

新潟地震被害地における人為加振による地盤調査

吉川 宗 治・島 通 保・後 藤 典 俊

ON THE EXPLORATION BY USE OF VIBRATOR AT THE DAMAGED AREAS BY NIIGATA EARTHQUAKE

By Sōji YOSHIKAWA, Michiyasu SHIMA and Noritoshi GOTO.

Synopsis

In order to investigate the relations between the earthquake damage and the ground condition, explorations of the ground were carried out by measurements of Love type wave at the damaged areas by Niigata Earthquake. That is, the phase velocity of the Love wave of a suitable wave length was adopted as the parameter which may express combined dynamic characteristics of the upper part of the ground. This wave was generated by the vibrator with unbalanced rotating masses.

For the wave length of ca. 15m the phase velocity at the undamaged area is 1.5 to 2.0 times as large as that at damaged.

1. 序 論

筆者らの「新潟地震被害地の弾性波探査」¹⁾において、P 波およびS波の実体波を用いて、新潟地震被害地の地盤の構造とその動力学的性質、とくにその弾性常数が求められた。その結果を用いて、地盤と構造物の被害状況との関係について、考察が進められている。地表の構造物の基礎としての地盤の耐震性に対して、どの程度の深さまでの地盤が関係してくるか重要な問題となっている。その地盤を構成しているいくつかの個々の地層の厚さや、弾性常数を知ることはもちろん必要であるが、地盤の動力学的な特性は、それらの層の相互作用の結果であるため、個々の層の厚さや、弾性常数の値それ自体では、たゞちに地盤の特性を表示できない。

そこで、ある深さまでの地盤の動力学的な特性を総合的に表示する有効なパラメーターが見つければ、地盤の耐震性を等級づけるのにも非常に便利であろう。レイレイ波、ラヴ波などの表面波の性質は、波長によって、地盤のある深さまでの弾性的な性質によって決まるため（波長の短い表面波は浅い層を、波長の長い表面波は深い層まで）、適当な波長の表面波を選んで、その位相速度その他を調べるならば、地盤の総合的な特性を知ることができるであろう。

調査した地点は Fig. 1 に示されている3つの地点で、それぞれ被害地及び被害を受けなかった地区を選んであり、振動源としては起振機を用いた。

2. 起振機と振動源の特性

波長に依存している表面波の位相速度を各波長に対して測定するためには、振動源として、なるべく広範囲にわたる振動周期をもち、それを自由に変え、定められるようなものが望ましい。普通用いられている爆薬や重錘を用いるよりは、起振機の方が適当と思われる。車輪に偏心荷重を付けた起振機は、かなり広い範

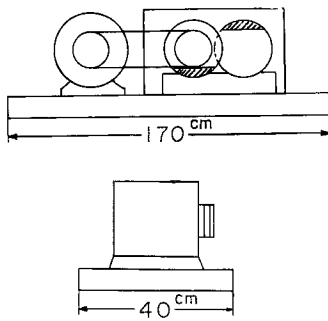


Fig. 2 Vibrator.

の周期の、正弦的な上下振動、又は水平振動を起こすことができる²⁾。

使用した起振機は当研究所機械工作室において製作したもので、Fig. 2 に示されている。起振力は最大 $20\text{kg} \times 10\text{cm}$ である。

今回の調査の対象であった新潟市およびその周辺部の地盤の上層部は殆んど砂

であった。砂は含水率の低い状態では、普通、P波の速度は数百 m/sec. 以下の低い値を示すが、他の条件が同一の下で、含水率が高くなって飽和状態に近くなると、P波の速度は急激に高まり、水の伝播速度と同程度の 1500 m/sec. 以上に達する³⁾。したがって、P波速度そのものは、砂から成る地盤の振動に対する強度を表す量とは見なせない。それに対して、S波の速度は、密度が余り変化しない条件下では、地盤の剛性をよく表すので、今回の調査でもこの方に重点を置くことにし、起振機によってもSH波的な水平方向に振動する剪断的な振動を発生させた。

これまで起振機は、地盤調査に用いられる場合、地盤の固有周期を測定するために使用されることが多かった。このためには、起振機の基礎を地盤にいかによく結合させるか、最も重要な点であるようである。地盤の上層が著しく軟弱であると、振動実験の途中で結合状態が悪化して、満足できる結果が得られない場合も多い。特に水平方向に加振力を加える場合、機械基礎と地盤との結果をよくするため、基礎を地中に埋込んだり、杭を用いて固定すると、起振機では水平方向の力のみ起こしても、地盤には圧縮性の力が働くため、振源で発生する地震波動はSH的なS波の外に、粗密性のP波や、SV的なS波も発生する。特にP波は、比較的小さい圧縮作用によっても容易に発生し、振動源から離れた地点ではレイレイ波も卓越してくる。実際観測されている波形は複雑になっている⁴⁾。又これでは地盤の剛性的な特性を知ることが困難である。

以上の難点をさける方法として、起振機の基礎の底面積をなるべく広くし、重量も大きくとり、又グラウトその他の方法で基礎と地盤との結合を充分なものにすることが考えられる。しかし今回

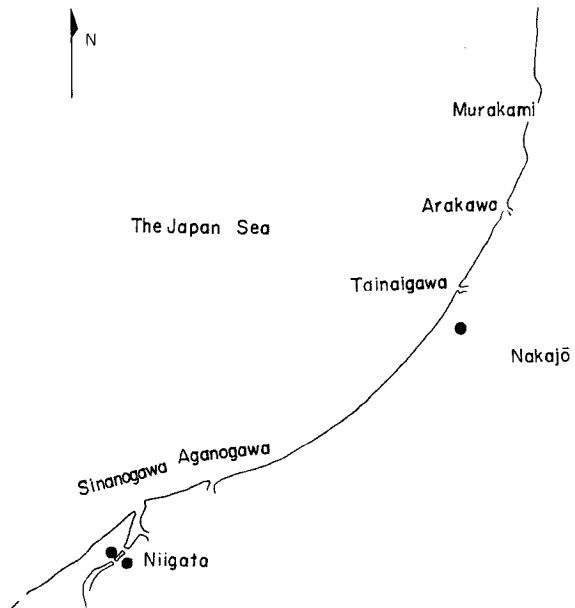


Fig. 1 Locations of observation.

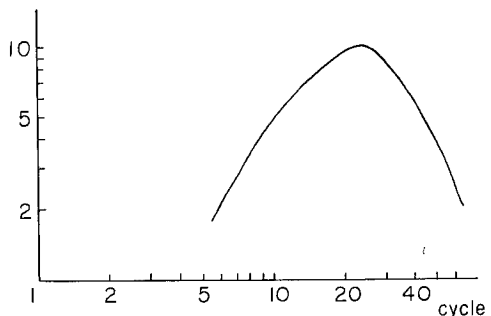


Fig. 3 Frequency characteristics of instrument.

は急いで遠方に出かけたため、グラウトを加えることによって結合を充分なものにすることができなかった。結合の完全であることを要する地盤の固有周期を求めることは止めた。地面との結合は不充分でも、基礎の下に地面に剪断的な力のみが加わるようにして、ラブ波のみを発生させ、その位相速度を求め、それと地盤の剛性とを関係づけた。

筆者らは、厚さ 10 cm、長さ 170 cm、幅 80 cm の鉄筋コンクリートの板を起振機の基礎として、水平にならした地面に置き、起振機を駆動させる時は、2, 3 名コンクリート板の上に上って圧力が増すようにし、地面との摩擦力によって地面と結合させた。もちろん、コンクリートベースの底面積、重量は大きい程よいが、運搬の便を考えて以上のものにせざるを得なかった。又セメントグラウトによる方法もとれなかったた

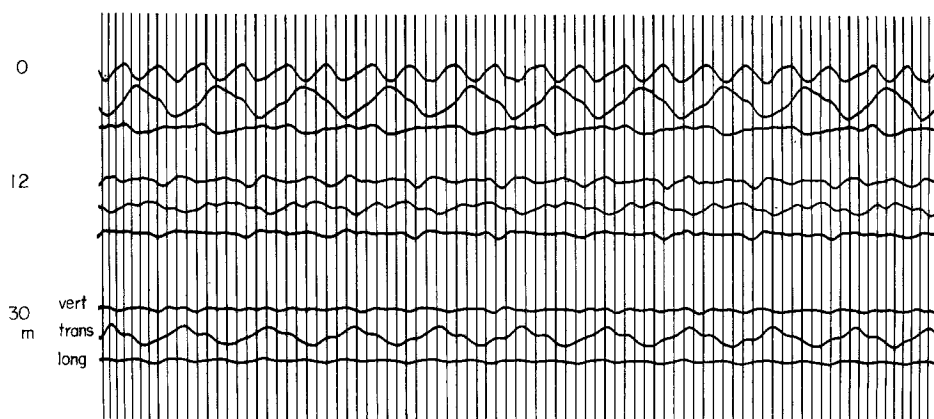


Fig. 4 Sample seismogram of three components.

め、結合力は不充分で、地面との間で振動時スリップしがちであって、強い波は発生させることはできなかったが、Fig. 4 に示されているように比較的単一周期の正弦波形を得ることができ、位相速度を追跡することが可能となった。

3. 測定の方法と結果

測定に使用した機器は 23 cps の NEC プックアップおよび ETL 12 成分の低周波増巾器で、電磁オシログラフに記録させた。増巾器では high cut filter をかけたが、その際の測定器全体の周波数特性は Fig. 3 の通りである。

まず、起振機によってコンクリートベースの長軸方向に、水平に加振されたベースから発生する波動の

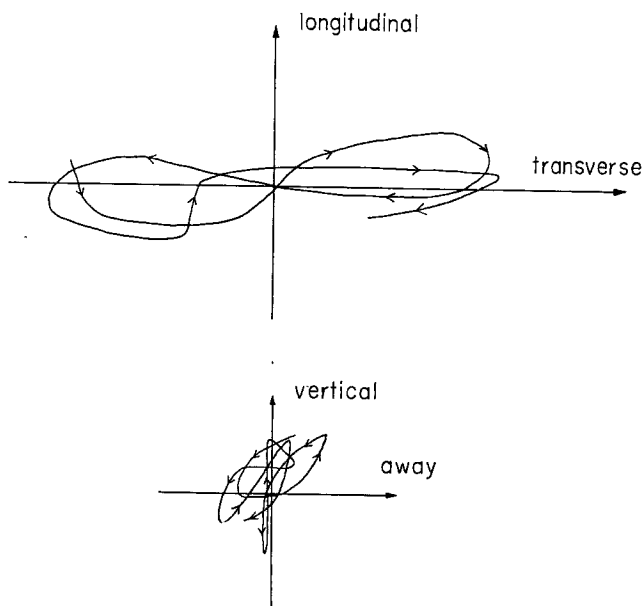
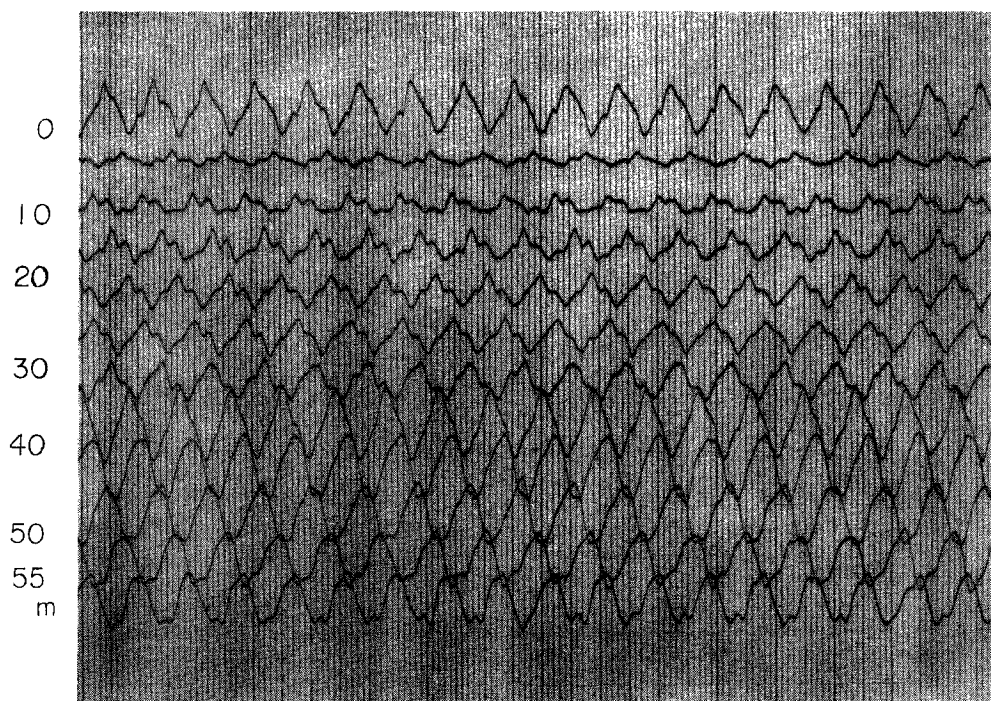


Fig. 5 Loci of oscillation at 30 m from origin.

Muramatsuhama-sandhill



Kawagishichō

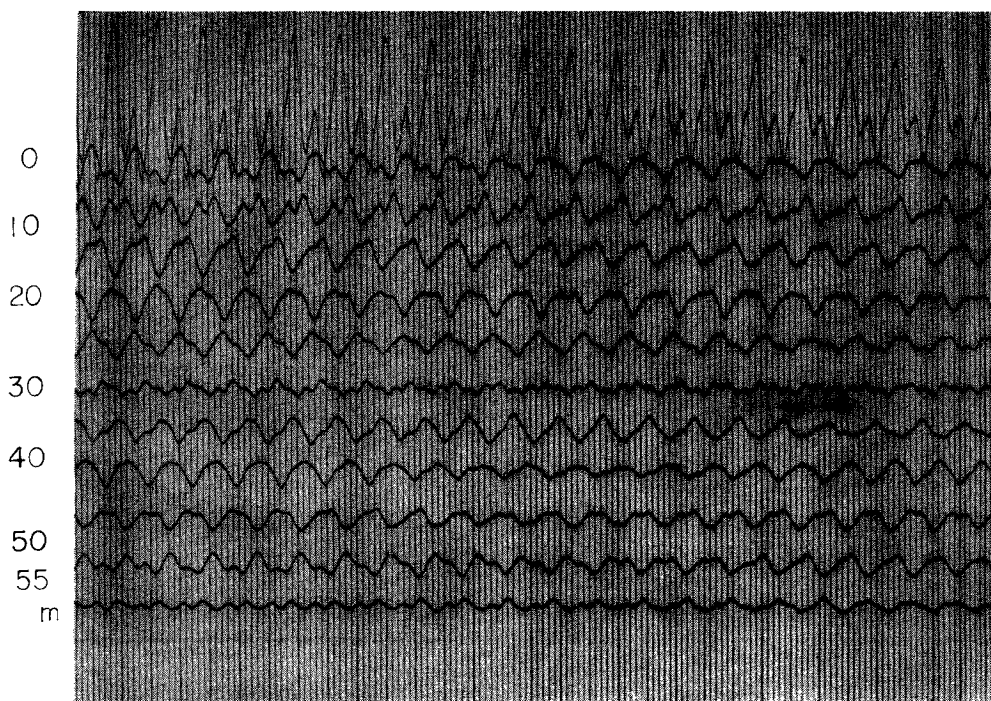


Fig. 6 Sample seismograms of transversal component from oscillations recorded at Muramatsuhama-sandhill and Kawagishi-cho.

mode を調べるため、村松浜において、ピックアップ3成分を、それぞれ、加振点、12 m 地点、30 m 地点の3ヶ所に置き、記録をとった結果は Fig. 4 に示されている通りであって、30 m 地点の振動の軌跡を描いたのが Fig. 5 に示されている。この軌跡から、30 m 地点ではほぼ定常な振動となっており、ほとんど水平成分のみの剪断的な mode の波が伝播していることがわかる。色々の周波数の波に対してその位相速度を調べた結果、分散していることがわかった。その結果、この波をラブ波とみなした。3点とも弱い上下動成分がみられ、その周波数は水平動の2倍である。これは、起振機に2次的なモーメントの力が発生して、ベースがロッキング運動を起こし、水平加振1周期の間に、地面をベースの右端と左端でそれぞれ一回づつ圧縮するために起こる、弱いレイレイ形の表面波であるが、振動の軌跡からもわかるように、ラブ波形を追跡する際余り支障にはならない。

以上で、起振機によって起こされる波の特性が明らかにされたので、ピックアップ12ヶを55 m の測線に5 m 間隔に、直角に、水平に埋込んで、剪断的な成分が記録できるようにした。

実体波による地震探査の実施地点で行なう予定であったが、交流電源の利用できる地点に限られたため、次の3地点で実施した。

- A: 村松浜小学校(砂丘地帯)
- B: 川岸町県営アパート付近(旧河川敷埋立地)
- C: 昭和大橋右岸(旧河川敷埋立地)

一応、被害地(B,C)および被害を受けなかった地点(A)を選んである。

電磁オシログラフによる記録の例として、A地点、B地点のものが Fig. 6 に示されている。

ラブ波の波長は10 m 前後にわたるものであるから、振動源から30 m 以遠では、ほぼ表面波が形成されたときとみなし、その区間においてラブ波の位相速度を求めた。実際に用いた起振機の振動の周波数範囲は9~15 cps程度であって、予定していた範囲に

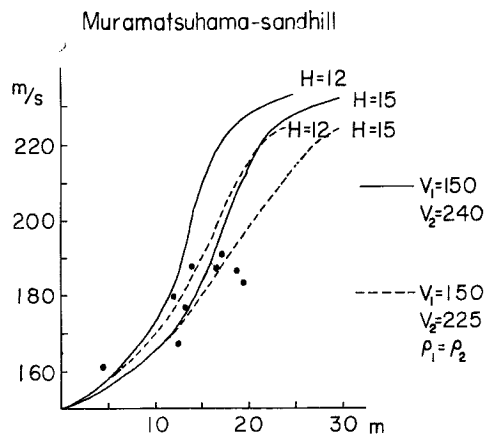


Fig. 7 Observed phase velocities of Love waves compared with theoretical curves.

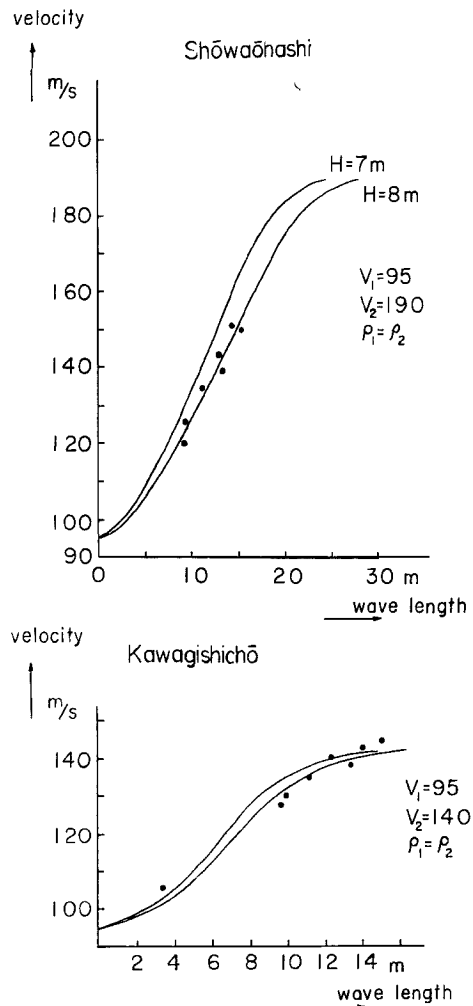


Fig. 8 Observed phase velocities of Love waves compared with theoretical curves.

比して、狭いものしか発生させることができなかった。低周波数の振動では加振力不足で、地盤の微小動と同程度の大きさになり、15 cps 以上ではベースと地面との結合がわるく、起振機自体が激しく揺れ、高くすることができなかった。今後、ベースと地面との結合および起振機に改良を加えていくつもりである。

測定された位相速度は Fig. 7, Fig. 8 に黒丸で示されている。ただしこの中の最短波長の位相速度は板タ、キの実験から得られたものである。

A, B, C いずれの地点でも明らかに分散の傾向を示している。

4. 測定結果の考察と結論

筆者らによって、地震探査の方法で求められた地層の厚さおよび弾性常数は Table 1 に示されているが、それを使って、A, B, C の各地点に対するラブ波の位相速度一波長の理論曲線を、2層構造に対する関係式⁵⁾

$$\tan kH\sqrt{c^2/c_{s1}^2-1}=\frac{\mu_2\sqrt{1-c^2/c_{s2}^2}}{\mu_1\sqrt{c^2/c_{s1}^2-1}}$$

によって数値計算して、2nd mode のものを測定値のグラフの上に描いてみた。ただし、 k は波数、 H は第一層の厚さ、 c は位相速度、 c_{s1} , c_{s2} は第一層、第二層S波の速度で、 μ は剛性率である。又 $\rho_1=\rho_2$ としてある。

Table 1

	Upper layer					Lower layer				
	v_p	v_s	v_p/v_s	σ	μ	v_p	v_s	v_p/v_s	σ	μ
	m/s	m/s			$\times 10^8$ c.g.s.	m/s	m/s			$\times 10^8$ c.g.s.
Kawagishi-chō	240	95	2.5	.405	1.5	1400	140	10	.495	3.3
Shōwa-ōhashi	300	95	3.2	.456	1.5	1500	150	10	.495	3.8
Muramatsuhama-sandhill	250	150	1.7	.235	3.8	1600	240	6.7	.489	9.8

層の厚さ、弾性常数の数値として、Table 1 とは違った値に対しても同時にのせてある。1st mode の理論曲線は測定とは全くあわなかった。

Fig. 7, Fig. 8 からわかるように、測定値に最もよく合うのは、層の厚さが Table 1 の数値より少し大きい場合であるが、大体それと一致しているようである。

1st mode のラブ波が観測されなかった理由として次のことが考えられる。1st mode に対する Airy Phase は、 $v_{s1}/v_{s2}=1.5\sim 2$ の場合、 λ/H が3以上に対して現われることが明らかにされている⁶⁾。2nd mode では λ/H が1～3程度の所に現われる。今回の実験の場合、波長は、 λ/H が2前後であって2nd mode に対応する波が測定されたものと思われる。

又、ラブ波は Fig. 9 に示されているように伝播経路A Bの波と経路A D Eの波との constructive な干渉によって形成される⁵⁾。1st mode と2nd mode とで比べる場合、同一波長のラブ波に対して、角度 θ の大きい方向で1st mode が形成され、 θ が小さい方向では2nd mode が形成される。80 cm の巾のベ-

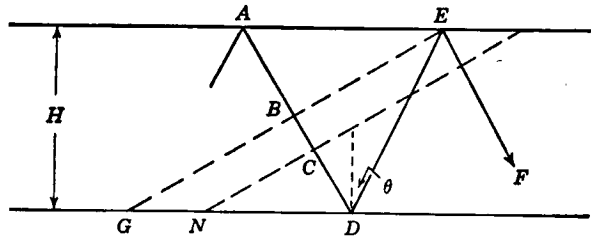


Fig. 9

スによって発生された振源付近のSH波は鉛直下方に指向性をもっている。今回のような余り波長の長いラブ波の場合、水平より下の方に放射された波に対応する 2nd mode が形成され易かったことも考えられる。

実体波を使って出された結果との比較から、起振機を上述のように働かせれば、ほぼ純粋のラブ波が形成されることが明らかになったから、これを地盤の剛性的な強さの測定に使うことは、かなり有効な方法といえる。

Fig. 7, Fig. 8 の分散曲線から、被害のなかったAと、被害地 B,C の位相速度を比較してみると、波長 10~15 m ラブ波の位相速度に関し、A地点は、B,C 地点の1.5~2倍程度であって、深さ 15 m 程度までの地盤の剛性を、総合的に表わしているとみることができよう。

又地盤の構造の複雑な場合、実体波によって決定しようとしても、簡単にいかないことがあるが、その全体的な特性をつかむだけであるなら、ラブ波による以上のようなやり方が有利な場合も多い。

今回は地震直後に実施しようとしたため、起振機の準備が不十分であった。そのため、振動源に色々問題があったが、この方法で最も重要な点は、なるべく純粋な、ひづまない正弦的なSH波を発生させることにあるので、この点今後更に研究を進める積りである。

今回の新潟における調査にあたり、御協力いただいた京都大学工学部後藤研究室の方々、および色々便宜をはかって下さった三井建設新潟出張所長田代氏に対して厚く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 吉川宗治，後藤典俊，島通保：新潟地震被害地の弾性波探査，京都大学防災研究所年報，第8号，1964，掲載予定
- 2) A. Hortwing, et al. : Die Ermittlung der für das Bauwesen Wichtigsten Eigenschaften des Bodens durch Erzwungene Schwingungen, DEGEBO, No. 1, 1933.
- 3) I. S. Berson et al. : Wave Refraction by Aquiferous Sands, Part 1, Bull. Acad. Sci. USSR, Geophys. Ser. No. 1, 1959.
- 4) 地震研究所地盤研究会：東京都地盤調査報，震研集報，第33号，1955，471頁
- 5) M. Ewing et al. : Elastic Waves in Layered Media, 1957, pp. 124.
- 6) K. Kanai : On the Group Velocity of Dispersive Surface Waves, Bull. Earthquake Res. Inst. vol. 29, 1951, pp. 49.