

トンネル発破工事における振動、騒音、低周波音の予測方法

Prediction Method of Tunnel Blasting Work Vibration, Noise and infrasound

船津弘一郎*・坂野良一**

Kouichirou Funatsu, Ryoichi Banno

Since more and more tunnels are constructed adjacent to common houses, in recent years, it has become an important theme how to adapt the blasting method to the environmental conditions. Practical methods to predict the vibrations, noises and infrasounds of the blasting for a tunnel construction are described in this report.

These prediction methods have been obtained by the statistical processing of actual measurement data, and further aim at the improvement of predictive accuracy.

Keywords: Tunnel Blasting, Vibration, noise, Infrasound, Prediction Method

1. まえがき

近年、民家等に近接した場所で発破工法によりトンネルを掘削しなければならないケースが増加してきており、その環境対策が重要なテーマになってきている。

発破に係わる環境問題としては、大きく分けると振動、騒音、低周波音の3つの問題があり、最近では図-1に示すようにそれぞれ単独の問題の他に複合した問題として苦情が発生するケースが多くなってきている。この問題に対処するためには、施工計画時にこれらの影響を予測し、適切な対策を実施することが重要である。本報文では、事前の影響予測を可能にするために、多数の実測データより求めた発破振動、騒音、低周波音の実用的な予測式について報告する。

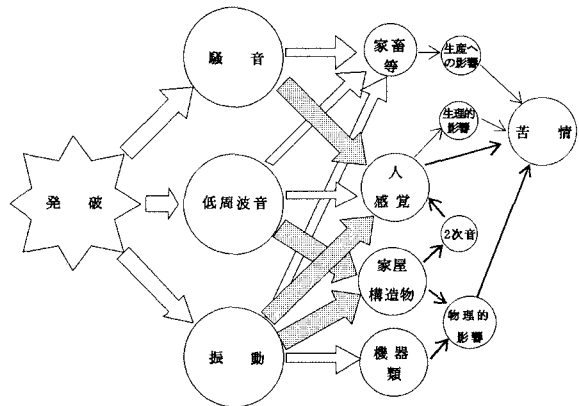


図-1 発破と環境問題

* 大成建設(株)環境部環境技術室

**正会員 大成建設(株)土木技術部技術計画室

2. 発破振動

2・1 発破振動の特徴

発破により発生する振動は、火薬類の種類、薬量、てん塞状態、発破パターンや自由面の数などの発破条件の他に、発破源からの距離、伝播経路の地盤、岩盤の性質、地形など各種の要因の影響を受ける。

地表で測定される地盤振動は、初動部の縦波（P波）以外にその時の各種の条件により種々の波が発生し、波形も複雑となり、とくに基岩上の表土層の厚さが、振動の形態に大きな影響を与えるようである。

発破振動の基本的な特徴をまとめ次に示す。

- (1) 発破振動は火薬類の爆発により生じるものであり、爆薬の量によって異なるが、地震に比べて極めて小さなエネルギーしか持っていない。そのため爆源を中心として狭い範囲に限られ、主として地表面およびその近くが問題とされ、地盤の深部まで問題となることはないと考えられる。
- (2) 局所的な振動であるため、爆源から遠ざかるにつれて急激に減衰する。（1.5～2.0乗で減衰）
- (3) 地震に比べて周波数が高く、持続時間が短い。地震は数Hz程度の周波数であるが発破振動は10～300Hz程度である。火薬類の爆発エネルギーの一部が振動を発生するものであり、爆発終了とともに振動も消滅する。通常ダイナマイトの爆発に要する時間は量にもよるが、1秒間の数1000分の1である。従って発破振動の持続時間は多くの場合せいぜい1秒位である。
- (4) 爆薬と発破振動の関係

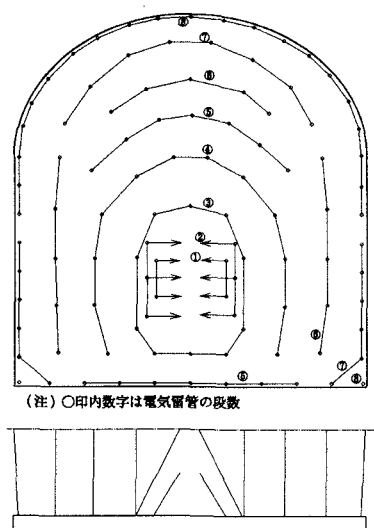
- ①振動速度：装薬量の $2/3 \sim 3/4$ 乗に比例して増大する。爆速との関係は顕著ではないが爆速がはやい程大きくなる傾向がある。
- ②周波数：装薬量の増大と共に低くなる。爆速との関係は顕著ではないが、爆速がはやい程高くなる傾向がある。
- ③変位振幅：装薬量の増大と共に大になる。

(5) 岩質と発破振動の関係

- ①変位振幅：硬岩になるにしたがって小さくなる。
- ②周波数：硬岩になるにしたがって高くなる。
- ③継続時間：軟岩に比べ硬岩の場合は短い。
- ④距離による減衰：硬岩に比べ軟岩の場合は減衰が著しく遠距離には及ばない。

(6) 発破パターンと発破振動の関係

- ①抵抗線：抵抗線を小さくすることによって振動を軽減できる（薬量との関係もある）。
- ②分離発破：DS高段の雷管を用いることによって発破振動は完全に分離される。
- ③自由面：自由面が多い程、発破振動は小さくなる。



図－2 発破パターンの例

2・2 発破振動予測式

振動の大きさを表わす方法としては基本的には変位、振動、加速度の3種類である。発破振動の場合、周波数が数10Hz～数100Hzと比較的高いため、影響の程度と対応のよい振動速度が評価量としてよく用いられる。

発破振動を予測する式はいろいろ提案されているが、いずれも次に示す式の型で表わされている。

V = K L^m \cdot R^{-n}

ここで、V：振動速度（cm/sec）
K：定 数
L：段当り装薬量（kg）
R：爆源から影響を受ける構造物までの距離（m）
m=2/3（1/2<m<1）
n=2（1<n<2.5）

定数Kについては、岩質、岩盤の状況、使用薬種および発破方法によって定まるものであるが、多くの場合、実測により求めている。

この式はシンプルで使いやすいものの、薬量と距離だけで表現されているため、予測精度に難点がある。そこで、我々の過去の測定例の中から、振動値と各種の発破条件のデータをピックアップし、約4,000データについて統計処理を行い、データの多い下記の項目についてダミー変数を使った回帰モデル予測式の設定を試みた。

発破振動予測式 $\lg V_z = 2.026 + [0.386 H_1 - 0.155 H_2 + 0.111 H_3 + 0.072 H_5]$
 $+ [0.052 Y_1 + 0.287 Y_4 + 0.160 Y_6] - 1.930 \lg R$
 $+ [0.572 J_1 + 0.262 J_2 + 0.216 J_3] \lg L + C$

V_z：上下方向の振動速度（cm/sec）
R：振源からの距離（m）
L：段当り薬量（kg）
C：断層等による減衰値、実測値との整合補正值など
ダミー変数（1,0）
H：発破種別 H₁：心抜き（アングルカット）、H₂：心抜き（パレルカット）、H₃：払い、H₅：分割発破
Y：薬 種 Y₁：2号複ダイナマイト、Y₄：含水爆薬、Y₆：アーバナイト
J：発破地点の岩のかたさ

分 類	J ₁ ：硬岩	J ₂ ：中硬岩	J ₃ ：軟岩
一軸圧縮強度σ _c （kg/cm ² ）	800 以上	100～800	100 以下
地山の弾性波速度V _p （km/S）	3.5 以上	2.5～3.5	2.5 以下

この予測式を使った予測値と実測値の関係を図-3に示す。回帰式に対する相関係数は0.86と比較的対応の良い結果となったが、まだばらつきが残っており、今後これらのばらつきを説明できる項目を含めて、予測精度の向上を目指す計画である。

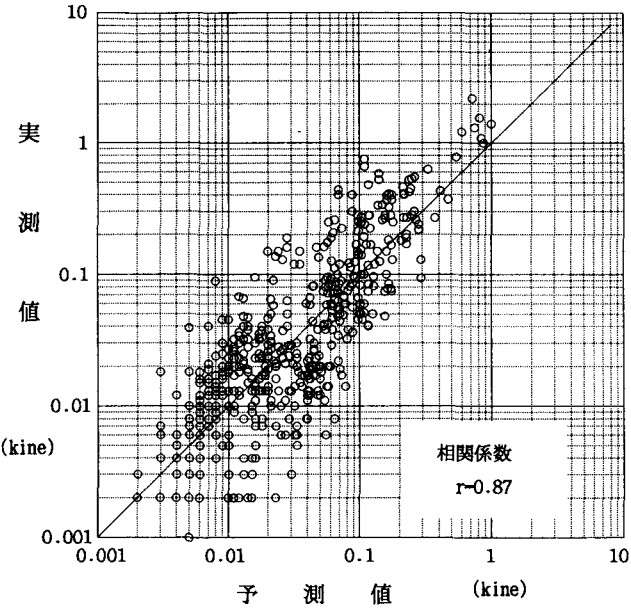


図-3 予測値と実測値の関係

3. 発破騒音・低周波音

3・1 発破音の特徴

発破音はするどい立上り波形をもつ衝撃音のため、実効値を測定する場合には、測定器の実効値回路の時定数により値が変化する問題が発生する。発破のトータルエネルギーを表すには L_{AE} （単発騒音暴露レベル）による測定が有効と思われるが、ここではデータ数の大半を占めるFASTによるレベルのピーク値でデータを整理した。また、発破音のデータはバラツキが大きく、まったく同じ発破条件、測定条件でも10 dB程度ずれることはめずらしくない。そこで、ここでは主な条件と発破音との関係についておおよその傾向を求めるため整理を行った。

(1) 坑内減衰

坑内距離（切羽～坑口）と騒音レベル、低周波音レベルの関係を図-4に示す。いずれも大きくばらついているが騒音レベルはおおよそ $-16\log D$ の関係が見られるのに対し、低周波音レベルの場合はほとんどが見られない。

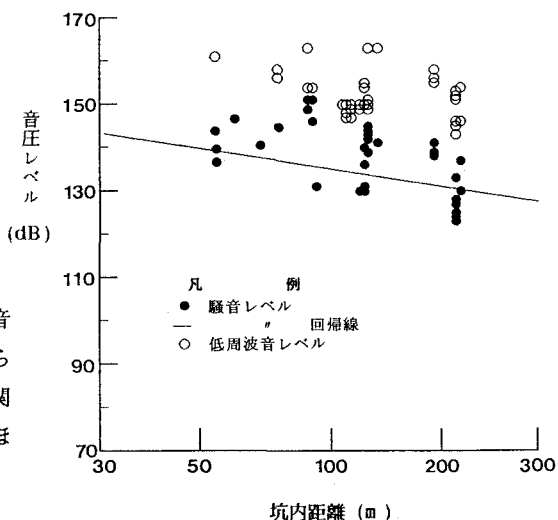


図-4 坑内距離とレベルの関係

(2) 薬量と発生レベル

図-5, 6は総薬量、段当り最大薬量とレ

ベルの関係を表したもので、総薬量、段当り最大薬量ともあまり差はなく、約 $16\log w$ の特性を示した。

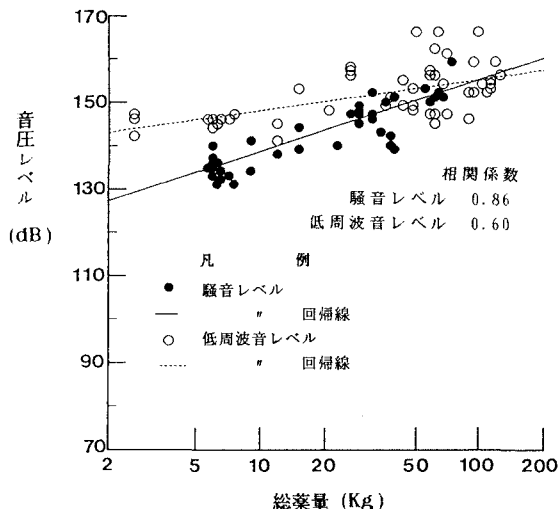


図-5 総薬量とレベルの関係

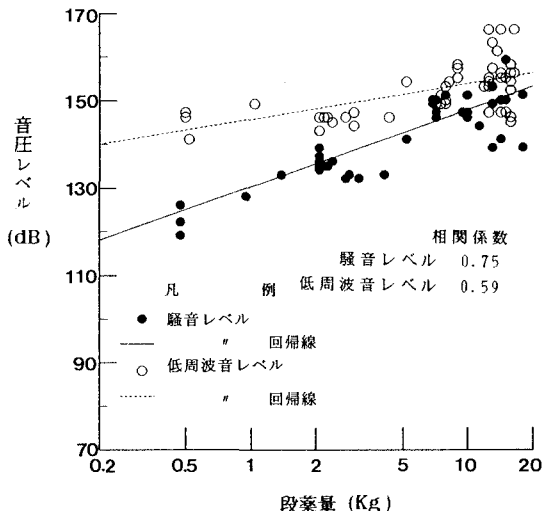


図-6 段当り最大薬量とレベルの関係

(3) 坑外距離減衰特性

図-7, 8は坑外距離（坑口～受音点）とレベルの関係を表したもので、騒音レベル、低周波音レベルとも特に障害がなければ300 m程度までは倍距離6 dBの減衰と考えることができる。

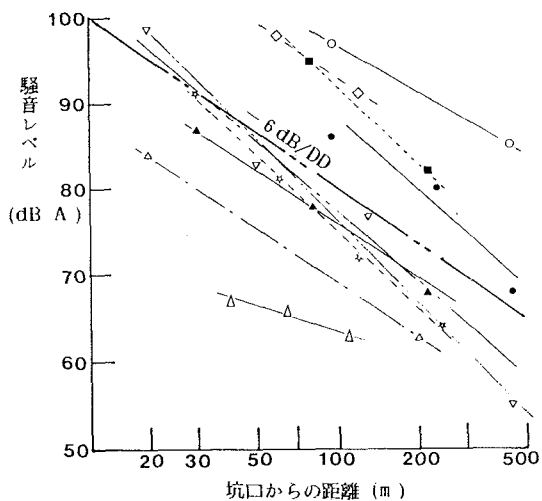


図-7 騒音レベルの坑外距離減衰

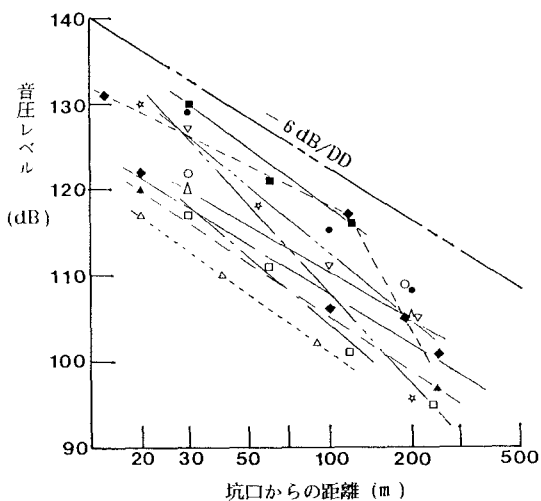


図-8 低周波音レベルの坑外距離減衰

図-9は発破音の指向特性をトンネル軸からの立体角で表したもので、低周波音レベルの場合はほぼ無指向性、騒音レベルの場合は坑口の形状より若干異なることも考えられるが、おおむね図の例の特性となるものと思われる。

3・2 予測式

発破条件と発破音の関係は、図でもわかるようにたいへんバラツキが大きく、統計的にはあまり意味がない所もあると思われるが、得られた係数をもとに傾向をつかむための簡易予測式を求めてみた。なお、この予測式は最も影響の大きい上半の発破を対象としたもので、各変数の範囲はおおむね表-1に示した範囲に適用できるものと思われる。

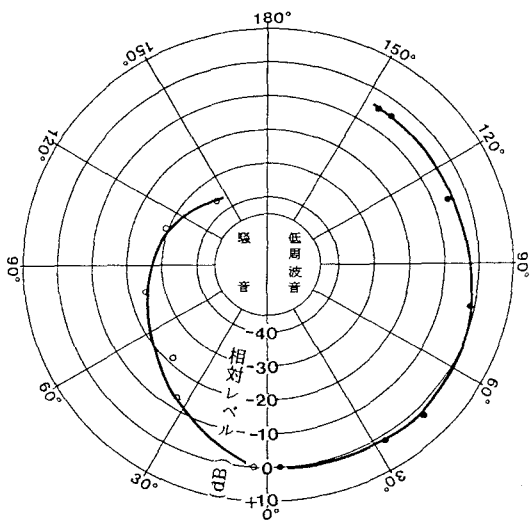


図-9 指向特性の例

騒音レベル $L = A + 16 \log w - 16 \log D - 20 \log R + \Delta L$

低周波音レベル $L = A + 7 \log w - 20 \log R + \Delta L$

ここで L : 騒音レベル、低周波音レベル予測値 (dB(A)、dB)

A : 定数 騒音レベル DS電管 130 MS電管 136

低周波音レベル DS電管 141 MS電管 148

w : 総薬量(kg)

D : 坑内距離(m)

R : 坑外距離(m)

ΔL : 指向性、防音扉、障害物減衰などの補正值 (dB(A)、dB)

なお、防音扉の対策効果としては、実例より騒音が15～20dB(A)、低周波音が10～15dBとすることができる。また、山などの障害物による減衰値は、一般の防音壁等による減衰値よりも小さくなることから、減衰値は騒音が0.7倍（代表周波数 $f=125\text{Hz}$ ）、低周波音が0.8倍（ $f=8\text{Hz}$ ）程度となる。

表-1 発破音の整理項目とデータの範囲

項 目	データの範囲
総 薬 量	2.5～124 (kg)
段 当 り 最 大 薬 量	0.4～21.7 (kg)
段 数	10～20 段
切羽（坑内）距離	70～250 (m)
坑口（坑外）距離	10～640 (m)

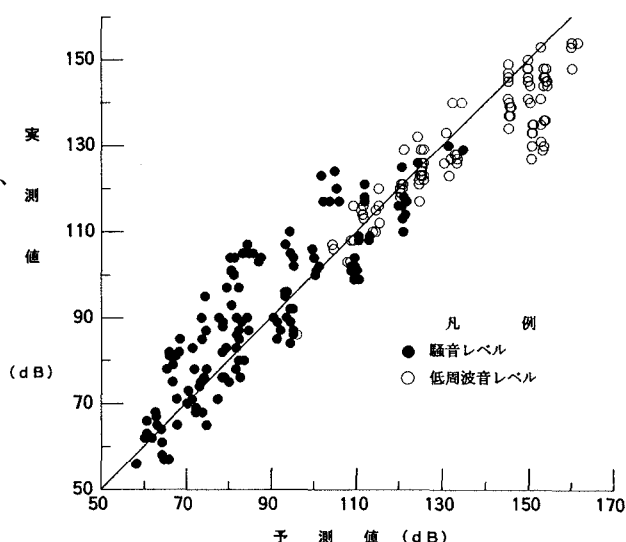


図-10 予測値と実測値との関係

この予測式を使った予測値と実測値の関係は図-10 に示すように全体的には比較的对応の良い結果となったが（相関係数は約0.8）、誤差の標準偏差が5～6 dBあることから、安全側（大きめ）の予測を行う場合には、定数項に標準偏差を上乗せしておくことが良いものと思われる。

4. あとがき

発破振動、騒音、低周波音について実用的な予測式を求めるために、多数の実測データを主な発破条件で整理し、得られた特性より各変数の係数を求め予測式を設定した。予測値には、まだばらつきが残っているもののおおむね実測値に対応しており、これらの予測式は工事の計画段階の影響検討や対策の検討に適用できるものと思われる。今後、予測精度を向上させるために、爆薬の種類、発破パターン、岩盤の特性、など各種の発破条件についてさらに分析し、定量化していく計画である。

参考文献

- 1) 船津弘一郎：発破音による低周波音、トンネルと地下、16-6(178), pp19～24, 1985. 6.
- 2) 船津弘一郎・内山恒光：トンネル発破の特性と予測、日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集、PP57～60, 1987. 9.
- 3) 船津弘一郎・坂野良一：民家に近接したトンネル工事における発破振動について、日本建築学会環境工学委員会第8回環境振動シンポジウム PP3-10, 1990. 3.
- 4) 坂野良一他：最新発破技術、森北出版、1984. 5.