



Title	10. 青森県長泥橋の橋脚の振動測定と地盤調査 (続)
Author(s)	田治米, 鏡二; TAZIME, Kyozi; 吉井, 敏尅 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 21, 133-150
Issue Date	1969-02-15
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.21.133
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/13958
Type	departmental bulletin paper
File Information	21_p133-150.pdf



10. 青森県長泥橋の橋脚の 振動測定と地盤調査 (続)

田治米鏡二・吉井敏尅・五十嵐 亨

(北海道大学理学部地球物理学教室)

— 昭和 43 年 10 月 受理 —

4. 記 録

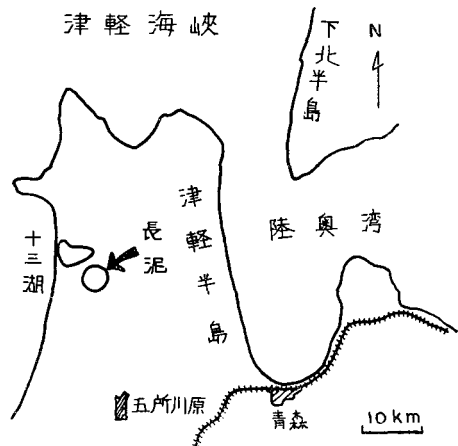
長泥橋が建設される場所は第 7 図に円で囲ってある長泥部落内である。十三湖にそそぐ岩木川をまたいでおり、付辺一帯は沼地である。測定の場合はすでに報告されているとおりである¹⁾。今回はまず、その際に得られた記録を第 8~12 図に示すことにする。各記録の説明は前回の報告に記されているので、重複をさけてここでは省略する。

5. 火薬爆発による表面波の解析

地表 A₁ で得られた変位記録と橋脚の下 B で得られた速度記録とを見ると、初動直後の短周期 (0.12 秒程度) の波群と記録の後部の長周期 (0.6 秒程度) の波群とが顕著である。しかも、長周期の波群はさらに 2 波群に分れているようである。

このように、顕著な 3 波群が観測されることは、小爆発実験の際に、しばしば経験されている²⁾。ゆえに、その例にならい、ここでも、出現時刻の早い波群から順次 II 群、III 群および IV 群と呼ぶことにする。いずれの波群も美事な分散波形を呈しているので、リーキング・モードまたはノルマル・モードとして解釈されよう。

爆発点の深度が 4 m またはそれより小さい場合には、第 8 図と第 9 図の記録 No. 2, No. 3 および No. 8 に見られるごとく、II 群よりも III, IV 群の振幅の方が圧倒的に大きい。しかるに、爆発点の深度が 20 m になると、記録 No. 4 および No. 5 に見られるごとく、II 群は III, IV 群の振幅と同程度の大きさになる。すなわち、爆発点の深度が大きくなると、III, IV 群はたちまち劣勢になるのに反し、II 群はそれ程急激には衰えない。

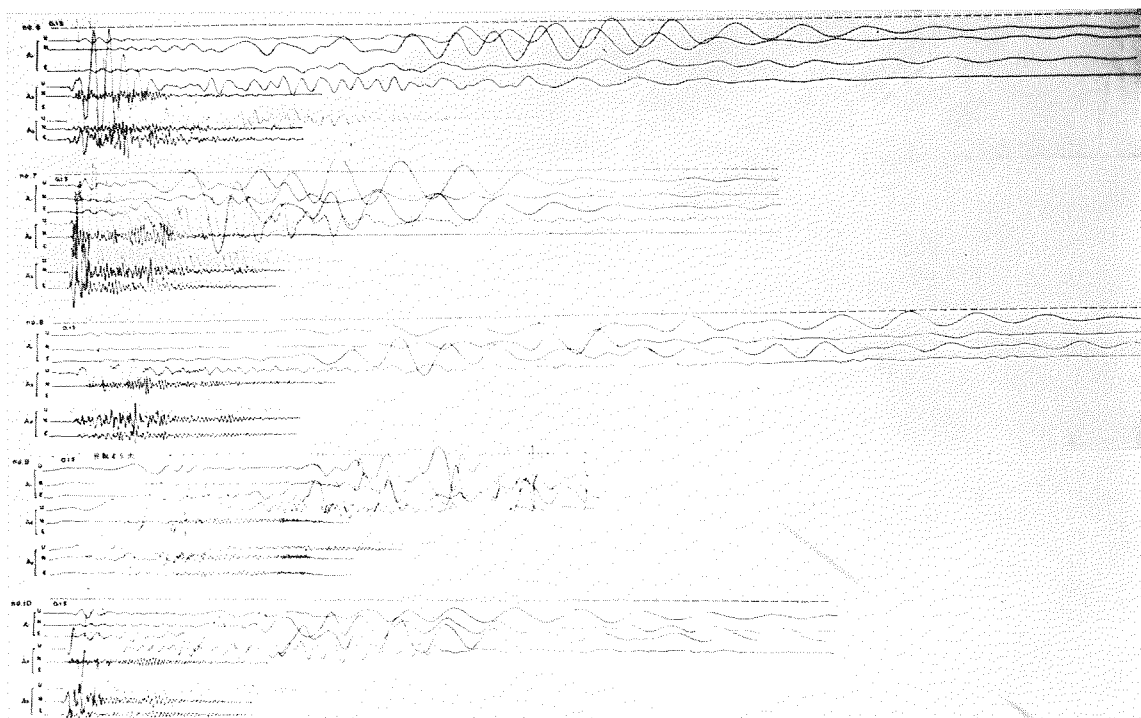
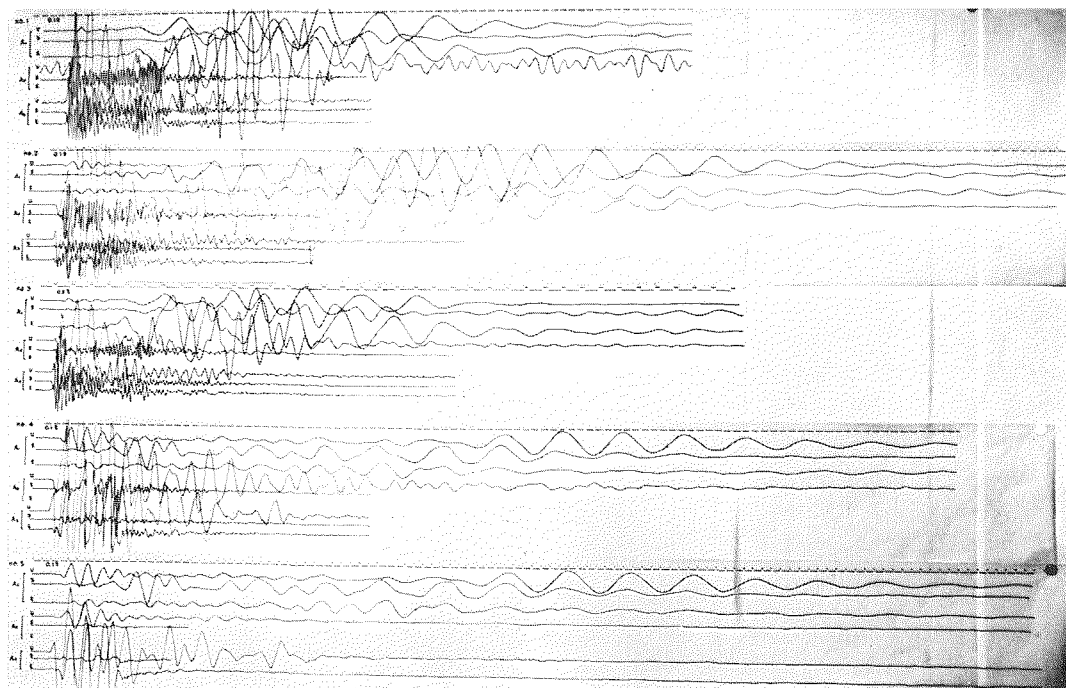


第 7 図 長泥橋の位置

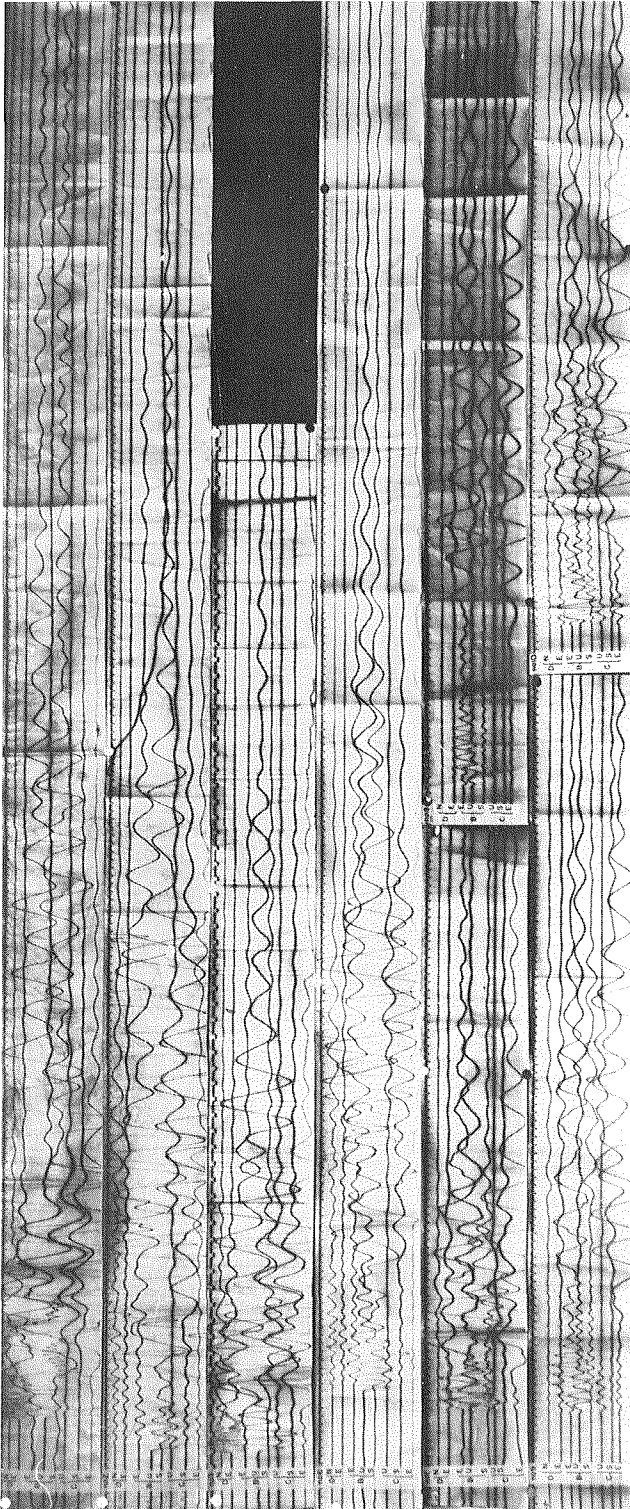
Fig. 7. The location of the bridge of Nagadoro.

1) 田治米鏡二・他；青森県長泥橋の橋脚の振動測定と地盤調査，物理探鉱 (1968)，印刷中。

2) 久保寺章・太田 裕；火薬爆発によって発生する波群，特に II 群について，地震，21 (1968)，97-108。

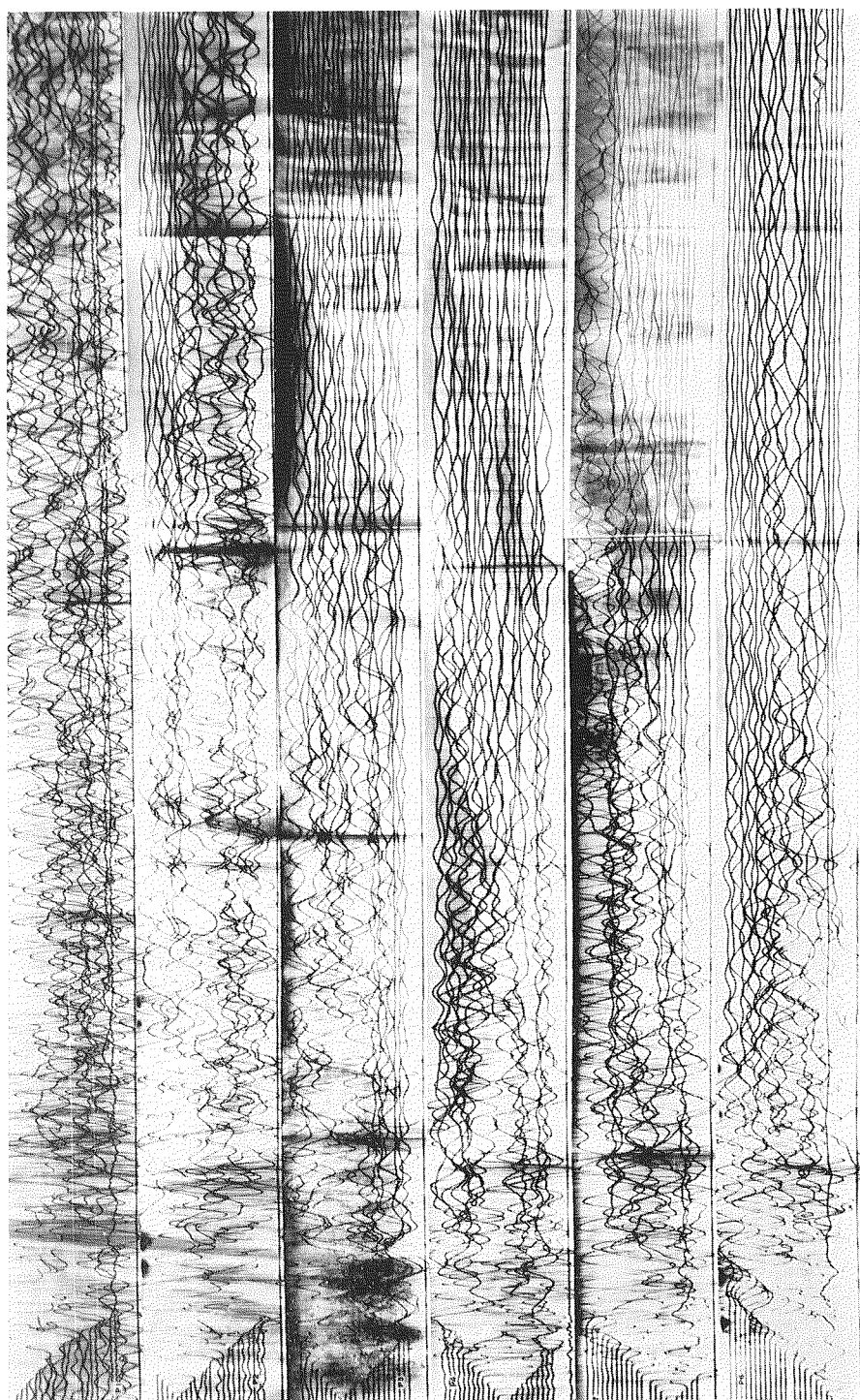


第8図 火薬爆発の際に、 A_1 、 A_2 および A_3 で得られた地動の記録
 Fig. 8. Seismic records obtained at A_1 , A_2 and A_3 , by explosions.



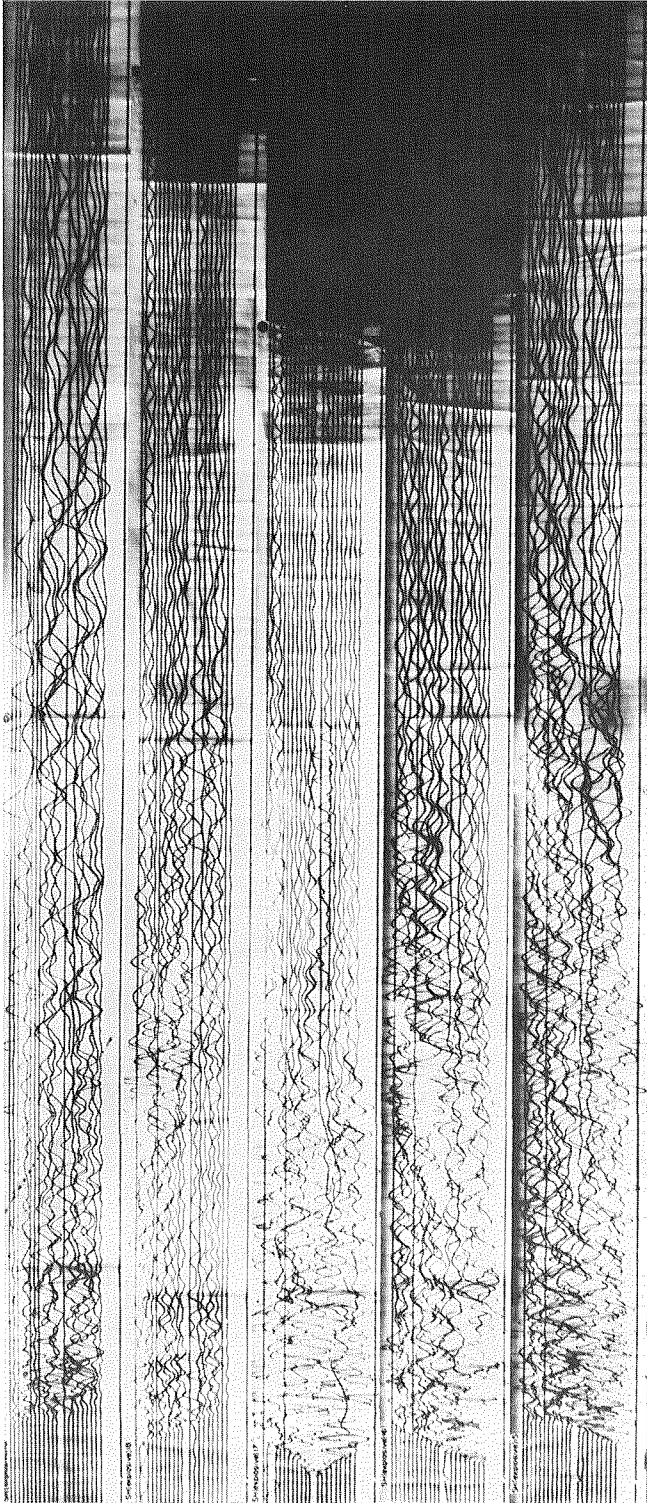
第9図 火薬爆発の際に、B、CおよびDで得られた地動の記録

Fig. 9. Seismic records obtained at B, C and D, by explosions.



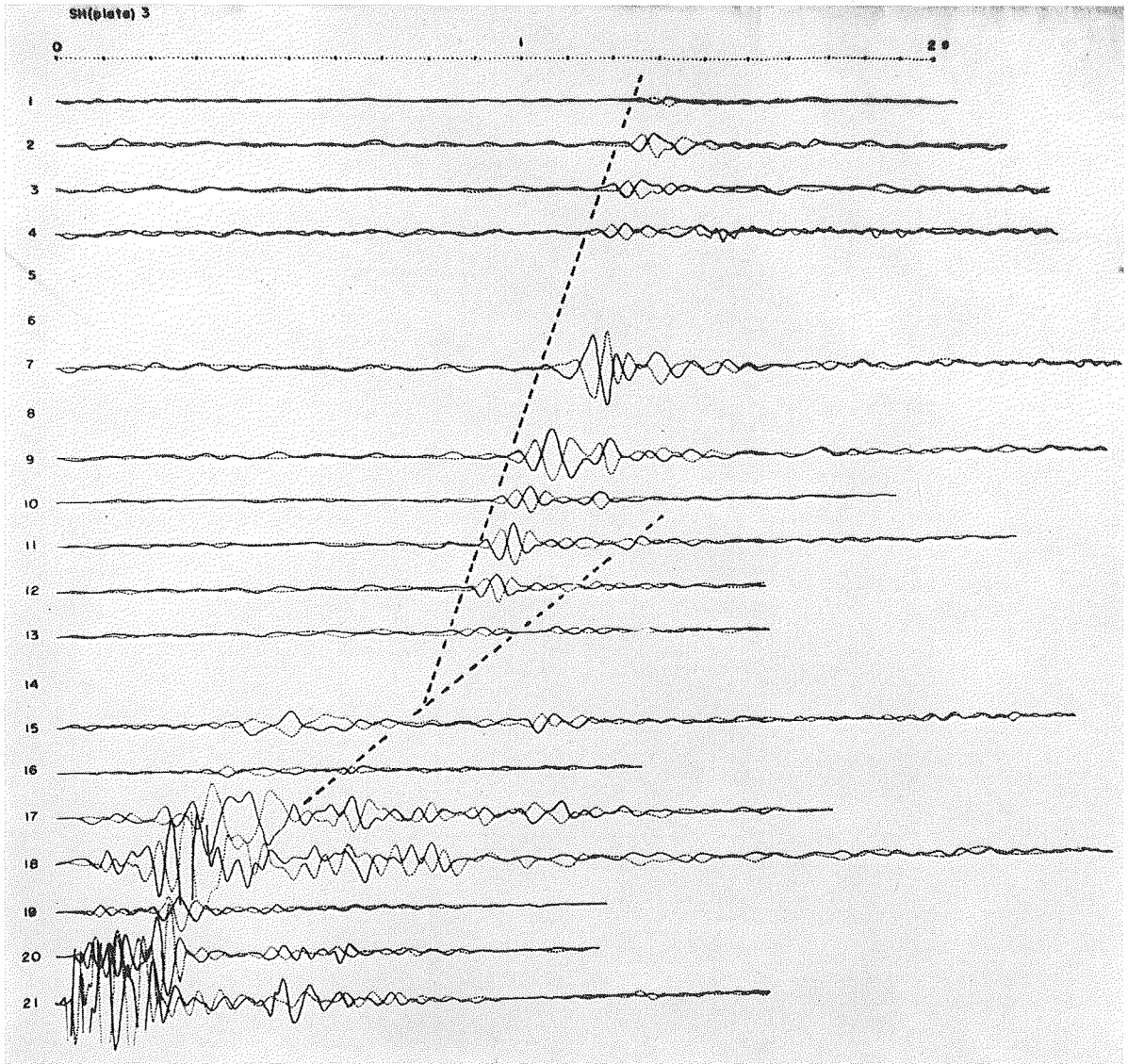
第10図 屈折法の記録

Fig. 10. Records for refraction shootings.



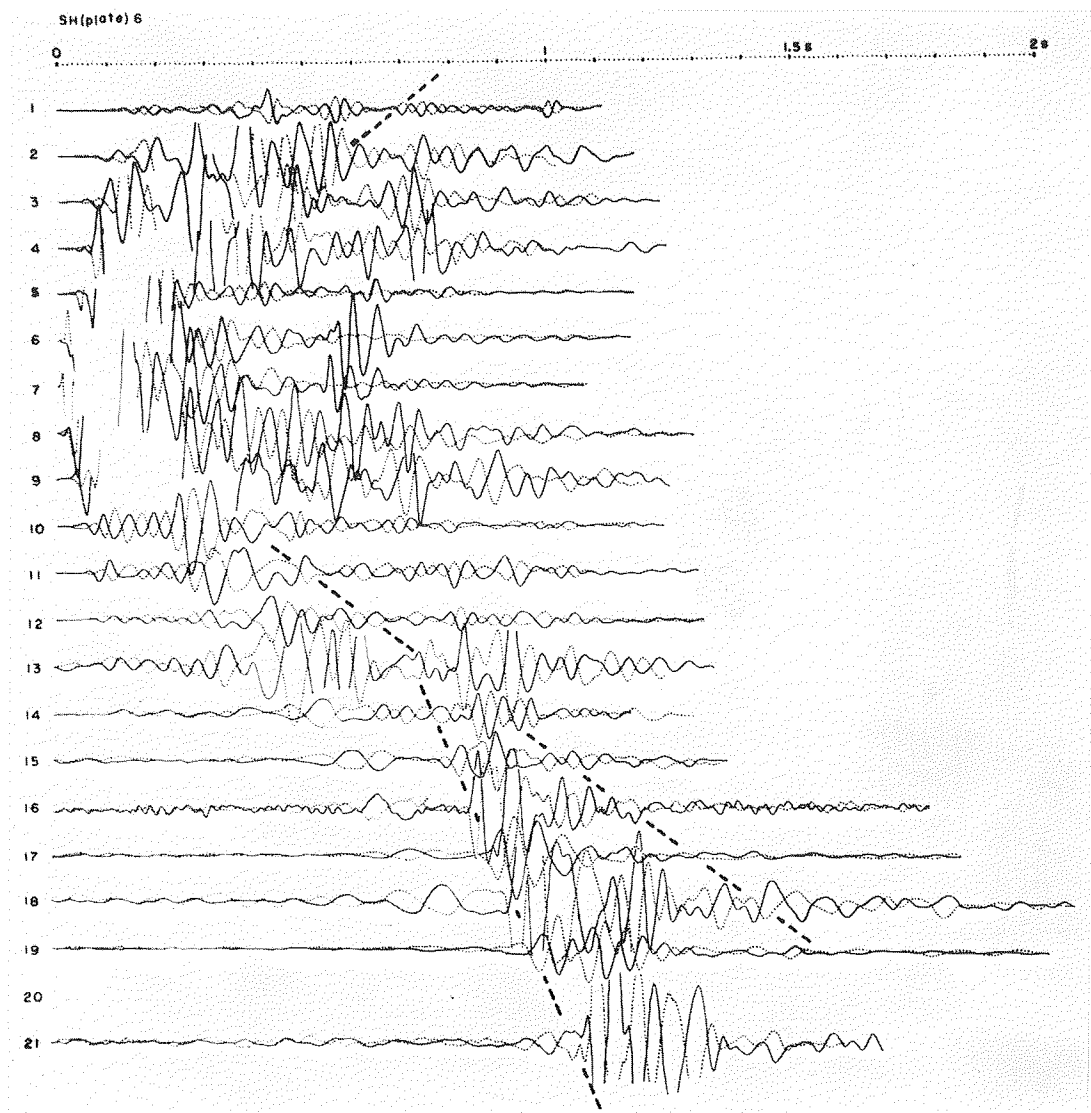
第11図 火薬爆発によるSH波の記録

Fig. 11. Records of the transversal component, by explosions.



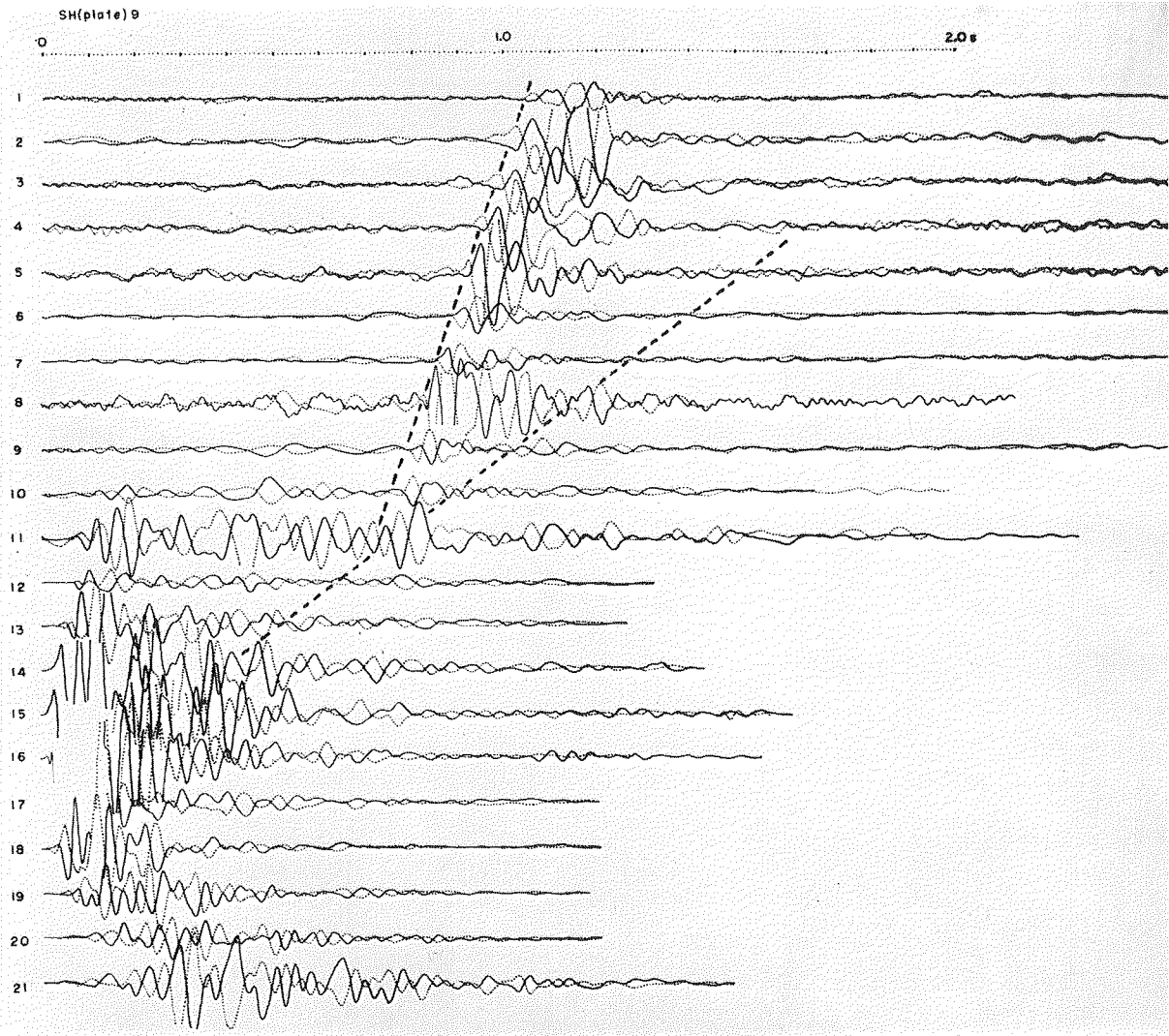
第12図 (a) 板叩きによる SH 波の記録

Fig. 12. (a) Records of the transversal component, by a hammer.



第12図 (b) 板叩きによるSH波の記録

Fig. 12. (b) Records of the transversal component, by a hammer.



第12図(c) 板叩きによるSH波の記録

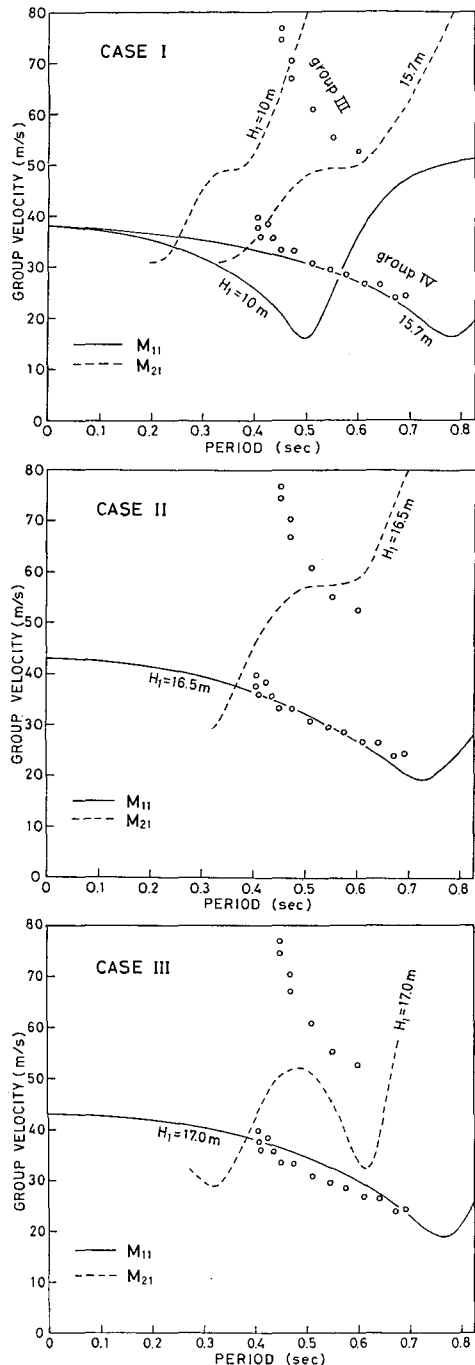
Fig. 12. (c) Records of the transversal component, by a hammer.

第8図の A_1 での記録と第9図の B での記録とから位相速度を算出することには、余りにも大きな誤差が予想される。かと云って、第8図にも第9図にも爆発の時刻が記録されていないので、これらの記録のみから群速度を算出することもできない。

しかるに、初動の走時の測定を狙った第10図の中に、P3のトレース24のごとく、上記の3波群が見られる記録がある。しかも、屈折法の測線は、前報の第1図と第4図とに示されているごとく、 A_1 地点と B 地点との近くを通っている。その上、屈折法 (P波) の記録と A_1 および B で得られた記録とでは同一の爆発点が用いられている。ゆえに、 A_1 および B と大体等しい震央距離の屈折法の記録を参照して、 A_1 および B で得られた記録の爆発の時刻を推定した。群速度は、PEKERIS³⁾ にならい、波群の山谷の走時図を作って算出した。

5.1 III, IV 群 このようにして求めた III, IV 群の群速度が第13図に白丸でプロットされている。

次に、先にも述べたごとき小爆発実験の経験から推察して、IV群を M_{11} 波、III群を M_{21} 波と考え、理論的な分散曲線の試算を行なった。その際に、前報で述べられ、第14図にも示されている P波と S波の地下構造を参考にし、CASE I で $H_1=10$ m の場合をまず計算した。この計算結果は第13図に実線で示されているが、実測値と全然合わない。そこで最表層の厚さ H_1 だけを約 16 m に変えてみると、IV群の方は、図に見られるごとく、実測値とかなりよく合った。



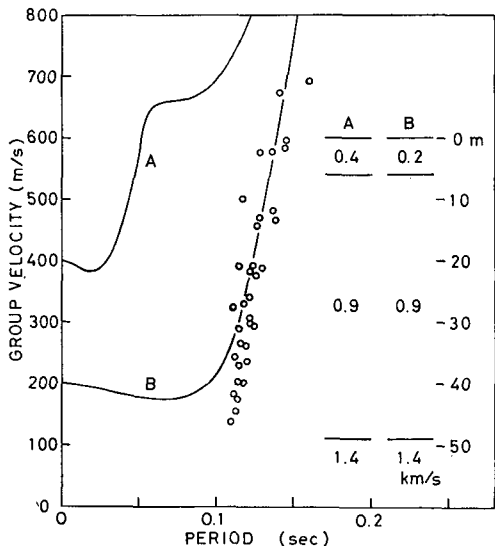
第13図 III群およびIV群の群速度
 Fig. 13. Group velocities of groups III and IV.

3) PEKERIS, C. L.; Theory of Propagation of Explosive Sound in Shallow Water, Geol. Soc. Am. Mem., 27 (1948).

さらに、IV 群の短周期の部分を一層よく合わせるために、CASE II の試算を行なった。IV 群は表層近くの S 波に支配されやすいので、CASE II ではそのことが主として考慮されている。予期したごとく、IV 群の理論値は実測値と一層よく合った。しかし、III 群の方は依然として合わぬ。CASE II では、S 波構造の 0.14 km/s 層の厚さ H_2 が尊重されている。IV 群の分散特性は、最表層 H_1 の性質で大体決められる。これに反し、III 群は下層の性質にも支配される。 M_{11} はこのままで、 M_{21} の理論曲線の弯曲点付近が深い谷になるモデルを与えることができれば、実測と理論との対比が申し分なく行なわれることになる。

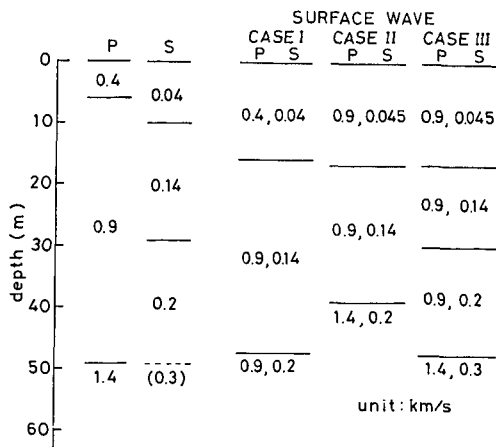
そのことを念頭にして、CASE III の試算を行なった。CASE II の 0.2 km/s 層の下に 0.3 km/s をおくことによって、 M_{21} の分散曲線の谷が深くなり、実測値の逆分散に対応すると思われる部分が現われた。最下層の S 波の速度をさらに大きく 0.4 km/s にしてみると、分散曲線の谷は一層深くなる。ただし、この種の試算では分散曲線の山の高さは余り変わらない。

先にも述べたごとく、 M_{11} の理論的な分散曲線は深部の構造にはほとんど影響されない。



第15図 II 群の群速度

Fig. 15. Group velocities of group II.



第14図 P 波, S 波の地下構造と分散曲線の計算に用いた種々のモデル

Fig. 14. The subsurface structure deduced from P and S refraction shootings and various models used for the calculation of the dispersion curve.

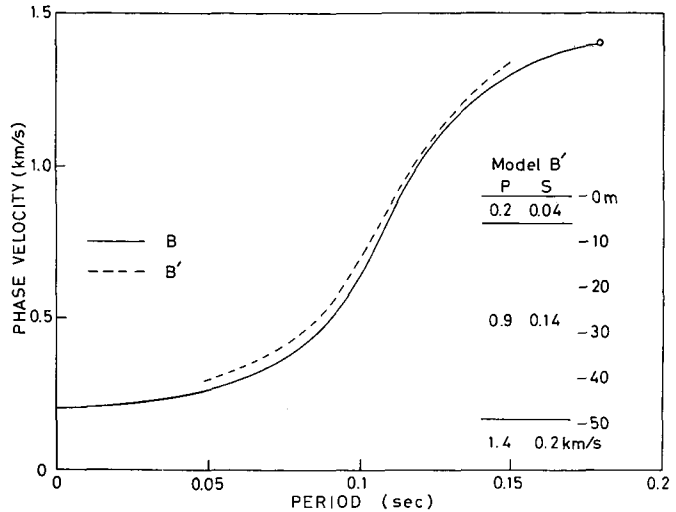
これに反し、 M_{21} の方は深部の構造にも敏感である。深部の構造、すなわち層厚や速度、を種々に変えて試算を続ければ、 M_{11} と M_{21} の両方の実測値に適合する構造を見付けることは可能である。その代り、屈折法による S 波構造からはずれの恐れはある。実は IV 群に比し、III 群の実測値の精度はよくない。ゆえに、いずれの構造をモデルとして選ぶかは、S 波の実測値と III 群の実測値とのいずれの精度が良いかによる。このような問題点があるので、III、IV 群に対する分散曲線の試算は、不満足ながら、CASE III で中止した。

5.2 II 群 III、IV 群と同様な方法で求めた II 群の群速度の実測値は第15図の白

丸のごとくである。一方、近年のモード解の発展的解釈によれば、II群はリーキング・モードと思われる。地層のポアソン比が0.50に近いと、オリバー流のリーキング・モードの近似的分散曲線⁴⁾は圧力波、すなわちP波、のみを考慮した場合のノルマル・モードの分散曲線に近い⁵⁾。先に挙げた久保寺・太田の論文²⁾にも、II群は近似的に圧力波のノルマル・モードと考えられることが述べられている。

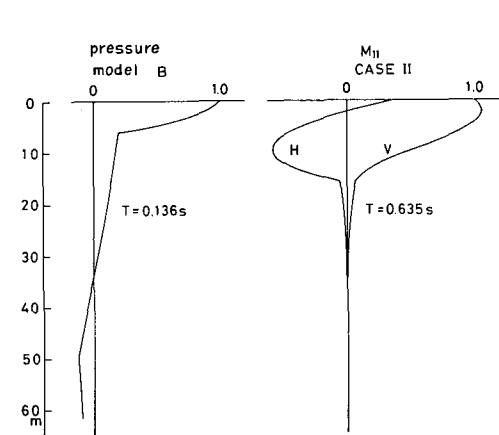
ゆえに、第14図のP波の構造のみを用いて、圧力波のノ

ルマル・モードの群速度分散曲線を試算した。これが第15図の曲線Aである。しかし、実測値との違いが甚だしすぎるので、同図のモデルBを仮定すると、曲線Bが得られ、実測値と大体一致する。それでも、群速度の小さい部分のはずれが大きいのので、第16図に示したときモデルB'を用いてS波をも考慮し、近似解法によるリーキング・モードの分散曲線を試算した。



第16図 圧力波の位相速度と固体波リーキング・モードの位相速度との比較

Fig. 16. Comparison of phase velocity for pressure waves to that for leaking mode of solid waves.



第17図 地中の理論的な振幅分布

Fig. 17. Amplitude distributions deduced theoretically.

た。しかるに、図に見られるごとく、曲線Bと曲線B'の間にはほとんど違いはない。これらの地層モデルでは、II群の群速度の実測値と理論値との差は結局ちぢまらぬ。II群の群速度はP波の速度に大きく支配されるので、S波を考慮しても、この影響はほとんど現われぬらしい。

P波の構造をモデルBからさらに変えて、種々の試算を行なえば、実測値との一致がもっとよい理論的分散曲線が得られるであろう。しかし、モデルAが屈折法によって推定された地下構造なので、これとひどく異な

4) OLIVER, J. and M. MAJOR; Leaking Modes and the PL phase, Bull. Seis. Soc. Am., 50 (1960), 165-180.

5) 吉井敏尙; いくつかの形の leaking mode の性質, 北大地球物理学研究報告, 21 (1969), 117-131.

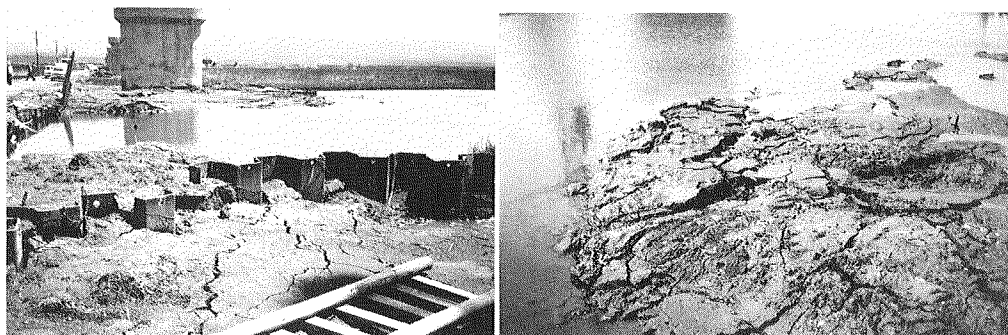
るモデルを採用することはできぬ。ここでは、II 群を、大局的には、III, IV 群が生じたのと同じ地下構造のリーキング・モードと解釈しておく。

5.3 地中の振幅分布 圧力波および M_{11} 波の地中の理論的な振幅分布は第 17 図のごとくなる。下層の影響を見ることを主眼にしたので、実測された波群の周期の中では、それぞれ最大周期に近い位相の振幅分布のみが計算された。この図を見ると、IV 群の大半のエネルギーは最表層 H_1 のみに貯えられている。IV 群の分散特性は最表層の性質だけで決ってしまい、下層の影響を受けないことがこれによっても理解される。これに反し、II 群は深所でもかなりのエネルギーを持つので、深い所までの構造に影響される。

6. 地震による地盤の振動

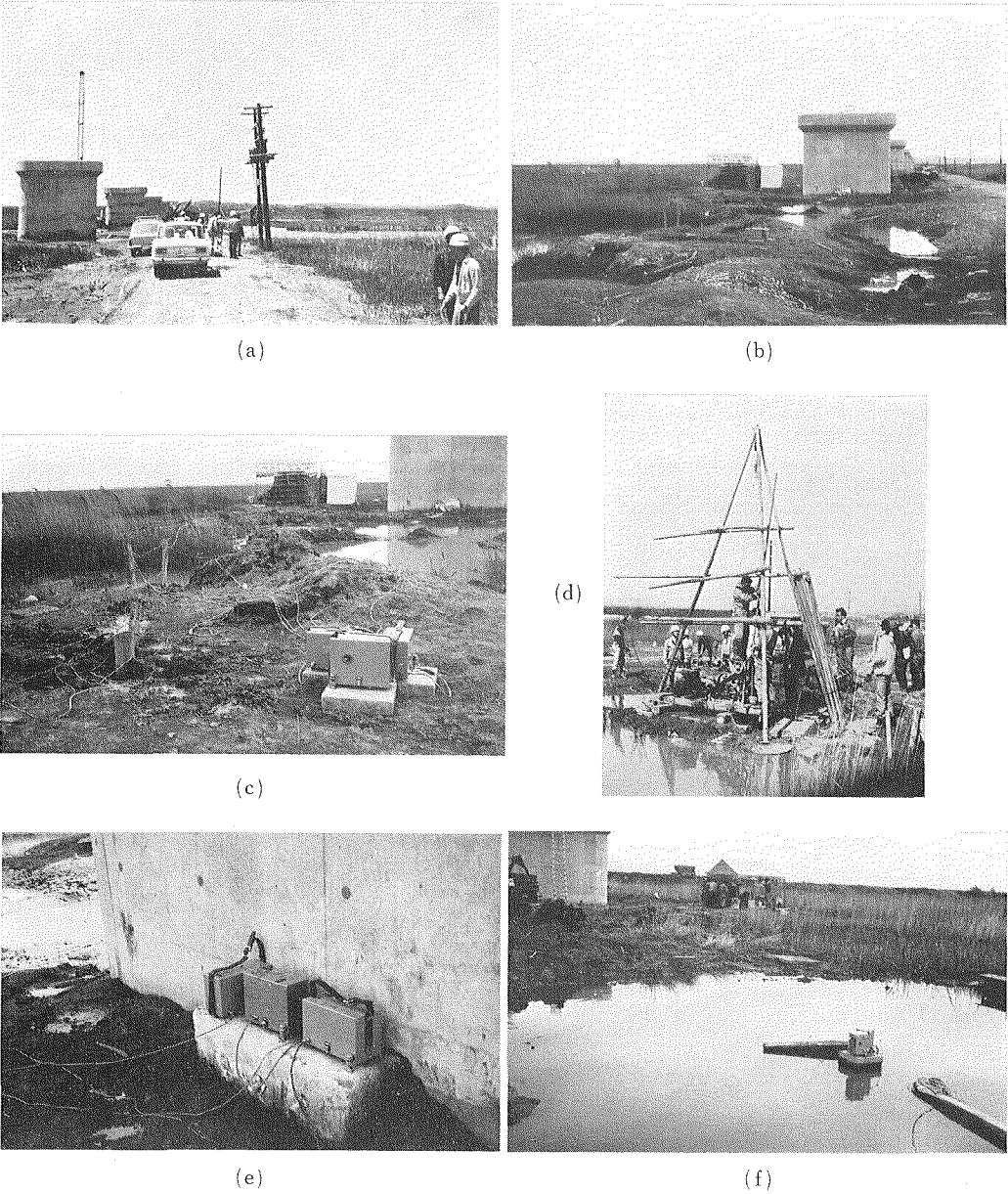
5 月 16 日 9 時頃現場に初めて到着し、橋脚の振動実験を行なうための配線に着手して間もなく、9 時 50 分頃に 1968 年十勝沖地震が起った。現場での人体感覚では震度 5 強であった。橋脚付近の地盤には、第 18 図に見られるごときキレツが生じたが、橋脚には何等の異常もなかった。しかし、第 19 (a) 図に見られる電柱にのっていた変圧器が倒れて、油が流れ出てしまったので、翌朝までは交流電源が得られなかった。そのために、第 19 (b)~(f) 図のごとく、地震計の配置を終わったにもかかわらず、当夜の大きな余震も逃した。交流電源の回復後は昼間に振動実験と地下探査とを行ない、夜間に A_1 地点または B 地点に置かれた地震計を用い、第 19 図のテント内のデータ・レコーダーで地震を観測した。2 晩の観測で数 10 コの地震を捕えた。これらの中には、長泥の近くで起った微小地震と十勝沖地震の余震とが入り紛っている。余震の中には有感地震もいくつかあった。

規模の大きな地震による地盤の振動を調べたいので、ここでは、微小地震には触れない。P~S 時間が 20 秒程度の地震を余震と考えて、P~S 時間の小さい微小地震と区別した。第 20 図に余震の記録例が示されている。感度較正が行なわれている記録については、最大振幅の加速度と P~S 時間から試算される震央距離とを用いて、各地震の規模 M を推定した。その値が



第 18 図 1968 年十勝沖地震による地盤のキレツ

Fig. 18. Breaks of the ground by the earthquake of Tokachi-oki 1968.



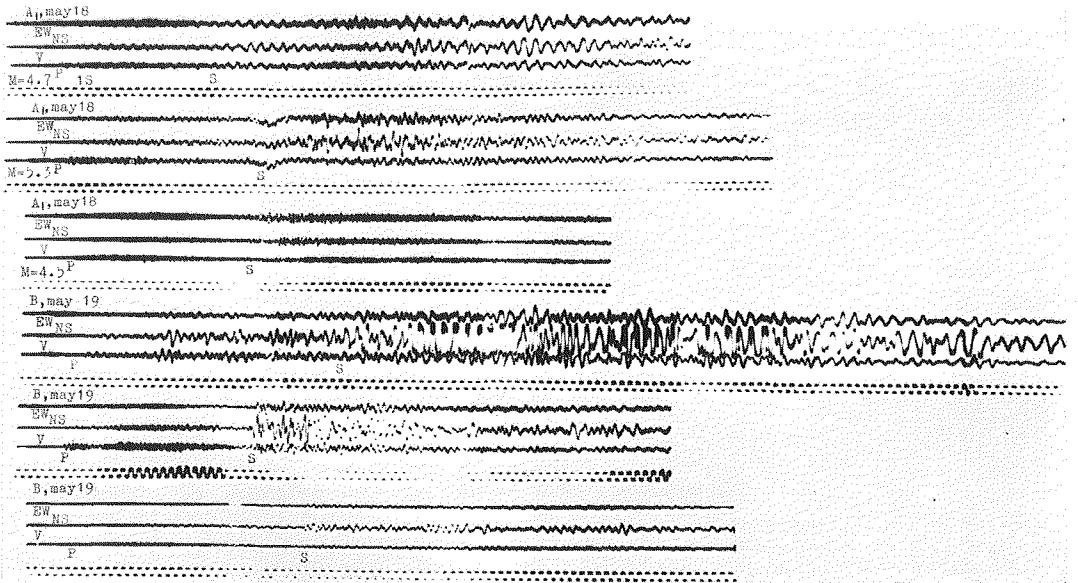
第19図 長泥橋の測定風景

- | | |
|--------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| (a) 橋脚 | (d) 測点 A ₃ に土中地震計を入れる作業 |
| (b) 測点 A, B, C | (e) 橋脚に固定された測点 B |
| (c) 測点 A ₁ と A ₂ および A ₃ の孔 | (f) 測点 D |

Fig. 19. Landscapes of the observation at Nagadoro-bridge.

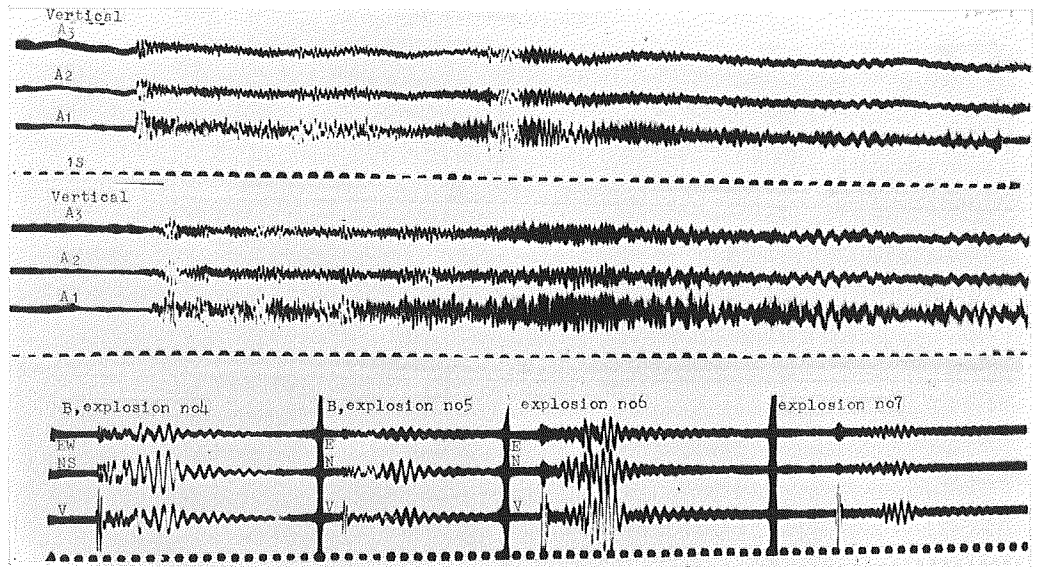
- | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| (a) Piers. | (d) The work putting pick-ups in the bore-hole for A ₃ . |
| (b) Observation points A, B and C. | (e) Observation point B fixed to the pier. |
| (c) Observation point A ₁ and bore-holes for A ₂ and A ₃ . | (f) Observation point D. |

地震記録 No. 1, No. 2 および No. 3 に記入されている。これらはいずれも有感地震であった。感度較正は行なわれていないが、第 20 図のその他の地震の規模も $M=4\sim 5$ と考えてよい。この図に示されているのよりも震度のもっと大きな余震も捕えられたが、データ・レコーダーが飽和したので、正しい波形が見られない。第 20 図には波形の良い記録だけが選ばれている。



第 20 図 長泥で観測された余震の記録，刻時 1 秒

Fig. 20. Records of the after shocks observed at Nagadoro.



第 21 図 B 地点で観測された微小地震の記録と火薬爆発による記録，刻時 1 秒

Fig. 21. Micro-earthquakes and explosions observed at B.

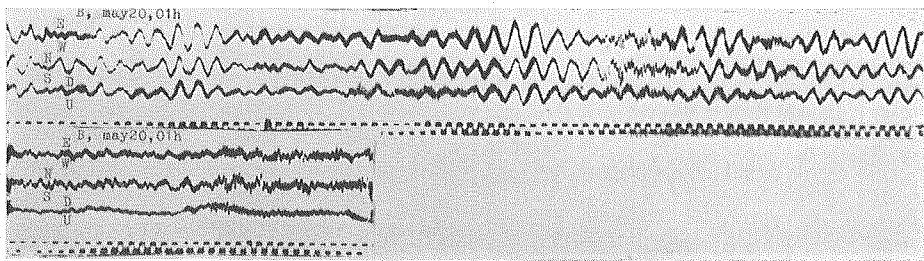
余震の記録を概観すると、 A_1 地点でも B 地点でも、P 波の初動付近では 0.1~0.2 秒、S 波の到着直後では 0.5~0.8 秒、表面波の部分では 1.5~2.0 秒の周期を持った波群が顕著である。水平動に比し、上下動の振幅はやや劣勢であるが、上記の各波群の周期はどの振動成分にも共通である。

前報の第 3 表の B 地点での火薬爆発の記録 No. 4 および No. 5 は電磁オシロの回転が不調のために失敗であった。しかし、電磁オシロへの入力の一部がデータ・レコーダーにも入っていたのでこれらの再生記録が微小地震の記録と共に第 21 図に示されている。

微小地震の初動の波形は余震のそれとは著しく異なっていて、火薬爆発の際の初動の波形と驚く程よく似ている。ただし、後方の波群は微小地震と火薬爆発とは全く違い、微小地震はむしろ余震の波形に近い。余震では水平動に比し上下動の振幅が劣勢であったのに反し、微小地震では上下動の振幅の方が大きい。これは、微小地震は長泥の直下で起ったせいであろう。

7. 雑微動による地盤の振動

B 地点で観測された雑微動の記録の一部が第 22 図に示されている。前報の 1・2 では、高周波ロハ器を通して再生したので、0.12 秒と 0.6 秒とが雑微動の卓越周期であると述べられた。第 22 図ではロハ器は使われていない。これによれば、2.0 秒に近い周期が卓越していて、短周期は部分的にしか見られない。



第 22 図 長泥の雑微動、刻時 1 秒
Fig. 22. Micro-tremors at Nagadoro.

この部分的な短周期は微小地震によるものであって、周期 2.0 秒の波は海の波の影響かも知れぬ。観測点から日本海の海岸線までの距離は約 5 km である。雑微動以外の記録に周期 2.0 秒の波がこれ程顕著でないのは、他の記録では雑微動の記録ほど計器の感度が上げられていないせいと解される。このように解釈すると、周期 2.0 秒の波は地盤の振動特性を何も反映せぬことになる。

もっとも、雑微動の周期 2 秒の波ほどキレイではないが、余震の記録にも周期 2 秒程度の波はかなり多く含まれている。ゆえに、周期 2 秒は地盤の特性を意味している可能性もある。

第7表 記録の中で目立つ周期

Table 7.

記 録	P	S	表面波 (a)	表面波 (b)
火 薬 爆 発	0.12秒		0.5~0.7秒	
極小群速度	0.11		0.7	
余 震	0.1~0.2		0.5~0.7	1.5~2.0秒
微小地震	0.2	0.3~0.4		1.0
雑微動	(0.12)		(0.6)	2.0

次に、これまでに指摘した種々な周期を一括して第7表に挙げておく。火薬爆発の記録以外ではスペクトル分析を行っていないので、単に直読してえた数値である。余震では、地震ごとにスペクトラムの形はかなり違うから、多くの地震記録のスペクトル分析を行なった後に、顕著な周期を指摘すべきである。

P波、S波の屈折法および分散波の解析結果から推定される地下構造のモデルは第23図のごとくに統一される。ボーリングの資料は第7図から再録された。

8. 1/4 波長法則の検討

Tを周期、 H_j をj番目の層厚、 v_j をj番目の層内の弾性波の速度、nを波の次数とすると、1/4波長法則は次式で表わされる：

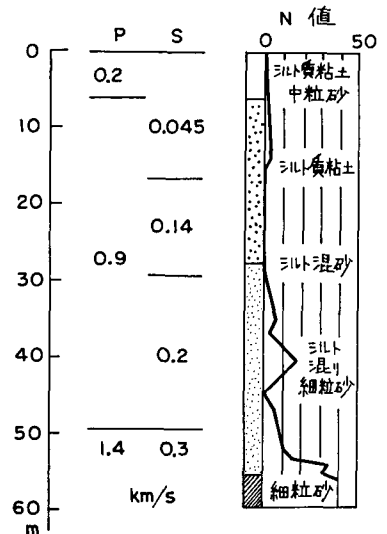
$$T = 4(2n+1)^{-1} \sum_j (H_j/v_j). \tag{8.1}$$

ただし、多くの実測例では $n=0$ の場合だけが問題になる。

表層のポアソン比が0.30位よりも小さいと、レーレー型波のノルマル・モードの極小群速度の周期は、 $v_j=v_{p1}$ とおけば、(8.1)のTで近似される⁶⁾。しかし、表層のポアソン比が0.30位よりも大きいと、 $v_j=v_{s1}$ とおかねば、 $n=0$ に対して(8.1)は満たされない⁶⁾。ラブ型波のノルマル・モードの極小群速度の周期は、 $v_j=v_{s1}$ とおけば、(8.1)のTで近似される⁷⁾。極小群速度の周期付近で振幅が極大になるものとすれば、ノルマル・モード波に対しては(8.1)は有効である。

6) TAZIME, K.; Dispersive RAYLEIGH Waves in a Layer Overlying a Half Space, J. Fac. Sci. Hokkaido Univ., 1 (1962), 449-458.

7) TAZIME, K.; Minimum Group Velocity, Maximum Amplitude and Quarter Wave-length Law, J. Phys. Earth, 5 (1957), 43-50.



第23図 種々の解析結果を統一した地下構造模型

Fig. 23. A unified model of the subsurface deduced from various analyses.

一方、高橋竜太郎等⁸⁾や嶋悦三⁹⁾のS波の重複反射の計算によれば、(8.1)に $v_j = v_{sj}$ とおいた場合の周期 T の振幅が最大になる。金井清¹⁰⁾はこの T を地盤の固有周期と称している。

第7表に、長泥で測定された地盤の顕著な波群の周期が挙げられているので、これらの周期と1/4波長法則から期待される周期とを比較してみよう。(8.1)の計算を行なう際には $n=0$ とおき、 H_j と v_j とは第23図の数値を用いる。試算の結果は第8表に挙げられている。第7表の何れかの周期に対応すると思われるものには註が付けられている。この結果で最も意外なのは、実測の方でしばしば見られた0.65秒前後の周期が、1/4波長法則では、全然算出されぬことである。

第8表 1/4波長法則による周期の試算結果
Table 8. Periods calculated from the quarter wave-length law.

$v_j = v_{pj}$			$v_j = v_{sj}$		
T_1	0.12 s	II 群の周期に対応	T_1	1.42 s	} 雑微動の周期に対応
T_2	0.20		T_2	0.37	
T_1+T_2	0.32		T_3	0.40	
		$T_1+T_2+T_3$	2.19		
		T_1+T_2	1.79		
		T_2+T_3	0.77		

謝 辞 スペクトラムの計算および分散曲線の試算は北大計算センターで行なわれた。資料の解析と論文の作成とに、1968年度文部省災害科学特定研究費の一部が用いられた。

10. Measurements of the Vibration of the Pier by Explosions and the Seismic Prospecting at the Bridge of Nagadoro, Aomori Prefecture

By Kyozi TAZIME, Toshikatsu YOSHII
and Toru IGARASHI

(Department of Geophysics, Faculty of Science, Hokkaido University)

As to the bridge of Nagadoro, only the piers have been accomplished. At the present stage the dynamical characteristics of the pier were investigated by the use of explosions. Vibrations of the pier were found to be same to that of the ground. No natural period of the pier was observed. This might be due to considerably large damping factor ($h \approx 0.4$) of the pier.

8) 高橋竜太郎・平能金太郎; 軟弱地盤における地震動, 地震研井報, 19 (1941), 534-543.

9) SHIMA, E.; Modifications of Seismic Waves in Superficial Soil Layers as Verified by Comparative Observations on and beneath the Surface, 地震研井報, 40 (1962), 187-259.

10) 金井 清; 彰国社, 建築学大系-地震学 (1963).

Main ground vibrations can be divided into three parts, that is wave groups II, III and IV. Wave group II is mainly constructed from P wave in the most superficial surface layer, or it may be considered as a leaking mode following the initial motion. Wave groups III and IV are corresponded respectively to M_{21} and M_{11} which are constructed also in the most superficial surface layer.

After-shocks of Tokachi-oki earthquake 1968 were fortunately observed with the same instrument as that of the above measurements. Every spectrum of the seismogram has distinct peaks at 0.12 s and 0.6 s, coinciding with those of explosions. Micro-tremors were also observed at the same place which have predominantly so large period as 2.0 s. If this period indicates any dynamical characteristics of the ground, the wave might be constructed from S waves in the surface layers whose total thickness is 50 m. At last, the final model of the subsurface structure has been proposed from view points of all observations at the present study.