

秩父地方での表面波の減衰について*

森 滋 男**

550.344

A Study on Attenuation of Rayleigh Waves in the Chichibu Region, Central Japan

S. Mori

(Seismological Division, J.M.A.)

JMA installed a seismograph (named EMT76) at Chichibu region in 1976, where blasting to get limestones is done so often every day. EMT76 can record seismic waves produced by the blastings of some areas. The distances between the observation point and those blasting areas are various, consequently under the hypothesis that the concerned region is homogeneous and isotropic the seismic wave records will show the nature of its attenuation at the region.

The phase that gives maximum velocity amplitude is identified as Rayleigh wave with period 0.3-0.8 sec. Using this phase, dependence of its velocity amplitude on the distance propagated through can be gotten.

From this process, the absorption coefficient is derived as 0.38-0.71, and Q (quality factor) as 9-37.

§ 1. はしがき

気象庁では1977年から秩父で高倍率地震計 (EMT76 と略称; 速度型, Fig. 1) による観測を開始している。又、この地方では碎石発破が頻繁に行われている。発破作業箇所はセンサー (観測点) から 6~15 km の距離に

10点以上あり (Fig. 2), うち10点での発破による地動をセンサーは捕えている。この記録を使ってこの地方での表面波 (レーリー波) の減衰を調べた。

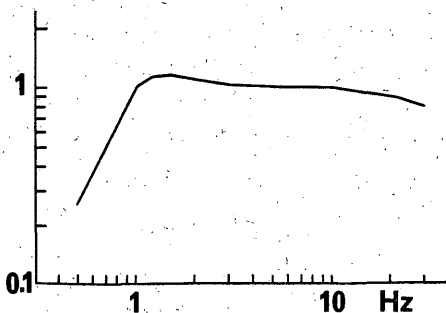


Fig. 1. Frequency response curve of the EMT76 total system. Ordinate: Relative velocity sensitivity. Abscissa: frequency.

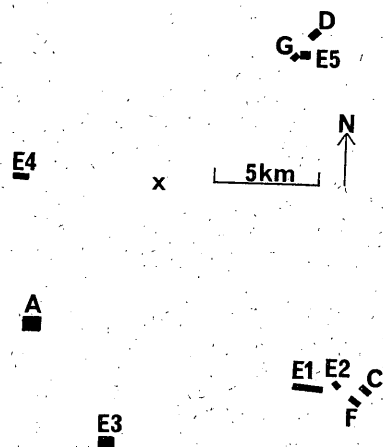


Fig. 2. Location of the blasting areas and the observation station. A, C, D, G, E1, E2, E3, E4 and E5 are the names of the blasting areas. x is the observation station (longitude 139.0°E, latitude 36.0°N, depth of transducer 88 m).

* Received June 23, 1979

** 気象庁地震課

§ 2. データ

上記地震計の磁気テープ記録から読み取った、 P , S (P 波, S 波到着時刻), M (上下動最大地動速度をあたえる相の到着時刻), $U(d, F)$ (センサーからの距離 d km 地点での $F \times 10^2$ kg の火薬量の発破による最大地動速度, μ kine), ならびに T (最大地動速度をあたえる相の周期) をデータとした。使った発破は60個余りであるが、全ての発破について上記データ要素を験測したわけではない。期間は1977年7月~11月である。

以下「最大地動速度」を単に「最大速度」と呼ぶ。

§ 3. 最大速度をあたえる波の種類

[P , S , M をあたえる相の波線は等しく、かつ、それ

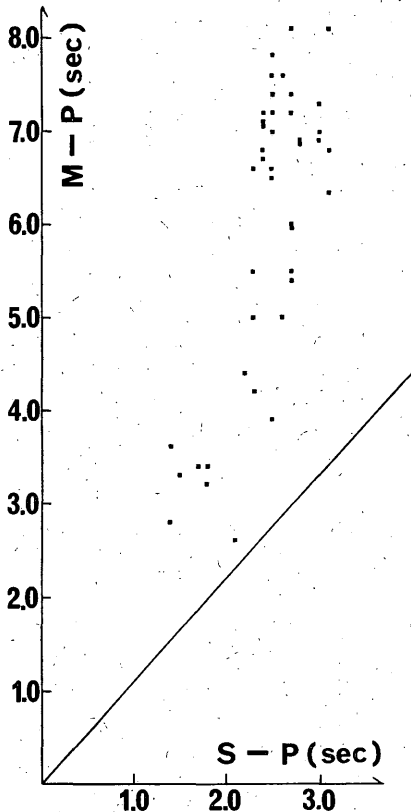


Fig. 3. Dependence of M (the arrival time of the maximum velocity amplitude) minus P (the arrival time of P wave) on $S-P$ time. The solid line is the theoretical one in the case that M equals the arrival time of Rayleigh wave (Poisson's ratio 0.30).

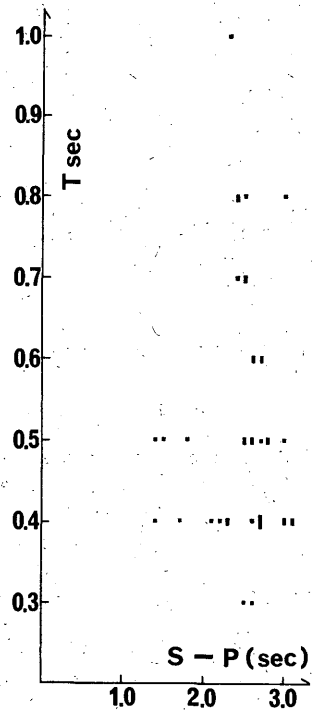


Fig. 4. Dependence of period (T in second) corresponding to the maximum velocity amplitude on $S-P$ time.

らの波の進んだ距離は d (発破点からセンサーまでの距離) に等しい」と仮定して、 $S-P$ に対して $M-P$ をプロットした図 (Fig. 3) に R (レーリー波予想到着時刻) $-P$ を書き込んだ (ポワソン比 0.3 [市川・望月 1971]) とした。これによると、レーリー波の到着時刻より最大速度の到着時刻は遅い。また一方、最大速度をあたえる相の周期は波の進んだ距離に依存せず、0.3~0.8秒程度である (Fig. 4)。よってどの地点での発破による波でも最大速度をあたえる相はレーリー波の一部で周期 0.3~0.8秒を持つ波であると考えられる。

§ 4. 方法

次の仮定をおく。

- (1) 対象地域は一様で等方的な媒質である。よって表面波の減衰は波の進んだ距離のみに依存する。
- (2) 発破のエネルギーの、表面波への分配率は発破薬量に依存し、発破の場所・発破の方法によらない。

これらの仮定を踏まえて、多点の発破を一点で観測している現状を、一点の発破を一直線で多点で観測してい

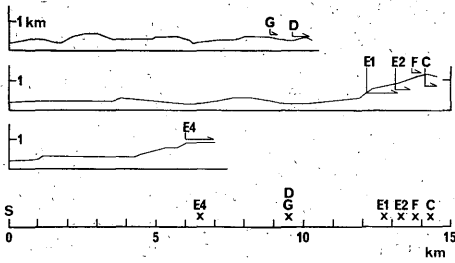


Fig. 5. Cross section of the concerned area. Radiative cut is made. Its center is observation station (S). Azimuths are, from the top, N45°E, S45°E, N88°W. G, D, E1, E2, F, C and E4 are the names of the blasting areas. The arrows show those areas. The height of the arrows roughly shows the ones of the blasting areas. The bottom one shows the positions used as the blasting points (for convenience sake, areas are reduced to points.).

るとおきかえる (Fig. 5). こうして、ある基準の上下動最大地動速度をあたえる薬量を各地点毎に求め、その距離依存性より吸収係数を求める。

§ 5. 発破のエネルギーの表面波への分配率

各発破点での発破薬量の大きさ範囲が大きく異なるので、等しい最大速度をあたえる薬量が内そうでは求まらない発破点がでてしまう。外そうで求めるにあたっては、 d 一定の時の最大速度と火薬量との関係を求める必要がある。そこで、

$$E_S = \eta F^{\kappa_1}, \quad \dots(1)$$

ここで η, κ_1 : 定数, F : 火薬量, E_S : 地震エネルギー

$$E_R = \varepsilon E_S^{\kappa_2}, \quad \dots(2)$$

ここで ε, κ_2 : 定数, E_R : レーリー波のエネルギー

$$E_R = \frac{1}{2} \rho V(F) A^2(F), \quad \dots(3)$$

ここで $V(F)$: 発破点で $A(F)$ という最大地動速度をあたえた体積,

ρ : 密度,

$$V(F) = C'' F \quad \dots(4)$$

ここで C'' : 定数.

$$U(d, F) = \gamma \frac{A(F)}{\sqrt{d}} e^{-k d} \quad (d \neq 0), \quad \dots(5)$$

ここで γ, k (吸収係数): 定数
とおけると仮定する。これらの式より

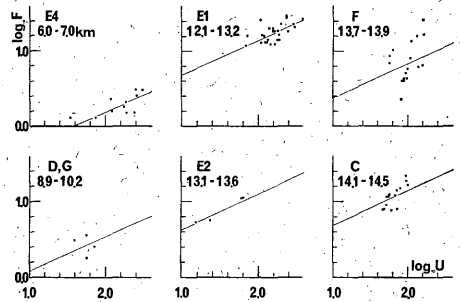


Fig. 6. Dependence of U (the maximum velocity amplitude) on F (the amount of gunpowder used for a blasting). Ordinate: $\log_{10} F$ (10^2 kg). Abscissa: $\log_{10} U$ (μ kine) The distance (the blasting area to the observation station) is taken as a parameter. The numeral below the area name shows its distance. The solid line is drawn by the result obtained from the method of least squares under the assumption that the line's slope does not depend on the distance.

$$\log_{10} F = \frac{2}{\kappa_1 \kappa_2 - 1} \log_{10} U + C(d), \quad \dots(6)$$

$$C(d) = \frac{1}{\kappa_1 \kappa_2 - 1} \{ 2k(\log_{10} e) \cdot d + \log_{10} d + \log C' \}, \quad \dots(7)$$

$$C' = \frac{\rho C''}{2\varepsilon \eta^{\kappa_1} \gamma^2}$$

(6) 式によれば最大速度の対数 ($\log_{10} U(d, F)$) と火薬量の対数 ($\log_{10} F$) とは比例することになる。そこで各発破地点毎に $\log_{10} U$ 対 $\log_{10} F$ をプロット (Fig. 6) し、全てのグラフの傾きが等しいと仮定して最小 2 乗法で直線を引いた。ここで U は μ kine 単位, F は 10^2 kg 単位。こうして、この傾きから $2/(\kappa_1 \kappa_2 - 1)$ が求まり、 U を一定にした時の F が任意の発破地点で求まる。Fig. 6 によると

$$2/(\kappa_1 \kappa_2 - 1) = 0.460$$

§ 6. 吸収係数

(6), (7) 式で U を一定とすると、

$$\log_{10}(F^{\kappa_1 \kappa_2 - 1} / d) \propto 2 \cdot k \cdot (\log_{10} e) \cdot d$$

となる。そこで

$$\log_{10}(F^{\kappa_1 \kappa_2 - 1} / d) \text{ 対 } d$$

のグラフの傾きより k (吸収係数) が求まる。Fig. 7 より

$$k = 0.38 \sim 0.71$$

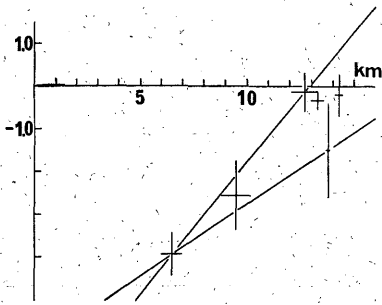


Fig. 7. Dependence $(\kappa_1\kappa_2-1)\log_{10} F-\log_{10} \Delta$ on Δ under the condition that U equals 1 μ kine, where F (10^2 kg) is the amount of gunpowder, Δ (km) the distance, U (μ kine) the maximum velocity amplitude, κ_1 and κ_2 is constant (see equations (1), (2) in the text). Solid lines show the smallest slope and the largest one. The cross means error bar (longitudinal one: standard deviation; lateral one: the size of the blasting area).

となる。

§ 7. 波動的 Q の計算

次の定義に基づいて Q を計算する。

$$Q^{-1} = \frac{1 - e^{-kL}}{2\pi}, \tag{8}$$

ここで k : 吸収係数, L : 波長.

まず対象にしている波の波長を求める。

$$L = V_R T \tag{9}$$

ここで V_R : レーリー波の速度, T : 周期

T は 0.3~0.8 秒とあたえられているので, V_R を求めればよい。

距離 (発破点とセンサーとの間) と $S-P$ との関係 (Fig. 8) より, ポワソン比 0.30 の仮定のもとで, P

* P 波, S 波ともに地表近傍を通ってくると仮定すると,

$$\Delta / (S-P) = ab / (a-b),$$

ここで Δ : センサーと発破点との距離,

a : P 波の速度,

b : S 波の速度.

ポワソン比を 0.30 とすると,

$$b = 0.53a.$$

よって,

$$a = 0.89 \times \Delta / (S-P).$$

Fig. 8. より

$$\Delta = 6 \sim 9 \text{ km で } \Delta / (S-P) = 3.6 \sim 4.7 \text{ km/s,}$$

$$\Delta = 12 \sim 15 \text{ km で } \Delta / (S-P) = 4.7 \sim 6.2 \text{ km/s.}$$

Δ がより小さい方の値が, より浅い所の P 波速度をあたえるので,

$$\Delta / (S-P) = 3.6 \sim 4.7 \text{ km/s}$$

と考える。

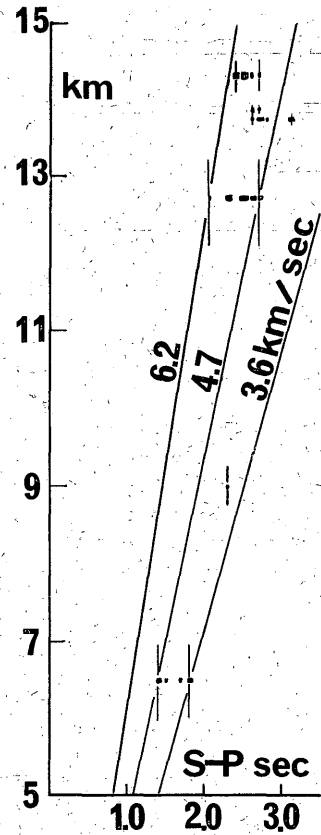


Fig. 8. Dependence Δ on $S-P$ time, where Δ is the distance. Solid lines show the smallest slope, the largest one for all data, and the largest one for distance-small data. Longitudinal error bar shows the size of the blasting area.

波速度が 3.2~4.2 km/s と求まる*. よって V_R が 1.6~2.1 km/s と求まる。

以上より, L が 0.51~2.0 km と求まる。こうして

$$Q = 9 \sim 37$$

と求まる。

§ 8. 考 察

1. 求まった Q 値の妥当性

ここで求まった Q はレーリー波についての値であり, この波の波長の見積もり (0.51~2.0 km) から表層 2 km 程度までの Q の平均的な値と思われる。この深さまでの表層についてのレーリー波の Q を求めた例は見当たらなかったが Tab. 1 のような値の報告がある。これを見ると, ここで求まった Q 値はオーダー的には他の観測例と矛盾しない。

Tab. 1. 地表付近の Q 値

波の種類	波の周期 (sec)	Q	V_P (km/s)	深さ (km)	方 法	場 所	
P 波	0.03	50	1.5	5~6	物 探 記 録 (地 震 波)	海 上, 南 幌	浜野・青木 1973*
	0.1	500	7~8	20~30			O'Brien 1968*
SH 波	0.03	5	0.15	20~30	鉛直相対振幅 "	弥生, ローム 雪ヶ谷, 泥岩	工藤 1973*
	"	5~6	0.42	"			"
Love 波	0.1~0.2	5~15	0.3~2.0	表層	Q の f 依存性	"	" 1970*
Rayleigh 波	0.3	10	0.8~1.6	20	—	三 条 市	前川 1971*

* 竹内 (1974) による

2. 発破の薬量と表面波へ分配されたエネルギーとの関係式

Fig. 6 から求まった

$$\frac{2}{\kappa_1 \kappa_2 - 1} = 0.460 \approx 0.5, \quad (10)$$

又, (1) 式~(4) 式より

$$\log_{10} E_S \propto \frac{2\kappa_1}{\kappa_1 \kappa_2 - 1} \log_{10} A. \quad (11)$$

(11) 式と次のグーテンベルグ・リヒターの式と比べると,

$$\log_{10} E_S \propto 1.5 M_S (\propto 1.5 \log A),$$

$$\frac{2\kappa_1}{\kappa_1 \kappa_2 - 1} = 1.5. \quad \dots (12)$$

(10) 式, (12) 式を κ_1, κ_2 に関して解くと,

$$\kappa_1 = 3, \quad \kappa_2 = 5/3$$

と求まる。つまり, (1) 式, (2) 式を参照して,

$$E_S \propto F^3, \quad E_R \propto E_S^{5/3}.$$

これらの妥当性はまだわからない。

3. 距離 (D km) と発破薬量 ($F \times 10^2$ kg) とから最大

地動速度 ($U \mu\text{kine}$) を求める式

(6), (7) 式に求まった値を入れて

$$\log_{10} U = 2.2 (\log_{10} F - C(D)),$$

$$C(D) = (0.11 \pm 0.03) \times D + \frac{\log_{10} D}{4.3} - (1.62 \pm 0.02)$$

と求まる。例えば, 100 kg の発破をセンサーから 2.0 km 離れた所で行えば 630~1000 μkine の最大地動速度が観測されることになる。

§ 9. 謝 辞

この小研究を行うにあたって, 秩父地方で採石をしている鉾山会社の方々には各種データを提供して頂いた。感謝します。

参 考 文 献

- 市川政治, 望月英志 (1971): 近地地震用走時表について, 気象研究所研究報告, 22, 229-290.
 竹内治男 (1974): 地表面の波動の減衰, 地震学会予稿集, No. 2, 253.