



発破振動の予測に及ぼす波動伝搬経路の影響に関する検討

国松 直*, 井清武弘*

現在発破振動の予測にあたって、薬量と距離を変数として最大速度振幅を実験式により予測する方法が主に行われている。従来の予測法では実験式の係数の中で振源特性、伝搬特性が一応は考慮された形となっている。しかし、予測精度の向上に当たってはこれらの個々の特性についてさらに細かな検討を行う必要がある。

そこで、本研究は振動の伝搬系での影響を発破振動予測へ反映させることを目的に、地下の速度構造を仮定し、振源から実体波が最短時間で受振点に到達する波線を波線追跡法によって求め、地層境界面での振幅変化についてはZoeppritz行列を計算することによって求めるプログラムを作成した。次に、その結果を発破振動予測に適用する方法について述べた。

1. はじめに

地下の振動源(地下岩盤掘削等)から発生した地盤振動によって公害的な問題が生じる可能性がある場合には、地表面での振動の大きさを予測し、事前に対策を講じなければならない。発破により生じた振動の大きさの予測に対しては次式を使用して、最大速度振幅(Peak Particle Velocity)が予測され、その大きさにより被害の程度が議論されることが多い¹⁾。

$$PPV = K \cdot W^m \cdot D^{-n} \quad (1)$$

ここに、 PPV は最大速度振幅(cm/s)、 W は振動の大きさを規定している装薬量(kg)、 D は発破中心から受振点までの距離(m)、 K は発破方法や岩盤の特性、地盤条件などによって変化する係数である。通常、 K 、 m 、 n は試験発破や実発破の結果を用いて、 PPV 、 W 、 D を入力値とした重回帰分析によって求められ、予測式の係数として使用される。これらの値は現場毎に異なる値として報告されることが多い。

地盤振動の予測を行う場合には振源特性、伝搬特性についてそれぞれ個々の影響を検討、評価することが必要であるが、式(1)では振源特性(W^m 、 K)、伝搬特性(D^{-n} 、 K)が一応考慮された式となっている。しかし、式(1)による予測では、かなりのばらつきを生じることが知られている。発破振動の予測精度の向上のためには振源特性、伝搬特性のそれぞれについてもっと細かな検討を行う必要があるといえる。

地下に振動源がある場合、振動は地層構造のように

音響インピーダンスの異なる2つの層を横切って伝搬し、地表へ到達することになる。そのとき、その境界面では振動の伝搬方向、振幅が変化する。従って、振動の経路は地層構造による影響をうけ、式(1)における D のように爆源から受振点までを直線として考えることは好ましくない。

近年では物理探査技術の向上により地下の速度構造を精度よく知ることが可能となってきた。トンネル掘削、地下空洞建設の場合には工事着工以前に地下の速度構造が物理探査手法を用いて調査されているようである。このような探査結果を使用すれば、発破振動の予測に地下の速度構造を仮定することは可能であるといえる。

そこで、本研究は振動の伝搬系での影響を発破振動予測へ反映させることを目的に、地下の速度構造を仮定し、振源から実体波が最短時間で受振点に到達する波線を波線追跡法によって求め、地層境界面での振幅変化についてはZoeppritz行列を計算することによって求めるプログラムを作成した。次に、その結果を発破振動予測に適用する方法について述べた。

2. 波線追跡法、地層間振幅変化計算プログラムの流れ

作成したプログラムの流れを示せば次のようである。

- (1) 振源と受振点の入力。
 - (2) 地層構造のデータ入力および作図。
 - 各層のP波速度(V_P)、密度(ρ)、ポアソン比(ν)、地層境界面を表す直線切片(b_i)と勾配(α_i (deg))の入力。
 - 地層構造の描画。
- S波速度(V_S)はポアソン比を用いて次式より

1992年1月29日受理

*資源環境技術総合研究所

〒305 茨城県つくば市小野川16-3

TEL 0298-58-8573, 8570

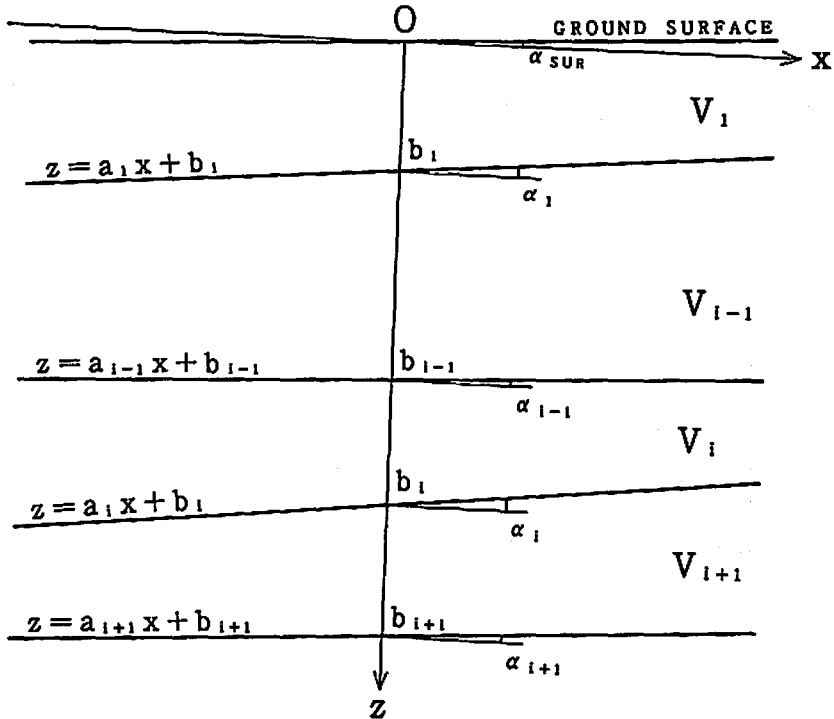


Fig. 1 Geometrical explanation of coordination and layer.

算出する。

$$VS_i = \sqrt{\frac{(1-2\nu_i)}{2(1-\nu_i)}} \cdot VP_i \quad (2)$$

ここで、添え字 i は第 i 層の値であることを意味する。

(3) 波線追跡法により振源から受振点への最短経路を求める。

・最短経路の描画。

(4) 各地層境界面での振幅変化計算。

(5) 地表面での振動の方向と振幅計算。

(6) 各層の振幅および地表面での振動の方向と振幅描画。

以下、波線追跡法、各層境界面での振幅変化計算、地表面での振動の方向と振幅計算について説明する。

2.1 波線追跡法

振源は Fig. 1 の z 軸(垂直方向)上にあるとし、 z 軸と地表面が交差する点を原点とする。第 i 層と第 $i+1$ 層の境界は

$$z = a_i x + b_i \quad (3)$$

で表現できる。ただし、層の傾きを α_i (反時計回りを正とする) とすると

$$\tan(\alpha_i) = -a_i \quad (4)$$

である。ここで、図中の V_i は各層の伝搬速度であ

り、P波速度またはS波速度である。

いま、振源が $i+1$ 層中にあると仮定する。振源の座標を (x_s, z_s) とする。振源は z 軸上にあるとしているので $x_s = 0$ である。従って、プログラムでは振源の深さ z_s のみを入力するようにしている。振源から角度 θ_0 で上方へ伝搬する波を考える。ここで、垂線に対して反時計回りを正とする。そのとき、第 $i+1$ 層と第 i 層との境界面と波線が交差する x 座標は次式で求まる (Fig. 2 参照)。

$$x_i = \frac{\tan(\theta_0)(z_i - b_i)}{(1 - a_i \cdot \tan(\theta_0))} \quad (5)$$

この x_i を式(3)に代入すれば交点の z 座標が得られる。

波線がスネルの法則を満足するものとして、第 i 層中を伝搬するとすれば、第 i 層での波の伝搬角度 (θ_i) は次式により決定される。

$$\frac{\sin(\theta_i - \alpha_i)}{\sin(\theta_0 - \alpha_i)} = \frac{V_i}{V_{i+1}} \quad (6)$$

次に、第 i 層と第 $i-1$ 層との境界面と波線との交点の座標は次式で計算できる。

$$x_{i-1} = \frac{(1 - a_i \cdot \tan(\theta_i))}{(1 - a_{i-1} \cdot \tan(\theta_i))} \cdot x_i - \frac{(b_i - b_{i-1}) \cdot \tan(\theta_i)}{(1 - a_{i-1} \cdot \tan(\theta_i))} \quad (7)$$

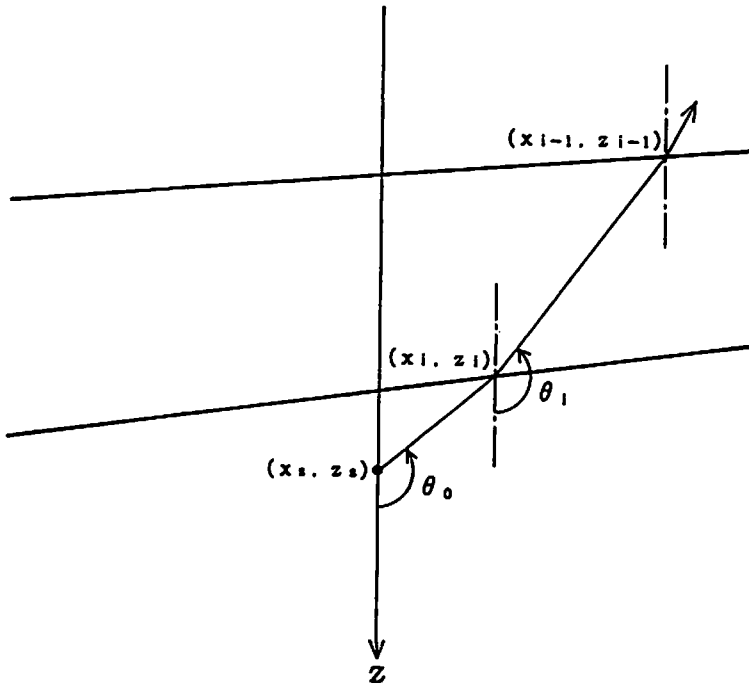


Fig. 2 Geometrical explanation of propagation path.

以上の手順を繰り返すことで、地表面へ最短時間で到達する波の経路，すなわち各境界面での座標を求めることができる。

今着目している受振点と波の到達点が水平距離で、ある許容誤差より大きければ、初期射出角度(θ_0)を変化させ、再度繰り返し計算を行い、最終的な伝搬経路，すなわち波線が各層と交差する交点の座標と入射角，屈折角を決定する。

同様の考えにより、下層で反射した波についても考慮できる。

2.2 地層間の振幅比変化計算

P波が媒質が異なる境界面に到達すると Fig. 3 のように 4 種類の波が生じる。ここで、SV 波とは粒子の運動が境界面に対して直角な面内で起こる S 波である。

いま、Fig. 3 のように入射角 i_e で振幅 A_e の平面 P 波が音響インピーダンス(密度と速度の積)の異なる媒質に入射する場合を考える。

4 種類の波の反射，屈折の角度はスネルの法則より、次式を満足する。

$$i_e = i_1$$

$$\frac{VP_1}{\sin(i_e)} = \frac{VP_1}{\sin(i_1)} = \frac{VS_1}{\sin(j_1)} = \frac{VP_2}{\sin(i_2)} = \frac{VS_2}{\sin(j_2)} \quad (8)$$

発生する反射 P 波 (A_r)，反射 SV 波 (B_r)，屈折 P 波

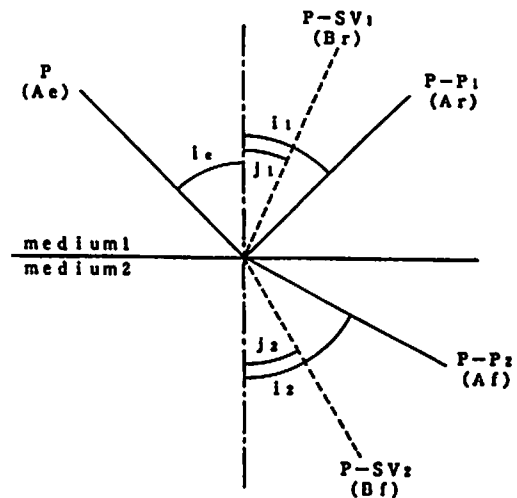


Fig. 3 Reflection and refraction of a longitudinal (P) wave at a plane boundary between isotropic media.

(A_r)，屈折 SV 波 (B_r) の振幅は境界面に対して垂直方向および切線方向の変位と応力が連続であるという関係から導かれた以下に示される Zoeppritz の式により求められる²⁾。

$$A_p X_p = B_p \quad (9)$$

ここで、

$$A_p = \begin{bmatrix} \sin(i_1) & \cos(j_1) & -\sin(i_2) & \cos(j_2) \\ -\cos(i_1) & \sin(j_1) & -\cos(i_2) & -\sin(j_2) \\ \sin(2i_1) & \frac{VP_1}{VS_1} \cos(2j_1) & \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{VS_2}{VS_1} \frac{VP_1}{VP_2} \sin(2i_2) & -\frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{VS_2}{VS_1} \frac{VP_1}{VS_2} \cos(2j_2) \\ -\cos(2j_1) & \frac{VS_1}{VP_1} \sin(2j_1) & \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{VP_2}{VP_1} \cos(2j_2) & \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{VS_2}{VP_1} \sin(2j_2) \end{bmatrix}$$

$$B_p = \begin{bmatrix} -\sin(i_1) \\ -\cos(i_1) \\ \sin(2i_1) \\ \cos(2j_1) \end{bmatrix} \quad X_p = \begin{bmatrix} A_r/A_r \\ B_r/A_r \\ A_r/A_r \\ B_r/A_r \end{bmatrix}$$

式(9)の X_p は

$$X_p = A_p^{-1} B_p \quad (10)$$

として解くことができる。

媒質(1)と媒質(2)との境界面にP波が垂直に入射した場合については垂直方向の変位、応力が連続であるということから、次式が得られる。

$$\frac{A_r}{A_r} = \frac{\rho_2 VP_2 - \rho_1 VP_1}{\rho_1 VP_1 + \rho_2 VP_2} \quad (11)$$

$$\frac{A_r}{A_r} = \frac{2\rho_1 VP_1}{\rho_1 VP_1 + \rho_2 VP_2} \quad (12)$$

また、 $B_r/A_r = 0$, $B_r/A_r = 0$ である。

SV波についても同様の考えで式を展開することができる。S波には境界に平行な面内で粒子が運動するSH波もあるが本研究では検討していない。SH波の場合には境界に入射しても反射、屈折波としてSH波のみしか生じず解析的には考え易い。

以上の計算をP波、SV波入射に対して行い、入射波の振幅を乗じることにより、それぞれ反射P波(A_r)、反射SV波(B_r)、屈折P波(A_r)、屈折SV波(B_r)の振幅を計算することができる。

2.3 地表での振幅計算

境界面が地表の場合には、近似的に媒質(2)が無いとみなすことができるから、境界条件は媒質(2)の垂直応力成分、せん断応力成分を零とおき、垂直方向および切線方向の変位と応力が連続であるという関係を用いれば、反射P波、反射SV波の振幅を求めることができる。地表の振動のxおよびz方向の振幅は入射波の振幅と反射波による振幅との合成値として得られる。

地表面(自由面)に平面P波が角度 i_1 で入射する場合には次式が成立する (Fig.4参照)。

$$A_{SUR-P} X_{SUR-P} = B_{SUR-P} \quad (13)$$

ここで、

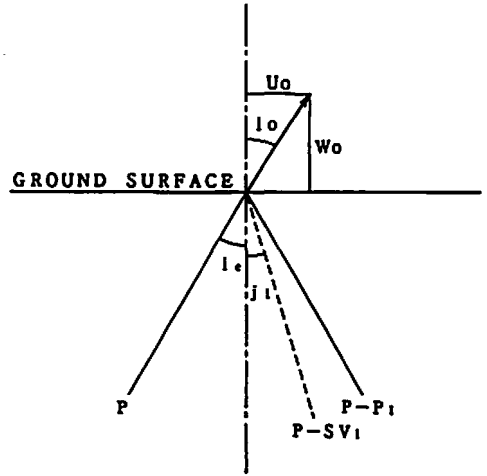


Fig. 4 Amplitude and direction of ground vibration at ground surface for incident P wave.

$$A_{SUR-P} = \begin{bmatrix} \sin(2i_1) & \frac{VP_1}{VS_1} \cos(2j_1) \\ -\cos(2j_1) & \frac{VS_1}{VP_1} \sin(2j_1) \end{bmatrix}$$

$$B_{SUR-P} = \begin{bmatrix} \sin(2i_1) \\ \cos(2j_1) \end{bmatrix}, \quad X_{SUR-P} = \begin{bmatrix} A_r/A_r \\ B_r/A_r \end{bmatrix}$$

式(13)の X_{SUR-P} は

$$X_{SUR-P} = A_{SUR-P}^{-1} B_{SUR-P} \quad (14)$$

として解くことができる。

地表面に平面P波が入射した場合に発生する地表の振動のxおよびz方向の振幅を U_o および W_o とすると、 U_o , W_o は入射波の振幅と反射波による振幅との合成値となるから、次式が成り立つ。

$$U_o = A_r \sin(i_1) + A_r \sin(i_1) + B_r \cos(j_1)$$

$$W_o = A_r \cos(i_1) - A_r \cos(i_1) + B_r \sin(j_1) \quad (15)$$

上式の関係と式(13)の関係より、

$$U_o = \frac{\cos(j_1)}{\cos(2j_1)} \cdot B_r, \quad W_o = \frac{1}{2\sin(j_1)} \cdot B_r \quad (16)$$

という関係が得られるから、地表の振動方向と地表面の垂線との間の角を i_0 とすると、

$$\tan(i_0) = \frac{U_0}{W_0} = \tan(2j_1) \quad (17)$$

故に、

$$i_0 = 2j_1 \quad (18)$$

となる。

平面P波が地表面に垂直に入射した場合には式(11)、(12)から、

$$A_1/A_2 = -1, A_3/A_2 = 2, B_1/B_2 = 0, B_3/B_2 = 0 \quad (19)$$

となる。

SV波入射の場合にはP波入射の場合と同様に変えて式を導くことができる。

3. プログラムの検証

上記した計算式に基づき、プログラムを作成した。作成したプログラムの妥当性を検証するために、1) 波線追跡法、2) 地層間の振幅比変化、3) 地表での振動振幅のそれぞれについて計算を行った。

3.1 波線追跡法

地層構造をFig. 5のように多層構造と仮定し、計算結果と手計算結果を比較した。地層の物性はFig. 5中

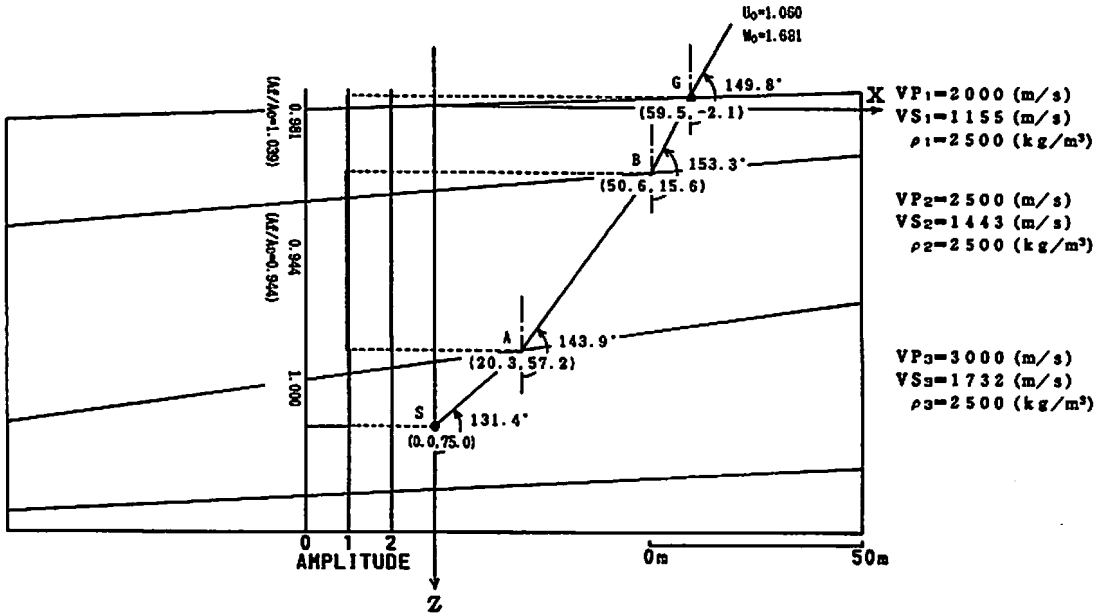


Fig. 5 An underground layer model and an example of calculation result for its model.

のように設定した。ポアソン比は各層とも0.25とし、地層勾配は地表2°、第1層5°、第2層8°としている。この図は振源S(波り深さ75m、●印)から平面P波が上方のみ伝搬し、地表面において振源からの水平距離で60m(許容誤差は水平距離で±0.5m)の受振点G(●印)に最短時間で到達する場合の波線経路を示している。計算結果は式(8)で表されるスネルの法則を用いて手計算した結果と同じであった。

3.2 地層間の振幅変化計算

媒質(1)と媒質(2)との境界面にP波、SV波が任意の角度で入射した場合の反射係数、透過係数を求め、その結果をMcCAMYの結果³⁾と比較した。Fig. 6は一例であるが伝搬速度が速い層から遅い層へ伝搬する場合である。図中の実線が反射P波、点線が反射SV波、一点鎖線が透過P波、二点鎖線が透過SV波を意味す

る。各係数はすべて絶対値で示している。このプログラムでは臨界屈折角以後の計算は行っていない。Fig. 6の結果がMcCAMYの結果と一致していることを確認した。このSV波の結果についても同様であった。

3.3 地表面での振動の振幅

地表面P波、SV波が任意の角度で入射した場合の地表面での振動の振幅を計算する。P波については式(17)からわかるように地表の粒子の振動の方向は $i_0 = 0$ の場合を除けば、一般には入射方向とは一致しないことがわかる。Fig. 7a)~d)はP波入射に対する A_1/A_2 、 B_1/A_2 、 U_0/A_2 、 W_0/A_2 である。 A_1/A_2 、 B_1/A_2 についての結果は参考文献4)の結果と一致している。また、SV波についての結果も同様であった。

3.4 計算例

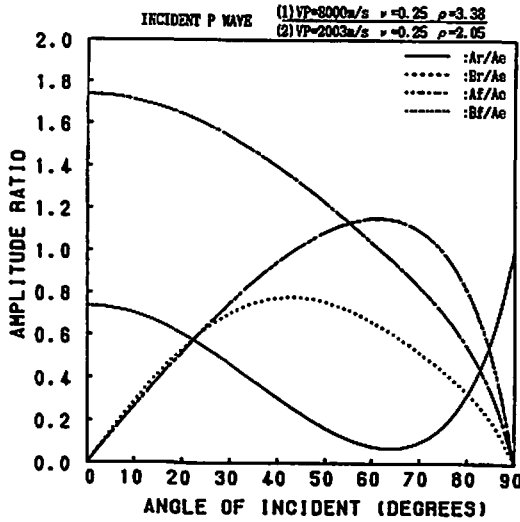


Fig. 6 An example of relation between amplitude ratio of refracted P to incident P and angle of incident at a plane boundary between isotropic media.

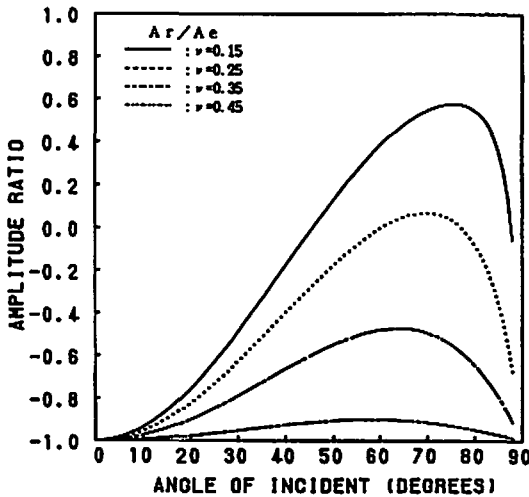


Fig. 7 (a) Relation between amplitude ratio of reflected P to incident P and angle of incident at ground surface.

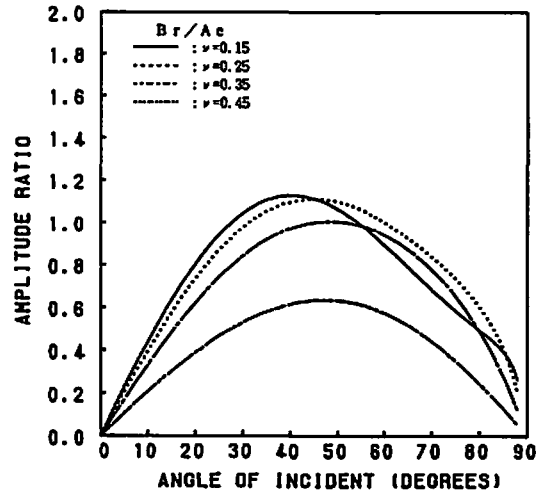


Fig. 7 (b) Relation between amplitude ratio of reflected SV to incident P and angle of incident at ground surface.

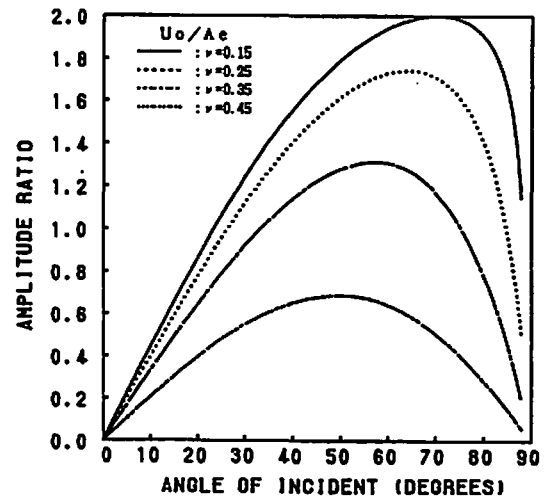


Fig. 7 (c) Relation between amplitude ratio of vertical vibration to incident P and angle of incident at ground surface.

作成したプログラムを用いて、Fig. 5の地層構造を仮定し、計算を行った。その結果についてはFig. 5中に示し、平面P波が受振点まで最短時間で到達する波線経路と波線が各層と交差する座標および伝搬角度を記入している。

本プログラムでは振幅減衰を考慮していないので、振源((0.0, 75.0))から射出された平面P波は第2層に入射するまで振幅1で伝搬する。第3層と第2層の

物性と入射角度より、第2層中を伝搬する平面P波の振幅は0.944と計算される。次に、第2層と第1層間のP波の透過係数は $A/A_0 = 1.039$ と求められるので、第1層中を伝搬する平面P波の振幅は $0.944 \times 1.039 = 0.981$ として求めることができる。これらの結果については図中のz軸より左側に表示している。

地表の振動の振幅 U_0 、 W_0 は2.3に従って計算され、 U_0 、 W_0 は地表面に沿った振動成分と地表面に垂直な振動成分として算出される。図中の線の長さは振幅1の長さに比例して描かれている。

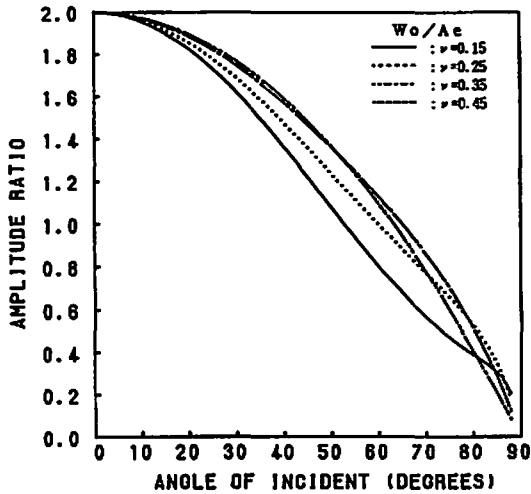


Fig. 7 (d) Relation between amplitude ratio of horizontal vibration to incident P and angle of incident at ground surface.

4. 地下の速度構造が地表面の振動振幅に与える影響についての一検討

いま、一例として、Fig.8(a), Fig.8(b)のように地下の速度構造が同じで、速度構造の傾斜が 10° と -10° の場合を計算した。これは同一斜面の上側に着目点がある場合と、下側に着目点がある場合に相当する。

振源は両方とも同じく地表下75mとし、水平距離60mの位置を着目点とした。Table 1には各層間の屈折波の振幅比(A_r/A_i)、入射・屈折角度($^\circ$)、地表でのx成分の大きさ(U_x)、地表でのz成分の大きさ(W_x)、振動方向($^\circ$)、各地層での伝搬距離(m)、振源から着目点までの直線距離(m)を示した。

この結果から、同一水平距離の場合、当然のことながら斜面下側へ伝搬するより、斜面上側へ伝搬する方が着目点までの伝搬距離が長く、約20m程度長くなっている。しかし、伝搬経路を考慮した伝搬距離の総和と振源と着目点までの直線距離との比は斜面上側で

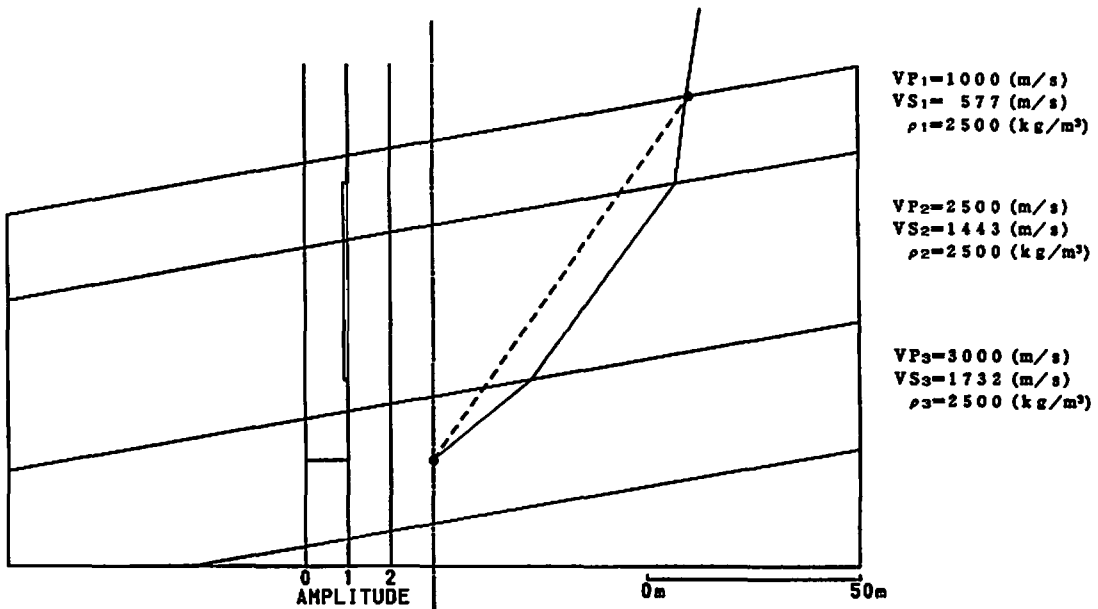


Fig. 8 (a) A calculation result of a slope model having same dip in each layers. Wave is propagated toward up-side of a slope. Horizontal distance to observation point from source point is 60m.

1.03, 斜面下側で1.02であり、Fig.8(a), Fig.8(b)の速度構造の場合には振源から着目点までの伝搬距離を直線と仮定したとしても伝搬距離の誤差として数%の差しか生じていないといえる。

次に、地層間の振幅変化については第1層中において斜面下側へ伝搬する振動の方が約25%振幅が大きくなって現れている。地表面での振動方向については、

斜面下側より斜面上側の水平成分は小さく鉛直成分が卓越している。地表面での振幅については、斜面上側の成分より、斜面下側において水平成分で約3倍、鉛直成分で約13%、大きく振動することがわかる。

このように、振源に対して着目点が斜面の上側にあるのか、下側にあるのかということだけでも地表面に生じる振動の方向、各成分の大きさは異なってくると

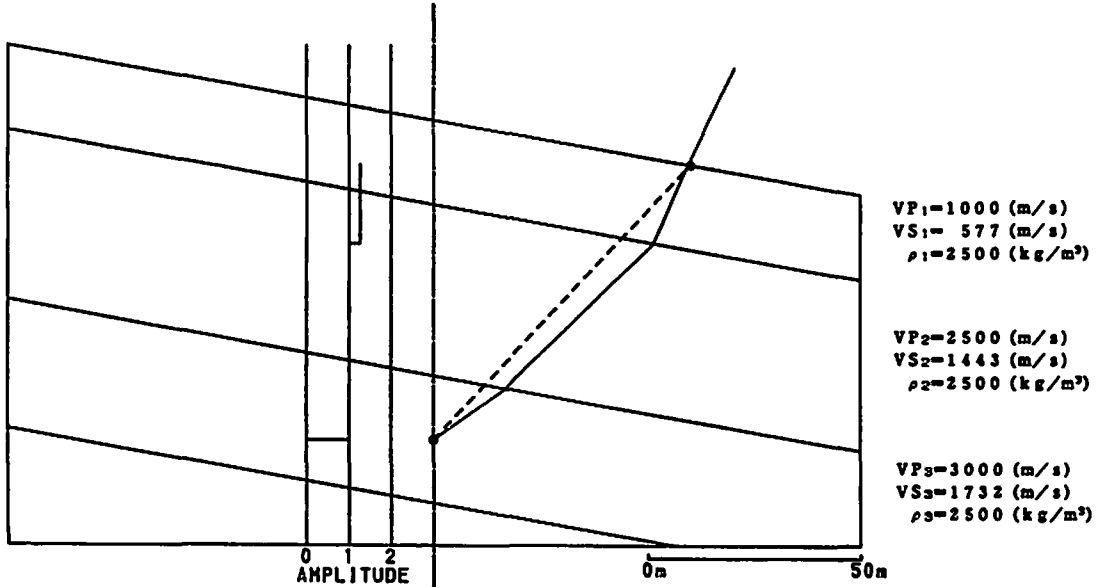


Fig. 8 (b) A calculation result of a slope model having same dip in each layers. Wave is propagated toward downside of a slope. Horizontal distance to observation point from source point is 60m.

Table 1 Calculation results for slope models of Fig. 8(a) and (b).

地層傾斜(°)	A_i/A_s	波線角度(°)	U_0	W_0	振動方向(°)	伝搬距離(m)	直線距離(m)
10	1.000 (1.000)	-50.4	0.679	1.942	-9.3	29.9	104.2
	0.911 (0.911 × 1.000)	-36.5				87.1	
	1.024 (1.124 × 0.911)	-6.9				107.7	
-10	1.000 (1.000)	-54.4	0.679	2.452	-25.5	20.7	87.8
	1.017 (1.017 × 1.000)	-45.6				69.1	
	1.268 (1.247 × 1.017)	-23.5				89.4	

いえる。

ここでは、地層の傾斜の影響について若干結果を示したが、振源から出た波は波の伝搬系において種々の影響を受けた結果として地表面での振動が発生するといえる。地表面での振動をより正確に、正しく把握するためにはこれらの要因および影響を明らかにしていく必要があると考えられる。

5. 伝搬経路を考慮した発破振動予測方法についての検討

上記のプログラムを用いた計算結果から伝搬特性に関して有益な情報を得ることが可能であるが、それら

の結果は単一振動数を対象とした結果である。しかし実際の発破振動には種々の振動数成分が含まれている。そこで、上記のプログラムによる計算結果を予測へ反映させるためにはスペクトルで考える必要がある。

地震の分野においては、観測波形はスペクトルを用いて次のように書き表わされる⁴⁾。

$$U(\omega, x) = G(x) \cdot S(\omega) \cdot H(\omega) \cdot M(\omega) \cdot \exp(-\lambda(\omega) \cdot x) \quad (2)$$

ここに $U(\omega, x)$ は観測波形の振幅スペクトル、 ω は角振動数、 $G(x)$ は波面の幾何学的広がり、 $S(\omega)$ は震源特性、 $H(\omega)$ は地下構造に起因する伝達特性、

$M(\omega)$ は計器の特性、 x は距離である。また $\lambda(\omega) = \omega / (2QV)$ である。 Q は逸散関数比と呼ばれ、岩盤の非弾性的な性質による波動減衰を表す指標 (Quality Factor) である。 V は波動の伝搬速度である。なお、地質材料の Q の値は $1 \sim 1000$ 程度である。

平田ら⁵⁾⁶⁾ は発破振動の予測に上式を適用することを試み、 $S(\omega)$ についての検討を行っている。また Q 値については金子ら⁷⁾⁸⁾ の研究がある。発破振動の場合は爆源の近傍に振動計を設置することが可能であるので、爆源近傍の振動波形から発破条件を含めた $S(\omega)$ を得ることもできる。

伝搬系の影響を検討することは、上式中の $H(\omega)$ を振源と受振点間の特性変化としてひとまとめとして取り扱うのではなく、地下構造に起因する波の伝搬経路や地層間での振幅変化といった点まで含めて、式(2)に反映させることである。

いま、Fig. 5 のように発破振動が伝搬していく場合を考える。振源から上層の境界面と波線が交差する点 (点 A) までの距離を r_1 とすれば、境界面へ入射する直前での波形スペクトルは $M(\omega) = 1$ として、

$$U(\omega, A) = r_1^{-1} \cdot S(\omega) \cdot \exp(-\lambda(\omega) \cdot r_1) \quad (2)$$

で表すことができる。式(2)の中の $G(x)$ は実体波を仮定しているので r^{-1} で表される。上層へ入射した直後の波形スペクトルは地層間での増幅特性 (2.2 で計算した振幅変化特性 (透過係数)) を T で表せば次式となる。

$$U(\omega, A)' = U(\omega, A) \cdot T_A \quad (2)$$

次に、点 A から上層の境界面と波線が交差する点 (点 B) までの距離を r_2 とし、上式の $U(\omega, A)'$ を振源とみなせば境界面へ入射する直前での波形スペクトルは

$$U(\omega, B) = r_2^{-1} \cdot U(\omega, A)' \cdot \exp(-\lambda(\omega) \cdot r_2) \quad (2)$$

で表され、上層へ入射した直後の波形スペクトルは

$$U(\omega, B)' = U(\omega, B) \cdot T_B \quad (2)$$

として得られる。

このような計算を繰り返すことによって、地表面での観測波形のスペクトルを求めることができる。地表面では地表面に垂直な成分と地表面に水平な成分のそれぞれについて求められる。観測波形は求められたスペクトルをフーリエ逆変換することによって得ることができ、PPV はその波形の最大値から求められることになる。

6. まとめ

発破振動の予測精度向上のためには振源特性、伝搬特性に分けて検討することが合理的である。本研究はこのような観点のもとに、実体波の伝搬について伝搬経路、地層間での振幅変化を考慮することを試みた。実体波の伝搬経路については最短時間で到達する波の経路を波線追跡法により明らかにし、その結果を用いて地層間での振幅変化については Zoeppritz 行列を計算して求めるプログラムを作成した。次に、これらの結果を発破振動の予測へ適用する方法について述べた。

今後、発破振動の予測が振動数領域で行われるとすれば爆源近傍で、同一条件で観測された観測波形による振源スペクトルの収集が必要であろう。

また、伝搬系においては実体波のみならず表面波として振動が伝搬する場合の取扱い、他の経路を伝搬してきた振動との重畳による影響、地形の影響等についても検討を行っていく必要がある。

謝 辞

本論文の作成に当たり、京都大学工学部資源工学教室探査工学講座教授佐々宏一先生、同講座渡辺俊樹先生に貴重な助言、資料を頂いた。ここに謝辞を表します。

文 献

- 1) たとえば、工業火薬協会編、「発破ハンドブック」、(1976)、山海堂。
- 2) K. H. Waters, "Reflection seismology", (1981), Wiley, New York.
- 3) K. McCamy, R. P. Meyer, T. J. Smith, Bulletin Seismological Society of America, 52, 4, pp. 923-955, (1962).
- 4) 日本建築学会、「地震地と地盤」、(1985)、丸善。
- 5) 平田篤夫、金子勝比古、稲葉 力、石山宏二、第 22 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 261-265, (1990)
- 6) 平田篤夫、金子勝比古、稲葉 力、石山宏二、第 23 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 362-366, (1991)
- 7) 金子勝比古、中村直昭、平田篤夫、大見美智人、物理探査, 42, 4, pp. 235-244, (1989).
- 8) 金子勝比古、平田篤夫、柴 拓海、大見美智人、物理探査, 42, 4, pp. 245-252, (1989)

The effect of propagation path on the blast vibration prediction

by Sunao KUNIMATSU*, Takehiro ISEI*

The following empirical equation is commonly used for the purpose of the prediction of the ground vibration induced by blastings.

$$PPV=K \cdot W^m \cdot D^{-n}$$

where, *PPV* is peak particle velocity, *W* is usually the sum of explosive charge with detonators of same delay time, *D* is direct distance from source to receiver and *K*, *m* and *n* are constants. In some sense, the characteristics of source and propagation path are roughly considered in this equation. It is well known that the difference between measured and estimated value vary widely.

In this paper, the characteristics of wave propagation through the layers are treated numerically. The computer program coupled ray tracing method and calculation of Zoepritz' amplitude equation was developed under the assumption that underground structure is known. The primary ray path of body wave is calculated firstly and next, reflection and refraction coefficients at each layer boundary between media are calculated by using the results of ray path in the program. Two calculation results of wave propagation toward upside or downside of a slope model having same dip in each layers are shown and discussed as an example (see Fig.8). Moreover, the application of the results to prediction of blast vibration has also been discussed.

(*Safety Engineering Department, National Institute for Resources and Environment, Ministry of International Trade and Industry, 16-3 Onogawa Tsukuba City, Ibaraki Pref., 305 Japan.)

工 業 火 薬

第53巻 第2冊 通巻 264号



1992年4月25日印刷 (隔月刊)

1992年4月30日発行

発行所 社団法人 工業火薬協会
会長 福山 郁生

〒103 東京都中央区日本橋2-3-21
(群馬ビル) 日本火薬工業会内
電話 03(3271) 6715~7
振替東京8-146724

西部支部

〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1
九州工業大学工学部物質工学科
応用化学コース内

電話 093(871)代表 1931 内線 446
5831

編集兼発行人 福山 郁生

編集部 東京大学工学部反応化学科

〒113 東京都文京区本郷7-3-1

電話 03(3812) 2111 内線7291, 7383

FAX 03(5800) 6871

印刷所 (有)石川印刷

〒162 東京都新宿区河田町7番7号

電話 03(3351) 3111(代)

FAX 03(3351) 3113