material with Poisson's ratio of 0.29 were studied. The source is a rectangular pulse, the duration of which is short enough to allow easy identification of the scattered waves.

The results are summarized as follows;

From the calculated seismograms,

- (1) the amplitude of the main pulse is largest at the upper corner and is smallest at the lower corner.
- (2) The amplitude of the motion along the upper shelf approaches unity as the distance from the top corner increases.
- (3) It is seen that the scattered waves with large amplitude propagate along the upper shelf. Especially, Rayleigh waves induced at the top corner for SV incidence have half the amplitude of the motion for a half-space.
- (4) The scattered waves propagating along the sloping surface from the top corner and along the lower shelf from the bottom corner are also seen, but these amplitudes are small.
- (5) The representation of the wavefields enabled us to grasp at sight the behavior of the reflected, the scattered, and Rayleigh waves and the space distribution of displacements in the horizontal and vertical directions.
- (6) The amplification characteristics along the surface is obtained from the spectral analysis, taking the ratio of the height of the cliff (H) vs, the wavelength (L) as the dimensionless parameter for the case of $H/L=1/4, 1/2, 3/4,$ and 1 . On the whole, the amplification characteristics depend on both wavelength and site conditions.
- (7) The amplification reaches about 0.5 at the lower corner and about 1.5 at the upper corner at particular frequencies.
- (8) The difference of the pattern of the amplification between SH and SV-H increases more at the shorter wavelength.
- (9) The phases in the pattern of the amplification characteristics for SV-H and SV-V are opposite and supplementary to each other.