

(24) 最大速度振幅で管理されたトンネル掘進発破振動の振動レベルについての考察

山口大学工学部 正○国松 直 日本道路公団 正 吉岡幸雄 日本国土開発(株) 正 宮地明彦
山口大学大学院 岡村昭彦 山口大学工学部 正 中川浩二

A STUDY ON THE VIBRATION LEVEL ON THE BASIS OF BLASTING VIBRATION INDUCED BY THE TUNNEL EXCAVATION BLASTING UNDER THE CONTROLLED PEAK PARTICLE VELOCITY

Sunao KUNIMATSU, Yamaguchi University Yukio YOSHIOKA, Japan Highway Public Corporation
Akihiko MIYAJI, Nihon-Kokudo-Kaihatu, Ltd Akihiko OKAMURA, Yamaguchi University
Koji NAKAGAWA, Yamaguchi University

Abstract

In this study, we discussed practically recorded velocity waves of blasting vibration induced by the tunnel excavation blasting under the controlled peak particle velocity (PPV) from the standpoint of vibration level (VL), which was used for estimation of public disturbances. We investigated the relation between the VL and the PPV to two controlled velocity waves, which were the same PPV or the same VL in each delay, and clarified their relation theoretically. Moreover, we studied the relation between the VL and the PPV from the amplitude ratio, which was the mean of the ratio of the PPV in each delay to the max PPV in a velocity wave, using the practically recorded velocity waves.

1. はじめに

最近、発破に伴う公害問題に対して厳しい規制が行われることが多くなってきた。本研究はそのような規制のもとに最大速度振幅 (PPV) を管理するように設計された住宅地近傍を通過するトンネルの掘進発破において観測された発破振動波形 (速度波形) を用いて、公害振動の評価に対して一般的に使用されている振動レベル (VL) の観点から検討を行った。まず、記録された速度波形から振動レベルの時刻歴を算出し、PPVとVLの相関を調べた。次に、帰帰直線からずれたデータについて速度波形と振動レベルの時刻歴の特徴について述べた。さらに、振動レベルを制御するための速度波形について言及し、実測データからの検証を行った。

2. 使用した発破振動記録

本研究で用いた発破振動記録は花こう岩類に属する硬岩に対するトンネル発破により生じた速度波形である。トンネルの進行方向に民家があるため制限発破が要請された。許容振動値は0.1~0.15cm/s程度である。この振動値を満足させるため起爆方法はDS雷管を用い、秒時差はほぼ250msである。トンネル天端と最も近い民家との鉛直距離は82mである。計測点は発破点から最も近い民家の庭 (トンネル軸直上) であり、トンネル軸方向 (X)、トンネル軸直角水平方向 (Y)、鉛直方向 (Z) の3成分 (各99個) を計測した。発破振動の管理は鉛直方向 (Z) データを用いて行われた。なお、最大速度振幅の管理の仕方等についての詳細については文献1) を参照されたい。すべてのデータについて速度波形から振動レベルの時刻歴を算出した。

3. 実測データによる最大速度振幅と振動レベルの関係

図1 (a) は鉛直方向 (Z) の最大PPV (これは各段におけるPPVではなく速度波形全体のPPVを意味する) を発破点と受振点との距離Dを横軸にとって表した図である。Z方向以外のX、Y軸方向のデータはいずれもZ方向のデータより振動値が小さいため図は省略する。図1 (b) は図1 (a) に対応する速度波形を用いて振

動レベルを算出した結果を同様に示した図である。最大PPVと振動レベルの変動の傾向はほぼ対応がとれており、最大PPVの管理が振動レベルの管理に対しても非常に有効であることを示唆している。

図2は鉛直方向（Z）の最大PPVと振動レベルの関係を示している。鉛直方向に対して標準偏差（図中の破線）は3.3dBであり、両者の対応がよいことがわかる。これらの関係を回帰した結果は次のように得られた。

鉛直方向（Z） $VL=20\cdot\log_{10}(PPV)+79$ （標準偏差 3.3dB）

図2の回帰直線の上側にずれる2例について速度波形と振動レベルの時刻歴を図3に示す。また、同様に下側にずれる2例を図4に示す。図3と図4は明らかに速度波形の各段の振幅および振動レベルの時刻歴の形状が異なる。速度波形に対して、図3は各段の振幅がほぼ等しいような波形であるが、図4は最初に大きな振幅を持ち後段の振幅がかなり小さいという傾向を示している。一方振動レベルについて述べれば、図3は徐々に振動レベルが増加し最大値を示すのに対して、図4は初段付近で振動レベルの最大値を示した後ほぼ振動レベルが一定値を示す傾向にある。これらの結果に対して次のような考察を行った。

4. 発破振動波形の制御に関する考え方

発破振動速度波形に対して、最大速度振幅、振動レベルそれぞれに着目すれば理想的に制御された波形として次の2つが考えられる。

- 1)最大速度振幅一定制御
（各段の最大速度振幅が一定である波形）
 - 2)振動レベル一定制御
（各段の振動レベルが一定となるような波形）
- 上述の波形、特に2)の波形を明らかにし、両波形について振動レベルの観点から考察した。

(1) 段発速度波形からの振動レベルの算出方法

段発速度波形を振動レベルの観点から考察するために、最初に段発速度波形から振動レベルを算出する方法について述べる。段発発破の振動レベルの速度波形からの算出は、まず各段の個々の振動に対して振動レベルを算出した後、簡単なデシベルの加算を行い各段の段発発破振動レベルを算出するという手順からなる。図5は手順および記号を示すために実際に記録された基本単発速度波形を秒時差 Ti_1 、 Ti_2 で3波重ね合わせた振動速度モデル波形である。まず図中の各波形（WAVE1、WAVE2、WAVE3）に相当する個々に分離した波形について、それぞれの振動レベルを各波形の最大速度振幅（ PPV_1 、 PPV_2 、 PPV_3 ）と目視による継続時間（ $Td.m_1$ 、 $Td.m_2$ 、 $Td.m_3$ ）を用いて次式から算出する（ VL_1 、 VL_2 、 VL_3 ）¹⁾。

$VL=20\cdot\log_{10}(PPV)+10\cdot\log_{10}(1-\exp(-Td.m/0.63))$
+85 (1)

次に、図5の点Cの位置での波形が入力される前の振動

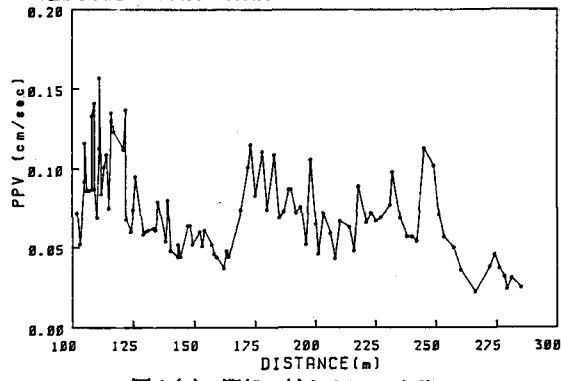


図1(a) 距離に対するPPVの変動

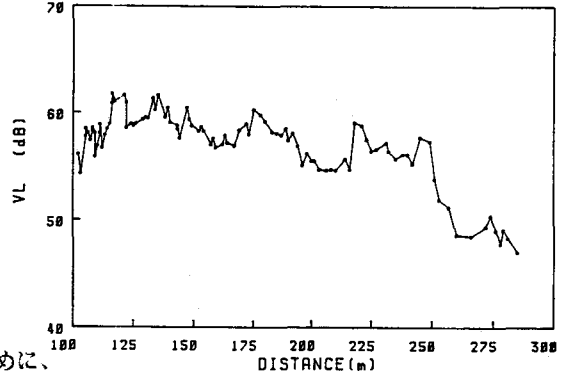


図1(b) 距離に対するVLの変動

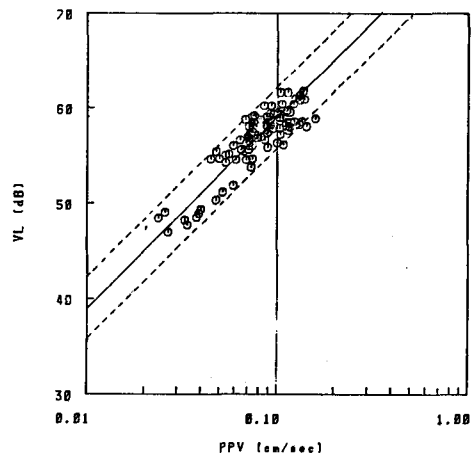


図2 PPVとVLの相関図

レベルを次式により求める。

$$\begin{aligned} VL_c' &= VL_1 + 10 \cdot \log_{10} (\exp(-(Ta_1 + Td_2)/0.63)) \\ &= VL_1 - 6.89 \cdot T_1 \end{aligned} \quad (2)$$

いま、複数の振動源による振動レベルは個々の振動源の振動レベルの和により求められることが理論的に明らかにされている²⁾。従って、点Cの振動レベルは VL_c' と VL_2 のデシベルの和を計算することにより求めることが可能となる。その計算式は次式で表される。

$$VL_c = 10 \cdot \log_{10} (10^{VL_c'/10} + 10^{VL_2/10}) \quad (3)$$

以下、後段の波形については上記手順の繰り返しとなる。なお、この算出方法の詳細については文献3)を参照されたい。

(2) 最大速度振幅からみた理想的な発破振動波形

最大速度振幅が規制される場合には、その理想的な発破振動波形は図6に示すような各段の最大速度振幅が規制値を越えずに一定である波形と考えられる。図6は最大速度振幅が0.1cm/s、波形の継続時間74msの単発速度波形を秒時差250msで繰り返した振動速度モデル波形とその振動レベルの時刻歴を示している。このような波形に対して振動レベルは時間の経過とともに徐々に増加し、約2秒以上でほぼ一定値を示す。その最大の振動レベルは上述の手順の繰り返しから求めることが可能であり、その値は60.3dBと計算される。一方、同一波形が繰り返されるような段発発破振動波形に対する振動レベルは初段の振動レベル(VL_1)を用いて次式から計算することも可能である⁴⁾。

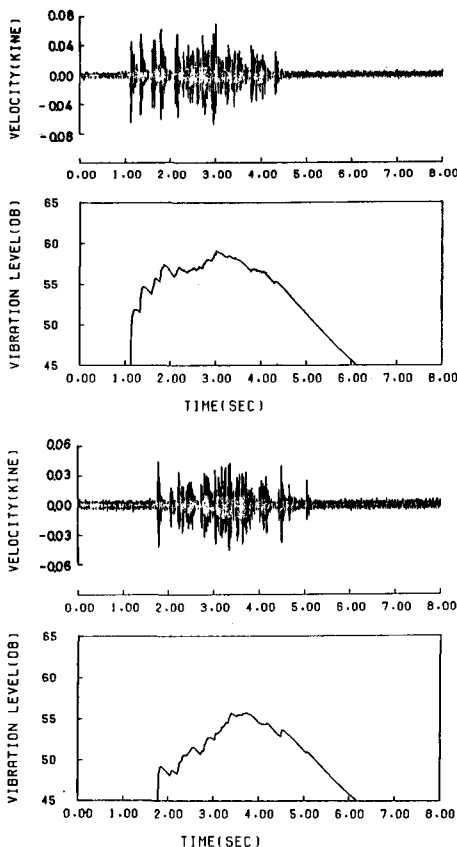


図3 回帰直線から+側に大きくずれる速度波形例

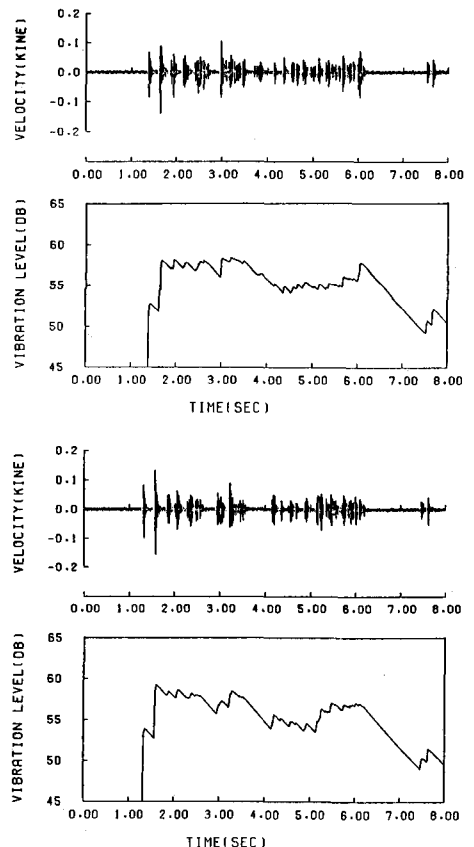


図4 回帰直線から-側に大きくずれる速度波形例

$$VL = VL_i + 8 \cdot \log_{10} (1400/T_i)$$

$$VL = 20 \cdot \log_{10} (PPV) + 10 \cdot \log_{10} (1 - \exp(-T_d \cdot m / 0.63)) + 85 + 8 \cdot \log_{10} (1400/T_i) \quad (4)$$

ここで、 VL_i は式(1)から55.4dBであり、式(4)による振動レベルの最大値は61.4dBと計算される。繰り返し計算の結果と約1dBの差があるけれども予測値としては十分であるといえる。

(3) 振動レベルからみた理想的な発破振動波形

振動レベルが規制される場合には、各段の振動レベルが規制値を越えないで一定の振動レベルとなるように発破振動波形を制御する必要がある。(1)節で述べた方法を用いて振動レベルが一定となる波形について考察を行う。

いま、同一波形(継続時間が同じ)で振幅のみが異なるような波形を考える。初段において最大速度振幅が0.1cm/s、継続時間74msの速度波形を生じたとすれば、そのとき振動レベルは55.4dBを示す。2段目の速度波形が秒時差250msで生じるとき、その最大速度振幅がいくらであれば初段の振動レベルと等しくなるかを計算する。

$$\text{式(2)より } VL_c' = 55.4 - 6.89 \cdot 0.25 = 53.7 \quad (\text{dB})$$

$$\text{式(3)より } 55.4 = 10 \cdot \log_{10} (10^{53.7/10} + 10^{VL_2/10}) \quad \therefore VL_2 = 50.5 \quad (\text{dB})$$

以上より、2段目の発破振動波形の振動レベルが50.5dBであれば2段目の振動レベルが初段の振動レベルと等しくなることがわかる。従って、そのときの最大速度振幅は

式(1)より

$$50.5 = 20 \cdot \log_{10} (PPV) + 10 \cdot \log_{10} (1 - \exp(-0.074/0.63)) + 85 \quad \therefore PPV = 0.057 \quad (\text{cm/s})$$

となる。同様に3段目以降の最大速度振幅の大きさは2段目と同じであればよい。

図7は2段目以降の振幅を初段の0.57倍としたモデル波形である。各段の振動レベルが一定に制御されていることがわかる。この考察の結果は最大PPVと各段のPPVの比の平均(振幅比)が振動レベルの制御において重要であることを示唆している。

また、図6と図7の比較から同じ最大PPVであっても速度波形の制御によって振動レベルが約6dB異なる結果となることがわかる。

5. 実測結果の振幅比による検討

鉛直方向(Z)の最大速度振幅と振動レベルの関係は図1のようである。3章および前章の考察から、回帰直線の上側に位置するデータは最大速度振幅が一定であるような波形であり、下側に位置するデータは振動レベルが一定であるような波形であると考えられる。いま、最大速度振幅が一定で、 $T_d=100\text{ms}$ 、 $T_i=250\text{ms}$ とすれば、式(4)から $PPV=1.0\text{cm/s}$ のときの振動レベルは82.7dBと計算される。また、振動レベルが一定のときには式(1)から76.7dBと計算される。この2つの平均値(79.7dB)は実測結果の79dBと非常に近い結果である。従って、実測結果は2つの両極端な場合のほ

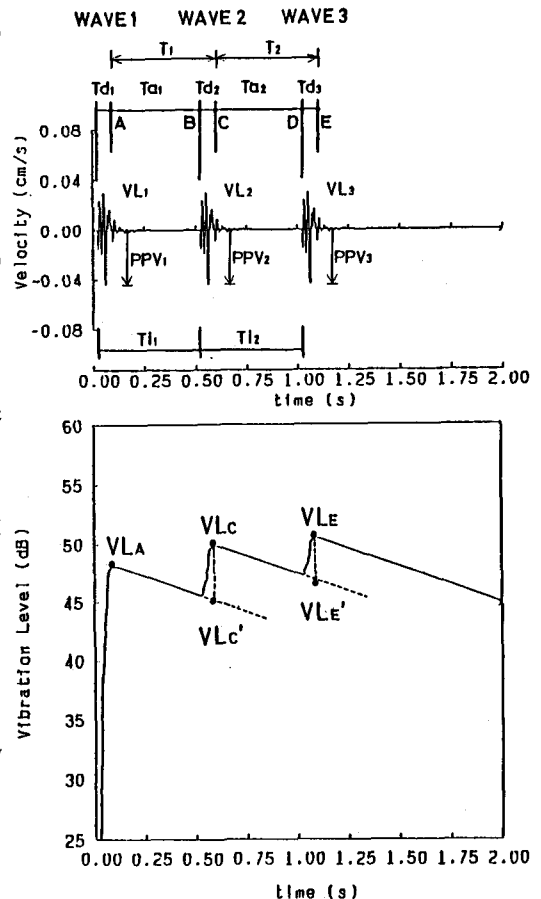


図5 計算手順と記号の説明

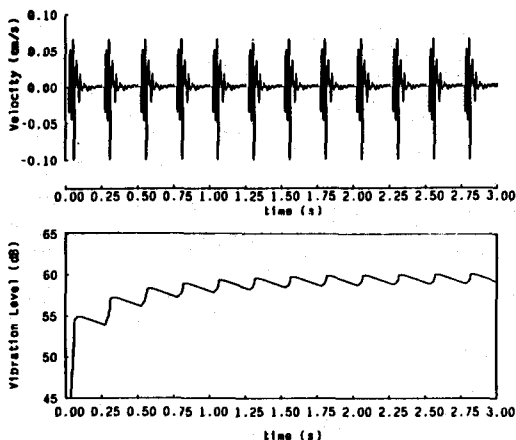


図6 最大速度振幅一定制御の速度波形と振動レベル

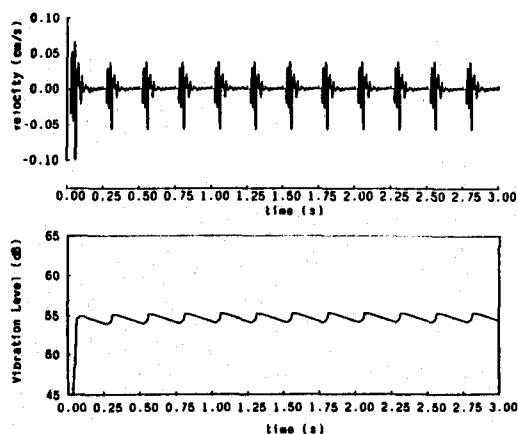


図7 振動レベル一定制御の速度波形と振動レベル

ば中間に位置すると考えられる。

そこで、すべてのデータについて各段のPPVを読み取り、振幅比を算出した。振幅比が1.0の場合には最大速度振幅一定の波形であり、また秒時差250msのときにこの比が0.57であれば振動レベル一定の波形であるといえる。図8は振幅比を図1の回帰直線からのずれ（偏差）に対してプロットした結果である。明らかにこの比が小さい（各段の最大速度振幅と最大PPVの差が大きい）方が下側にずれ、この比が大きい（各段の最大速度振幅と最大PPVの差が小さい）方が上側にずれていることがわかる。しかし、振幅比の大きさは+1標準偏差上で0.727、-1標準偏差上で0.367、回帰直線上で0.547とかなり低い。これは振幅比の算出にあたり各段すべてのPPVを用いているため、図3、図4に見られるような各段の振幅の変動が大きく左右していると考えられる。実際の速度波形においては最大速度振幅や継続時間および秒時差が変動することから、この比についてはさらに十分検討する必要があると思われる。

今後、各段の最大速度振幅と秒時差をもっと厳密に制御すれば、振幅比をパラメータに発破設計を考えることが可能であるといえる。

参考文献

- 1)宮地・川上・古川・中川：確率論的手法に基づく発破振動管理手法に関する一提案，土木学会論文集，投稿中。
- 2)たとえば、公害防止の技術と法規編集委員会編：公害防止の技術と法規・振動編，産業公害防止協会，1985。
- 3)国松・三浦・今村・中川：段発破振動速度波形からの振動レベルの算出，土木学会論文集，投稿中。
- 4)国松・三浦・今村・中川：発破振動における振動レベルの推定，土木学会論文集，第367号，pp.45-51，1986。

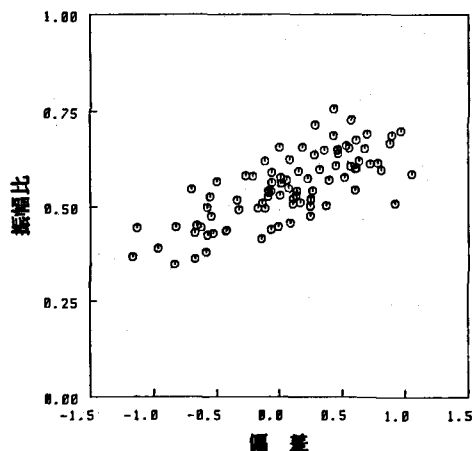


図8 回帰直線からのずれと振幅比の関係