

40. 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 座間信作

(昭和 56 年 10 月 31 日受理)

1. はじめに

地表面付近の不規則構造が地震波の挙動に与える影響について、前報(座間, 1981a, 1981b)では実体波の場合を取扱い、不規則構造が地震動災害を考える際、重要な要素となる事を指摘した。本報では続いて表面波(Love波)を扱う。これは、周期数秒以上の強震地動は主に表面波で構成されている事が、近年明らかにされてきており(eg. TRIFUNAC and BRUNE, 1970; 嶋, 1970; BOUCHON and AKI, 1977; KUDO, 1978), 超高層ビルや大型石油タンクなどの長大構造物の増加に伴い、短周期表面波(工学的にはやや長周期)の特性を知る事が地震動災害を考える上で重要になってきている事にもとづく。従来表面波の取扱いは、対象とする表面波の波長が長いこともあって平行層を仮定した正規モード解によっており、多くの成功を納めてきた。ところで、短周期表面波に注目するならば、例えば夢の島直下の構造(嶋他, 1978)に対しては周期5秒程度のLove波の波長は約4kmであるから、1km程度の不規則構造の存在に対して相当の影響を受ける事が予想され、平行層近似では不十分となってくる。ここで扱うような水平方向に不均質な媒質を伝播する表面波に対して、全て統一的に扱う事のできる理論解は得られていないが、個々の問題に対しては幾つかの研究がなされている(eg., HIGUCHI, 1980; R. SATO, 1961; GHOSH, 1962; ALSOP, 1966; BOORE, 1970; 石井・山崎, 1973; YAMADA and SATO, 1976)。本報では有限要素法を用いて2, 3の問題を議論する。LYSMER (1970), LYSMER and DRAKE (1971)等はこの方法を用いて不規則構造に対する表面波の振幅特性を求めている。彼らは与えられた周波数に対し有限要素方程式を波数の固有値問題として解き、平行層に対するモード解と不規則構造に対する有限要素解とを結合させる方法を提案し、個々のモードについて議論した。しかし、この方法では波形をみるために多くの周波数に対し固有値問題を解き重ね合わせる必要があり、實際上困難である。ここでは、直接時間領域で有限要素方程式を解くことで波形を容易にみれるようにした。本報では以下の問題を扱う。

i) 鉛直不連続境界を有する場合の反射・透過の問題及び 45° , 135° の傾斜角をもつ場合について、

ii) 凸構造を有する場合

iii) 首都圏の基盤構造に対する Love 波の振幅特性

2. Love 波の発生とその検証

Fig. 1 に示される平行2層モデルの左上端に SH 型の振源(矩形パルス; パルス幅は2×タイムステップ)を設ける。この場合、問題は2次元であるから、振源は SH 型線源

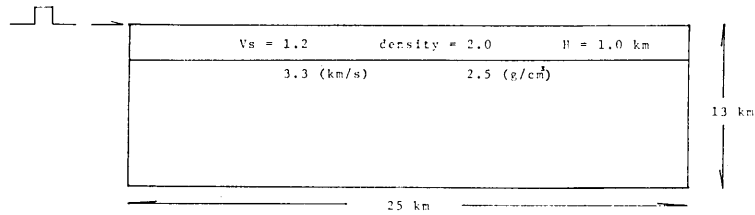


Fig. 1. The finite element model for Love waves. A pulse was applied at the left upper corner and the dash-pots were added on the lower boundary to absorb the reflected waves.

で、発生する Love 波は平面 Love 波である。Love 波は振源から放出された波の直接、反射、屈折波の干渉で成立するから、モデルの水平方向の長さを十分に大きくとる必要がある。またモデル下端からの反射波の混入を避けるために、深さ方向も大きくとる必要がある。ここではそれに加えて下端境界に dash-pot を設けた。dash-pot は有限要素系に於いて、境界上の節点速度に比例した減衰項で与えられる。これは LYSMER and KUHLEMEYER (1969) に依れば境界節点 i に対応する $(\rho CA)_i$ で表わされる。ここで $(\rho A)_i$ は dash-pot を適用する境界節点の lumped mass であり、 C_i は物質定数から定まる位相速度である。

要素分割に関しては、第 1 層を 200×200 (m²) の正方形要素とし、第 2 層は 200×500 (m²) の長方形要素とした。メッシュサイズは取扱う波動の波長と密接に関連して精度に

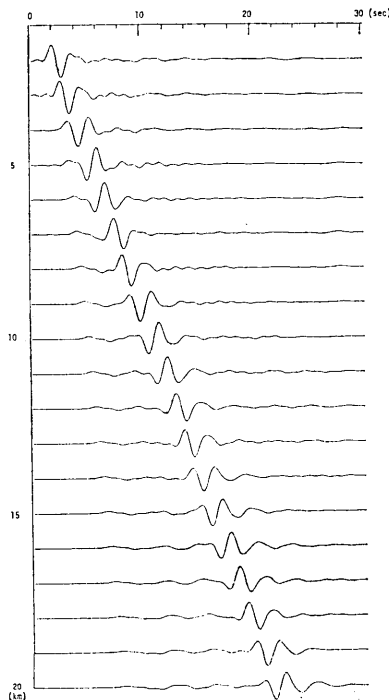


Fig. 2. Calculated seismograms on the surface for the model shown in Fig. 1.

影響を及ぼす。媒質の減衰性は無視しているが、有限要素法では節点変位を簡単な形状関数で表現するため、得られる解は high cut されたものになる。これについては後で触れる。

Fig. 2 に得られた変位記録を示す。但し以下に示す記録は全てチェビシェフのハイカット・フィルターを通したものである。head wave にひき続き Love 波と思われる大振幅をもった孤立波的な波が存在する。以下では、この波群が理論的に得られる Love 波の特性を有しているかを調べる事により、Love 波であるか否かを検討する。

i) Fig. 3 は震央距離 (L) 10 km での深さ方向の各節点に於ける記録である。明らかに、波面は進行方向に垂直で、その振幅は深くなるにつれ減衰しており、表面波の 1 つの特性をもっている事がわかる。

ii) $\Delta=10$ km, 0.5 Hz に於ける深さ方向の振幅分布を理論値 (基本モード) と比較してみると (Fig. 4) 両者は非常に良く一致している事がわかる。

iii) Fig. 5 は Fig. 2 で得られた記象のフーリエ解析から求めた位相速度と基本モードの理論分散曲線とを比較したものであるが, 数%以内の誤差範囲におさまっている。

iv) Love 波の振幅特性を理論値と比較した。Fig. 6 の破線は理論値で, 線振源に対する amplitude function を最大値で正規化したものである。白丸は有限要素解で, $\Delta=10$ km での記象の振幅スペクトルを source function のそれで除し, さらに最大値で正規化したものである。両者はほぼ一致するが, 高周波数域で若干相違が認められる。これは有限要素解には内的減衰が伴う事に因る。

以上の検討から上記の方法で発生させた波が Love 波である事が確認された。ところで平面 Love 波は伝播距離に関係なく一定である。先に述べた様に有限要素解は内的粘性のため減衰をうける。Fig. 7 はその程度を検討したもので, $\Delta=8$ km と 18 km との 2 地点間のスペクトル比である。横軸は 1 波長当りに含まれる要素数を示しており, 振幅に対し 90% 以上の精度を要求するならば, 要素サイズは波長の $1/13 \sim 1/14$ である必要がある事がわかる。但し, 伝播距離 10 km, メッシュサイズ 0.2×0.2 (km²) という条件の下である。この時, 0.6 Hz 程度までは許容できるが, 波形から振幅について詳細に議論する事は難しいだろう。

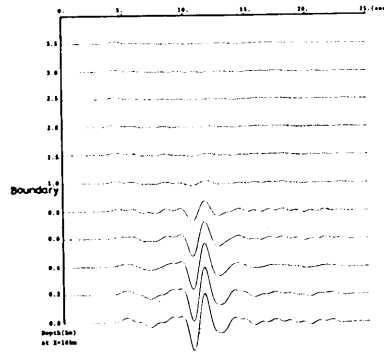


Fig. 3. Computed waveforms with respect to the depth at the epicentral distance 10 km.

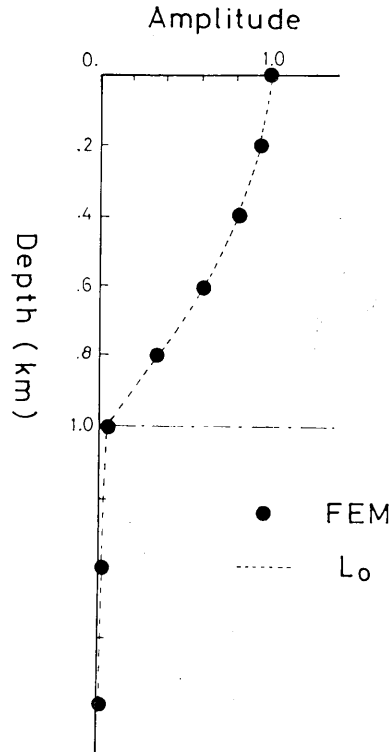


Fig. 4. Amplitude distribution obtained from the seismograms in Fig. 3 at 0.5 Hz. The broken line is a theoretical one of the fundamental mode.

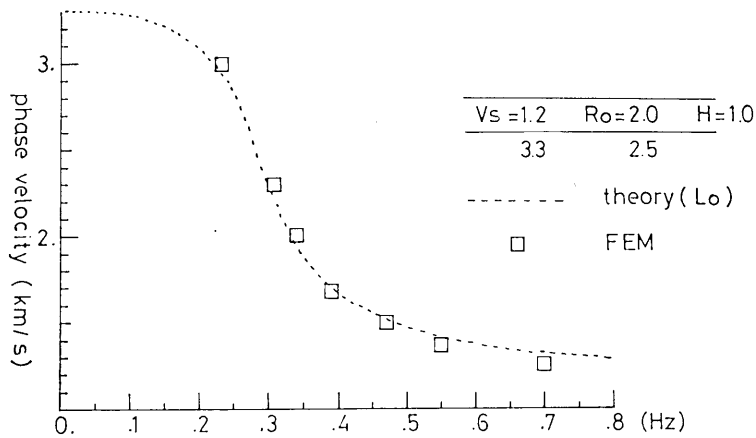


Fig. 5. Dispersion curve obtained by the Fourier analysis of the seismograms. The broken line is a theoretical one of the fundamental mode.

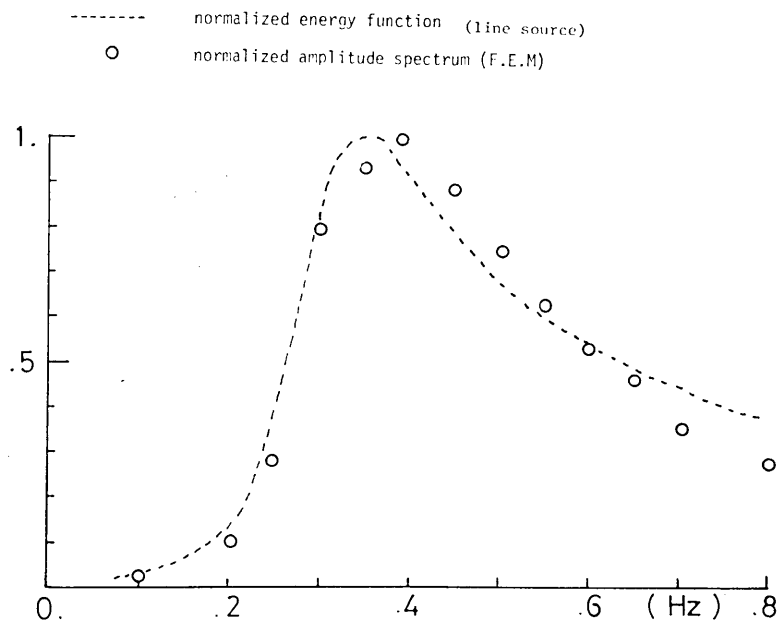


Fig. 6. Comparison of characteristics of the amplitude between the F.E.M. solutions and the theoretical ones (broken line).

3. 鉛直・傾斜不連続境界面のある場合

鉛直境界を介して固有関数が相似の場合、その様な条件を設けない一般の場合、及び境界面が傾斜している場合について議論する。ここでの目的は Love 波が境界面に入射した時の境界近傍での振動特性を明らかにする事である。鉛直境界が存在する場合の Love 波の伝播の問題に対して幾つかの研究がある (HIGUCHI 1930; R. SATO 1961; ALSOP, 1966)

LOVE WAVE-ATTENUATION-

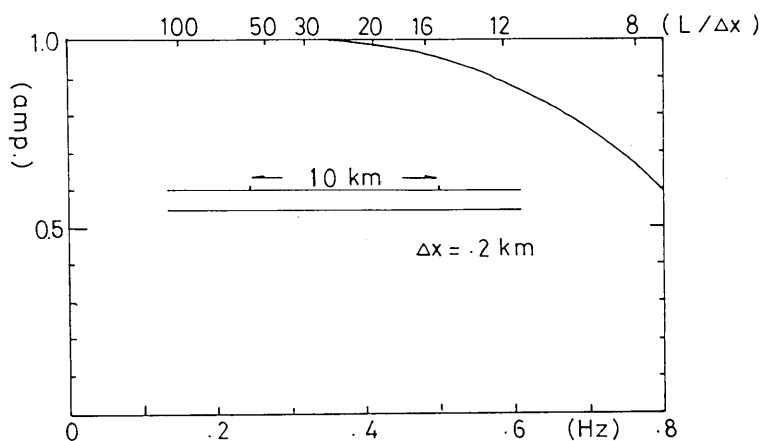


Fig. 7. Spectral ratio of the seismograms at the epicentral distance 8 km to the one at 18 km. Unit of the abscissa is the number of elements per wavelength.

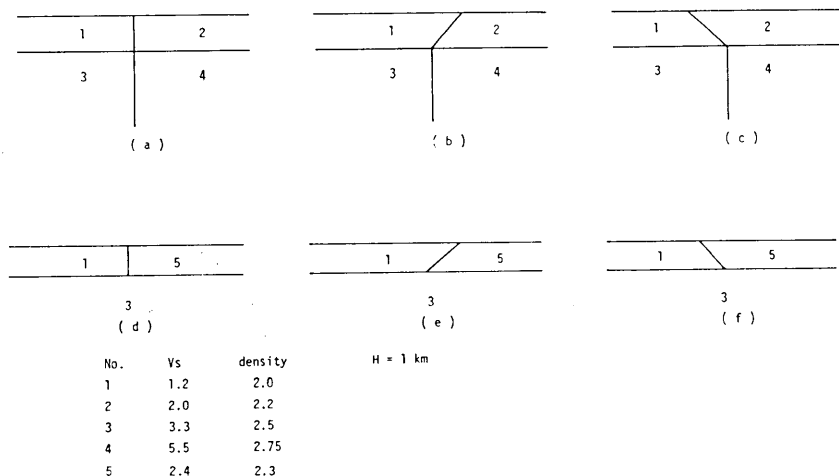


Fig. 8. Schematic models illustrating problems of Love waves propagating across a discontinuity. Upper: eigenfunctions on either side of the boundary are similar to each other. Lower: not similar. a., b. and c are the slant angles of the discontinuity 90°, 45°, and 135°, respectively.

がこれらの諸研究に於いては境界面に入射した Love 波が直ちに新しい Love 波を形成する事を暗に仮定しており、境界からの散乱波の影響を考慮していない。有限要素法は境界に関する仮定を一切含まず現実に波が生成し、伝播していく状態を表現できる方法であるから、境界で発生するであろう実体波も当然表現する筈であり、境界付近の地震動特性をより明確に把握できる事が期待される。

a) 固有関数が相似の場合

Fig. 8-a に示したモデルで Love 波を発生させる。得られた記象を Fig. 9 に示す。反射 Love 波が出現し、透過 Love 波は入射 Love 波より振幅が小さくなっており、分散性も顕著になっている。境界上での記象と境界のない場合の同地点での記象のスペクトル比をもって便宜的に透過係数とし、SATO (1961) の解と比較したものが Fig. 10 である。横軸として周波数の他に入射側の地下構造の層厚 (H) と波長 (L) との比も与えてある。結果は 0.7 Hz 付近までは良い一致をみる。これはこの周波数までは Love 波の振幅が大きいこと (Fig. 6 参照)、境界を介して固有関数が相似形である事から実体波が出現しにくいことによるとと思われる。0.7~0.8 Hz ではスペクトル比は SATO の解よりも大きく散乱波の影響が現われている。

次に Love 波の進行方向に対し 45° , 135° の傾斜をもつ境界面が存在する場合 (Figs. 8-b, c) について検討する。このような境界条件に対しては解析解は得られておらず興味深い問題である。Figs. 11-a, b は各々の場合の記象を示すもので、Fig. 9 とは等しい source function, スケールで描かれており、三者を比較する事により相違が直接確認できる。反射 Love 波は傾斜角が 45° の時、その振幅は大きく、透過 Love 波は当然の事ながら小さい。Fig. 12 は鉛直境界の場合と全く同じ方法で得られたスペクトル比を示しており、比較のために SATO の方法による鉛直境界に対する解を破線で示してある。明らかに 45° の場合に小さく記象から得た結論を支持する。

(b) 一般の場合

境界を介して固有関数が相似形でない一般の場合について ALSOP (1966) はエネルギー

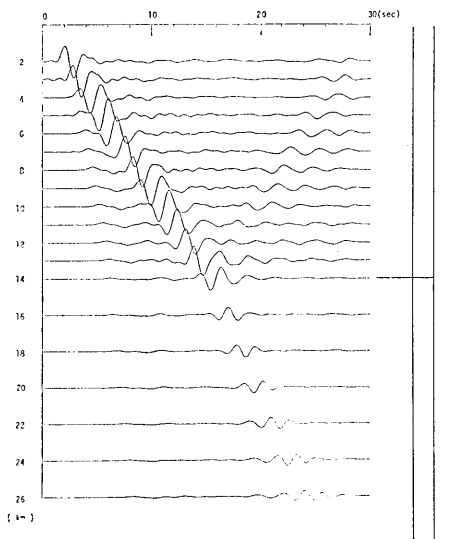


Fig. 9. Calculated waveforms for Fig. 8-a.

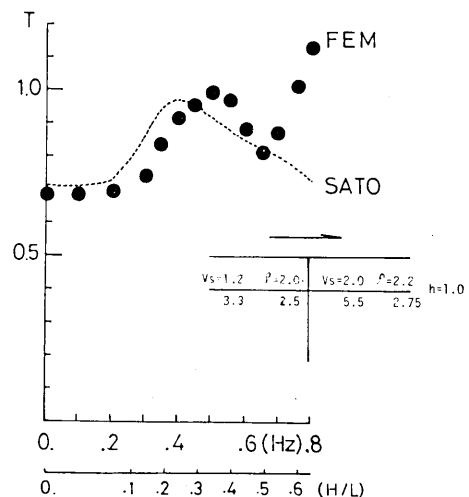


Fig. 10. Spectral ratio of the seismograms at the vertical discontinuity to one at the same distance for the horizontal layer. The broken line is the solution by the Sato's method.

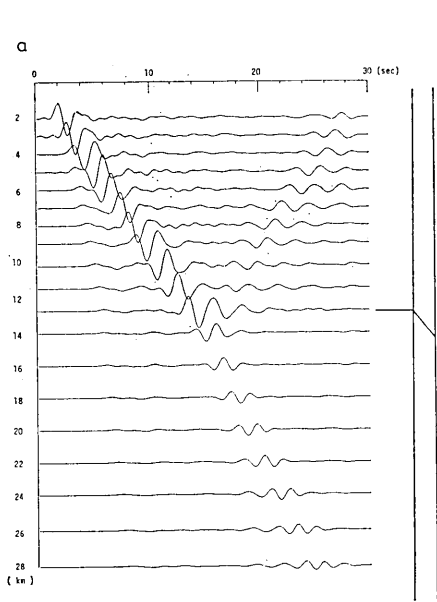


Fig. 11-a. Calculated waveforms for Fig. 8-b.

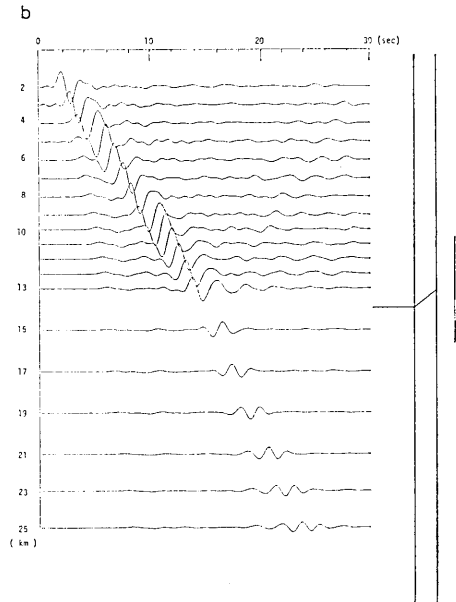


Fig. 11-b. Calculated waveforms for Fig. 8-c.

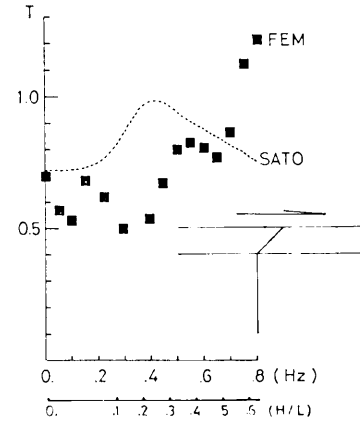
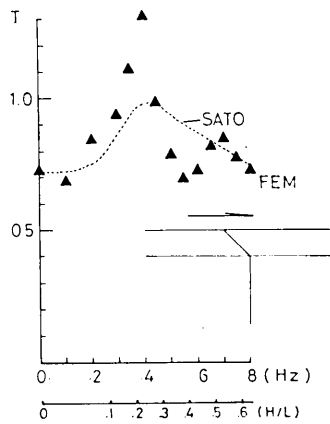


Fig. 12. Spectral ratios for the inclined boundaries. The result by Sato's method for a vertical boundary is also shown as reference by the broken line.

取支がうまくなされる様に反射・透過係数を求める方法を提出している。ここでは有限要素解との比較にこの方法を用いた。Fig. 8-d のような下層が等しく表層だけが異なる場合について解析した。得られた記象を Fig. 13 に示す。また不連続境界面が 45° 、 135° の場合 (Figs. 8-e, f) に対する記象を Figs. 14-a, b に示す。これらの図から反射 Love 波の振幅は傾斜角が小さくなるにつれ大きくなる事が認められ、(a) と全く同様の結論を得る。各々の境界上におけるスペクトル比及び垂直境界に対して境界からある程度離れた

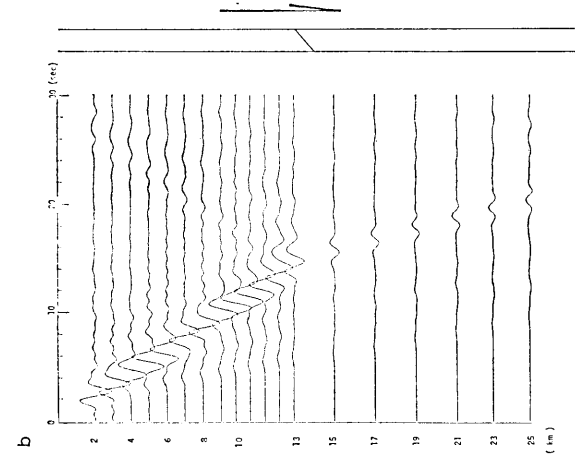


Fig. 13. Calculated waveforms for Fig. 8-d.

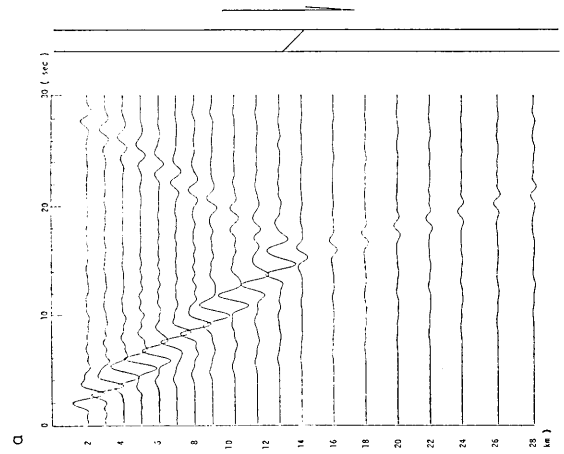


Fig. 14-a. Calculated waveforms for Fig. 8-e.

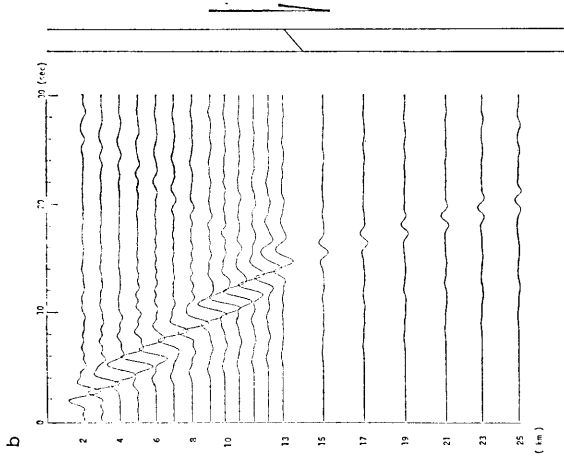


Fig. 14-b. Calculated waveforms for Fig. 8-f.

地点でのそれを Fig. 15 に示す. ここに三角, 四角は $45^\circ, 135^\circ$, 黒丸は 90° の境界上
 白丸は離れた所でのスペクトル比を表わしている. また破線は ALSOP の方法による透過
 係数である. このモデルの場合, 境界を介して両側の固有関数が異なるため, ALSOP の
 “not accounted energy” が大きくなる. 境界上では ALSOP の方法による値より三者とも
 大きく, 実体波が多く混入している事が認められる. この実体波が, 距離減衰, 有限要素
 解に伴なう内的粘性を受けて, 振幅が小さくなる点に於ては (図中白丸) 比較的破線に一
 致している. 境界上でのスペクトル比は (a) の場合と同様の傾向がみられるが, この場合

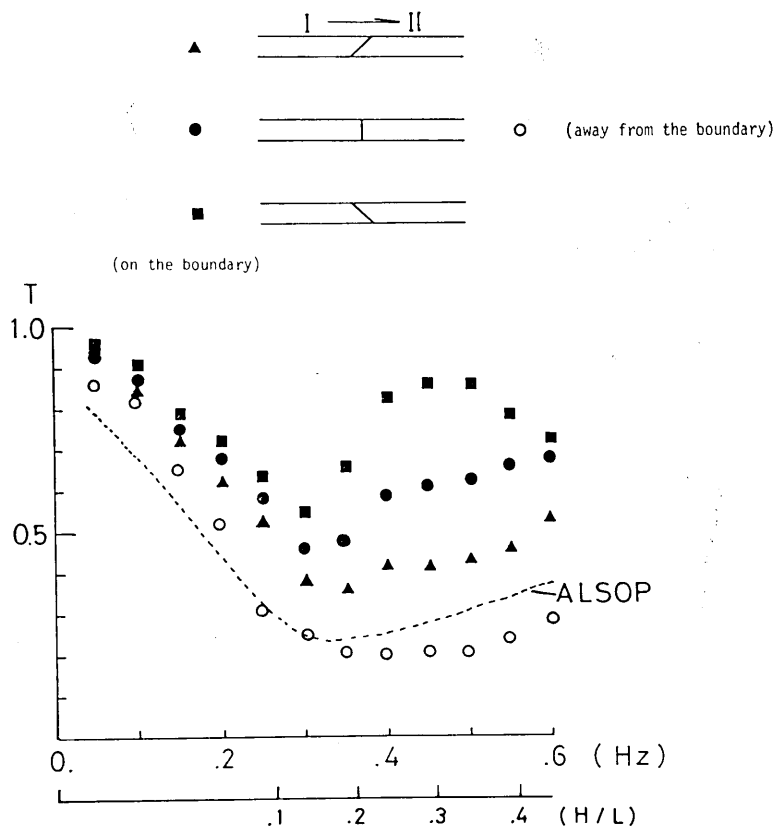


Fig. 15. Spectral ratios for three boundary conditions shown in Figs. 8-d, e, and f. The broken line is the result estimated by Alsop's method for a vertical boundary. The open circles are spectral ratios of the seismograms at points far from a vertical boundary.

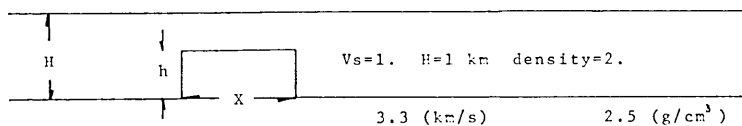


Fig. 16. Geometry of the problem of Love wave propagating through the structure having a convexity.

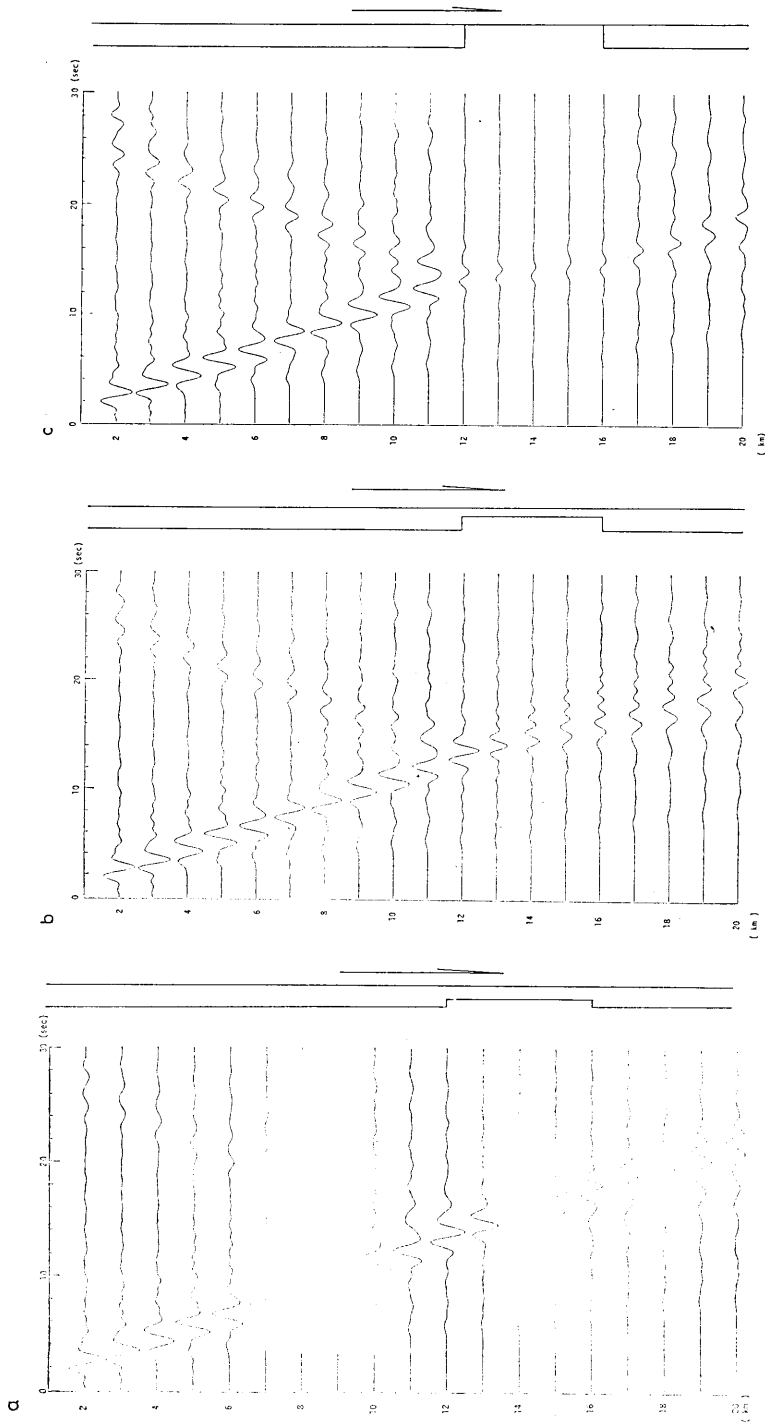


Fig. 17. Waveforms at selected sites.
 a: $h/H=0.4$ b: $h/H=0.6$ c: $h/H=1.0$.

周期によっては ALSOP の方法による値より2倍程度大きくなる場所があり、境界近傍では散乱波の影響を無視できない事がわかる。又傾斜角 135° の場合には鉛直境界の場合に比し、透過波は最大約 40%, 45° の場合、反射波は約 40% 大きい事がいえ、傾斜した不連続境界近傍での地震動については一層の注意が必要であろう。

4. 凸構造を有する場合の Love 波

Fig. 16 のような地下構造を考える。この様な構造としては北米の太平洋側の Berkely 付近から Colorado Plateau, Golden に至る地下構造が挙げられる(STIFLER *et al.*, 1977)。この構造に対する Love 波の伝播の問題は、2つの垂直境界がある場合の例としてもみる事ができる。凸構造が層厚に比し小さい場合について、MAL and HERRERA (1965) は摂動法を用いて Love 波の散乱を議論しているが、ここではその様な制限は設けない。 $h/H = 0.4, 0.6, 1.0, X/H = 4.0$ について検討する。ここで $h/H = 1.0$ は凸部が露出している場合を示す。各々の h/H に対する記象を Figs. 17-a~c に示してある。また各記象の右側には用いた構造モデルの概略を示してある。この記象の振幅に対するスケールは等しくとってあるから、 h の大きさによる影響度をみる事が可能となる。明らかに h の大きい程反射 Love 波が大きく出現し、逆に透過波の振幅は小さい。Fig. 17-c の場合、即ち凸部が露出している場合には、 $\Delta = 16$ km 以遠で再び Love 波が形成されていく過程がみられる。この場合入射した Love 波は、凸部を Love 波として伝播できないから ALSOP の方法を用いる事ができず、境界条件に何ら仮定を必要としない有限要素法の威力が発揮された問題といえる。Fig. 18 に平行層の等震央距離に対するスペクトル比を示した。(a)~(e) は各々図中右下に描かれている凸構造との位置関係を示している。また実線、破線、点線はそれぞれ $h/H = 0.4, 0.6, 1.0$ に相当する。横軸は凸構造の幅 (X) を波長 (L) で除したものを単位としてある。この図は各点での近似的な透過係数を表現すると考えられ、

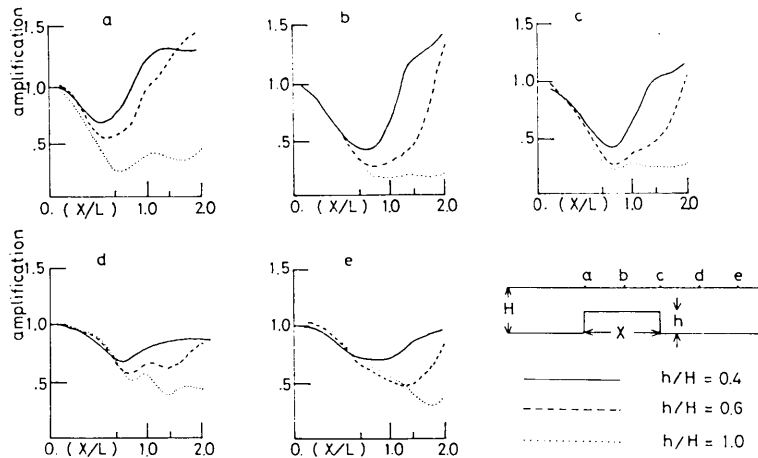


Fig. 18. Spectral ratios of the seismograms shown in Fig. 17 to those for the horizontal layer. Dimensionless frequency is given by the ratio of the length of the convexity to wavelength. a to e indicate the relation of the positions to the convexity as shown at the lower right.

次の事がいえる。

- i) h が小さい程透過 Love 波の振幅が大きい。
- ii) $X/L \approx 0.5$ 付近までスペクトル比は単調に減少する。
- iii) $h/H = 0.4, 0.6$ の場合の凸構造上では、ほぼ直下の構造に依存したパターンをもつことが、直下の構造を仮定して理論的に得られる amplitude function と比較する事によりわかる。
- iv) $h/H = 1.0$ の場合の凸構造以遠では (c) から (e) へ行くにつれ振幅比は大きくなる傾向にあり、Love 波が形成されていくのが確認できる。この様に下層が露出する場合は現実にもみられ、例えば首都圏の基盤構造の西方測線において高尾付近で基盤が露出している事が指摘されている (嶋他, 1978)。従って地震工学的見地からも、非常に興味深い結果となった。

5. 首都圏の基盤構造に対する Love 波

今まで扱ってきた地下構造モデルは Love 波の特性を知るためのもので現実的でなかった。ここでは地下構造が明らかにされ、比較的複雑な夢の島-高尾、夢の島-堂平測線の地下構造 (嶋他, 1978) に対し、首都圏の震害対策の立場から Love 波の挙動について検

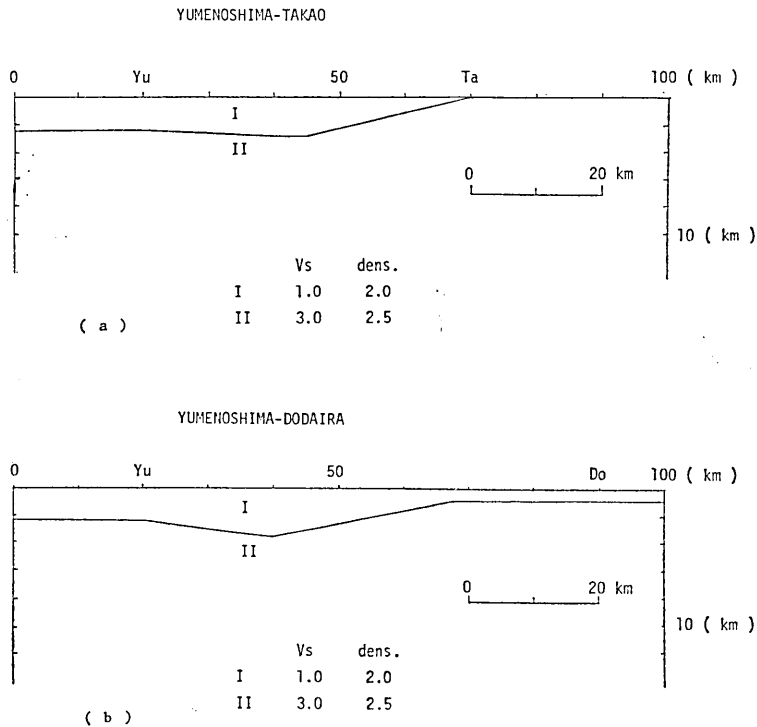


Fig. 19. Schematic models illustrating the underground structures of the Tokyo metropolitan area.

a: a profile from Yumenoshima to Takao.

b: a profile from Yumenoshima to Dodaira.

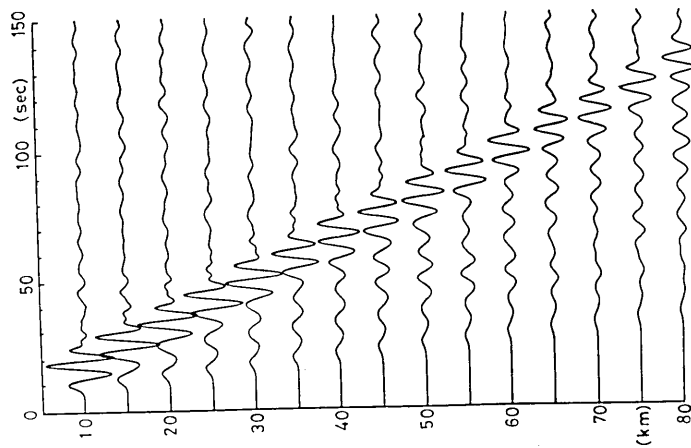


Fig. 20. Calculated seismograms assuming the structure at Yumenoshima.

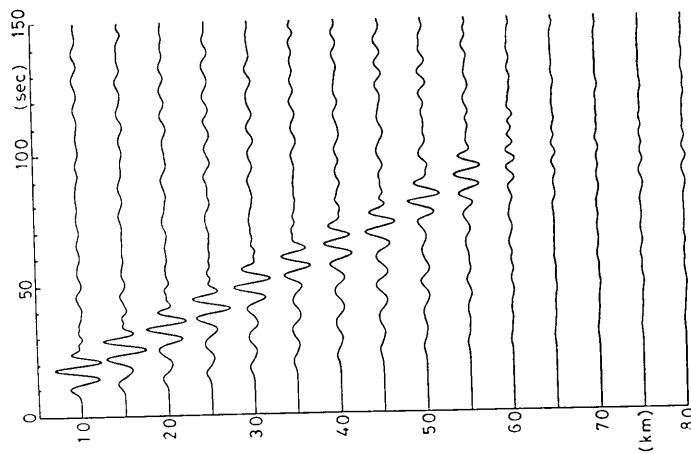


Fig. 21. Seismograms at several points for Fig. 19-a.

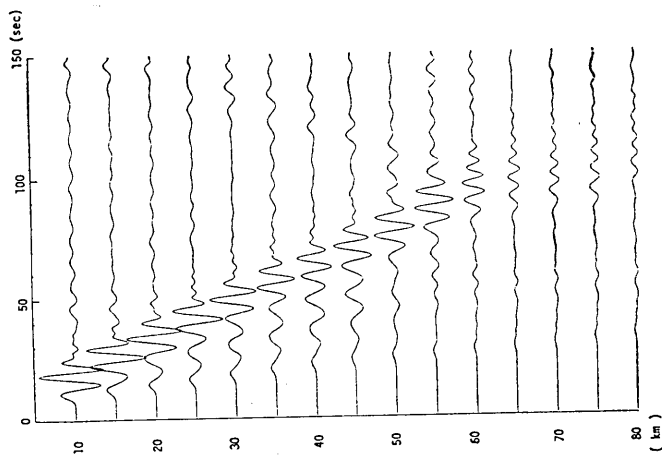


Fig. 22. Seismograms at several points for Fig. 19-b.

討する。Kudo (1978) は発震機構が明らかにされた地震について、首都圏の平均的基盤構造 (嶋他, 1978) を用いて正規モード解により表面波理論記象を求め、実測と比較し良い一致をみた。従ってここでは平均的構造と現実に近い地下構造とどの程度の相違がみられるのかをみる。Figs. 19-a, b に各々の測線に対する有限要素モデルの概略を示す。メッシュサイズは計算機容量の制限から表層で約 400×400 (m²) にし、基盤については約 400×1000 (m²) にとった。従って精度的に満足できる範囲は数秒以上の周期域である。モデル下端までの深さは各々 52.8, 53.6 km であり、この場合も dash-pot を下端に設けた。ここで Yu, Ta, Do は夢の島, 高尾, 堂平を示す。振源下の構造は夢の島直下の構造に等しく、Yu まで 20 km とした。Figs. 19-a, b の表層の最大の厚さは 2.8 km, 3.6 km であり、Yu 直下では 2.4 km である。また高尾付近は基盤が露出しているとし、堂平付近は厚さ 1 km の平行層とした。また問題は2次元であるから各測線に沿った構造が測線に直交する方向に無限に続いているものとしており、更に計算コストを考慮し2層構造とした。

夢の島直下の平均的構造、及び Figs. 19-a, b に示した地下構造モデルに対する記象を Fig. 20, Fig. 21, Fig. 22 に示す。Fig. 21 では明らかに $\Delta=60$ km で振幅が極端に小さくなっている。Fig. 22 では $\Delta=60$ km 付近から短周期、小振幅となっている。またその付近からの反射 Love 波が明瞭にみられる。

平行層の場合との等震央距離におけるスペクトル比を Fig. 23, Fig. 24 に示す。Fig. 23 をみると $\Delta \leq 50$ km では周期 10 秒前後で 1.3 程度、 $\Delta \geq 60$ km では大幅に減衰されている。一方 Fig. 24 では $\Delta=40$ km で周期 15 秒付近で約 2 倍増幅されており、 $\Delta=30, 50$ km で周期 12 秒~14 秒付近で 1.5 倍程度増幅を受け、 $\Delta \geq 60$ km では減衰されている

事がわかる。

結論として首都圏の長大構造物に対する震災対策を考える上で、夢の島—高尾測線については平均的構造を仮定して議論してもそれ程問題はないであろうが、夢の島—堂平測線に対しては夢の島から約 20 km の付近で、周期 15 秒程度の Love 波は平行層を仮定した場合に比し 2 倍の振幅をもち、超大型石油タンクへの影響等を考える際には無視し得ないと思われる。また、高尾付近、堂平付近の振動特性は平行層近似では得られないものである。

6. おわりに

本報では有限要素法を用い、平行層モデルと比較する事により不規則構造が Love 波の特性に及ぼす影響について調べた。ここでは、Love

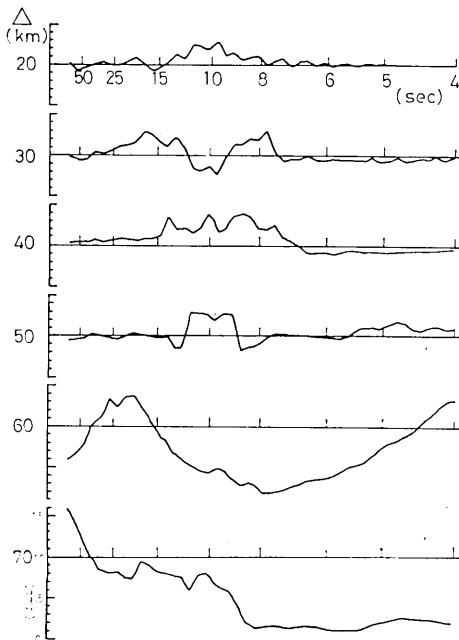


Fig. 23. Spectral ratio of Fig. 21 to Fig. 20.

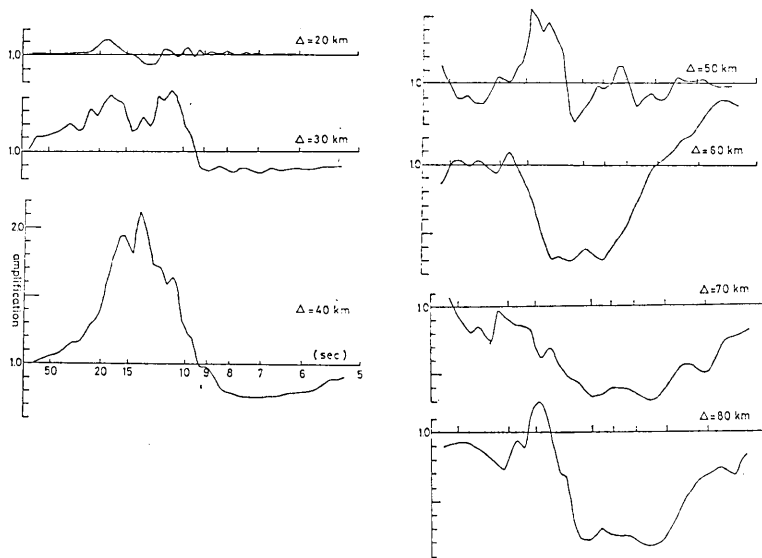


Fig. 24. Spectral ratio of Fig. 22 to Fig. 20.

波の生成は transient excitation によっているため、記象を容易に得る事ができ、実測との関連性をもたせることができた。実際の観測データに対する解釈に於いては、震源から観測点までの地下構造の詳細を得て初めてここで示した様な方法が有効となる訳である。

謝 辞

本稿をまとめるに当たり、地震研究所嶋悦三教授には色々御指導を頂いた。東京大学理学部佐藤良輔教授には多くの点で御教示を賜った。また地震研究所工藤一嘉博士には、正規モード解に基づくプログラムをお借りし、色々議論して頂いた。ここに記して謝意を表します。尚、本稿での計算は東京大学大型計算機センター HITAC 8700/8800, HITAC M-200H によった。

文 献

- ALSOP, L. E., 1966, Transmission and reflection of Love waves at a vertical discontinuity, *J. Geophys. Res.*, **71**, 3969-3984.
- BOORE, D. M., 1970, Love waves in nonuniform wave guides: finite difference calculations, *J. Geophys. Res.*, **75**, 1512-1527.
- BOUCHON, M. and K. AKI, 1977, Discrete wave-number representation of seismic-source wave fields, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **67**, 259-277.
- GHOSH, M. L., 1962, On Love waves across the ocean, *Geophys. J. Roy. astr. Soc.*, **7**, 350-360.
- HIGUCHI, S., 1930, On the propagation of a Love wave along some complex superficial layers of the earth, *Sci. Rep. Tohoku. Univ.*, **1**, 793-800.
- 石井 紘, 山崎謙介, 1973, 傾斜層内におかれた SH 線源による反射波と先駆波の蔽密解, *地震*, **2**, 142-159.
- KUDO, K., 1978, The contribution of Love waves to strong ground motions, *Proc. 2nd. Int. Conf. Microzonation.*, 765-777.

- LYSMER, J. M. and R. L. KUHLEMEYER, 1969, Finite dynamic model for infinite media, *J. Eng. Div., Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, EM, 859-877.
- LYSMER, J. M., 1970, Lumped mass method for Rayleigh waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 60, 89-104.
- LYSMER, J. M. and L. A. DRAKE, 1971, The propagation of Love waves across nonhorizontally layered structures, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 61, 1233-1351.
- MAL, A. K. and I. HERRERA, 1965, Scattering of Love waves by a constriction in the crust, *J. Geophys. Res.*, 70, 5125-5133.
- SATO, R., 1961, Love waves propagated across transitional zone, *Japan. J. Geophys.*, 2, 117-134.
- 嶋 悦三, 1970, 強震地動に見られる表面波成分, 第3回地震工学国内シンポジウム論文集, 277-284.
- 嶋 悦三, 柳沢馬住, 座間信作, 1978, 首都圏の基盤構造, 第5回地震工学国内シンポジウム論文集, 321-328.
- STIFLER, J. F. and B. A. BOLT, 1977, The application of finite elements to wave problems in geophysics, *Comp. Meth. Geophys. Mech., Appl. Mech. Div.*, ASME 25, 1-6.
- TRIFUNAC, M. D. and J. N. BRUNE, 1970, Complexity of energy release during the Imperial Valley, California, earthquake of 1940, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 60, 137-160.
- YAMADA, T. and R. SATO, 1976, SH wave propagation in a medium having step-shaped discontinuity, *J. Phys. Earth.*, 24, 105-130.
- 座間信作, 1981a, 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, 地震研究所彙報, 56, 741-752.
- 座間信作, 1981b, 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.

40. *Behavior of the Elastic Waves Propagating through the Irregular Structures. III. Love Waves Propagating through the Nonhorizontal Structures.*

By Shinsaku ZAMA,

Earthquake Research Institute.

The characteristics of Love waves propagating through the laterally heterogeneous structures were studied using the finite element method.

The waves generated by the transient excitation are identified as Love waves through the waveforms with depth, phase velocity, and amplitude characteristics. On the basis of these verifications, we have treated the following problems.

First, we treated the problem of Love waves propagating the structure with a discontinuity. It was shown from a comparison of both Sato's and Alsop's solutions that the effects of body waves scattered at the vertical continuity are not negligible. In the case of the structure with a slant discontinuity, it was found that the smaller the slant angle of discontinuity the larger the amplitude of reflected Love waves.

Secondly, the problem of Love waves propagating through a structure with a convexity was examined. It was found that the higher a convexity the larger the amplitude of reflected Love waves. The Love waves were formed anew after passing through the outcropped convexity.

Furthermore, we studied the characteristics of Love waves propagating through the structures of the Tokyo metropolitan area from the viewpoint of an earthquake disaster counterplan. The finite element solutions for the models close to the real structures gave about a two-fold amplification at the period about 15 sec in the northern part of the 23 wards of Tokyo in comparison with the solutions assuming the horizontal layers. We are alarmed about the influence of such waves on the huge oil tanks and high rise buildings etc., which may have a longer natural period.

We emphasize from the results of this study that it is very important to investigate the underground structures in detail.