

# 確率論手法に基づく発破振動管理手法に関する一提案

## A PROPOSAL ON THE BLAST VIBRATION CONTROL BASED ON PROBABILISTIC APPROACH

吉岡幸雄\*・宮地明彦\*\*・古川浩平\*\*\*・中川浩二\*\*\*\*

By Yukio YOSHIOKA, Akihiko MIYAJI, Kohei FURUKAWA and Koji NAKAGAWA

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 blast vibration control method using probability theory which is based on the charge per each hole instead of the charge within the same delay number.

*Keywords: blast vibration, control, probabilistic approach*

### 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、実施工においては厳しい管理が必要とされる。発破振動の予測あるいは管理は、基本的には試験発破をもとにした実測値から得られる  $K$  値、発破点と計測点との距離  $D$  と薬量  $W$  を用いて最大振動速度振幅を表わす式  $PPV = KW^a D^{-b}$  によることが多い<sup>1)~3)</sup>。しかし、この式による予測値は実測値と大きく外れることが多く、発破振動の管理上この予測法が必ずしも適当であるとはいえない。その理由として、発破される岩盤の状況が一様でない、あるいは作業員による削孔位置などが必ずしも設計どおりではない等のほかに、同段で起爆される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

ないことなどが考えられる。

発破振動の管理は基本的には試験発破のデータに基づいて行われているとはいえ、試験発破から得られた  $K$  値をそのまま用いるのではなく、工学的判断を加味する場合もあり、 $K$  値の決定が場合により異なっていたり、試行錯誤の程度が大きかったり、統一性がなく、実際に現場で生じている現象をうまく説明できないことが多い。そのため、発破振動の管理はややもすると、場当りになっていると考えられ、これらを統一した理論で再構築する必要がある。特に、市街地に近い所で発破を用いる工事が増加しつつある最近では、その重要性はますます大きくなっていると考えられる。

本研究はこれらの需要と問題点をふまえ、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をもとに、現象を正確に表現できる論理の構築を目指したものである。実際に大きなトラブルなく工事が完了した現場においては、住民や発注者の厳しい発破振動の監視の下に、最も適切な薬量や削孔長、削孔パターンを検討しつつ工事が行われたと考えられる。本研究はこれら熟練の技術者、作業員の経験を最大限うまく取り入れた一種のエキスパートシステム的な考え方にたつて発破振動管理法を構築したものである。

このように本研究では、トンネル掘削における発破振

\* 正会員 日本道路公団広島建設局広島工事事務所所長  
(〒731-01 広島市安佐南区西厚 7-1-1)

\*\* 正会員 日本国土開発(株)エンジニアリング本部技術  
部技術課長(〒107 港区赤坂 4-9-9)

\*\*\* 正会員 工博 山口大学教授 工学部土木工学科  
(〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

\*\*\*\* 正会員 工博 山口大学教授 工学部建設工学科(同上)

動予測式において、薬量は段当たりでなく孔当たりを基本にし、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し、従来の手法との比較を行い、提案した管理法がより優れていることを明らかにする。

## 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。

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

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問題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。そのため孔間隔、抵抗線長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  $K$  値は従来の振動計測結果をも加味して、決定しているのが実情である。

また、心抜き孔とそれ以外の孔とでは  $K$  値を変えるといったこともしばしば行われる。この両者の差をどのようにして決めるかということも過去の経験や結果を参考にして、恣意的に決められることが多い。

さらに、 $W$  は段当た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 雷管が通常用いられる。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く。表—1 に X 社で行われた DS 雷管の起爆時間測定結果を示す。同段であってもかなりばらつき、厳密な意味で斉発していないことは明らかである。このように各孔の起爆時間にずれが生じることによって発破振動が低減するが、そのことが式 (1) では考慮されていない。また、薬量最大の段で  $PPV$  が必ずしも最大にならないことなどがあり、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。

表—1 DS 雷管の段ごとの起爆時間測定結果

段	標準値 (msec)	標準偏差 (msec)
1	0	
2	250	12
3	500	16
4	750	31
5	1000	28
6	1250	16
7	1500	30
8	1750	30
9	2000	34
10	2300	49
11	2700	70
12	3100	68
13	3500	55
14	4000	88
15	4500	12

このように発破振動の予測にはいくつかの問題点があるが、今後発破振動管理を考えるにあたって次の 2 点を特に考慮する必要がある。その第 1 として、発破振動の問題、特に最近問題となっている振動公害は、本質的に物が壊れることを対象とするものではないことが挙げられる。本研究で計測した現場もこの一例である。物が壊れる場合はある大きな荷重 (最大荷重) がかったときに問題であるが、公害振動の問題はこのような極値が問題というよりも、全体としての振動による不快感をいかにして小さくするかを管理する問題と考えられる。極値の出現は特殊な条件が重なった場合と考えられ、このような少数例のものによる影響を従来の手法は過大評価していたといえる。このように考えると、発破振動全体を管理するという観点からは、発破振動の平均値や分散を考慮したうえで最大値の出現する確率を許容値以下にするという確率統計的な考えを取り入れる必要がある。

第 2 に、薬量  $W$  としての段当たり薬量を用いる理由が不明確なことが挙げられる。上述のように起爆時間のばらつきを考慮に入れると、その段の薬量すべてが同時に起爆しているとは考えにくい。起爆時間のばらつきから推定すると発破振動が重畳するのは高々 2~3 孔でないかと考えられる。この点については Gustaffson<sup>4)</sup> や 佐々<sup>5)</sup> によっても指摘されている。このようなことを考慮すると、段当たり薬量でなく、孔当たり薬量を基本とした振動予測式が必要と考えられる。

これらのことをふまえ、本研究では以下の 4 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 1 は従来から用いられてきた試験発破を 1 回あるいは数回行って  $K$  値を求め、その  $K$  値をもとに管理する手法である。手法 2 も従来から用いられてきた手法と考えられるが、試験発破のデータだけでなく、施工を経るに従って施工時の計測によって得られたデータがつけ加わるため、この施工時計測データをもとに  $K$  値を順次変更する手法である。手法 3 は雷管のばらつきを考慮して、段当たりではなく孔当たり

葉量を基本とする手法であり、手法4は孔当たり葉量を基本として、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。これらの4手法の基本式は次のように表わすことができる。

手法1  $PPV_{max} = K_{D,max} W_b^a D^{-b}$  ..... (2)

手法2  $PPV_{max} = K_{D,max} W_b^a D^{-b}$  ..... (3)

手法3  $PPV_{max} = K_{K,max} W_b^a D^{-b}$  ..... (4)

手法4  $PPV_{mean} = K_{K,mean} W_b^a D^{-b}$  ..... (5)

とし、 $PPV_{mean}$ の設定にあたっては、 $PPV_{max}$ がある許容値 $PPV_{all}$ を越える確率を一定値以下にするという条件から求める。

ここに、添字 max, mean, D, K はそれぞれ最大, 平均, 段当たり, 孔当たりを意味している。定数 a, b としては現場の岩盤の状態をはじめとする多くの要因により変化するものであるが、この値を正確に求めるのは困難であることおよびトンネルの掘削に伴って岩盤の状況が変化することから、本研究では  $a=3/4$ ,  $b=2$  を用いることにする。

### 3. 実施工と観測データ

#### (1) 計測概要

本研究で観測を行ったトンネルの地質は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 kine程度としている。トンネル天端と最も近い民家との鉛直距離は82mである。発破地点と各測点間の地質は未風化の中粒～粗粒の黒雲母花崗岩であり、弾性波速度は3.5 km/sとなっている。また各測点の表土層の層厚は約2m程度である。振動計測は2か所で行った。発破点から最も近い民家の庭(トンネル軸直上)に設置した測点をA測点とし、その民家近くのA測点と22m離れた地点に設置した測点をB測点とした。各計測点でトンネル軸方向(X), トンネル軸直角水平方向(Y), 鉛直方向(Z)の3成分を計測した。

図-1, 2にA, B測点で得られた鉛直方向(Z)の最大PPV, PPVの平均値を発破点と受振点との距離Dを横軸にとって示す。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。A, B測点で記録されたPPVはA測点の方がB測点よりかなり大きい。これは受振点特性が異なるためであろう。図-3はA, B両測点で得られた最大PPV, 平均PPVの相関図であるが、ほぼ両者は相関していると考えられる。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最も大きかったため、A測点の鉛直方向(Z)データを用いて管理しており、本研究でも主としてこのデータを用

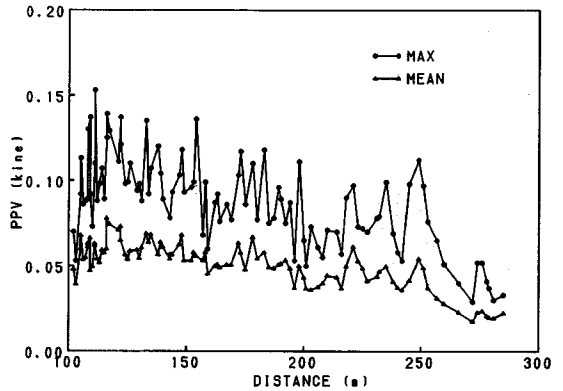


図-1 A測点で計測されたZ方向のPPV

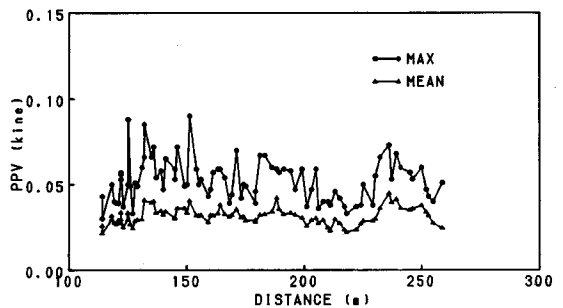
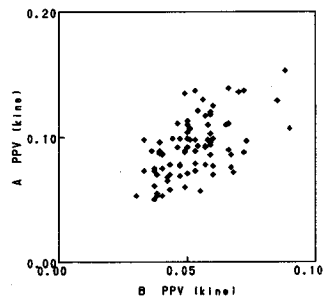
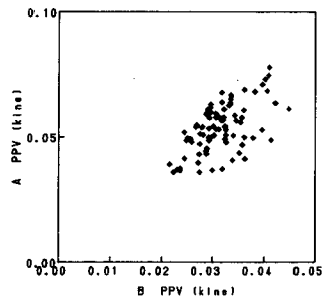


図-2 B測点で計測されたZ方向のPPV



(a) 最大PPV



(b) 平均PPV

図-3 AB両測点で計測されたPPVの相関図

いて考察を行う。

(2) 実施工概要

表一にA測点で計測を行った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となった段の孔当たり最大薬量 (kg)を示す。

表一および図一の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と以下のとおりである。測定を始めたデータNo.4001から4013であるD=249mまで振動値が急激に大きくなっている。これは表一2のDAN欄に示すようにいずれもDS雷管の1段で心抜きした場合の振動である。4013の発破でPPVが0.1kineを越えたので4014の発破では薬量を落としている。それでも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, 4015以降は瞬発 (DS1段) 雷管をやめ, 初段としてDS2段の雷管を用いた。そのため, 以後の振動値はかなり小さくなっている。しかし, 施工の最終段階 (No.5015以降) では再びDS1段雷管を用いた。ここでは孔当たりあるいは段当たり薬量が十分小さく, 発破振動の問題より破砕効果を重くみただけである。

4015以降は, 最大PPVを生じた段数や段当たり最

表一2 計測されたデータ

No.	Vmax (kine)	DAN	W <sub>D</sub> (kg)	W <sub>k</sub> (kg)	No.	Vmax (kine)	DAN	W <sub>D</sub> (kg)	W <sub>k</sub> (kg)
4001	0.033	1	2.4	0.6	4051	0.092	4	7.5	0.6
4002	0.040	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	8.6	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	9.3	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					

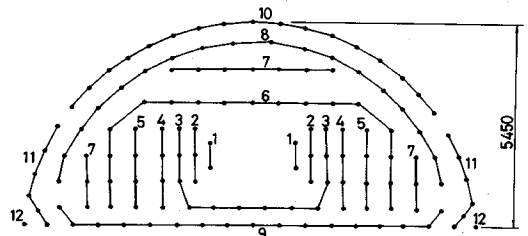
W<sub>D</sub>: 段当たり総薬量, W<sub>k</sub>: 孔当たり薬量

大量薬量は発破ごとに異なり, その予測が難しいのがわかる。しかし, 表一2によると2~4段で最大PPVを記録した回数が最も多く, 5, 6段はほとんどないことから, 本工事で用いた発破パターンでは2~4段が比較的荷が重く, 5, 6段の払いは荷が相対的に軽かったと考えられる。

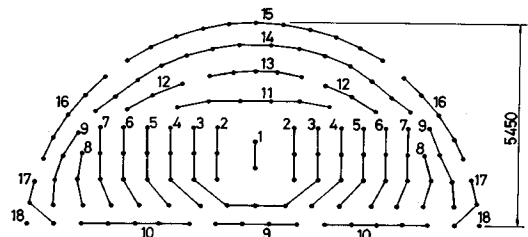
削孔長Lは表一3に示すように2.3mから順次2.0, 1.7, 1.5, 1.2, 0.9mと小さくして施工を行った。図一4, 5に削孔長L=2m~1.2mおよびL=0.9mのときの削孔パターンを, 表一4, 5に削孔長L=2.0mと0.9mのときの発破諸元を示す。削孔長Lは表一3のように2.3mから0.9mまで変化した, 削孔パターンは基本的には図一4, 5に示したパターンで大きな変更は行わなかった。しかし, 実際の施工においては岩の状況や起砕状態に応じて, 現場の作業員が適当に変更を加えた場合もかなりある。厳密に削孔パターンを守るよう現場に対して要請することは可能であるが, 実際にはパターン図どおりには削孔できないこと, 実際の現場では作業員の判断で適当に削孔数を変えることは避けられないか

表一3 削孔長Lと削孔数の変化

データ No	削孔長 L (m)	削孔数	
		Max	Min
4001-4008	2.0	140	118
4009-4015	2.3	136	107
4016-4044	2.0	140	97
4045-4048	1.7	147	128
4049-4061	1.5	143	113
4062-5012	1.2	139	113
5013-5032	0.9	136	113



図一4 削孔長が2m~1.2mのときの削孔パターン



図一5 削孔長が0.9mのときの削孔パターン

表-4 発破諸元 (L=2.0 m)

1. 岩面積: B
2. 断面積: 52.4 m<sup>2</sup>
3. 掘進長: 1.8 m
4. 穿孔長: 2.0 m
5. ビット径: 45 mm
6. 使用爆薬: 2号種ダイナマイト
7. 使用電気雷管: DS
8. 爆薬使用量: 107.3 kg
9. 破砕量: 94.3 m<sup>3</sup>
10. 単位爆薬量: 1.1 kg/m<sup>3</sup>
11. 単位孔数: 2.56 孔/m<sup>2</sup>

段数 (DSD)	孔数	1孔当り 装薬本数 (2号種)	総薬量 (kg)
1	4	7	2.8
2	6	8	4.8
3	12	8	9.6
4	8	8	6.4
5	8	8	6.4
6	17	15	12.7
7	13	15	9.7
8	18	15	13.0
9	17	8	13.6
10	17	7	11.9
11	12	8	9.6
12	2	9	1.8
計	134	—	102.3

表-5 発破諸元 (L=0.9 m)

1. 岩面積: 1
2. 断面積: 52.4 m<sup>2</sup>
3. 掘進長: 0.75 m
4. 穿孔長: 0.90 m
5. ビット径: 45 mm
6. 使用爆薬: 2号種ダイナマイト
7. 使用電気雷管: DS
8. 爆薬使用量: 45.0 kg
9. 破砕量: 39.3 m<sup>3</sup>
10. 単位爆薬量: 1.1 kg/m<sup>3</sup>
11. 単位孔数: 2.6 孔/m<sup>2</sup>

段数 (DSD)	孔数	1孔当り 装薬本数 (2号種)	総薬量 (kg)
1	2	3	0.6
2	6	4	2.4
3	9	4	3.6
4	8	3	2.4
5	8	3	2.4
6	8	3	2.4
7	8	3	2.4
8	6	3	1.8
9	12	4	4.8
10	10	4	4.0
11	6	3	1.8
12	6	3	1.8
13	5	3	1.5
14	14	3	4.2
15	11	3	3.3
16	10	3	3.0
17	6	3	1.8
18	2	4	0.8
計	137	—	45.0

らである。各削孔長で用いた削孔数を雷管数で示すと表-3になる。表-3をみてわかるように厳密には同パターンではないが、ほぼ当初の予定どおりのパターンで削孔していたといえる。

#### 4. 観測データによる振動予測式の比較

##### (1) 振動予測式の定式化

表-2に示したデータを用いて、2.で述べた手法1~4の比較を行う。以下の手法1~4の比較にあたっては、No. 4001~4014のデータは無視する。なぜなら、本研

究ではいかに発破振動を管理するかに主眼がおかれており、このようなケースでは一般にDS雷管の1段は用いない方が有利であることが明らかであるため、DS1段を用いた4001~4014の発破は考察する必要がないと考えたからである。またNo.5015以降もDS1段雷管を用いているが、この場合は薬量そのものも少なく、表-2をみても常に1段で最大PPVとなるとは限らないため、このデータは計算に用いる。

すでに述べたように、K値は試験発破の結果をもとに決定されている。そのため、本研究の解析では最初のn回の発破結果あるいはある発破の前n回の発破結果を試験発破として取り扱い、その結果からK値を求めて、そのK値を用いて次回の発破に必要なWを推定し、それと実際用いられた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をもとに、熟練した技術者、作業員が次回の発破パターンや薬量を決めていることを再現しようと試みたからである。これは一種のエキスパートシステムとも考えられる。本研究で対象とした工事が、住民の特に大きな苦情も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1~4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)は本研究でいうところの試験発破を意味し(i)は次回の発破を意味する。

- a) 手法1 (最初の試験発破で求めたK値を用い、段当たり薬量を基本とした手法)

式(2)を用いて1回あるいは数回の試験発破のデータをもとに施工完了まで管理する手法であり、以下の式から必要な段当たり薬量W<sub>B</sub><sup>(i)</sup>を計算する。

$$PPV_{\max}^i = K_{D,\max}^T (W_B^{(i)})^{3/4} (D^{(i)})^{-2} \dots \dots \dots (6)$$

ここに、上添字Tは試験発破を意味する。式(6)から得られたK<sub>D,max</sub><sup>T</sup>と管理値(目標値)であるPPV<sub>max</sub><sup>(i)</sup>、実距離D<sup>(i)</sup>を用いて次式により次回に必要な段当たり薬量W<sub>B</sub><sup>(i)</sup>を求める。

$$PPV_{\max}^{(i)} = K_{D,\max}^T (W_B^{(i)})^{3/4} (D^{(i)})^{-2} \dots \dots \dots (7)$$

このW<sub>B</sub><sup>(i)</sup>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。

- b) 手法2 (切羽進行とともに変化するK値を用い、段当たり薬量を基本とした手法)

発破振動が問題となる現場では、計測を行いながら施工していることが多い。この場合、実施工での計測結果は試験発破結果と同様と考えられ、切羽の進行とともにK値が変化すると考えていることになる。そのためこの計測結果を順次施工に取り入れて工事を進めていると考えるのが妥当である。この手法では、式(3)を用いて試験発破のデータから、K<sub>D,max</sub><sup>(i-1)</sup>を次のように計算する。

$$PPV_{\max}^{(i-1)} = K_{D,\max}^{(i-1)} (W_B^{(i-1)})^{3/4} (D^{(i-1)})^{-2} \dots \dots \dots (8)$$

この  $K_{D,max}^{(i-1)}$  と管理値 (目標値) である  $PPV_{max}^{(i)}$ , 実距離  $D^{(i)}$  とを式 (3) に代入した次式から  $W_D^{(i)}$  を計算する。

$$PPV_{max}^{(i)} = K_{D,max}^{(i-1)} (W_D^{(i)})^{3/4} (D^{(i)})^{-2} \dots\dots\dots (9)$$

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。

c) 手法3 (変化する  $K$  値を用い、孔当たり最大薬量を基本とした手法)

手法2で段当たりの  $K_{D,max}$ ,  $W_D$  としたのを孔当たりの  $K_{K,max}$ ,  $W_K$  とした手法であり、 $K_{K,max}^{(i-1)}$  を次式より求める。

$$PPV_{max}^{(i-1)} = K_{K,max}^{(i-1)} (W_K^{(i-1)})^{3/4} (D^{(i-1)})^{-2} \dots\dots\dots (10)$$

から  $K_{K,max}^{(i-1)}$  を計算し、

$$PPV_{max}^{(i)} = K_{K,max}^{(i-1)} (W_K^{(i)})^{3/4} (D^{(i)})^{-2} \dots\dots\dots (11)$$

より  $W_K^{(i)}$  を求め、実施工での孔当たり最大薬量と比較する。

d) 手法4 (孔当たり薬量を用いた確率論的な予測手法)

$PPV$  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  $PPV_{allo}$  を越える確率を一定値 ( $P_a$ ) にするのは  $\delta$  を変動係数とすると次式で表わされる。

$$P(PPV_{allo} \leq PPV_{max}) = \Phi(\infty) - \Phi\left(\frac{PPV_{allo} - PPV_{mean}}{\delta \cdot PPV_{mean}}\right) = P_a \dots\dots\dots (12)$$

これより

$$PPV_{mean} = \frac{PPV_{allo}}{1 + \delta \cdot \Phi^{-1}(1 - P_a)} \dots\dots\dots (13)$$

この  $PPV_{mean}$  を  $PPV_{mean}^{(i)}$  として式 (5) に代入し、次式より  $W_k$  を求める。

$$PPV_{mean}^{(i)} = K_{K,mean}^{(i-1)} (W_k^{(i)})^{3/4} (D^{(i)})^{-2} \dots\dots\dots (14)$$

本研究においては、 $PPV_{allo}$  は手法1~3の管理値の0.01 kine 小さい値とし、 $P_a=0.01$  とした。

(2) 振動予測式の計測データによる比較

試験発破として手法1では最初の1回の発破 ( $n=1$ ) あるいは3回の発破 ( $n=3$ ) 結果を平均して  $K_{D,max}^T$  を計算した。手法2~4では、その前回の発破 ( $n=1$ ) あるいは前3回の発破 ( $n=3$ ) の平均から求めた  $K$  値を  $K^{(i-1)}$  として用いた。上述の手法1~4で得られた薬量 (図中 cal で示す。以下計算薬量という。) と実施工で用いられた薬量 (図中 real で示す。以下実薬量という。) とを以下比較する。以下の図の横軸はいずれも発破点と計測点との直線距離  $D$  である。

図-6に最初の発破 (表-2の No. 4015) を試験発破と考へて手法1を用いて予測を行った結果を示す。図-6の (a) は計算薬量 (破線) と実薬量 (実線) であり、(b) は実薬量/計算薬量を示している。振動予測式が本トンネルの技術者の考え方を表わすべきとすると、実薬

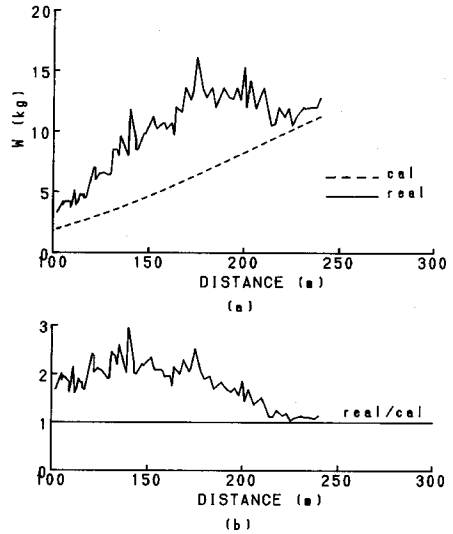


図-6 n=1 の場合の手法1での予測結果

量/計算薬量=1が望ましいと考えられる。

これらの計算で用いた管理値は、以下のようにして決定した。図-1をみてもわかるように記録された最大振動値は徐々に大きくなっている。これは管理値を徐々に変化させたものと考えられる。本研究では図-1を参考にして、 $D = 250$  m で 0.09 kine,  $D = 100$  m で 0.14 kine 程度を管理値として用いたものと考え、その間は線形で補間したものを本研究の計算に用いる管理値とした。

図-6に示す手法1の計算薬量は距離  $D$  が小さくなるに従って、薬量が減少している。これは  $K_{D,max}$  の値が変化しないため、 $W_D$  を減少させないことには  $PPV_{max}$  が小さくならないから当然であろう。実施工で用いられた薬量は計算薬量を大きく上回り、この手法1を用いては合理的な発破振動管理が難しいことがわかる。熟練の技術者は場所による  $K$  値の変化や地質状況、さらには上述の DS 雷管の起爆時間のばらつきによる振動低減効果を考慮に入れて、実施工で用いる薬量を決定しているものと考えられる。

図-7は同じく手法1で試験発破として、最初の3回 ( $n=3$ ) の結果を用いたもので、 $n=1$  の場合に比べて  $K_{D,max}$  は小さくなり、その分計算薬量は増加している。しかし、図-6と同様ほとんどの場合実薬量より計算薬量の方が大きく、数回の試験発破のみで施工全体を管理することは難しいことがわかる。

図-8は手法2で  $n=1$  としたときの結果であり、real と cal の差が著しい。実施工で用いられた段当たり最大薬量は各発破ごとに異なるとはいえ、傾向的にはほぼ同じような量を用いている。それに対して計算された

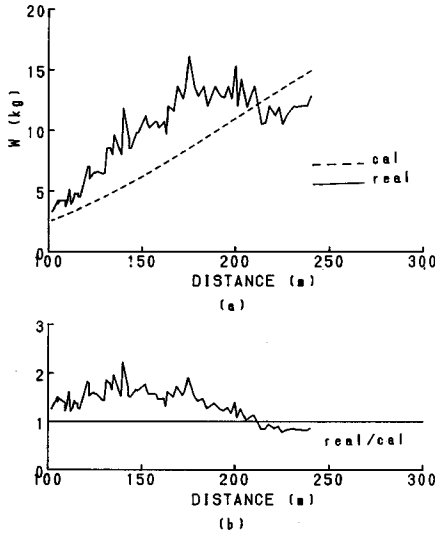


図-7  $n=3$  の場合の手法1での予測結果

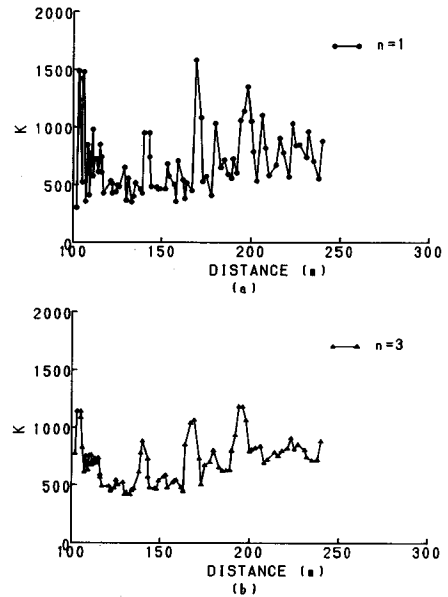


図-9 手法2での  $K_{D,max}$  の変化

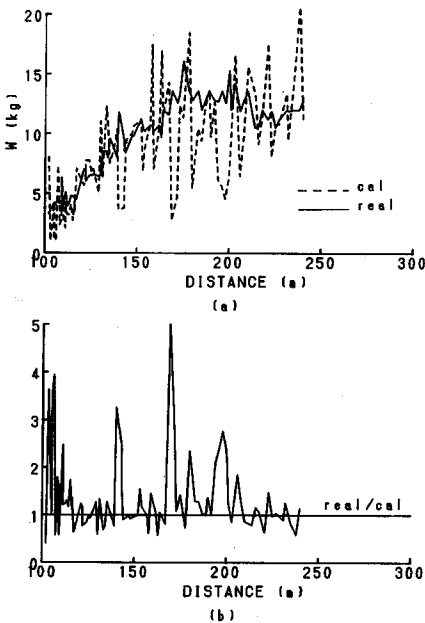


図-8  $n=1$  の場合の手法2での予測結果

薬量は変動が激しい。このことは試験発破から得られた  $K_{D,max}$  の値が発破ごとに大きくばらついていることを意味している。

図-9 (a) に式 (8) によって得られた  $K_{D,max}$  の値を、 $D$  を横軸にとって示す。この図より明らかなように、 $K_{D,max}$  が発破ごとに大きくばらつくことがわかる。すでに述べたように、削孔時の孔間隔、抵抗線長のばらつきや節理の存在などによる荷の重さ軽さが  $K_{D,max}$  の値に大きく影響を及ぼしていることが推測できる。 $K_{D,max}$  の

変化を事前に予測することは非常に難しく、このことが従来の発破振動管理が实情に沿っていないと考えられているゆえんであろう。このことはまた、発破振動管理には確率論手法ではなく、何らかの確率論手法を導入する必要性のあることを示していると考えられる。

図-8 (b) をみれば実施工に用いられた薬量は計算薬量よりかなり大きく、この手法2ではDS雷管の起爆時間のばらつきによる振動低減効果が入らないことを技術者は経験で知っていて、実薬量を計算薬量より大きくしたものと考えられる。

実施工では前回の発破結果だけでなく、前数回の発破結果をもとに、薬量を決めていられることから、前3回の発破 ( $n=3$ ) で求めた  $K_{D,max}$  を用いて、図-8と同じ計算を行った結果を図-10に示す。また、 $n=3$  のときの  $K_{D,max}$  を図-9(b) に示す。この場合は3回の発破結果が平均されているため、図-9(b) の  $K_{D,max}$  や図-10の計算薬量の変動は  $n=1$  の場合に比べれば小さいが、それでも変動が大きく、また計算薬量は実薬量よりかなり小さい。このように、施工時の計測結果から求めた  $K_{D,max}$  を用いて、段当たり薬量を求める手法2も予測式としては余り適当でないことがわかる。

図-11, 12は手法3で試験発破として前回 ( $n=1$ ) および前3回の平均 ( $n=3$ ) を用いた結果である。また図-13に  $n=1$  および3のときの  $K_{K,max}$  を示す。手法2と比べると計算薬量の方が実薬量より少し大きいとその差は小さく、予測式としての安定性は手法2より良いことがわかる。また、図-9と13の  $K$  値を比べると、

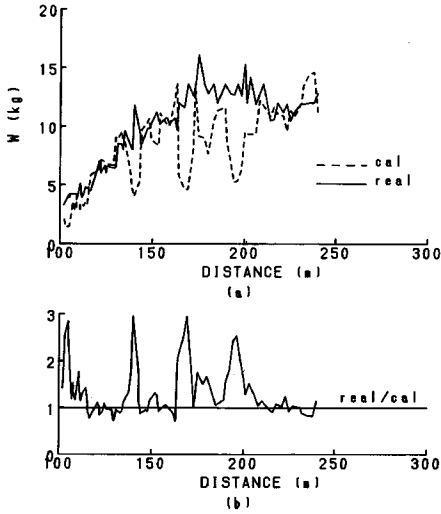


図-10  $n=3$  の場合の手法 2 での予測結果

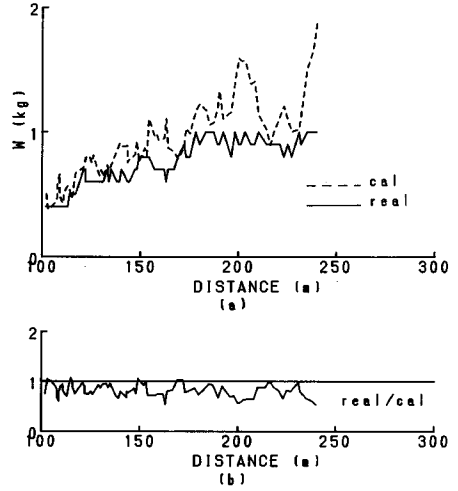


図-12  $n=3$  の場合の手法 3 での予測結果

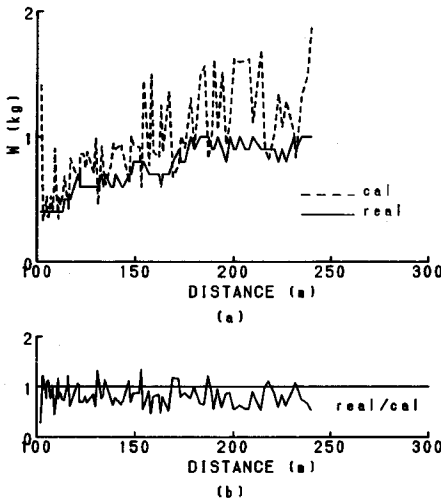


図-11  $n=1$  の場合の手法 3 での予測結果

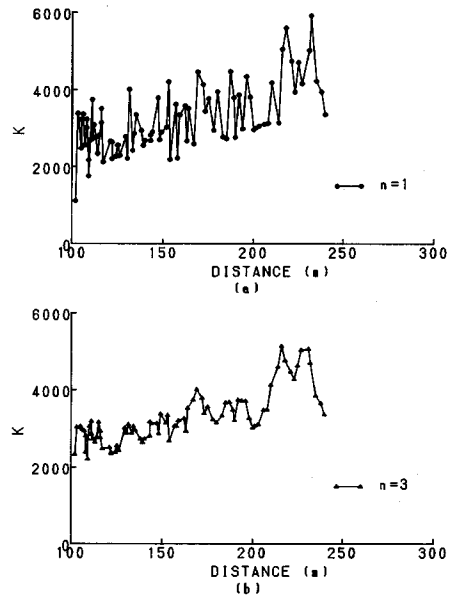


図-13 手法 3 での  $K_{k,max}$  の変化

図-13 の  $K$  値の方が変動が小さく、この面からも手法 3 の方が安定性の大きい予測手法であることがわかる。これは手法 3 では段当たり総薬量ではなく孔当たり最大薬量で計算したことによる効果であろう。しかし図-11 および 12 の (b) をみてわかるように  $real/cal \approx 0.8$  であり、手法 3 では DS 雷管の起爆時間のばらつきを過大に評価し、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-14, 15, 16 は手法 4 で  $n=1, n=3$  として同様の計算を行った結果である。図-14, 15 をみてわかるように、計算薬量と実薬量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、 $K$  値のばらつきも小さく、孔当たり薬量を用いた確率論的な

手法である手法 4 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わかる。

表-6 に図-7, 10, 12, 15 に示した  $n=3$  の場合における手法 1~4 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 1.39, 手法 2 で 1.34, 手法 3 で 0.81, 手法 4 で 1.03 と手法 4 が最も良く、変動係数も 0.21, 0.39, 0.16, 0.14 と手法 4 が最も小さい。このことから、手法 4 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わかる。

以上は管理値として図-1 をもとに  $D=250$  m で 0.09 kine,  $D=100$  m で 0.14 kine 程度と考えた場合の結果



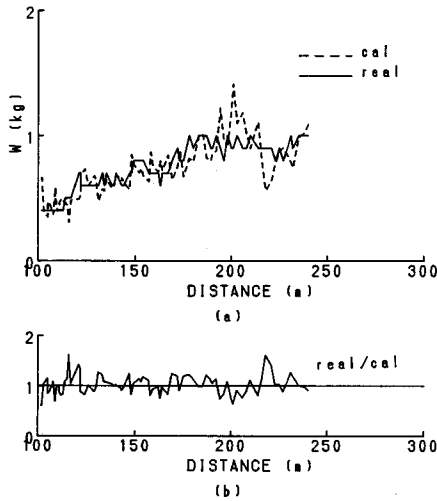


図-14  $n=1$  の場合の手法 4 での予測結果

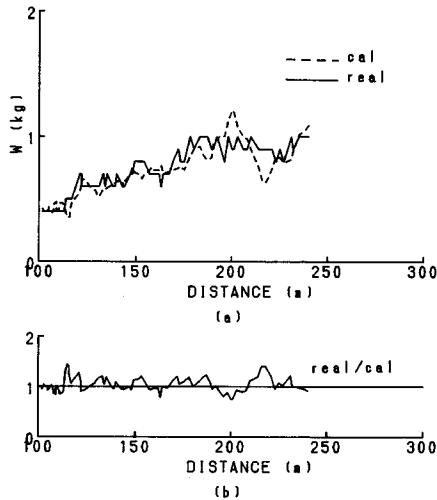


図-15  $n=3$  の場合の手法 4 での予測結果

である。管理値によりこの結果は当然異なることになる。たとえば本研究で用いた管理値より $\pm 0.01$  kine ずつ変化させた値を用いた場合、すなわちケース A として  $D=250$  m で  $0.10$  kine、 $D=100$  m で  $0.15$  kine としてその間を線形補間した場合とケース B として  $D=250$  m で  $0.08$  kine、 $D=100$  m で  $0.13$  kine としてその間を線形補間した場合の手法 1~4 の real/cal の平均値、標準偏差、変動係数を表-7 に示す。この場合でも手法 3, 4 すなわち孔当たり最大薬量をもとにした予測式は手法 1, 2 より明らかに優れていることがわかる。またケース B の平均値を除けばやはり手法 3 より手法 4 の方がより優れていることもわかる。

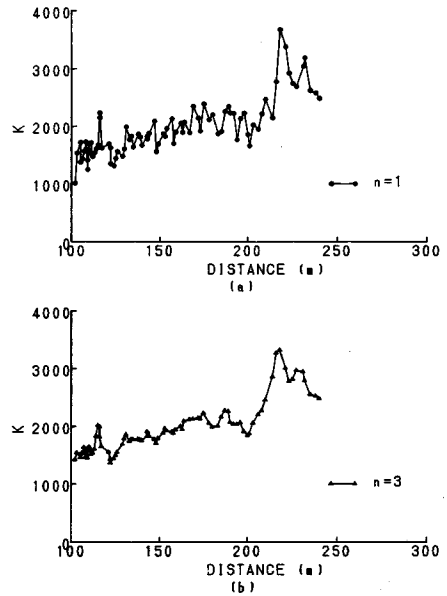


図-16 手法 4 での  $K_{r,mean}$  の変化

表-6 4 手法の予測精度の比較

	平均値	標準偏差	変動係数
手法 1	1.391	0.298	0.214
手法 2	1.338	0.522	0.390
手法 3	0.814	0.129	0.159
手法 4	1.033	0.149	0.144

表-7 管理値が異なる場合の 4 手法の予測精度の比較

	ケース A			ケース B		
	平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数
手法 1	1.251	0.276	0.220	1.561	0.322	0.207
手法 2	1.203	0.472	0.392	1.504	0.583	0.388
手法 3	0.731	0.119	0.163	0.914	0.142	0.156
手法 4	0.919	0.132	0.144	1.176	0.172	0.146

## 5. おわりに

本研究は実施工で計測されたデータをもとに、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たり薬量をもと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、孔当たり最大薬量をもと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たり薬量をもと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もとにしている。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あたり、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。

#### 参 考 文 献

1) 日本トンネル技術協会：トンネル爆破技術指針，p.142，

昭和57年。

- 2) 工業火薬協会：発破ハンドブック，山海堂，p.336，昭和51年。
- 3) 雑喉 謙：発破振動の周辺への影響と対策，鹿島出版会，p.23，昭和59年。
- 4) Gustaffson, R. 原著・和田満穂監訳：新しい発破技術，森川出版，p.224，1956年。
- 5) 佐々宏一：DS 発破に起因する振動について，工業火薬協会昭和51年度年会講演要旨集，昭和51年。

(1988.9.16・受付)