

(30) 発破振動管理に対する一提案

日本国土開発(株) 正員 宮地明彦 日本国土開発(株) 正員 山口陽久
山口大学工学部 正員 古川浩平 山口大学工学部 正員 中川浩二

1. まえがき

山岳トンネルの掘削には発破が用いられることが多い。しかし、今日ではトンネルが住居近くを通過する場合も多く、その場合は発破による振動、あるいは騒音を軽減するため、しばしば制限発破が要求される。発破振動の予測あるいは管理は、基本的には試験発破を基にした実測値を用い、発破点と計測点との距離 D と薬量 W を用いた $PPV = KW^a D^{-b}$ の式によることが多い。この式において薬量は同段で起爆される総薬量を考えており、同段の雷管のもつ起爆時間のばらつきによる振動の低減は考慮されていない。そのため、この式による予測値は実測値に比べて大きくばらつき、発破振動の管理上問題が多い。

本研究はこれらの問題点をふまえ、実際のトンネル施工時に観測された発破振動記録の解析結果から、トンネル掘削における発破振動予測式において、薬量は段当りでなく孔当りを基本にし、発破振動のばらつきを考慮に入れた確率論に基づく発破振動管理法を提案する。

2. 従来の発破振動予測式における問題点

発破振動は爆薬の爆発により生じるエネルギーが波動となって地盤中を伝わることにより生じるものである。そのため発破振動の予測式は薬量 W と発振点から受振点までの距離 D とを用いた次式が経験式として用いられている。

$$PPV = KW^a D^{-b} \text{ ----- (1)}$$

ここに、 PPV は受振点の最大速度振幅、 K, a, b は定数である。 a として $2/3 \sim 3/4$ 、 b としては 2 が用いられることが多い。式(1)において薬量 W は同段で起爆される総薬量を考えている。式(1)で発破振動を予測するに際して、従来より次のような点が指摘されている。

式(1)を用いるにはまず定数である K, a, b の値を決める必要がある。 a, b は上述の値を用いるとしても、 K 値を決めるには一般に試験発破の結果が用いられる。試験発破を行って得られる K 値は、最大の PPV を記録した段の W を用いて式(1)から求められるが、1試験発破で1つの K 値しか求まらない。また孔間隔のばらつきや節理の存在による荷の重さ軽さが振動値に反映され、試験発破により求めた最大の K 値は大きくばらつくことが多い。これらのことを考慮して、発破振動管理で用いる K 値は従来の結果をも加味して、決定しているのが実情である。

さらに、 W は段当り薬量を用いているが、制限発破においては振動をなるべく抑えるため、 MS あるいは DS 雷管を用いることがしばしば行われている。 MS あるいは DS 雷管では、同段であってもその起爆時間がばらつき、その結果発破振動が低減するが、そのことが考慮されていないため、式(1)による予測は上述の理由とあいまって精度が悪くなると考えられる。

これらのことをふまえ、本研究では以下の3種の発破振動予測式を考え、実測データを用いることにより予測式の精度を検証する。手法2は雷管のばらつきを考慮して、段当りではなく孔当り薬量を基本とする手法であり、手法3はさらに K 値のばらつきの情報をも確率論手法を用いることにより、取り入れようとするものである。

手法1 $PPV_{max} = K_{D, max} W_D^a D^{-b} \text{ ----- (2)}$

手法2 $PPV_{max} = K_{K, max} W_K^a D^{-b} \text{ ----- (3)}$

手法3 $PPV_{mean} = K_{K, mean} W_K^a D^{-b} \text{ ----- (4)}$

とし、 PPV_{mean} の設定に当たっては、 PPV_{max} がある許容値 PPV_{val} を越える確率を一定値以下にするという条件から求めている。

ここに添字 $max, mean, D, K$ はそれぞれ最大、平均、段当り、孔当りを意味している。定数 a, b としては本研究では $a=3/4, b=2$ を用いる。

3. 実施工と観測データ

3.1. 計測概要

本研究で観測を行ったトンネルは広島型花崗岩類に属する硬岩である。トンネルの進行方向に民家があり、制限発破を要請された。許容振動値は0.1~0.15kine程度としている。トンネル天端と民家との鉛直距離は82mである。振動計測は2箇所で行った。発破点から最も近い民家の庭に設置した測点をA測点とし、その民家近くの上り下り線の中心線の上に設置した測点をB測点とした。各計測点でトンネル軸方向(X)、トンネル軸直角方向(Y)、鉛直方向(Z)の3成分を計測した。図-1にA, B測点で得られた鉛直方向の最大PPV、PPVの平均値、を測点との距離を横軸にとって示す。A, B測点で記録されたPPVの差は明らかであるが、これは受振点特性が異なるためであろう。実施工における発破振動の管理はA測点が最近接点であり、かつ振動値そのものも大きかったため、A測点の鉛直方向(Z)データを主として用いており、本研究でも主としてこのデータを用いて考察を行う。

3.2. 実施工概要

図-1のA測点のデータを用いて、実施工における発破振動の管理概要を説明する。測定を始めてD=249mまで振動値が急激に大きくなっている。これはいずれもDS雷管の1段で心抜きした場合の振動である。PPVが0.1kineを越えたのでD=245mの発破では薬量を落としている。またこの地点での振動値としては大きすぎると考えられたので以降は初段として、DS2段の雷管を用いた。そのため、以後の振動値は小さくなっている。

表-1に計測を行った99発破のデータNo.、最大PPV(kine)、最大PPVが生じた段数、最大PPVとなった段の薬量(kg)、最大PPVとなった段の孔当り最大薬量(kg)を示す。4001~4014までのデータはことごとく1段で最大PPVが生じていることがわかる。4015以降は、最大PPVを生じた段数や薬量は発破毎に異なり、その予測が難しいのが分かる。削孔長Lは4001~4044

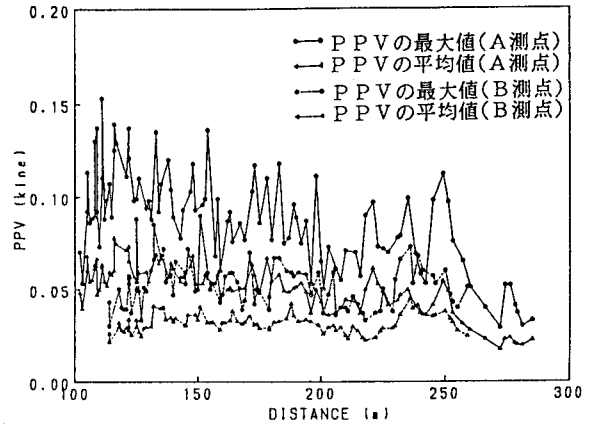


図-1 計測されたA, B測点での速度振幅

表-1 計測されたデータ

No.	Vmax (kine)	DAN	W (kg)	Wk (kg)	No.	Vmax (kine)	DAN	W (kg)	Wk (kg)
4001	0.033	1	2.4	0.6	4051	0.092	4	7.5	0.6
4002	0.030	1	2.4	0.6	4052	0.087	10	4.8	0.6
4003	0.037	1	2.4	0.6	4053	0.060	13	7.0	0.5
4004	0.041	1	2.4	0.6	4054	0.099	4	8.4	0.6
4005	0.052	1	2.4	0.6	4055	0.068	3	4.2	0.7
4006	0.052	1	2.8	0.7	4056	0.136	4	8.0	0.7
4007	0.029	1	2.4	0.6	4057	0.099	4	8.6	0.7
4008	0.040	1	2.4	0.6	4058	0.096	7	8.1	0.6
4009	0.051	1	2.8	0.7	4059	0.093	4	7.4	0.7
4010	0.065	1	3.2	0.8	4060	0.118	9	9.5	0.6
4011	0.076	1	2.4	0.6	4061	0.103	4	7.7	0.7
4012	0.097	1	2.8	0.7	4062	0.093	3	3.6	0.6
4013	0.112	1	2.8	0.7	4063	0.078	2	2.0	0.5
4014	0.098	1	2.4	0.6	4064	0.078	2	2.0	0.5
4015	0.053	3	5.4	0.9	4065	0.089	4	6.6	0.6
4016	0.058	8	11.1	0.7	4066	0.104	7	7.2	0.6
4017	0.069	4	9.9	0.9	4067	0.120	7	7.3	0.6
4018	0.099	4	10.2	0.9	5001	0.107	7	8.4	0.6
4019	0.079	8	10.4	0.8	5002	0.092	8	8.0	0.5
4020	0.078	3	8.4	0.9	5003	0.135	7	7.0	0.5
4021	0.070	7	7.0	0.7	5004	0.088	4	6.7	0.6
4022	0.072	3	5.4	0.9	5005	0.098	7	3.5	0.5
4023	0.073	9	11.9	0.7	5006	0.094	5	4.8	0.6
4024	0.097	10	11.2	0.8	5007	0.110	3	5.4	0.6
4025	0.090	4	8.0	0.8	5008	0.099	3	5.4	0.6
4026	0.057	4	6.3	0.7	5009	0.098	3	5.4	0.6
4027	0.070	8	9.8	0.7	5010	0.121	3	5.4	0.6
4028	0.071	3	6.0	1.0	5011	0.137	3	6.0	0.7
4029	0.055	2	2.8	0.7	5012	0.111	3	6.0	0.7
4030	0.061	4	8.3	0.8	5013	0.129	5	3.2	0.4
4031	0.073	3	6.0	1.0	5014	0.139	3	4.5	0.5
4032	0.050	2	2.4	0.6	5015	0.125	2	2.5	0.5
4033	0.065	2	2.4	0.6	5016	0.089	8	2.4	0.4
4034	0.111	3	6.0	1.0	5017	0.107	8	2.4	0.4
4035	0.053	2	2.4	0.6	5018	0.098	17	2.1	0.3
4036	0.087	4	9.6	0.8	5019	0.088	3	2.4	0.3
4037	0.075	3	6.0	1.0	5020	0.153	2	2.4	0.4
4038	0.089	4	10.4	0.7	5021	0.110	2	2.4	0.4
4039	0.096	8	10.5	0.7	5022	0.073	5	2.8	0.4
4040	0.078	3	6.0	1.0	5023	0.092	2	1.6	0.4
4041	0.075	7	6.3	0.9	5024	0.137	2	2.4	0.4
4042	0.118	3	6.0	1.0	5025	0.130	7	3.2	0.4
4043	0.077	8	11.3	0.8	5026	0.089	15	4.2	0.3
4044	0.110	4	11.2	0.9	5027	0.088	1	0.6	0.2
4045	0.086	4	8.6	0.7	5028	0.086	1	0.6	0.2
4046	0.117	3	4.8	0.8	5029	0.113	3	3.2	0.4
4047	0.103	2	2.4	0.6	5030	0.092	1	0.6	0.2
4048	0.077	9	8.4	0.8	5031	0.053	2	2.3	0.4
4049	0.086	4	7.8	0.6	5032	0.070	2	2.0	0.4
4050	0.076	4	9.5	0.7					

の間は、4009～4015間のL=2.3mを除いて、L=2mである。4045以降は振動値を基に順次1.7,1.5,1.2,0.9mとLを小さくして施工を行った。

4. 観測データによる振動予測式の比較

これらのデータを用いて、2. で述べた手法1～3の比較を行う。すでに述べたように、K値は試験発破の結果を基に決定されている。そのため、本研究の解析ではある発破の前n回の発破結果を試験発破と考え、その結果からK値を求めて、そのK値を用いて次の発破に必要なWを推定し、それと実際に用いられたWとを比較するという手法を用いる。実施工では計測されたPPVを基に、熟練した技術者、作業員が次の発破パターンや薬量を決定していることを再現しようと試みたからである。また本研究で対象とした工事が、住民の苦情もほとんどないまま終了したことも上記の考え方を支持する1つの理由でもある。上記の考え方をを用いて手法1～3の薬量Wを求める手順は次のようになる。以下、上添字の(i-1)は試験発破を意味し(i)は次の発破を意味する。

手法1 式(2)を用いて試験発破のデータから、 $K_{D,max}^{(i-1)}$ を以下の式から計算する。

$$PPV_{max}^{(i-1)} = K_{D,max}^{(i-1)} (W_D^{(i-1)})^{3/4} (D^{(i-1)})^{-2} \quad (5)$$

この $K_{D,max}^{(i-1)}$ と管理値である $PPV_{max}^{(i)}$ 、実距離 $D^{(i)}$ とを式(2)に代入した次式から $W_D^{(i)}$ を計算する。

$$PPV_{max}^{(i)} = K_{D,max}^{(i-1)} (W_D^{(i)})^{3/4} (D^{(i)})^{-2} \quad (6)$$

この $W_D^{(i)}$ を計算上得られた薬量と考え、実施工で用いられた薬量と比較する。

手法2 手法1で段当りの $K_{D,max}$, W_D としたのを孔当りの $K_{K,max}$, W_K とした手法であり、 $PPV_{max}^{(i-1)} = K_{K,max}^{(i-1)} (W_K^{(i-1)})^{3/4} (D^{(i-1)})^{-2}$ から $K_{K,max}^{(i-1)}$ を計算し、 $PPV_{max}^{(i)} = K_{K,max}^{(i-1)} (W_K^{(i)})^{3/4} (D^{(i)})^{-2}$ より $W_K^{(i)}$ を求める。

手法3 PPVの分布が正規分布であると仮定すると、 PPV_{max} がある許容値 PPV_{a10} を越える確率を一定値(P_a)にするのは δ を変動係数とすると次式で表される。

$$P(PPV_{a10} \leq PPV_{max}) = \Phi(\infty) - \Phi\left(\frac{PPV_{a10} - PPV_{mean}}{\delta \cdot PPV_{mean}}\right) = P_a \quad (7)$$

これより

$$PPV_{mean} = \frac{PPV_{a10}}{1 + \delta \cdot \Phi^{-1}(1 - P_a)} \quad (8)$$

この PPV_{mean} を $PPV_{mean}^{(i)}$ として式(4)に代入し、次式より W_K を求める。

$$PPV_{mean}^{(i)} = K_{K,mean}^{(i-1)} (W_K^{(i)})^{3/4} (D^{(i)})^{-2} \quad (9)$$

本研究においては、 PPV_{a10} は手法1, 2の管理値の0.01kine小さい値とし、 $P_a=0.01$ とした。

試験発破(i-1)としてその前3回の発破で求めたK値の平均を $K^{(i-1)}$ として用い、手法1～3で得られた薬量(図中calで示す)と実施工で用いられた薬量(図中realで示す)を図-2～図-4に示す。横軸は距離Dである。図-2～図-4の(a)はcal(破線)とreal(実線)の薬量であり、(b)はreal/calを示している。振動予測式の観点からすると、real/cal≒1が望ましいと考えられる。

図-2は手法1の結果であり、realとcalの差が著しい。実施工で用いられた段当り最大薬量は各発破毎に異なるとはいえ、傾向的にはほぼ同じ様な量を用いている。それに対して計算

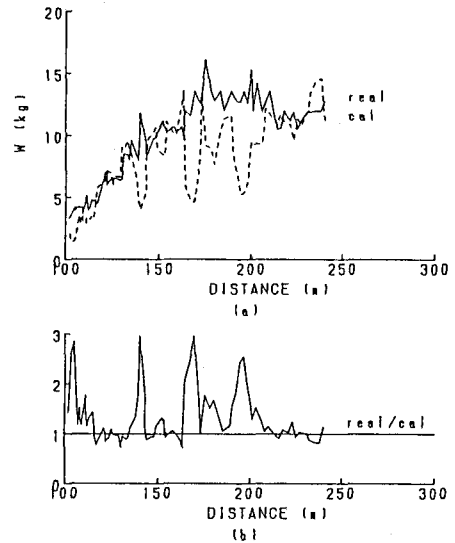


図-2 手法1での結果

された薬量は変動が激しい。このことは3回の試験発破の平均から得られた $K_{D,max}$ であってもその値が大きくばらついていることを意味している。図には示していないが、試験発破を1回と考えて得た同様の図の変動はさらに大きく、試験発破による $K_{D,max}$ を用いて段当り薬量を求める手法1は予測式として余り適当でないことがわかる。

図-3は手法2の結果であり、calの方が少し大きいがrealとの差は小さく、予測式としての安定性は手法1より良いことがわかる。しかし図-2(b)を見ても分かるように $real/cal \approx 0.8$ であり、実施工のデータとの合致度に少し問題があると考えられる。

図-4は手法3の結果である。図を見ても分かるように、calとrealはほとんど同じであり、 $real/cal \approx 1$ となっている。また $real/cal$ のばらつきも小さく孔当り薬量を用いた確率論的な手法である手法3が本研究の実測データからは最も予測式の精度がよいことが分かる。

表-2に図-2～図-4に示した手法1～3での $real/cal$ の平均値、標準偏差、変動係数を示す。平均値は手法1で1.34で、手法2で0.81、手法3で1.03と手法3が最も良く、変動係数も0.39、0.16、0.14と手法3が最も小さい。このことから、手法3が予測式としての精度、安定性の面から最も優れていることが分かる。

5. おわりに

本研究は実施工で計測されたデータを基に、発破振動予測式を比較検討し、発破振動管理手法に対する一提案を行ったものである。本研究の結果によれば、従来用いられてきた段当り薬量を基にした振動予測式は精度が悪く、かつ発破条件によりばらつきが大きく、この式を用い発破振動を管理することは非常に難しいことが明らかになった。これに対して、孔当り最大薬量を基にした予測式は精度、安定性の面ではるかに実情を反映している。特に本研究で提案した手法は孔当り薬量を基に確率論的な考え方を取り入れた手法であり、この手法は予測精度、安定性いずれの面においても最も優れていることが明らかになった。

本研究はある1つの現場における計測データを基にしている。今後本研究で提案した手法を他の現場にも適用し、この手法をさらによりよいものへと改良を加えていく所存である。最後に本研究の計算に当たり、山口大学工学部中尾絵理子技官の助力を得た。記して謝意を表す。

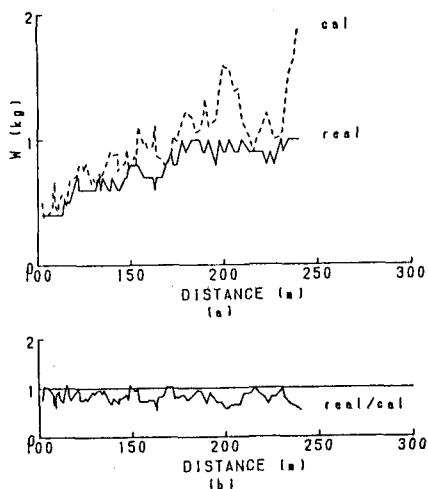


図-3 手法2での結果

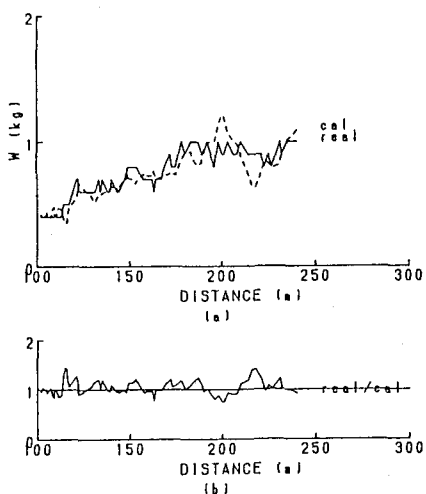


図-4 手法3での結果

表-2 3手法の予測精度の比較

	平均値	標準偏差	変動係数
手法1	1.338	0.522	0.390
手法2	0.814	0.129	0.159
手法3	1.033	0.149	0.144

(30) An proposal on the control of blasting vibration

Akihiko Miyaji *
Haruhisa Yamaguchi *
Kohei Furukawa **
Koji Nakagawa **

Abstract

Blasting is usually used in tunnelling in mountainous region. Nowadays, however, controlled blasting is often used because of vibration or air blast by the blasting. We fundamentally estimate and control the blasting vibration by a survey of blasting test. For that purpose, we use the equation of $PPV = KW^a D^{-b}$ where PPV is the peak particle velocity, D is the distance from the source and W is the sum of the instantaneously detonating charge. Because we consider that W is the charge within the same delay number in this equation, the reduction of vibration caused by a distribution of firing within the same delay number is not considered.

Analyzing the blasting vibration records measured in a tunnelling in practice, we propose the control method of blasting vibration using probability theory which is based on the charge per each hole instead of the charge within the same delay number.

* Japan Development and Construction Corporation

** Faculty of Engineering, Yamaguchi University