

(75) 発破振動の予測法

西松建設株式会社技術研究所 ○平田 篤夫
熊本大学工学部 金子 勝比古
西松建設株式会社技術研究所 稲葉 力
西松建設株式会社技術研究所 石山 宏二

A prediction method of blasting vibration

Atsuo HIRATA, Nishimatsu Construction Co., Ltd.
Katsuhiko KANEKO, Kumamoto University, Faculty of Eng.
Tsutomu INABA, Nishimatsu Construction Co., Ltd.
Koji ISHIYAMA, Nishimatsu Construction Co., Ltd.

Abstract

It is the purpose of this paper to predict the amplitude of blasting vibration. This is significant for the safety control in blasting work. However, the estimation of the amplitude in time domain is difficult due to uncertainty of the phase angle of the vibration component, which should be strictly decided after due consideration reflection, refraction and dispersion during the wave propagation. Then, there is little possibility of the waveform prediction conclusively in the present situation.

In frequency domain, Fourier spectrum of the observed blasting vibration is represented by a product of a blasting source function related with failure mechanism by blasting, a transfer equation through rock mass and a local property around an observation area assuming a frequency is constant. The prediction of blasting vibration is possible in frequency domain, because each characteristic can be estimated with high accuracy. It is assumed that the observed waveform in random process depends upon stationary gaussian process. The maximum amplitude of blasting vibration at a certain distance from the source point can be predicted by the consideration of probability and the power spectral density function estimated from Fourier spectrum.

1. 緒言

発破を用いたトンネル掘進の際に発生する振動の予測には、使用爆薬量および波動の距離減衰を考慮した経験的な手法¹⁾が採用されることが多い。この種の経験式は、岩盤種別や発破条件等が異なる多数の条件下で計測した最大振幅値に対して統計的处理を施した結果である。それをある特定の原位置計測結果に適用する場合、最大振幅の伝播距離に対する分布性状と経験式による予測結果は概ね一致するものの、定量的評価を与えるほど高い精度は望めない。従って、経験式を用いて得られる最大振幅の予測値には相当の安全率を付与することが必要とされる。本研究では、理論的な根拠のもとに発破設計を行うことを目的として、従来の経験的な手法とは異なる概念のもとに発破振動を予測する方法を提案する。

時間領域における発破振動振幅値を決定論的に推定するためには、周波数領域において観測振動の振幅スペクトルおよびそれに対応する位相スペクトルを確定する必要がある。そのためには、発破による破壊域、減衰、反射、屈折さらに散乱現象などの波動伝播現象および位相速度の分散性等を厳密にモデル化することが要求されるため、位相スペクトルを確定することはきわめて困難な問題といえる。一方、観測波形のフーリエ振幅は、破壊領域、波動伝播過程および観測点近傍の局所的構造に依存した周波数応答関数の積で表現

できる。また、それぞれの応答関数は十分な精度で評価可能であり、周波数領域においては、発破振動レベルを予測することができる。そこで、位相スペクトルを確定させる代わりに、確率論的概念²⁾を適用することにより、時間領域における最大振動速度振幅値を推定する手法について検討する。すなわち、発破振動は定常正規確率過程に従うという仮定を前提に、発破振動スペクトルから時間領域における最大振幅を予測する発破振動予測理論の概要を示す。さらに、岩盤中および地表で計測した実測波形記録に基づいて、提案する評価理論の妥当性について考察する。

2. 発破振動予測理論

2.1 発破振動スペクトル

発破振動スペクトルを「理想的な測定系で観測される発破振動のフーリエ振幅スペクトル」として定義する。発破振動の発生、伝播機構を考慮すると、観測発破振動スペクトル $F(\omega)$ は、発破点の岩盤破壊に起因するスペクトルすなわち震源スペクトル $S(\omega)$ と震源から観測点までの波動伝播特性である伝達スペクトル $D(\omega)$ および観測点地盤の局所的構造特性 $A(\omega)$ との積として(1)式のように表現できる。

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

観測点が岩盤中にある場合には、観測点直下の局所的な地盤構造による増幅効果を考慮する必要がなく、 $A(\omega) = 1$ となる。観測点がトンネル等の地中構造物内部にある場合は、構造物周辺の緩み領域に起因する共振特性 $f(\omega)$ をBEM等の数値解析³⁾を実施して求める。また、観測点が表層にある場合はHaskellのマトリックス法⁴⁾により層構造を考慮した増幅特性 $f(\omega)$ を求め、いずれの場合も、 $A(\omega) = f(\omega)$ とおくことにより、局所的な影響を評価することができる。

伝達スペクトルは波動が伝播する地盤の弾性及び非弾性的な性質に依存した関数形を示し、それは(2)式で示される⁵⁾。

$$D(\omega) = r^{-1} \exp[-\omega r / 2CQ] \quad (2)$$

ただし、 r ：波動伝播距離、 ω ：角振動数、 C ：P波伝播速度、 Q ：岩盤の非弾性的な性質による波動減衰を現わす指標(Quality Factor)である。岩盤の Q 値は、簡便に求めることが可能⁶⁾であり、距離減衰特性を評価することは周波数領域においては比較的容易である。

爆源近傍の岩盤破壊圏は、装薬室まわりのせん断破壊圏とその周囲の引張破壊圏から構成される。発破振動は、破壊圏と非破壊圏である弾性圏の境界に放出される弾性波と考えると、震源スペクトル $S(\omega)$ は、動弾性理論に基づき、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場を解く問題の解として、(3)式で表現できる^{7), 8)}。

$$S(\omega) = L \omega \{ (M^2 - \omega^2)^2 + N^2 \omega^2 \}^{-1/2}, \quad L = aP_0 / \rho C_0, M = 2C_s / a, N = 4C_s^2 / aC_0. \quad (3)$$

ただし、 a ：破壊半径、 P_0 ：破壊圏と非破壊圏の境界に作用する最大圧力、 C_0 ：P波伝播速度、 C_s ：S波伝播速度、 ρ ：岩盤の密度である。 P_0 は引張破壊圏と非破壊圏の境界に作用する圧力であるので、岩盤の引張強度で破壊条件が規定できる。このように、発破による破壊源、波動伝播過程および観測点近傍の特性を表すパラメータを推定できれば、周波数領域における発破振動レベルの予測が可能となる。

2.2 最大振幅の予測

トンネル掘進にともなう芯抜発破の振動波形は、岩盤中においてはFig.1(a)に示す

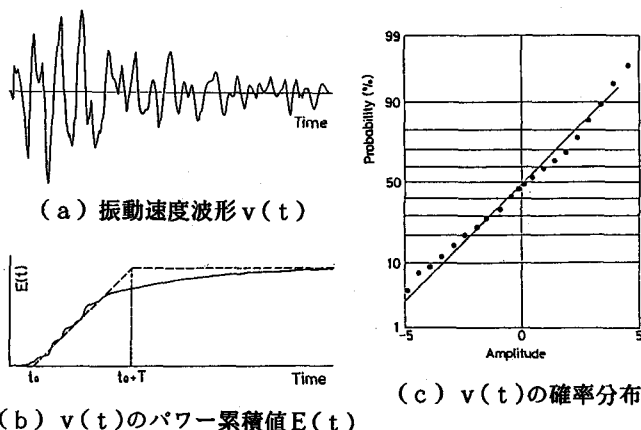


Fig.1 発破振動波形の特徴

ようである。(4)式で表されるパワー累積値 $E(t)$ は、Fig.1(b)の実線の破線で示されるように、振動速度成分 $v(t)$ の主要動領域で急増している。

$$E(t) = \int_0^t v^2(t) dt \quad (4)$$

しかも、パワーへの寄与は初動および後続波に関しては小さく、主要動領域におけるパワー変化率、すなわち、パワー密度は一定値を示している。このことは、発破振動は本来、非定常振動といえるが、主要動領域に関しては定常振動として見なせるものと考えられる。そこで、 $E(t)$ を(5)式で示すような関数で近似する。

$$E(t) = 0, \quad t < t_0, \quad t > t_0 + T \\ = \sigma_0^2(t - t_0), \quad t_0 < t < t_0 + T \quad (5)$$

ここで、 σ_0^2 は $\sigma_0^2 = E(\infty)/T$ で定義するパワー密度である。すなわち、(5)式は $E(t)$ を破線で近似することと等価である。言い換えれば、全パワーは $[t_0, t_0 + T]$ の区間内にあり、この区間内において定常性を仮定していることに他ならない。また、 $[t_0, t_0 + T]$ 区間内の各時刻における $v(t)$ の時系列データについて、振幅に対する累積分率をとり、これを正規確率紙上にプロットしたものがFig.1(c)である。以上のことから、 $[t_0, t_0 + T]$ 区間内において、 $v(t)$ は定常正規確率過程にほぼ従うことがわかる。

発破振動の変位速度波形 $v(t)$ 中に表れるピークの振幅は $v(t)$ の極大値として与えられる。このうち、最大の極値が発破振動の最大値である。一般に、発破振動の最大値は絶対値の最大値として求められるので、時間 $[0, T]$ における σ_0 で正規化した極大値 λ の確率密度関数 P_{AP} および総極大値数 N_{AP} は、(6)式で与えられる。

$$P_{AP}(\lambda/\sigma_0) = P_p(\lambda/\sigma_0) / \int_0^\infty P_p(z) dz, \quad N_{AP} = 2\gamma^{-1} T n_z \int_0^\infty P_p(z) dz \quad (6)$$

ただし、 n_z は単位時間当りのゼロクロッシング数、すなわち、見かけの周波数に相当し、 γ は n_z と単位時間当りのピーク数の比を表し、 $n_z = (\sigma_1/\sigma_0)/2\pi$ 、 $\gamma = \sigma_1^2/\sigma_0\sigma_2$ のようである。また、 σ_0 、 σ_1 および σ_2 は、 $v(t)$ およびその時間に関する1階および2階の導関数の標準偏差である。これらは、 $v(t)$ のパワースペクトル $G(\omega)$ を用いて、(7)式のようである。

$$\sigma_n = M_n/T, \quad M_n = \int_0^\infty \omega^{2n} G(\omega) d\omega, \quad n=0,1,2 \quad (7)$$

(6)式および式内の P_p は、 $\partial v(t)/\partial t = 0$ 、 $\partial^2 v(t)/\partial t^2 < 0$ 、すなわち波形中の正勾配のピークの条件で与えられる σ_0 で正規化した極大値 λ の確率密度関数であり、(8)式のようである。

$$P_p(\lambda/\sigma_0)/\sigma_0 = \{(1-\gamma^2)/2\pi\}^{1/2} \exp[-(\lambda/\sigma_0)^2/2(1-\gamma^2)] \\ + (\lambda/\sigma_0)(\gamma/2)\{1+\operatorname{erf}[(\lambda/\sigma_0)(2/\gamma^2-2)^{-1/2}]\} \exp[-(\lambda/\sigma_0)^2/2] \quad (8)$$

最大振幅値 ξ の確率密度関数 P_{max} は(6)式から(9)式のようにならる。

$$P_{max}(\xi/\sigma_0) = N_{AP} \left[\int_0^{\xi/\sigma_0} P_{AP}(z) dz \right]^{N_{AP}-1} P_{AP}(\xi/\sigma_0) \quad (9)$$

従って、最大振幅の平均期待値 μ および標準偏差 σ は、(9)式から(10)式のようになる。

$$\mu = (2\pi)^{-1/2} (M_0 M_1)^{1/4} m^{-1/2} F_1(\gamma, m), \quad \sigma = (2\pi)^{-1/2} (M_0 M_1)^{1/4} m^{-1/2} F_2(\gamma, m) \quad (10)$$

ただし、 $F_1(\gamma, m)$ および $F_2(\gamma, m)$ は以下のとおりである。

$$F_1(\gamma, m) = \int_0^\infty z P_{max}(z) dz, \quad F_2(\gamma, m) = \left[\int_0^\infty z^2 P_{max}(z) dz - (\mu/\sigma_0)^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

$G(\omega)$ は、前節で示したように推定可能な $F(\omega)$ を用いて、 $G(\omega) = |F(\omega)|^2/T$ の関係から求めることができる。Tは伝播距離に依存する変数であるが、見かけ周期 $(1/n_z)$ のm周期に相当すると考えると、 $T = m/n_z$ となるので、発破振動波形の主要動区間Tの卓越する波数を推定すればよいことになる。

mと $m^{-1/2} F_1(\gamma, m)$ およびmと変動係数 σ/μ の関係は、Fig.2に示すようである。種々の発破振動波形

を調べると、 $\gamma=0.5\sim 1.0$ 、 $m=1\sim 6$ の範囲にあることが解っているので、 m による関数値の変動はさほど大きくなく、最大振幅値の予測のためには大略の m が推定すればよいことになる。

3. 岩盤中および表層で観測される発破振動への適用

測定サイトは、Fig.3 に示すように安山岩質の貫入岩と火山性の堆積岩から構成されている。トンネル中で実施した屈折法弾性波探査によると、安山岩および堆積岩のP波速度は、2.7km/s、2.25km/s である。

トンネルは上半先進掘削により掘進した。ここでは、上半掘進時の芯抜発破振動を解析の対象とする。爆薬はスラリー爆薬を使用し、芯抜爆薬量は、1.0～2.5kgであった。振動測定地点は、トンネル坑口上部の表層上とその位置から 38m下の岩盤中であり、それぞれに動電型速度計を、トンネル軸水平(x)方向、軸直角水平(y)方向、上下(z)方向の3成分設置した。計測系の利得は48dB、総合周波数特性は 20～700Hzの範囲でほぼ平坦である。

岩盤中および地表のそれぞれの3成分波形とも伝播距離の増加にともなって長周期成分が卓越してくる。Fig.4 に示すように最大値で正規化した岩盤中と地表のx方向成分を伝播距離毎にみると、それぞれの波形中の対応する位相が容易に判別できることから、伝播距離の増加にともなう変化は連続的であり、発破点の状況が近似していることが伺える。Fig.5はFig.4で示した波形のフーリエスペクトルである。同一観測距離のスペクトルは、3成分とも、その形状および卓越周波数はほぼ等しい傾向を示す。図中●はスペクトルのピークを示し、数字は発破点から観測点までの距離を表している。なお、スペクトルの振幅値もそれぞれの最大値で正規化している。岩盤中観測点のスペクトルは、伝播距離の増加にともなって卓越周波数が低下し、高周波成分ほど減衰傾向が顕著であることがわかる。しかし、表層観測点のスペクトルは伝播距離にかかわらず、40～50Hz程度の一定の卓越周波数を示す。

計測結果に対して、前節で示した最大振動速度の予測を試みる。解析に用いる定数を、Table 1 に示す。推定される震源スペクトルは、Fig.6(a)のようであり、ほぼ 200Hzの卓越周波数を示す。震源スペクトルに岩盤中を伝播する際の減衰を考慮すると、Fig.6(b)のようである。図中の数字は発破点から観測点までの距離を表している。距離の増加にともなって、全体的に振動レベルが低下し、さらに卓越周波数が低周波数側に移行している。振動計設置地点の地質柱状図により地盤構造を仮定すると、表層地盤による増幅効果のために、地表では、Fig.6(c)のよう

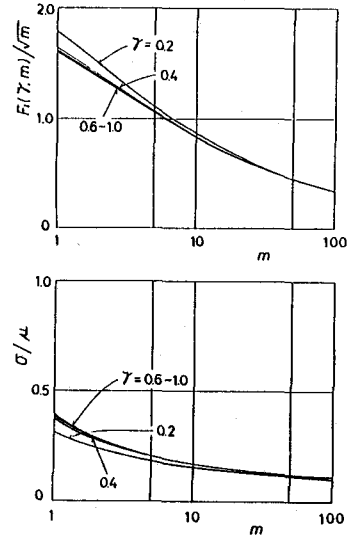


Fig.2 m と $m^{-1/2}F_1(\gamma, m)$ および m と変動係数 σ/μ の関係

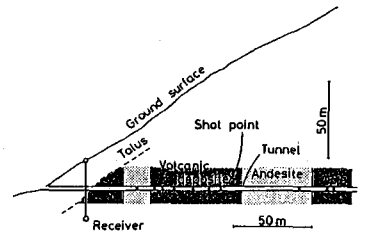


Fig.3 測定サイト地質断面図

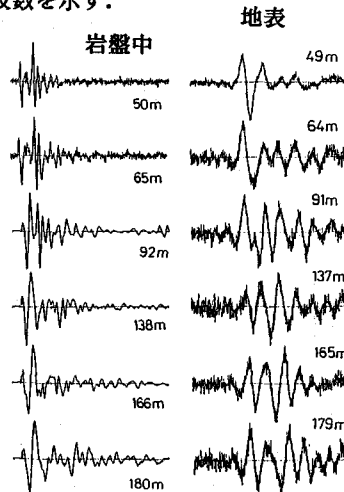


Fig.4 正規化した発破振動波形 x 方向成分

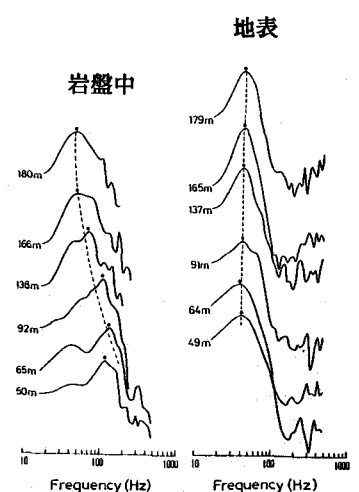


Fig.5 正規化したx方向振動成分のフーリエスペクトル

な発破振動スペクトルとなる。表層地盤の重複反射により40Hz程度の基本共振モードが、常に存在していて、Fig.5 で示したように、実測結果とほぼ同一な傾向を示している。

岩盤中および地表における発破振動の最大振幅を推定スペクトルをもとに予測すると、Fig.7(a),(b)のようである。図中●はx方向の実測値を示し、実線分は芯抜爆薬量の変化を考慮して補正した場合の $\mu \pm \sigma$ の帯域を、また、点線は爆薬量の変化を考慮しない場合の $\mu \pm \sigma$ の帯域を示している。実測値は推定値の変動域内に入り、ほぼ良好な予測がなされていることがわかる。

4. 結 言

確率論的手法に基づき、推定発破振動スペクトルを用いて発破振動の最大値を予測する方法を提案した。さらに、それを実際のトンネル掘進発破の芯抜発破振動を例にとり、現実問題への適用性について検討を加えた。予測式による最大振幅推定値は岩盤内および地表上においても実測値と大略一致した。ただし、地表部の実測値は、予測値と若干の異なる減衰傾向を示した。これは、震源からの距離の増加にともなって、発破振動の主要動部分に表面波成分が卓越してきたためと考えられる。震源と地表面との幾何学的な位置関係によっては、表面波を考慮することが必要になるものと考えられる。

【参考文献】

- 1) 雑喉謙：発破振動の周辺への影響と対策，鹿島出版会
- 2) 星谷勝：確率論手法による振動解析，鹿島出版会
- 3) 平田，金子，稲葉：発破振動に励起されたトンネルの動的応答特性，第8回岩の力学国

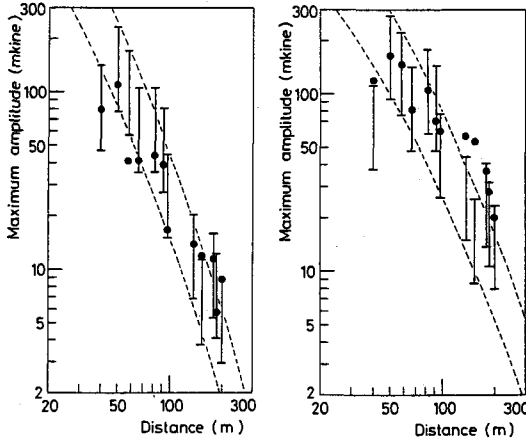


Fig.7 発破振動の最大振幅予測値と実測値の比較

Table 1 解析に用いた定数

爆	α	50
破	β	10000
条	破壊圏半径 (m)	1.5
件	最大作用圧力 (MPa)	4.5
岩	P波速度 (m/s)	2500
	S波速度 (m/s)	1443
	ポアソン比	0.25
	密度 (kg/m ³)	2500
盤	Q値	10

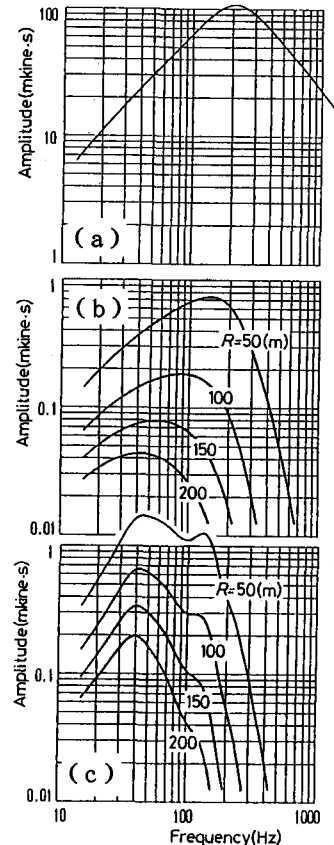


Fig.6 推定スペクトル

- 4) Haskell, N.A.: The dispersion of surface of wave on multilayered media, Bull. Seism. Soc. America, Vol.43, No.17, 1953

- 5) 金子，中村，平田，大見：伝播波形初動形状によるQ値評価法(I)－理論的考察－，物理探査，第42巻第4号，1989

- 6) 金子，平田，柴，大見：伝播波形初動形状によるQ値評価法(II)－現位置測定による適用例－，物理探査，第42巻第4号，1989

- 7) Hirata, Inaba, Ishiyama, Kaneko and Ohmi: Blasting vibration in jointed rock, Int. Conf. on Mechanics of Jointed and Faulted Rock, Vienna, April 18-20, 1990

- 8) 平田，金子，稲葉，石山：発破震源スペクトル，土木学会第22回岩盤力学に関するシンポジウム，1990