

## (55) 発破震源スペクトル特性

西松建設株式会社 正会員 ○ 平田 篤夫  
熊本大学工学部 正会員 金子勝比古  
西松建設株式会社 正会員 稲葉 力  
西松建設株式会社 正会員 石山 宏二

### Characteristics of blasting source spectrum

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

#### Abstract

It is significant to evaluate the damage for architectures and structures by blasting. The estimation method of blasting vibration is presented and discussed about the data, measured in rock at advance of tunnel excavation. The proposed technique, using Fourier transform, predicts the blasting vibration level in frequency domain. The spectrum of the measured vibration of blasting represents product of blasting source spectrum, wave path effect and the properties of ground around sensors, locally. The blasting source spectrum means the nature of the fracture at the boundary between elastic zone in rock. The spectrum corrected for the wave path is compared with theoretical source spectrum. It is characterized elastic wave velocity, rock density, rupture radius and tensile stress of rock. Rupture size defined by tensile strength is within the range of the reasonable scale, the proposed method is good accuracy to account for the evaluation of the blasting source mechanism.

#### 1. 緒言

地震動を対象とする構造物の耐震性の評価法に関しては、各種の応答計算手法が確立されていて、実務設計に供されている。地震動に比べると、発破振動はやや高い振動数帯域の振動が卓越するために、大振幅の波動も比較的早く減衰するうえ、継続時間も短い。従って、構造物に対して充分余裕のある距離を確保した発破設計を行っておけば、発破掘削にともなう振動が周辺構造物に対して影響を与えることはない。しかし、重要な構造物近傍における近接発破作業などでは、発破振動に対する安全性を十分な精度で評価することは困難であり、そのような状況のもとで、よく知られる経験式を適用する場合、多くの地盤条件や発破条件下で振動データを収集し、統計処理を行って、実験式を求める必要がある。

そこで、経験的に発破振動値を推定する考え方を離れ、観測波形に対して、[スペクトル]の概念を適用することを提案する。発破振動の観測スペクトルは、破壊源における発生振動スペクトルすなわち震源スペクトルの応答であるという観点から、実トンネル施工における発破掘削時の岩盤中の振動データから震源スペクトルを求める。その震源スペクトルの物理的意味について、球状震源モデルによる理論震源スペクトルと対比して考察を加え、発破震源スペクトル概念の妥当性を検討する。

## 2. 従来の発破振動の予測手法

発破振動の予測は、一般に、(1)式に示す経験式に基づいて行う。

$$V=KW^nD^{-n} \quad (1)$$

ただし、 $V$ は発破による地盤振動の最大振動変位速度(cm/sec)、 $K$ は使用する爆薬の種類や性能、発破条件、地盤条件によって定まる定数、 $W$ は装薬量(kg)、 $D$ は発破点から観測点までの距離(m)である。また、指数 $m$ は $1/2\sim 3/4$ の範囲の値を示す定数であり、 $n$ の値は、地盤条件により $1.0\sim 3.0$ の範囲にあるが、平均すれば大略 $2.0$ の値をとる場合が多い。

これらの定数値は発破条件・地盤条件から経験的に与えられるが、それらの間の定量的な関係は十分明らかにされていない。従って、実際の適用に当たっては、十分な安全率を付与しておくことが不可欠である。経験式を用いた発破設計では、数倍から10倍程度の安全率が見込まれるのが実状であり、構造設計等に採用される安全率と比較しても、過大な設計を余儀なくされているといえる。

## 3. 発破振動スペクトルの基本概念

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 $G(\omega)$ 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(2)式のように表現できる。

$$G(\omega)=S(\omega)D(\omega)A(\omega) \quad (2)$$

従って、個々のスペクトルが推定できれば、発破振動レベルの予測が可能となる。

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なる。また、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(3)式で示される。

$$D(\omega)=r^{-1}\exp[-\omega r/2CQ] \quad (3)$$

ただし、 $r$ :波動伝播距離、 $\omega$ :角振動数、 $C$ :波動伝播速度、 $Q$ :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。従って、岩盤の波動伝播速度および $Q$ がわかれば、観測波形スペクトルに対して、(3)式を用いた発破点と観測点間距離による距離減衰の補正を行うことにより震源スペクトルが推定できる。

なお、発破振動測定には、振動変位速度記録が通常用いられることを考慮して、本研究ではこの記録の伝播方向成分すなわちP波成分を解析する。

## 4. 理論発破震源スペクトル

多段発破における芯抜発破に相当する初段部分を対象にして、球状装薬発破を Fig.1に示すようにモデル化する。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して定義し、その弾性波は発破中心から $r$ 離れた点Pで観測する。

台枠にはねと減衰要素によってとりつけられたおもりすなわち振動計の運動は、よく知られた運動方程式で表現できる。その解は、地盤の振動変位速度に比例した出力として近似できる<sup>1)</sup>。その解の倍率係数 $Mv$ は、振動計としては $Mv=1$ の範囲で使用し、(4)式の関数形をしている。

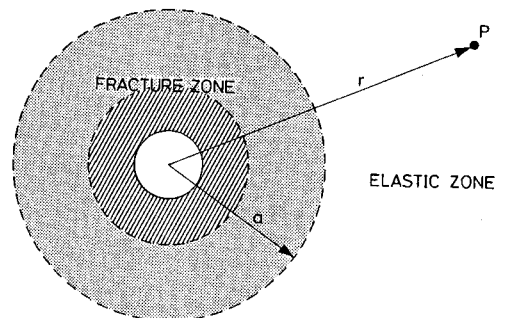


Fig.1 発破震源モデル

$Mv=L\omega\{(M^2-\omega^2)^2+N^2\omega^2\}^{-1/2}$  (4)  
 ただし、 $L=2h\omega_n$ ,  $M=\omega_n$ ,  $N=L$ ,  $h$ ; 限界減衰比,  $\omega_n$ ; 固有角振動数である。この式は電子回路における発振回路の共振特性を表現する形でもあり、よく用いられる関数形といえる。

Fig.1 の震源モデルにおいて、岩盤と発破による破壊圏との境界に階段関数形の圧力が作用して、片振れ型の変位波動が励起されると仮定する。そのとき、振動変位速度波形のスペクトル形状は、ある特定の共振振動数のもとで一つのピークを有する形をしている。従って、発破震源スペクトルにも(4)式の関数形を適用する。

理論震源スペクトルが(4)式の関数形をしている場合、(4)式の係数は、(5)式で表すことができる。

$$L=aP_0/\rho C_s, M=2C_s/a, N=4C_s^2/aC_p$$
 (5)

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,  $C_p$ ; P波伝播速度,  $C_s$ ; S波伝播速度,  $\rho$ ; 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。

スペクトルが特定のピークを有するときの卓越角振動数 $\omega_0$ は(6)式になる。また、 $\omega_0$ におけるスペクトル値は(7)式になる。

$$\omega_0=2C_s/a$$
 (6)

$$S(\omega_0)=a^2 P_0/4\rho C_s^2$$
 (7)

上記の理論発破震源スペクトルについての考え方は、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である。

この問題の変位ポテンシャル関数は、Sharpe<sup>2)</sup> によって与えられているが、Sharpeの解はポアソン比が0.25という特定の条件の場合にのみ適用可能であり、一般の問題に適用するためには無理がある。紙面の都合で、定式化の過程は別の機会に述べることにする。

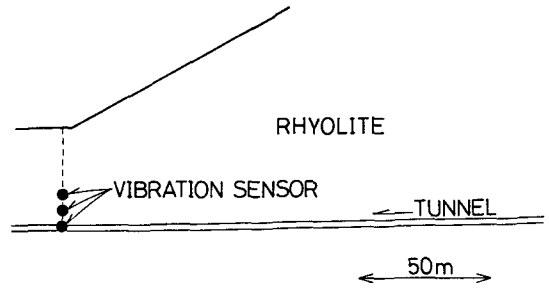


Fig.2 発破振動計測区間縦断面図

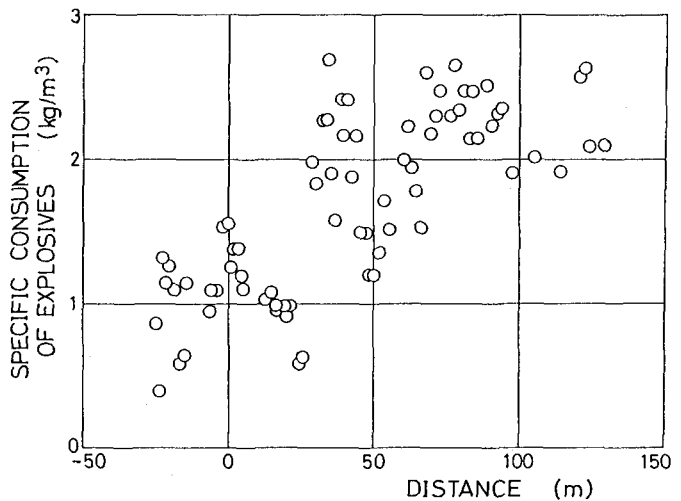


Fig.3 トンネル掘削にともなう単位掘削量当り使用爆薬量 (距離0の地点は振動計設置位置)

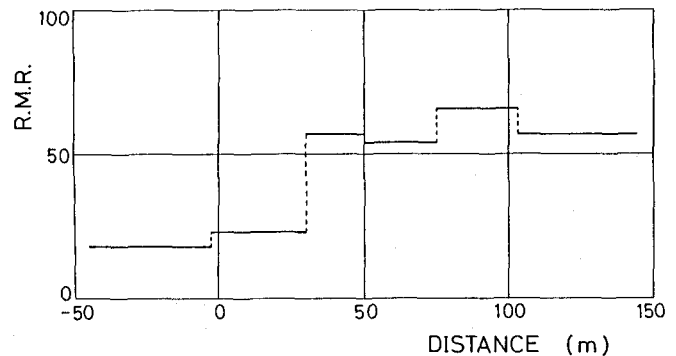


Fig.4 トンネル軸方向における岩盤のR.M.R.の変化

## 5. 発破計測と対象岩盤の状況

発破振動の計測は、流紋岩質の硬質岩盤中で行なった。トンネル掘削軸方向の岩盤中に、地表からのボーリング孔を利用して埋設した速度型および加速度型の振動計で得た発破振動波形データは、10kHzのサンプリング周波数でA/D変換後、パーソナルコンピュータのハードディスクに記録した。

Fig.2 は発破点と観測点の位置関係を示す縦断面図である。本研究では、観測点が震源から十分遠い、すなわち far fieldの問題を取り扱うものであるが、この計測は near fieldの問題を論じる際のデータの収集も目的としている。従って、下方2点は耐Gの大きい圧電型加速度計を配置し、最上部、トンネル中心から8mの位置に動電型の速度計を設置した。

Fig.3 に発破計測区間の単位掘削量あたりの使用爆薬量を示す。使用爆薬は2号燐である。

また、同一区間の R.M.R. 評価の変化を Fig.4 に示す。横軸の距離は振動計の設置位置を0として表示している。以下の図中および本文中の距離は、全てこの表示方式を採用する。

岩盤は流紋岩であるが、きれつ状況が急変する地点が数カ所ある。距離30m地点は、R.M.R.の評点が、57から23に低下していて、その地点の前後ではきれつ状況の違いが明瞭に区別できる。しかし、50m地点では、R.M.R. 評点の差は小さい。これは、この区間において、急激に岩質が劣化していることとトンネルの掘削断面積が15m<sup>2</sup>程度であるため掘進速度が早く、R.M.R. 評点が対象区間の平均的な値になったものと考えられる。

## 6. 岩盤中の発破振動

発破点から 85mの距離の岩盤中で計測した、伝播方向成分の芯抜き部分初段の振動変位速度波形をFig.5 に示す。岩盤中で観測しているため、反射波や表面波のような振幅の大きな後続位相が目立たなく、立ち上がりのP波成分が顕著である。このときの初段の爆薬量は500gである。距離30m地点で岩盤が軟化するまで、初段の爆薬量は400g~600gの範囲でほぼ一定である。

Fig.6は、Fig.5の波形のフーリエスペクトル、(3)式の伝達関数によって距離補正した発破震源スペクトルおよび震源スペクトルの100~800Hzの区間で最小自乗法を適用して、決定した理論発破震源スペクトルである。1kHz以上の振動数でスペクトル値が急激に大きくなっているのは、(3)式による距離補正で高い振動

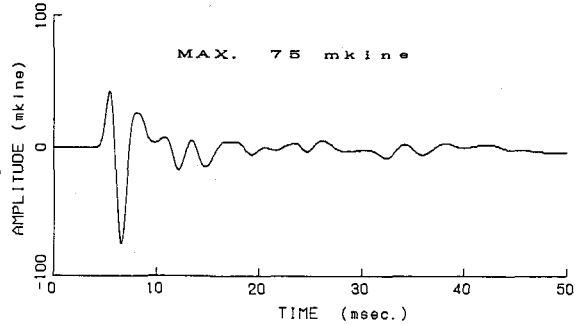


Fig.5 岩盤中で観測した発破振動波形  
(伝播方向成分, 伝播距離85m)

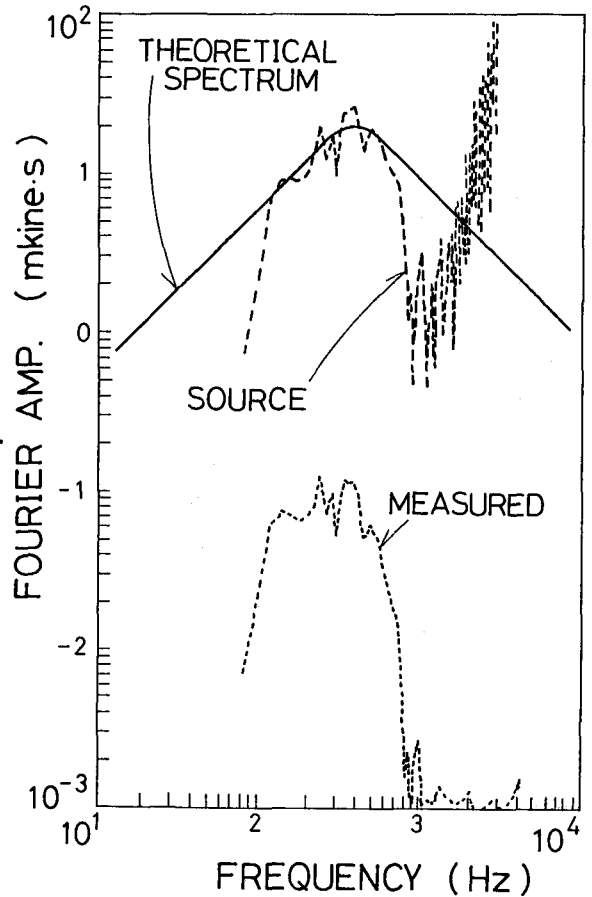


Fig.6 観測波形のフーリエスペクトル (伝播方向成分, 伝播距離 85m) とその発破震源スペクトルおよび最小自乗近似した理論スペクトル

数成分ほど、零割に近い補正が行なわれるための誤差である。Fig.5の波形を見ても、1kHz以上の高い振動数成分は含まれていないことがわかる。

スペクトルのピーク付近では、伝達関数による距離補正によって100倍以上の距離減衰が補正されているが、観測波形のフーリエスペクトルに比べて、高い振動数ほど高い震源スペクトル値を示している。また、実際に、発破振動に含まれる振動成分といえる100~1000Hzの振動は、理論震源スペクトルとほぼ一致している。理論震源スペクトルを算定するためのパラメータとして、 $Q=25^{31}$ 、 $C_p=4000\text{m/s}$ 、 $C_s=2300\text{m/s}$ 、 $\rho=2.5\text{kg/cm}^3$ を用いた。

このときの理論発破震源スペクトルから推定される初段発破による破壊半径は、1.93mであり、卓越角振動数は(6)式から、380Hzとなった。破壊半径は、芯抜き初段としてはやや大きいといえるが、引張破壊にともなう微小きれつ発生範囲と考えれば妥当な大きさといえる。また、引張強度は3MPaとなり、原位置岩盤の引張強度としては、これも妥当な値と考えられる。

トンネル掘削にともなう全発破振動計測データを上記の方法で整理すると、Fig.7、Fig.8およびFig.9が得られた。それぞれ、トンネル掘削にともなう形で、発破振動の卓越振動数、岩盤の引張強度および芯抜き初段の破壊半径の変化を示している。岩盤の状況は掘削にともなう変化しているが、便宜上、弾性波速度、岩盤の密度およびQは前述の値を用いたので、全区間にわたって同一の尺度で評価することはできないが、R.M.R.評点や単位掘削量あたりの使用爆薬量とも対応しており、現実的な値が得られたものといえる。

## 7. 結言

発破振動を推定する手法として、フーリエ変換を用いた振動数領域で解析する概念を提案した。実岩盤中で観測された発破振動データに対して、理論震源スペクトルのフィッティングから得られる発破パラメータが現実的な値を示すことを確認した。

### 【参考文献】

- 1) 土木学会編, 振動便覧
- 2) Sharpe, J.A.: The Production of Elastic Waves by Explosion Pressures. I. Theory and Empirical Field Observations, Geophysics, Vol.18, 1942
- 3) 平田, 金子: トンネル掘進発破にともなう振動計測, 第10回西日本岩盤工学シンポジウム, 1989 7月

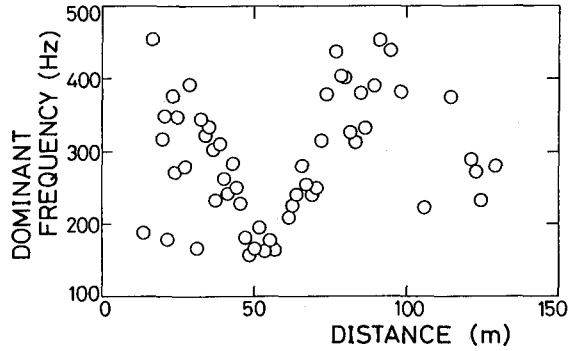


Fig.7 トンネル掘進にともなう発破震源スペクトルの卓越振動数の変化

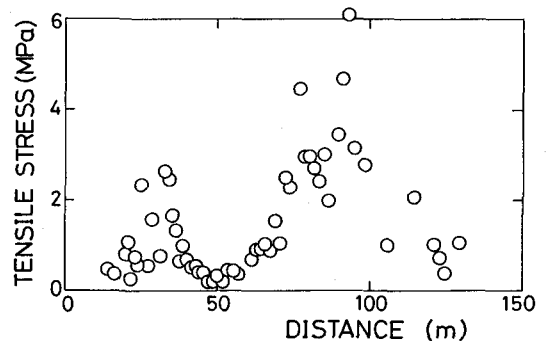


Fig.8 トンネル掘進にともなう発破震源スペクトルから求めた岩盤の引張強度の変化

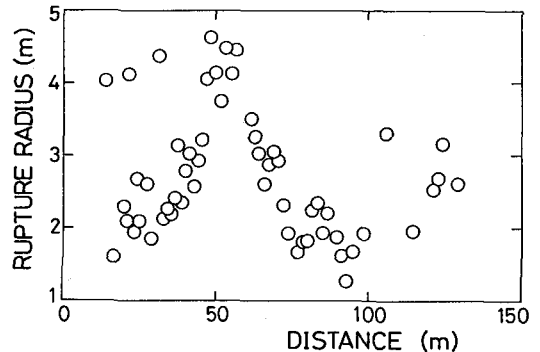


Fig.9 トンネル掘進にともなう発破震源スペクトルから求めた芯抜き発破の破壊半径の変化