

トンネル掘進発破によって励起される振動の振動レベル予測法

平田篤夫*, 山本雅昭**, 稲葉 力***, 金子勝比古****

人体に対する地盤振動の影響を評価する指標として、一般に、振動レベルが採用されているので、発破による地盤振動問題においても振動レベル予測法の確立が重要であるという観点から、理論的予測法を提案している。振動レベルは人体の振動の周波数と継続時間に対する応答特性を考慮したものであり、周波数領域で考えると振幅スペクトルの積分値の関数として定義できるので、振動の生成、伝播減衰、応答の3つの要素過程に分割して各要素過程のスペクトルの積によって振幅スペクトルを予測する方法を採用した。推定された振幅スペクトルによって振動レベルを予測するとともに、実際のトンネル掘進発破において計測された表面地盤上の振動レベルと比較して正確な予測が行われ、かつ、施工管理に有用であることを示した。

1. はじめに

トンネル掘進発破に起因する地盤振動によって公害が発生しないようにするには、地盤振動がある限度以下になるように発破の方法を工夫することが大切であり、発破を行う前には地盤振動を正確に予測しておくことが望まれる。

発破による地盤振動と家屋等の建造物の被害の関係については、Langeforsによって整理されたものがよく知られている¹⁾。これによると被害の程度は変位速度に依存するため、建造物に対する安全管理には振動の最大変位速度が採用されている。

一方、発破による地盤振動の人体に対する影響の度合は周波数、振動方向、継続時間などによって異なる。特定建設作業を対象とする現行の振動規制法では、振動レベルによる規制が行われている²⁾。トンネル掘進

発破に起因する地盤振動を対象とした法規制値は与えられていないが、住居地域における発破によるトンネル掘進工事が今後増加することが予想されるので振動レベル予測法の確立は必要であると考えられる。

筆者らは、時間領域の振動波形はフーリエ変換により周波数領域の振幅スペクトルと位相スペクトルに等価に変換でき、かつ逆変換操作によりその逆向きの変換も可能であることに着目して、最大変位速度の予測問題に周波数と継続時間の概念を盛り込んだ予測理論を提案した³⁾。この方法は予測が比較的容易な振幅スペクトルを理論的に求めて、これに確率論を適用して最大変位速度を予測する方法である。従って、この振幅スペクトルを用いると最大変位速度とともに振動レベルを予測することも可能となる。

本研究では、まず、トンネル発破に起因する地盤振動の特徴を分析し、振幅スペクトル計算法の概要を述べる。次に、振幅スペクトルを用いた振動レベル予測法の方法論を展開するとともに、実測結果と予測結果を比較して、提案する予測法の実用性を検証する。

2. トンネル掘進発破による地盤振動の特徴

Fig. 1は段発破を行った際の変位速度波形であり、(a)は岩盤中で、(b)は隣接トンネルの壁面で同時に測定されたものである⁴⁾。(a)および(b)の観測距離は心抜き中心からそれぞれ11.8mおよび24.6mである。どちらの場合も、心抜き発破(1段目)による振動が最大振幅を示していることがわかる。心抜き発破がトンネル切羽面だけを自由面とする発破であるために、爆轟エネルギーが振動エネルギーに転化する割合が相対的に高く、その結果、心抜きによる振動が後段

1997年3月21日受理
*熊本工業大学工学部土木工学科
〒862 熊本市池田4-22-1
TEL 096-326-3111
FAX 096-326-3000
**旭化成工業株式会社化薬事業部
〒100 東京都千代田区内幸町1-1-1
TEL 03-3507-7812
FAX 03-3507-2670
***西松建設株式会社技術研究所
〒242 大和市下鶴間2570-4
TEL 0462-75-1135
FAX 0462-75-6796
****北海道大学大学院工学研究科環境資源工学専攻
〒060 札幌市北区北13条西8丁目
TEL 011-706-6322
FAX 011-706-6322

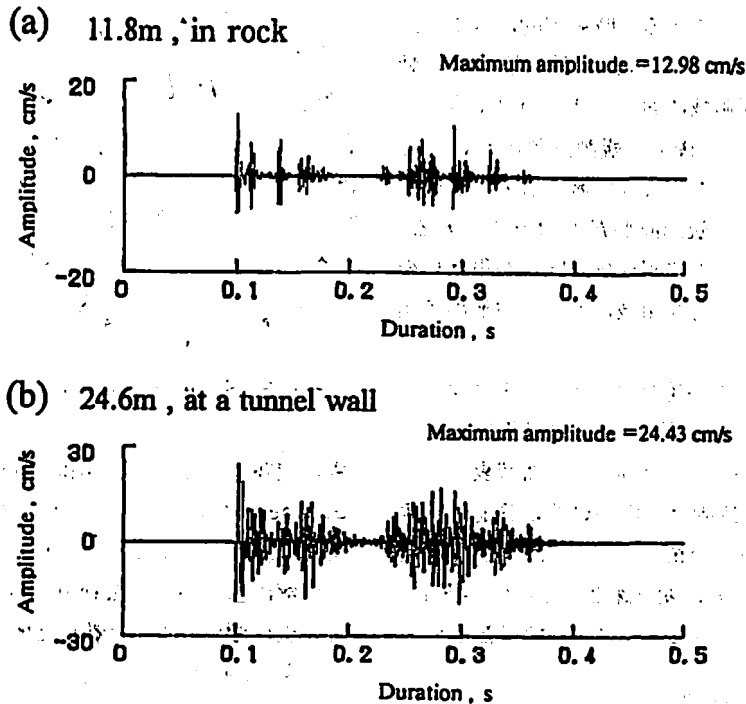


Fig. 1 Waveform by a multistage blasting in tunneling, (a) in rock mass, (b) at a tunnel wall

の発破による振動より総じて大きくなる。これは段発破法を採用した場合に共通して認められる特徴である。2段目以降では、必ずしも爆薬量が多いほど振幅値が大きくなるわけではない。このことは、抵抗線長の違いなどにより、爆轟エネルギーが振動エネルギーに転化する割合が異なるためと考えられる。岩盤中で観測される振動波形は(a)のように各段の振動が分離されているのが普通であるが、構造物の表面で観測される振動波形は(b)のように段ごとに分離せず連続的であることが多い。また、(b)が(a)に比べて遠い距離の観測波形であるにもかかわらず、振幅は(b)の方が大きい。このような現象は構造物の動的応答特性に関係する。当然のことながら、地表にいる人体は直下の表層地盤の動的応答を極大振動を感じるようになる。

心抜き発破は掘進の成否を左右し、前述したように、心抜き発破により励起される振動は払い発破によるそれより大きい。振動レベルは振動のエネルギー密度に対応した量であるので、心抜き発破と払い発破による振動の周波数と継続時間は同程度であるとすれば振動波形を振動レベルに変換した場合でも心抜き発破による振動レベルは払い発破によるそれより大きい値を示すことは明らかである。すなわち、心抜き発破に対する振動レベルを予測することは工学的に重要であるといえる。

3. 振動レベル予測理論

発破による地盤振動の特徴を分析した結果、観測さ

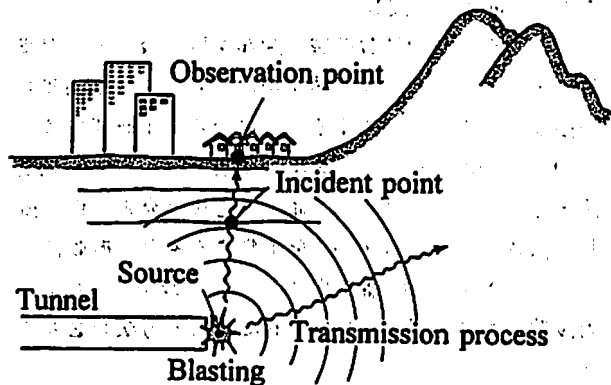


Fig. 2 A schematic diagram that tunneling by blasting generates vibrations, and these transmit in rock and respond under an observation site

れる振動を3つの素過程、すなわち、発破点における波動生成過程、これに続く波動伝播過程、および観測地域の動的応答過程に分割して分析する。

トンネル掘進発破に伴って生成された波動は、上記の3つの過程を経て観測される。Fig. 2はトンネル掘進発破により励起された波動が地盤中を減衰しながら伝播し、表層地盤の底部の入射点に入射する様子を模式的に示したものである。表層地盤は固有の動特性を持っているから、これらの影響を受けた振動が地表で観測される。したがって、問題の波動現象は発破点における波動生成過程、発破点から入射点までの波動伝播過程、および、表層地盤の動的応答過程で構成さ

れていると考えることができる。時系列的にみると、発破点で生成された波動 $S(t)$ は、波動伝播過程、動的応答過程という時間領域における2つのフィルター $D(t)$ および $A(t)$ を通った後で、観測波形 $F(t)$ になると考えることができる。このように考えると、3つの案過程の合積によって、観測波形 $F(t)$ は与えられる。しかし、各案過程における位相成分の同定が現状技術では問題が多いことから時間領域における波形の予測は困難といえる。

そこで、周波数領域で問題を取り扱うことにすると、観測波形の振幅スペクトル $F(\omega)$ は、発破振動源から放出される振動源スペクトル $S(\omega)$ 、伝播減衰スペクトル $D(\omega)$ 、および、観測点近傍の動的応答過程を表す周波数応答関数 $A(\omega)$ の積として式(1)のように表現される。ここで、 $F(\omega)$ は変位速度成分 $v(t)$ ($=F(t)$)のフーリエ振幅スペクトルとして式(2)で定義される。

$$F(\omega) = S(\omega) \cdot D(\omega) \cdot A(\omega) \quad (1)$$

$$F(\omega) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} v(t) \cdot \exp(-i\omega t) dt \right| \quad (2)$$

ここで、 ω は角周波数である。

このように、周波数領域で問題を取り扱くと、周波数ごとに各スペクトルの値を掛け合わせて、観測波形の振幅スペクトルが求まることになる。本研究では、式(1)に立脚するスペクトル予測法をスペクトル乗積法と呼んでいる。式(1)に従って心抜き発破に伴う振動の振幅スペクトル $F(\omega)$ を予測する場合、振動源スペクトル $S(\omega)$ 、伝播減衰スペクトル $D(\omega)$ 、および周波数応答関数 $A(\omega)$ を具体的に求める方法が必要である。

まず、振動源スペクトル $S(\omega)$ を評価するには、発破点における破壊のメカニズムと波動生成機構の解明が不可欠である。心抜き発破の幾何形状から判断すると、弾性理論解を応用した球振動源モデルが適当ではないかと想像される。

等方均質弾性体の球の表面に垂直に一様な動的圧力が作用する場合、弾性波動はP波により構成され、その波面は同じ中心を持つ球面である。発破振動は破壊面のうち最外周の引張破壊面から周囲の弾性圏に放出される弾性波であると考え、これが発破中心から距離 r だけ離れた観測点で観測されるものとする。

破壊面の外半径を振動源半径 a と呼び、発破により破壊面の外周面に作用する圧力を時間 t の関数として $P(t)$ と定義する。弾性圏に放出される弾性波はFig. 3に示す弾性波動問題を解くことにより与えられる。すなわち、無限弾性体中の半径 a なる球状空洞の内壁に、圧力 $P(t)$ が作用した場合の弾性体内の動的変位

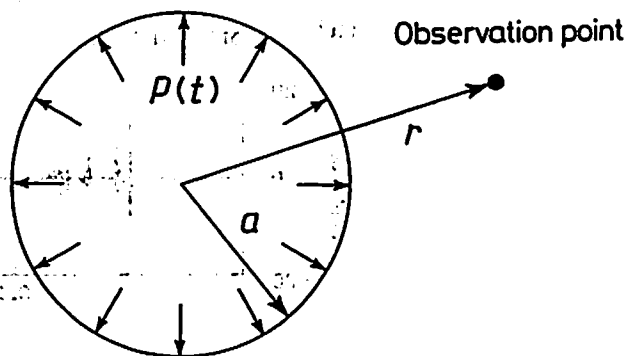


Fig. 3 Spherical source and boundary condition

場の問題となる。この問題の変位ポテンシャル関数はSharpe⁵⁾によって与えられており、その一般化した解は伊藤ら⁶⁾により与えられている。ここでは、伊藤らの解に基づいて、振動源スペクトルの定式化を行うと、破砕面中心から離れた地点における振幅スペクトル $V(r, \omega)$ は式(3)で与えられる。

$$V(r, \omega) = aP_0\omega / (\rho r V_P) \times [(4V_S^2/a^2 - \omega^2)^2 + (4V_S^2\omega/a/V_P)^2]^{-1/2} \times \xi(\beta - \alpha)\omega [(\omega^2 + \alpha^2)(\omega^2 + \beta^2)]^{-1/2} \quad (3)$$

ここで、 V_P および V_S はP波およびS波の伝播速度、 ρ は岩盤の密度である。また、 ξ は、 $P(t)$ の関数形は種々提案されているが、それらを一般化して表現すると式(4)となる⁷⁾。

$$P(t) = P_0 \cdot \xi \cdot [\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)], t \geq 0 \quad (4)$$

ここに、 P_0 は最大作用圧力、 ξ は $\text{Max}[P(t)] = P_0$ とするための正規化定数である。また、 α, β は $\alpha < \beta$ なる関係を有し、装薬条件や爆薬の種類などに関する正の定数であり、爆源圧力定数と呼ばれる。 β は爆発の衝撃作用(この大きさは主として爆速に比例する)、 α は生成ガスの圧力作用を表現するパラメータであると解釈されている。

発破振動が、通常、変位速度の形で表現されることを考えると、式(3)の変位速度スペクトルの $r = a$ の場合が、振動源スペクトル $S(\omega)$ であると定義することにする。すなわち、 $S(\omega) = V(r = a, \omega)$ とする。

球振動源モデルでは、 $r \geq a$ が弾性圏であるという制約から、 $r = a$ における接線方向応力 σ_θ は引張強度 S_t 以上の値をとることはない。また、当然のことながら、 $r = a$ において最大引張応力を示す。したがって、最大引張応力と最大作用圧力の間に、 $\text{Max}[\sigma_\theta(r = a, \tau)] = \kappa P_0$ の関係が成立することになる。ただし、 κ は α, β および岩盤のポアソン比 ν により定まる正定数であり、 $\text{Max}[\sigma_\theta(r = a, \tau)] = S_t$ と仮定すると、 $P_0 = S_t/\kappa$ なる関係が得られる。発破掘削を行う岩盤

の動的ポアソン比0.2~0.35に対応する k の値は0.65~0.75であり、平均的に見ると $k=0.7$ である。結局、球振動源モデルにおける最大作用圧力 P_0 は岩の引張強度によって与えることができる。

つぎに、伝播減衰スペクトル $D(\omega)$ を評価する上で考慮すべき波動減衰は幾何減衰と粘性減衰であると考えられる。波動の幾何学的拡散効果が内部減衰効果とは独立に与えられるものと仮定すると、2次元および3次元波動の伝達スペクトルは伝播距離に対する幾何学的拡散項を付加することにより与えられることになる。また、幾何学的拡散項が周波数に独立と仮定できる場合には、波形の時間的關係に幾何学的拡散項が影響を与えないことになる。心抜き発破に伴うP波が問題であるから、幾何減衰は伝播距離の逆数として近似することが可能であり、伝播距離として発破点と入射点あるいは観測点の直線距離が採用できる。Constant Q理論⁹⁾によると、粘性減衰は地盤のQ値、伝播距離、波動の周波数と伝播速度に関係するから、これらの正確な測定が必要であると考えられる。これらのパラメータのうち、現場測定が難しいのはQ値であるが、弾性波探査などの測定波形の初動部分を用いる実用的なQ値測定法が開発されている^{9,10)}。結局、全てのパラメータが測定できるので、伝播減衰スペクトル $D(\omega)$ は式(5)により与えられる。

$$D(\omega) = (a/r) \exp[-(r-a)\omega / (2V_pQ)] \quad (5)$$

つぎに、周波数応答関数 $A(\omega)$ は地盤構造に依存するので、周波数応答関数を求めるには地盤構造とこれへの入力スペクトル $S(\omega) \cdot D(\omega)$ が既知である必要がある。これらが与えられると、動的応答解析を行って周波数応答関数を求めることができる。周波数領域における動的応答解析を行って周波数応答関数 $A(\omega)$ が求まることは疑いない。

結局、3つの乗過程におけるスペクトルは全て求めることができるので、これらの積によって観測点における推定振幅スペクトル $F(\omega)$ を計算することができることになる。

振動レベル L_a は、振動の変位加速度の実効値 a_{rms} を用いて、式(6)によって定義される量である。

$$L_a = 20 \cdot \log(a_{rms}/a_0) \quad (6)$$

ここに、 a_0 は基準の変位加速度(10^{-5} m/s^2)である。ただし、市販の振動レベル計は a_0 の体感依存性を考慮に入れ、入力信号に対して2種類の体感補正を自動的に行って、振動レベル L_a を0.63秒ごとに表示するように設計されている。体感補正の1つは周波数と振動方向に関係する補正である。Fig. 4に示すように

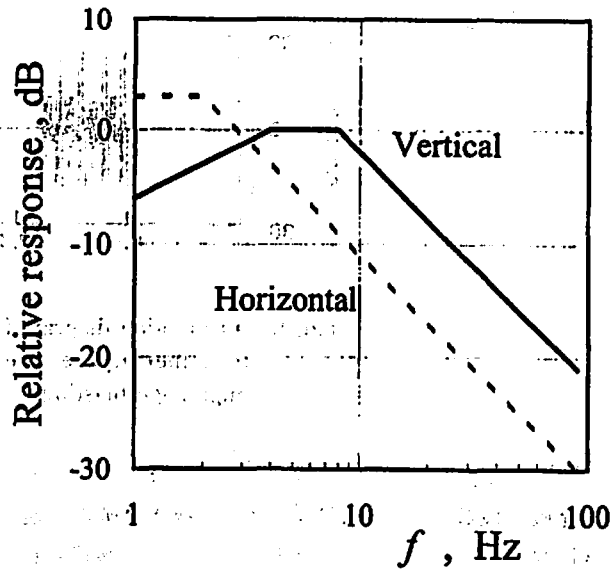


Fig. 4 Corrective filter in frequency domain of vibration level meter for human body.

人間の振動に対する感覚が周波数と振動方向によって異なり、上下方向は4~8 Hz、水平方向は1~2 Hzの振動に対して敏感であることに立脚した補正であり、この補正のために市販の振動レベル計は体感補正フィルターを内蔵している。2つ目の体感補正は振動の継続時間に関係するものである。この補正のために市販の振動レベル計では、整流回路の平滑時定数が0.63秒に設定されている。

振動レベル計の特性、言い換えれば、地盤振動に対する体感特性を考慮すると、地盤振動の予測法としては、振動方向ごとの周波数特性、および継続時間を正確に予測できる方法が必要となることは明らかである。ただし、人間は3 Hz以上では上下振動に、3 Hz以下では水平振動に対して敏感であること、発破による振動が数十 Hz~数百 Hzの範囲にあることなどを考慮すると、発破に起因する地表の振動の予測に問題を限定すると、上下方向の振動についてその周波数特性と継続時間が正確に予測できれば十分であると考えられる。すなわち、人体の上下振動に対する周波数応答特性 $H(\omega)$ がFig. 4の実線に示すようにわかっていて、推定振幅スペクトル $F(\omega)$ が変位速度成分のフーリエ振幅として定義されているので、これらに ω を乗じることにより周波数に関する体感補正を行った加速度振幅スペクトル $F^*(\omega)$ は式(7)のように与えられる。また、変位加速度の実効値 a_{rms} は周波数領域では $F^*(\omega)$ を用いて式(8)で与えられる。

$$F^*(\omega) = \omega H(\omega) F(\omega) \quad (7)$$

$$a_{rms} = [n/0.63 \int_0^{0.63} \{F^*(\omega)\}^2 d\omega]^{1/2}, T_d < 0.63$$

$$= [n/T_d \int_0^{T_d} \{F^*(\omega)\}^2 d\omega]^{1/2}, T_d \geq 0.63 \quad (8)$$

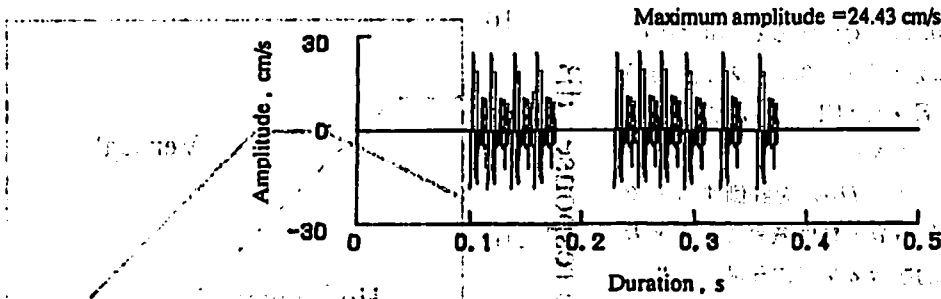


Fig. 5 Assumption diagram for calculation of vibration level to superimpose the cut-blasting waveform in multistage blasting.

ここで、 T_d は振動の継続時間である。また、 n は段発破の段数である。 $F^*(\omega)$ は、心抜き発破の加速度振幅スペクトルであり、当然のことながら後段の払い発破のスペクトルより大きい。Fig. 5で模式的に示すようにFig. 1 (b)における心抜き発破の振動が払い発破でも生じると仮定していることに他ならないので、すなわち、心抜きを段発破の段数分重ねることにより段発破全体で得られる実効値 a_{rms} は実際の段発破における全振動波形の実効値より若干大きくなる。このことは本予測法による振動レベルは安全側の予測を行っていると考えられることができる。

結局、周波数領域における振幅スペクトルを推定することにより、振動レベルを理論的に予測できることを明らかにした。

4. 表層地盤における周波数応答関数と振動レベル予測問題

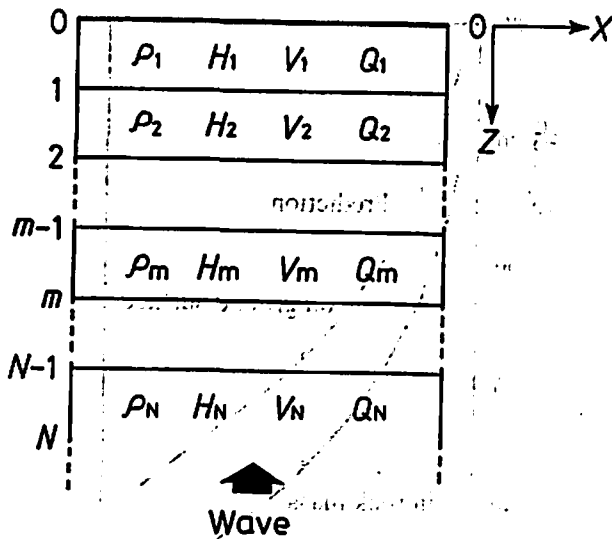
掘進発破によって励起された波動は周囲の岩盤に伝播し、地表の観測点に到達するまでに必ず表層地盤を通過する。波動が下から入射してきた場合の増幅特性は音響インピーダンスによって規定される。ここで、対象地盤の地下構造は表層地盤が岩盤の上にあるような2層構造である場合を考える。 $\rho_0 V_0$ を表層の音響インピーダンス、 $\rho_i V_i$ を岩盤の音響インピーダンス、 ρ および V をそれぞれの密度およびP波伝播速度とすると、音響インピーダンスの比 $\rho_0 V_0 / \rho_i V_i$ が1より小さい場合、すなわち、多くの表層地盤構造に共通する条件のもとでは、透過波の振幅は入射波の振幅より大きくなる。その結果、表層地盤が多層構造である場合には、各層の境界で音響インピーダンスの比に応じた透過および反射が行われ、地表では特定の周波数成分が増幅されたスペクトル特性を示すことになる。したがって、地表の振動を論ずる場合、上述した表層地盤に特有の増幅効果の評価が重要である。

いま、岩盤を等方均質と仮定すると、発破点から放出される弾性波動は発破点を中心にして球面波として伝播するが、入射点と発破点十分に離れていれば、

入射点付近の波面は近似的に平面であると考えられることができる。このように考えると、表層地盤に斜め下方から入射する平面波動が問題である。ここで、境界面でスネルの法則が成立すると考えて、入射角と射出角の関係を試算してみる。ただし、通常の表層地盤構造では $V_0/V_i \leq 0.5$ であることに着目して、計算には、上限値 $V_0/V_i = 0.5$ を採用する。このとき、 $\sin \theta_0 = 0.5 \sin \theta_i$ である。したがって、入射角60度のとき射出角26度、入射角80度のとき射出角30度である。この試算結果は、かなり斜め方向から波動が入射しても射出角は相当に小さく、地表に近づくほど伝播速度が低下する通常の成層地盤では、地表に近づくほど射出角が減少することを示唆している。したがって、多くの場合に、入射点は地表観測点の直下であると近似できると考えられる。この場合、P波入射に対する表層地盤内の波動は上下方向に伝播する一次元波動として取り扱うことができる。

表層地盤が成層構造とみなせる場合には、表層地盤を構成する各地層がそれぞれ単位要素であると考えられることができるから、地層の中まで要素分割する必要はないと考えられる。このように、各地層をそれぞれ単位要素と考えて、全体としての増幅特性を周波数領域において求める解析方法として、Haskellの伝達行列法¹¹⁾の適用が最も簡単であると考えられる。そこで、鉛直下方から平面P波が入射する場合の地表の振幅増幅率、すなわち、周波数応答関数 $A(\omega)$ をHaskellの伝達行列法を用いて解析する。このために、表層地盤をFig. 6に示すような N 層地盤モデルで表現し、各層の境界における変位と応力の連続条件から入射波の変位 u_N と地表の変位 u_0 の関係を求める。入射波に対する地表面の振幅増幅率は u_0/u_N の絶対値をとることにより求められる。ここで、入射波および地表面の変位速度はそれぞれ $i\omega u_N$ および $i\omega u_0$ であることから、振幅増幅率は周波数応答関数 $A(\omega)$ に他ならないことになる。

本解析に必要な各地層の厚さ、P波伝播速度、密度、



H_m	V_p m/s	ρ t/m ³	Q
4.0	700	1.5	3
1.9	2000	2.2	5
1.5	1500	1.8	5
5.3	2000	2.2	10
	2500	2.5	10

Fig. 8 A ground model to calculate the response function

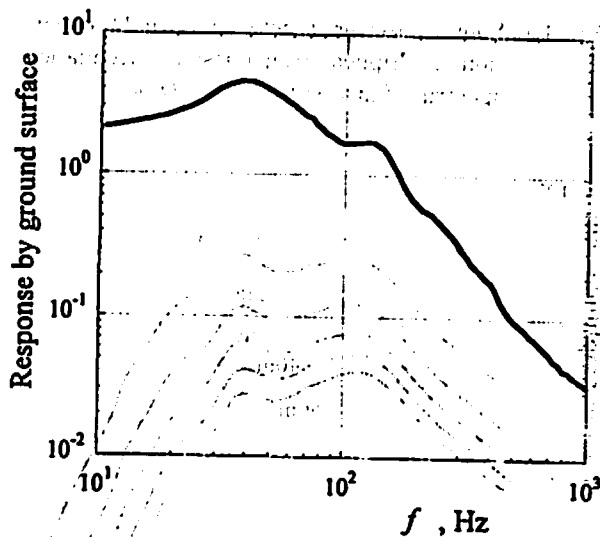
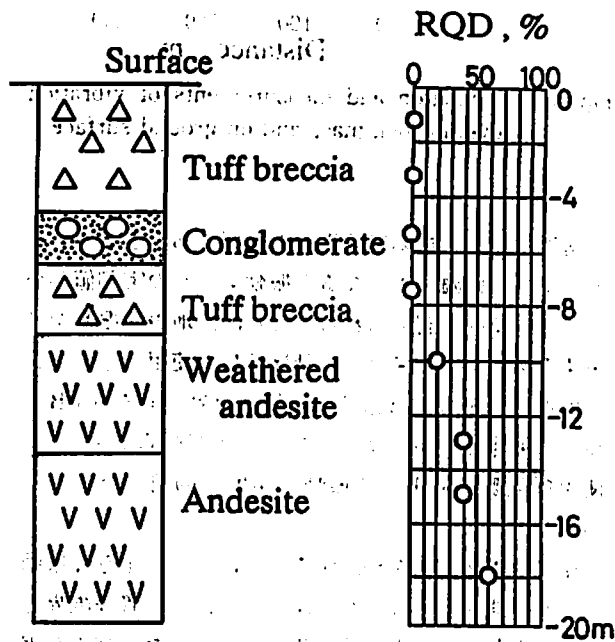


Fig. 9 Frequency response function $A(\omega)$ at ground surface

Fig. 7 Ground structure and RQD under an observation point

およびQ値はボーリング調査、速度検層、弾性波探査、および土質試験による通常の地盤調査法によって決定することができる。また、著者らは地表の微動スペクトルを計測して表層地盤の構造を推定する方法も提案している¹²⁾。従って、地表が対象地点である場合の周波数応答関数 $A(\omega)$ を計算することは容易である。

対象地点において事前に実施された弾性波探査によると、岩盤の平均的なP波伝播速度は2.5km/s程度である。また、ボーリング調査によると、地表の振動観測点の直下の地質柱状図およびRQDの分布はFig. 7のようである。すなわち、地表より角礫岩、礫岩、角礫岩、風化安山岩、安山岩の順の成層構造である。こ

れを5層の成層モデルとしてFig. 8に示すようにモデル化して、周波数応答関数 $A(\omega)$ を計算するとFig. 9に示す $A(\omega)$ が得られる。

振動源スペクトルと伝播減衰スペクトルは心抜き発破による破壊領域の寸法と岩盤物性から必要なパラメータを $a=1.5$ m; $P_0=4.5$ MPa, $\nu=0.25$, $\rho=2500$ kg/m³, $Q=10$, $\alpha=0$, $\beta=\infty$ として計算した。その場合の、振動源スペクトルと伝播減衰を受けて変化するスペクトルはFig. 10に示すようである。太実線が $S(\omega)$ であり、細実線が $S(\omega)D(\omega)$ である。図中の数字は伝播距離を示していて、伝播距離が大きくなるにしたがって $S(\omega)D(\omega)$ は高い周波数成分の振動ほど大きく減衰していく様子がわかる。振幅スペクトル $F(\omega)$ はそれぞれの伝播距離毎の $S(\omega)D(\omega)$ に $A(\omega)$ を乗じることにより求められる。Fig. 11はそれぞれの伝播距離に対応した $F(\omega)$ の計算結果である。 $S(\omega)D(\omega)$ に対して $A(\omega)$ の特性が影響して、伝播距離が

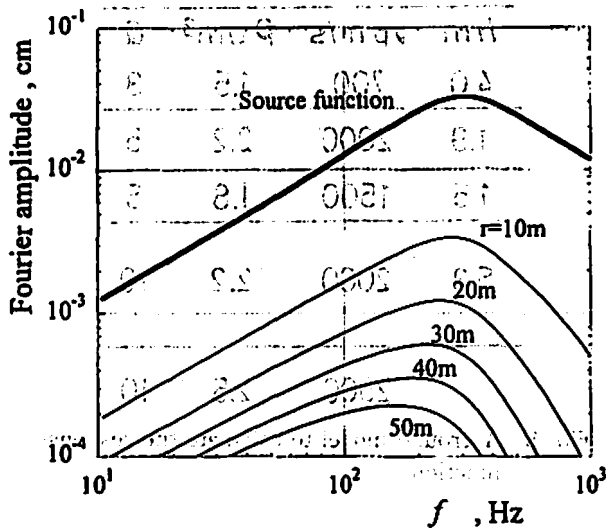


Fig. 10 Source spectrum function $S(\omega)$ and the function multiplied transmission attenuation spectrum function to it, $S(\omega)D(\omega)$

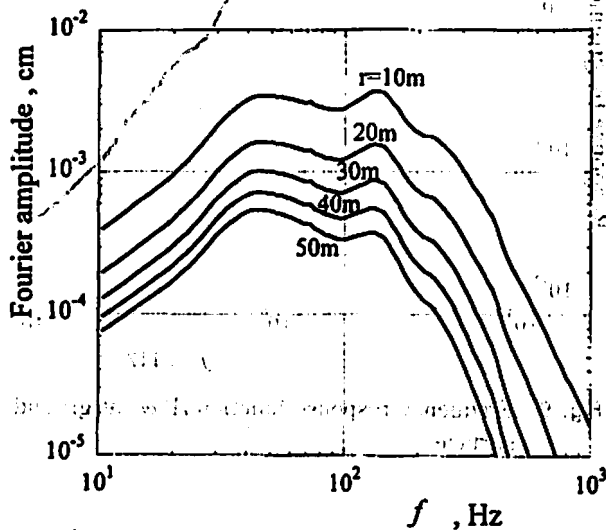


Fig. 11 Amplitude spectrum function $F(\omega)$

大きくなっても比較的低周波数成分の振動が卓越していることがわかる。すなわち、伝播距離が大きくなると距離減衰効果によって高周波数成分の振動は低減されるが、観測点直下の表層地盤による特定の周波数成分に対する増幅効果の影響が示されていることがわかる。

上記の推定した $F(\omega)$ によって予測した振動レベルと実測の振動レベルを比較すると Fig. 12 に示すようである。ここで、地表における予測値を破線で、実測値を○印でそれぞれ示している。また、観測点直下の岩盤中に埋設した振動計による振動レベルの実測値を●印で、その場合の予測値を実線で示している。予測値および実測値ともに地表における振動レベルは岩盤中に比べて 10 dB 程度大きい値を示している。これは

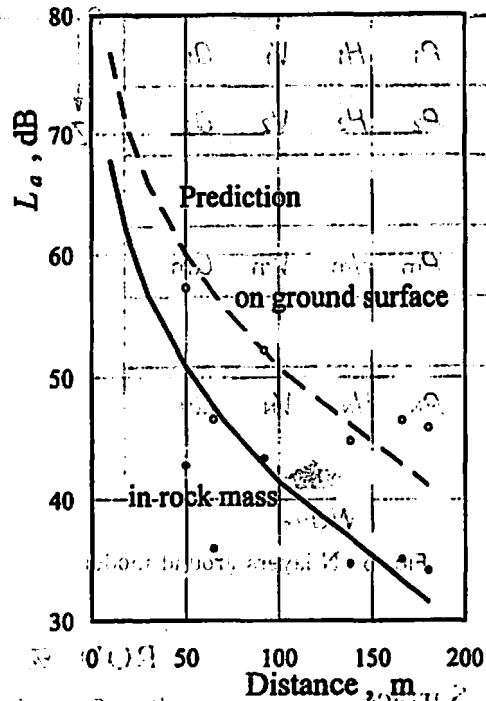


Fig. 12 Prediction and measurements of vibration level in rock mass and on ground surface

表層地盤による振幅増幅現象の影響であると考えられる。また、距離が近くなると振動レベルの実測値が小さくなる傾向が認められる。これは、地表の振動を考慮する必要がない場合の設計爆薬量を使用すると、管理地点に 50 m より接近すると管理限界である 60 dB を超える可能性が高くなったので、その区間については使用爆薬量を制限して振動の発生を抑制したためである。

結局、本予測法を採用することにより、正確な振動レベル予測を行うことが可能となり、かつ管理限界を超える振動の発生を未然に防いで公害のない施工が実現できたといえる。

5. おわりに

トンネル掘進発破による地盤振動の振動レベルをスペクトル乗積法に基づいて予測する方法論を提案した。トンネル掘進発破では、心抜き発破による振動が最も大きく、かつ重要であることを示した。心抜き発破で励起された弾性波動が観測点で計測される経過を見るとき、周波数領域では振動源スペクトル、伝播減衰スペクトル、および周波数応答関数の 3 つの要素過程に分割することができ、それぞれの積で観測点における振幅スペクトルを推定することができることを示した。また、3 つのスペクトルを理論的に決定することができることを明らかにするとともに、推定された心抜き発破の振幅スペクトルを用いて、段発掘進発破における振動の振動レベルは心抜き発破による振動レベルの

段数分の和として安全側に予測可能であることを示した。

また、地表の推定振幅スペクトルから振動レベルを予測した事例を示し、振動レベルの予測値が実測値と良好な一致を示し、現実問題においても提案する予測法が有効に適用されたことを示した。

提案する予測法はトンネル掘進の段発発破で発生する振動が観測点でどのような振動レベルを示すかを予測する方法であるので、観測点周囲の地盤構造が推定できて、その周波数応答関数が計算できれば隣接トンネルなどの地下構造物の振動問題にも適用することが可能である。

文献

- 1) Langefors, U. and Kihlstrom, K., "Modern Technique of Rock Blasting", P. 278, (1978), John Wiley and Sons.
- 2) 通商産業省立地公害局編「公害防止の技術と法規, 振動編」; P. 235, (1980)
- 3) 平田篤夫, 金子勝比古, 資源・素材学会誌, 108, 5, P. 389 (1992)
- 4) 平田篤夫, 高橋康寿, 石山宏二, 金子勝比古, 大見美智人, 第10回西日本岩盤工学シンポジウム論文集, P. 119 (1989)
- 5) Sharpe, J. A., Geophysics, 18, P. 144 (1942)
- 6) 伊藤一郎, 佐々宏一, 水曜会誌, 16, 2, P. 75 (1966)
- 7) Duvall, W. I., Geophysics, 18, P. 310 (1953)
- 8) Kjartansson, E., J. Geophys. Res., 84, B9, P. 4737 (1979)
- 9) 金子勝比古, 中村直昭, 平田篤夫, 大見美智人, 物理探査, 42, 4, P. 235 (1989)
- 10) 金子勝比古, 平田篤夫, 柴拓海, 大見美智人, 物理探査, 42, 4, P. 245 (1989)
- 11) Haskell, N. A., BSSA, 43, 17 (1953)
- 12) 平田篤夫, 金子勝比古, 資源・素材学会誌, 108, 3, P. 199 (1992)

Prediction of vibration level in tunnel blasting

by Atsuo HIRATA*, Masaaki YAMAMOTO**, Tsutomu INABA***
and Katsuhiko KANEKO****

The underground construction, such as tunneling, frequently causes the public hazard owing to the ground vibration. The ground vibration induced by the multistage blasting in tunneling is discussed and a method to predict the amplitude spectra is proposed as well as a statistical method to evaluate the vibration level in order to prevent the public hazard.

The theoretical analysis method of the vibration level to estimate the influence on human bodies is proposed as a product of the source spectrum function, the transmission attenuation spectrum function and the frequency response function named the Spectral Product Method. And the spectra are theoretically determined, respectively. Predictions are compared with the measurements to determine if a match has occurred. It is confirmed that these are in agreement, actually.

(*Dept. of Civil Eng., Kumamoto Institute of Technology, 4-22-1, Ikeda,
Kumamoto 860, JAPAN

**Explosives Division, Asahi Chemical Industry Co., Ltd., 1-1-1
Uchisaiwai-cyo, Chiyoda-ku, Tokyo 100, JAPAN

***Technical research Institute, Nishimatsu Construction Co., Ltd. 2570-4
Shimotsuruma, Yamato, Kanagawa 242, JAPAN

****Division of Environmental Resource Engineering, Graduate School of Engineer-
ing, Hokkaido University, N13W8, Kita-ku, Sapporo 060, JAPAN