人工地震の表面波の減衰について

京都大學理學部地球物理學教室 久保寺 章

(昭和 25 年 7 月 31 日受理)

Damping of the Surface-waves of Artificial Earthquakes.

A. Kubotera
Kyoto University

The writer studied the surface-waves (Rayleigh-type) generated by artificial earthquakes, especially in regard to the attenuation of amplitudes with the increase in focal distances and calculated the attenuation coefficient from the data obtained by himself.

Next, the data were compared with his modified Sezawa's theory and the viscosities of the weak surface layers were calculated.

Finally, the writer discussed the relation between earthquake damage and mechanical properties of the weak surface layers.

§ 1. 序

表面波の減衰を驗震學的立場から, Gutenberg¹⁾等が取扱つている。筆者は人工地震の場合に現われて来る表面波について, その減衰の模様を調べて見た。茲に取扱つたものは震源からの距離に關するもので, 振巾を計つて求めた。又この結果と理論的に求められた粘彈性體內を傳播する彈性波の傳播狀態と對應させて見ることにした。茲に言う表面波は Field では Ground roll と呼ばれるもので, この中で Rayleigh 型の波を取つて議論した²⁾。茲

Fig. 1 a
Map of Wakayama city.

Fig. 1 b
Geological section of Wakayama city in E-W direction.

に用いた記録は, 和歌山市内で行つた地盤調査のもので, 測線の分布及び地下構造の東西断面の大略は, Fig. 1 に示してある。測線の全長は 200 m~400 m とし, この間に 10 個の佐々式上下動 C 型振子及び 6 個の水平動 C 型振子を配置し, 振子の感度を等しくして置いた。用いた薬量は 300 g 前後とし, ほぼ一定に保つた。

§ 2. Rayleigh-型の波の振巾減衰率を求めること。

Rayleigh-型の波は土地の表面を伝わって四方に擴がるものであり、觀測點が源點(震源)から r なる距離にあるとき、その點の振巾 a_r は

$$a_r = C \frac{1}{\sqrt{r}} e^{-K_R r}$$

の如き型になる。

$e^{-K_R r}$ は土地の減衰力による項であり、 K_R は土地により定まる常數であり、振巾減衰率と名附ける。 $\frac{1}{\sqrt{r}}$ は波動が二次元的に擴がる爲に自然にこの様な型をとる。今人工地震の記録では、 a_r 、 r は既知であるから、 K_R が求められる。

§ 3. K_R の値³⁾ と波長、速度との關係。

Table 1 に § 2 の方法が求めた K_R の値及び記録から讀み取つた、Rayleigh 型の波の波長 (L)、週期 (T)、及び傳播速度 (V_R)、と P 波の傳播速度 (V_P) との比を示してある。Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 は夫々 $T-V_R$, K_R-L , K_R-1/V_R , K_R-V_P/V_R の關係を圖示してある。

Fig. 2 及び Table 1 で判る様に、人工地震の表面波の波長は大略一定である。又 Fig. 4,

Table 1. Attenuation coefficients, wave-lengths, periods, propagation velocities of Rayleigh-type waves and the ratios of V_P/V_R .

K_R : Attenuation coefficient of Rayleigh-type wave.
 L : Wave-length of Rayleigh-type wave.
 T : Period of Rayleigh-type wave.
 V_R : Propagation velocity of Rayleigh-type wave.
 V_P : Propagation velocity of longitudinal wave.

No.	K_R ($\times 10^{-4}$ C.G.S.)	L (m)	T (sec)	V_R (m/sec)	V_P/V_R
1	1.3	49	0.14	350	3.7
2	2.5	46	0.17	270	5.7
3	4.2	42	0.185	220	8.0
4	2.8	41.5	0.142	290	6.2
5	1.5	37.5	0.125	300	4.3
6	2.1	40.5	0.18	230	5.0
7	1.5	36.3	0.11	330	4.2
8	2.4	38.2	0.128	300	5.3

Fig. 2 Relation between periods and wave-lengths of Rayleigh-type waves.

Fig. 3 Relation between attenuation coefficients and wave-lengths of Rayleigh-type waves.

Fig. 4 Relation between attenuation coefficients and Velocities of Rayleigh type waves.

Fig. 5 Relation between attenuation coefficients of Rayleigh-type waves and V_P/V_R .
 V_P : velocity of the longitudinal wave,
 V_R : velocity of Rayleigh-type wave.

Fig. 5 では、 K_R と、 $1/V_R$ 、 V_P/V_R との間に著しい関係が見出された。次にこの結果が何を示すか考えて見る。

§ 4. Rayleigh 波の減衰に関する理論.

土地を傳播する Rayleigh 波の問題を、粘弾性體内の弾性波の傳播の理論で取扱つて見る⁵⁾。今二次元的に傳播する Rayleigh 波の状態を見るに、土地を半無限弾性體とし、 λ 、 μ を Lamé の常數、 λ' 、 μ' を粘性係數として運動方程式を立て、境界條件を導入して解いた。Rayleigh 波の場合の妹澤博士の理論によると震源からの距離による減衰の項は

$$\frac{e^{f_2 r}}{\sqrt{f_1} r} \quad (f_2 < 0) \quad (4.1)$$

となる、茲で λ' 、 μ' が λ 、 μ に比して小さいとき、 f_2 の値を求めると、

$$f_2 = -\frac{p f_1}{2} \frac{\left\{ \frac{\lambda' + 2\mu'}{\lambda + 2\mu} h_1^2 \frac{\sqrt{1-K_1^2}}{\sqrt{1-h_1^2}} + \frac{\mu'}{\mu} K_1^2 \left(\frac{\sqrt{1-h_1^2}}{\sqrt{1-K_1^2}} - 2 + K_1^2 \right) \right\}}{\left\{ h_1^2 \frac{\sqrt{1-K_1^2}}{\sqrt{1-h_1^2}} + K_1^2 \left(\frac{\sqrt{1-h_1^2}}{\sqrt{1-K_1^2}} - 2 + K_1^2 \right) \right\}} \quad (4.2)$$

茲で

$$h_1^2 = \frac{\rho p^2}{(\lambda + 2\mu) f_1^2}, \quad K_1^2 = \frac{\rho p^2}{\mu f_1^2} \quad (4.3)$$

$$p = \frac{2\pi}{T}, \quad f_1 = \frac{2\pi}{L}$$

即ち、この理論では f_2 が先に述べた、振巾減衰率に相當する。

$$K_R = -f_2$$

となる。

§ 5. K_R の數値計算.

K_R を § 4 の理論から數値計算することが出来る。然し實際の場合軟弱層の下部に基盤に相當する層がある。この爲に、一般に Rayleigh 波の傳播速度は上層と基盤との粘弾性的性質及び上層の厚さ (H) と波長 (L) に關係して變化して來る⁶⁾ L/H は Table 2 に示す。

ところが L/H が Table 2 で示される範囲では、一般に Rayleigh 波の傳播速度は上層の S -波の傳播速度に近い値をとることが示されている⁷⁾、それでこの場合には、基盤の effect

Table 2. Values of L/H .

L : Wave-length of Rayleigh-type wave.
 H : Thickness of upper stratum.

No.	L/H
1	1.84
2	1.17
3	0.70
4	0.71
5	0.60
6	0.86
7	0.95
8	1.41

を考えなくても良いことが判り、近似的に § 4 の理論で取扱い得る。

それで (4.2) の式で

$$h_1^2 \sqrt{\frac{1-K_1^2}{1-h_1^2}} = m$$

$$K_1^2 \left(\sqrt{\frac{1-h_1^2}{1-K_1^2}} - 2 + K_1^2 \right) = n \quad (5.1)$$

と置いて、任意の λ/μ を與えて計算を行つた。

但し吾々が考えている、 λ/μ の値は大略 V_P/V_R

で知り得る。一般に V_P/V_R と V_P/V_S は近い値をもつものである。Fig. 6 には V_P/V_R と V_P/V_S との關係を圖示し、Table 3 及び Fig. 7 には m, n の値を示す。

Fig. 6

Fig. 7

Table 3.

λ, μ : Lamé's constants.
 V_P, V_S : Propagation velocities of longitudinal and transversal waves.

λ/μ	V_P/V_S	m	n
98	10	0.00274	2.0274
62	8	0.00428	2.0202
47	7	0.00562	2.0138
34	6	0.00772	1.9944
23	5	0.01117	1.9834
14	4	0.02061	1.8480
7	3	0.03321	1.6160
1	$\sqrt{3}$	0.130	0.845
3/4	$\sqrt{11/4}$	0.146	0.74

又、(4.2) 式は (5.1) 式から

$$f_2 = -\frac{pf_1}{2} \frac{\left\{ \frac{\lambda' + 2\mu'}{\lambda + 2\mu} m + \frac{\mu'}{\mu} n \right\}}{m + n}$$

$$\text{今 } \frac{\lambda + 2\mu}{\mu} = l^2 \quad l = V_P/V_S$$

とすると

$$f_2 = -\frac{pf_1}{2} \frac{1}{\mu} \frac{1}{m+n} \left\{ (\lambda' + 2\mu') \frac{m}{l^2} + n\mu' \right\} \quad (5.2)$$

となる。

m/l^2 と n とを比較して、Table 4 及び Fig. 8 に示す。

Table 4

V_P, V_S : Propagation velocities of longitudinal and transversal waves.

$l = V_P/V_S$	m/l^2	n
10	0.000 0274	2.0274
8	0.000 0609	2.0202
7	0.000 1148	2.0138
6	0.000 2146	1.9944
5	0.000 4467	1.9834
4	0.001 2879	1.8480
3	0.003 6895	1.6159
$\sqrt{3}$	0.043 33	0.845

Fig. 8

Table 4 で V_P/V_S が

10~3 の間では

$$m/l^2 \ll n \quad (5.3)$$

であり、通常の場合、

$$\lambda' m/l^2 \ll \mu' n \quad (5.4)$$

と見て良く、又、

$$n/(m+n) \div 1 \quad (5.5)$$

となるから、 f_2 は (5.2)

式に (5.3), (5.4), (5.5) の条件を導入すると、

$$f_2 = -\frac{f_1 p}{2} \frac{\mu'}{\mu}$$

又、

$$K_R = -f_2, \quad f_1 = \frac{2\pi}{L}, \quad p = \frac{2\pi}{T} \quad V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

であるから、

$$K_R = \frac{2\pi^2}{\rho} \frac{1}{V_S} \frac{1}{L^2} \mu' \quad (5.6)$$

故に吾々の考えている範囲 ($V_P/V_S = 3 \sim 10$) では、(5.6) 式の示す如く、

$$K_R \propto \frac{1}{V_R} \frac{1}{L^2} \frac{\mu'}{\rho}$$

即ち、 K_R は V_R と L^2 に逆比例し、 μ'/ρ に比例して変化する。Fig 3, Fig 4 には上述の関係が現われている。又 K_R には粘性係数も関係して来ることが判つた。

Table 5. Attenuation coefficients and μ'/ρ .

K_R : Attenuation coefficient of Rayleigh-type wave.
 μ' : Viscosity coefficient.
 ρ : Density.

No.	K_R ($\times 10^{-4}$ C.G.S.)	μ'/ρ (10^7 C.G.S.)
1	1.3	0.61
2	2.5	0.79
3	4.2	0.91
4	2.8	0.78
5	1.5	0.35
6	2.1	0.44
7	1.5	0.36
8	2.4	0.38

Fig. 9.

Relation between attenuation coefficients of Rayleigh-type waves and μ'/ρ .
 μ' : coefficient of viscosity,
 ρ : density.

Table 5 及び Fig. 9 には

K_R と μ'/ρ の関係を示してある。

§ 6. K_R と P -波の振巾減衰率との関係。

P -波の振巾減衰率は

$$A_P = C_P \frac{1}{r} e^{-K'r} \quad (6.1)$$

の形で減衰する⁸⁾ として求め

て見た。(6.1) の式で

A_P ; P -波の振巾, K' P -波の振巾減衰率, r ; 震源から観測点迄の距離,

C_P ; 任意常数。

Table 6. Attenuation coefficients of two kinds of waves.

K_R : Attenuation coefficient of Rayleigh-type wave.
 K' : Attenuation coefficient of longitudinal wave.

No.	K_R ($\times 10^{-4}$ C. G. S.)	K' ($\times 10^{-4}$ C. G. S.)
1	1.3	1.2
2	2.5	1.7
3	4.2	5.0
4	2.8	2.0
5	1.5	2.5
6	2.1	—
7	1.5	1.8
8	2.4	2.3

K_R と K' との関係は, Table 6 及び Fig. 10 に示す如き 關聯性がある。

§ 7. K_R と震害との關係について。

先に述べたことで, 軟弱層の物性を, K_R を求めることにより, 大

略知ることが出來た。茲で注目すべきことは, Fig. 5 で知られる如く, K_R は V_P/V_R と著しい關係を持つてゐる。このことは, K_R が震害と深い關係があることを示している。 V_P/V_R の値が震害と關係のあることは, 福井, 高知, 等の調査結果が示している⁹⁾。今, K_R は波長の變化が餘りないとすれば, $1/V_R$ と μ'/ρ に比例して來る。即ち傳播速度と粘性係數 (密度は餘り變化はないとして) が關係して來る。速度と震害との關係はすでに知られてゐるが, 茲で, 粘性も或る程度關係して來る。然して, 軟弱層に於ては特に粘性係數の中でも μ' が主に關係して來ることが判つた。

終りに, 種々御指導下さつた佐々教授に感謝の意を述べると共に, 本研究に對して文部省科學研究費の補助を受けたことを記して, 當局に厚く謝意を表し度い。

文 獻

- 1) B. Gutenberg; Handb. d. Geophys. Bd. IV Lief 1. 253.
B. Galitzin; "Vörlesungen über Seismometrie" 93.
- 2) Benjamin F. Howell, Jr. "Ground Vibrations near Explosions". Bull. Seis. soc. Amer. 1949.
- 3) K_R の値に關しては Gutenberg 等の求めた値は大略 0.0002~0.0004 である。
- 4) 佐々, 棚橋, 石原 "震害と地盤" 防災研究所研究報告, II.
佐々 "地震探検の問題" Geophysical Exploration, Vol. 2. No. 1.
- 5) K. Sezawa, & K. Kanai; "Damping Periodic Visco-Elastic Waves with Increase in Focal Distance". I. II. Bull. Earth. Res. Inst., 16 (1938) 17 (1939).
- 6) 7) K. Sezawa. & K. Kanai;
"Decay Constant of Seismic Vibration of a Surface Layer". Bull. Earth. Res. Inst. 13 (1935).
"The Rate of Damping in Seismic Vibrations of a Surface Layer of Varying Density or Elasticity". Bull. Earth. Res. Ins., 13 (1935).
"The Action of Soil Layer and of the Ocean as Dynamic Dampers to Seismic Surface Waves." Bull. Earth. Res. Ins., 18 (1940).
"Dynamical Absorbtion of Rayleigh-waves and Love-waves by Weak Surface Layers." Bull. Earth. Res. Inst., 18 (1940).
- 8) 梶川 "金屬鑽床に於ける彈性波探鑽に就て" Geophysical Exploration, Vol. 1 No. 1.
- 9) 防災研究所研究報告, II.