

(50) 有効孔数を考慮した 発破管理手法に関する一考察

日本国土開発協	正会員	宮地明彦
日本国土開発協	正会員	二宮康治
山口大学工学部	正会員	古川浩平
山口大学工学部	正会員	中川浩二

A CONSIDERATION ON THE BLAST VIBRATION CONTROL METHOD BASED ON THE NUMBER OF EFFECTIVE HOLES

Akihiko MIYAJI, JDC Corporation
Koji NINOMIYA, JDC Corporation
Kohei FURUKAWA, Yamaguchi University
Koji NAKAGAWA, Yamaguchi University

Abstract

In this study, we tried to construct a more practical blast vibration control method in consideration of the time delay of the detonator. In the first step, we proved that the time delay of the detonator in actual field blasting is larger than the published values measured in a factory. In the second step, we calculated the number of effective holes (n), using actual blasting vibration data, and concluded that n is about 1.0-1.1. Using the number of effective holes, we tried to control the blasting vibrations based on two kinds of field data and came to the conclusion that the blast vibration control method based on the charge per each hole is the most practical.

1. まえがき

山岳地帯におけるトンネル掘削は、発破によって行われることが多い。しかし、最近では住居近くを通過するトンネルの施工が多く、このような場合厳しい制約条件下での制限発破が要求される。発破振動の予測式としては、薬量 W と発破点から受振点までの距離 D とを用いた次の関係式が用いられてきた。

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

ここに、 PPV は受振点の最大速度振幅、 K , a , b は定数である。薬量 W は、従来段当り薬量を用いており、この場合は雷管の秒時差のばらつきが考慮されていないなどのため、予測値と実測値はかけはなれていることが多く、この式を用いるには問題が多いとされている¹⁾。本研究は、工場における雷管の起爆テストや実際の発破振動記録を基に、雷管の秒時差のばらつきに関して考察を行い、起爆秒時のばらつきを考慮した発破振動における有効孔数の検討を行う。この結果を用いて、トンネル掘削における発破振動予測式として孔当り薬量を基本とし、有効孔数を考慮した手法の有効性を検討するものである。なお、本研究では定数 a は $3/4$, b は 2 を用いる。

2. 孔当りを基準とした有効薬量の検討

制限発破においては、一般に波の重量を避け振動を小さくするため、 DS あるいは MS 雷管を用い、1段は使用しないことが多い。この場合雷管の起爆の秒時誤差（あるいはばらつき）を考慮しなければならない。雷管の秒時誤差を考慮する場合、振動に関係した有効な薬量についての検討が必要である。そこで、式(1)の発破振動予測式において雷管の秒時誤差を考慮し、孔当りの薬量を基に佐々²⁾の有効薬量についての概念を

適用する。i 段目の孔当り薬量，振動速度，有効孔数を W_{ki} ， PPV_i ， n_i ，1 段目の段当り薬量を W_{D1} とする。DS 1 段雷管では完全に同時起爆と考えられるので，次式の関係が成立する。

$$PPV_i = KW_{D1}^a D^{-b} \quad (2)$$

i 段目では次式となる。

$$PPV_i = K (n_i W_{ki})^a D^{-b} \quad (3)$$

よって，

$$n_i = (W_{D1}/W_{ki}) (PPV_i/PPV_1)^{1/a} \quad (4)$$

の関係が得られる。この概念を予測式に用いるには，予め， n 値を決定しなければならない。そこで，筆者らが計測を行ったトンネルのデータを用いて n 値の検討を行う。

図-1, 2, 3 は DS 1 段を初段とした発破のデータを用いて，式(4)により各段の n 値を求めた結果である。図の横軸は段数であり，縦軸は各段毎に式(4)で求めた有効孔数 n_i である。図-1 は A 現場において，発振点と受振点の距離 D が 250m 程度で通常の発破で初段が最大 PPV となる場合，図-2 は同じく A 現場で距離 D が 100m 程度になりかなり厳しい制限発破を余儀なくされ，DS 1 段を用いてはいるが，最大 PPV は初段でなかった場合，図-3 は B 現場で初段が最大 PPV となった制限発破の場合である。B 現場ではトンネルの前方，上方，後方などに 5 箇所測定点を設けたが，図-3 は前方の測定点の結果である。図-1, 2, 3 の初段を除く n 値の平均は 1.19, 1.62, 0.80 とほぼ孔当り薬量分程度しか発破振動には寄与していないことが示唆される。また B 現場の図-3 以外の測定点 1~4 の n 値の平均は 1.52, 1.82, 1.16, 0.91 であった。すなわち，雷管の秒時差のばらつきにより，起爆時間にずれが生じ，そのため同段の発破であってもほぼ各孔毎に起爆しているため， n の値が 1.0 に近い値をとったと考えられる。このようによりよい発破振動の予測を行うためには雷管の秒時差のばらつきを明確にすることが必要であると思われる。

表-1 は図-3 のデータを得た B 現場で実際に用いていた雷管を，各段 50 個ランダムに抽出し，起爆時間の測定を行った結果である。表-2 は B 現場で用いたものとは別に入手した起爆時間測定結

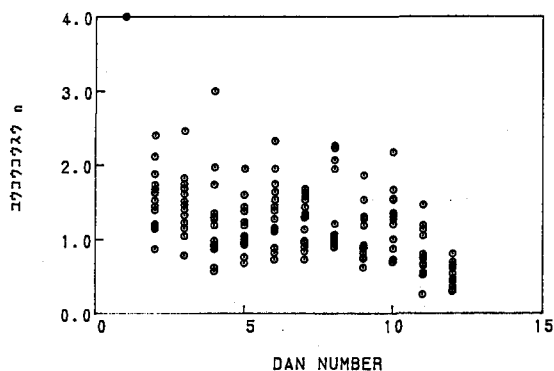


図-1 段毎の n 値 (A 現場, $D=250$ m 程度)

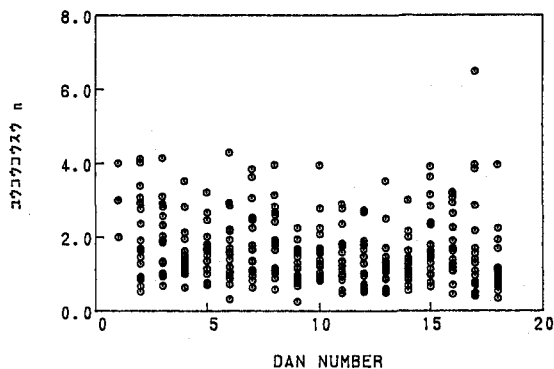


図-2 段毎の n 値 (A 現場, $D=100$ m 程度)

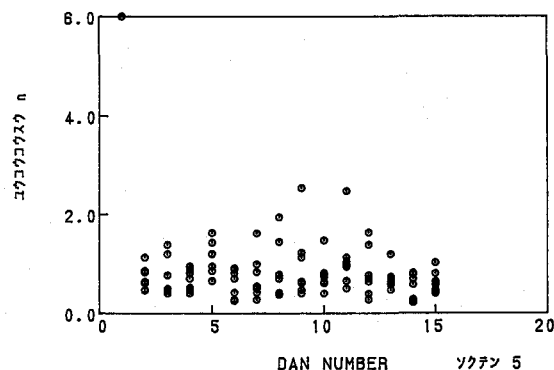


図-3 段毎の n 値 (B 現場, 前方測定点)

果である。両表から明らかなように各段ともある程度ばらつき、斉発していないことがわかる。これらの表は工場で測定温度を18～20℃にして測定した結果である。しかし現場の温度はこの測定温度とは異なり、また湿気の影響もあり、必ずしもこの結果が再現できるか否か明らかでない。

この点を明らかにするため、図-4,5はB現場で測定した発破振動の記録から各段毎に最初及び最後に起爆した時刻を特定し、それらの平均値(図-4)および標準偏差(図-5)を表したものである。なお、各段の途中の起爆時間は、波形が重畳し特定は不可能であった。図中1は1段雷管を用いた発破、2は1段を用いず2段雷管からを用いた発破、s、eは各段の最初および最後の起爆を意味し、横軸は段数であり、縦軸は起爆時刻(sec)である。2段からの雷管を用いた場合は、発破の最初の時刻を決める1段の発破がないため、1段を用いた発破における2段の起爆時間の平均と同じ時刻に起爆したとして以後の図を描いている。図-4の起爆の最初および最後の時間の平均値はほぼ段数の線形関数であるが、図-5の標準偏差は9～11段以降で大きくなばらつきが生じている。また図-6に工場で試験した結果(t)と現場で測定した結果(p)の比較を示す。平均値はほぼ同じであるが、標準偏差は工場での測定結果ではほぼ段数に比例した直線であるが、現場での測定結果は9段以降大きくばらついている。これは現場の温度、湿度、その他の管理状況が工場と異なるためであろう。現在、起爆時間の測定結果として公表されているものは、表-1,2に示す工場で測定した結果のみであり、実際の起爆時間はこれらよりさらに大きくばらつくことは明かで、これらを考慮に入れた発破振動管理が必要と言える。なお、9段あるいは11段以降ばらつきが大きくなるが、これは高段の雷管は延時薬が異なるのと、延時薬量が多くなるためと考えられる。

3. K値とn値の関係

一般にK値は式(1)から求められる。この時のWとしては従来段当り薬量を用いていた。本研究でも1段雷管の場合はWとして式(2)に示すように、段当り薬量を用いている。2段雷管以降については、有効孔数を考慮すると式(3)となるが、式(3)にはKと n_i という2つの未知数が含まれている。しかし、1回の発破ではPPVが1つしか求まらず、式(3)のKと n_i を同時に決定することは不可能である。

K値は過去の経験などから、発破の方法や岩の種類により、大体の値が決定できると考えられてきた。このことから本研究においては、式(1)のWとして孔当り薬量である W_k を用いてK値を求め、そのK値と別に与えたn値とを式(3)に代入して予測のPPVを求める。すなわち、K値は岩盤の状況から決まる定数と考え、雷管のばらつきとは別個に求まるものとし、雷管の秒時差のばらつきをn値で考慮するという考えにたっている。

4. 実施工データによる検討

表-1 現場で用いていたDS雷管の段ごとの起爆時間測定結果

段	標準値 (msec)	平均値 (msec)	標準偏差 (msec)
1	0		
2	250	244	10
3	500	503	17
4	750	744	20
5	1000	1019	22
6	1250	1274	19
7	1500	1522	28
8	1750	1772	30
9	2000	2007	35
10	2300	2330	42
11	2700	2727	49
12	3100	3123	48
13	3500	3552	44
14	4000	4042	52
15	4500	4541	52
16	5000	5144	61

表-2 別の会社の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

A, Bの両現場において、実施工時の発破振動データを用いて、孔当り薬量を基本とし、有効孔数が $n = 1.1$ と 1.0 とを用いた管理手法の比較を行う。図-7,8(a)は $n = 1.1, 1.0$ としてA現場で前回の発破結果からK値を求め、実際の距離Dと W_k を用いてPPVを予測した結果(cal:破線)と計測した結果(real:実線)とを、横軸にD、縦軸にPPVをとり描いたものである。図-7,8(b)はreal/calをDを横軸に描いたものである。real/cal=1になれば、予測と実測の振動速度が等しくなり、予測式としては最も望ましいと考えられる。両図の(b)を見れば明らかなようにほぼreal/cal ≈ 1 であり、孔当り薬量を基本とし、 $n = 1.1$ あるいは 1.0 と

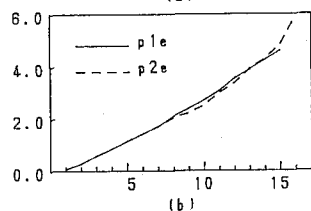
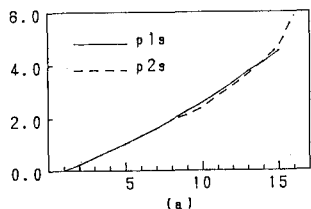


図-4 現場における各段の
起爆時間の平均値
(a)各段の最初の起爆時刻
(b)各段の最後の起爆時刻

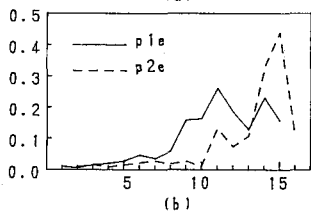
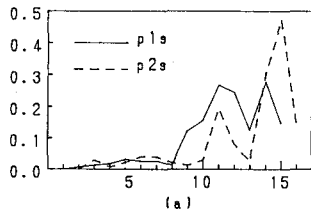


図-5 現場における各段の
起爆時間の標準偏差
(a)各段の最初の起爆時刻
(b)各段の最後の起爆時刻

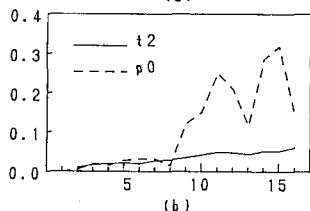
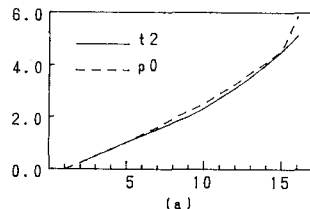


図-6 各段の起爆時間の工場
テストと現場測定結果の比較
(a)平均値
(b)標準偏差

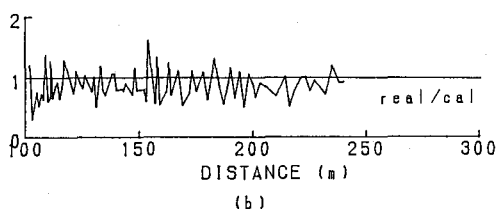
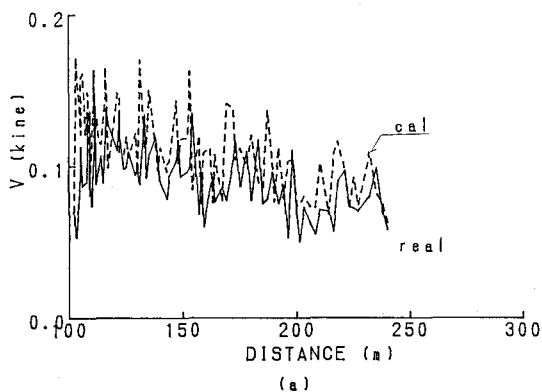


図-7 A現場での $n = 1.1$ の時の予測結果

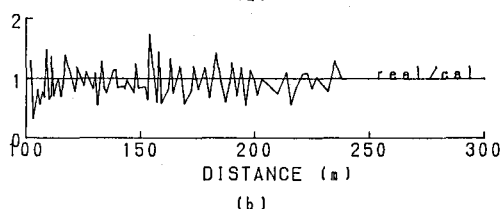
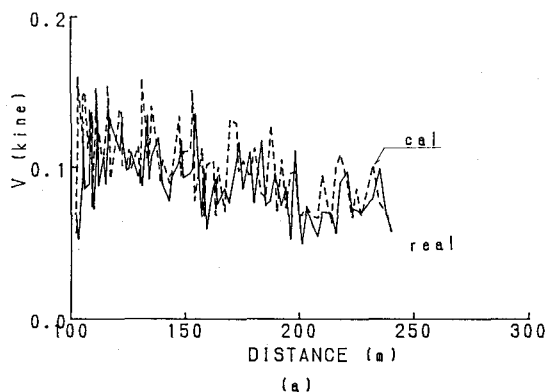


図-8 A現場での $n = 1.0$ の時の予測結果

した有効孔数を用いた発破振動管理式の妥当性は大きいことがわかる。なお、図-7,8の(b)の平均値は0.874, 0.938で $n=1.0$ とした方が実情をより反映していると考えられる。

図-9はB現場において5ヶ所の測定点で求めた実際のPPV(real)を縦軸に、 $n=1.0$ とし前回の発破のK値と孔当り薬量を用いた予測結果(cal)を横軸にして相関図を描いたものである。この時real/calの平均値は1.10でほぼ予測値と実測値は等しくなっている。また図-9の相関係数は0.866と大きく、孔当り薬量を用いた発破振動管理を行えばかなり良好な発破振動管理を行えることがわかる。

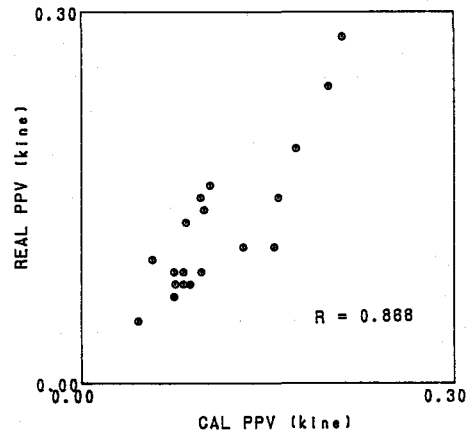


図-9 B現場での $n=1.0$ の時の予測結果

5. あとがき

本研究は発破振動の管理をより合理的に行うために、雷管の起爆の秒時誤差を考慮にいれた発破振動管理手法の構築を試みたものである。本研究ではまず実際の現場の発破における雷管の秒時差は従来公表されてきた工場での秒時差測定結果より大きくなることを明らかにした。実際の発破振動記録から有効孔数を求めると、 $n=1.1\sim 1.0$ 程度が妥当と考えられた。この有効孔数を用いて2現場でのデータを基に発破振動管理を試みた結果、孔当り薬量に基づく発破振動管理が最も実情に合うという結果が得られた。

本研究で明らかのように現場における雷管の秒時差を明らかにしない限り、合理的な発破振動管理は難しいと考えられる。本研究で用いたデータは1つの現場における結果であり、今後データを蓄積していく必要があると考えている。

また、現場における発破振動の管理は、本研究で検討したような平均値ではなく、一般に最大値で行われている。その点はK値を求める段階で一応の考慮はされているが、real/calの最大値が余り大きくなるのは問題があり、この点をも含めた発破振動管理手法について今後さらに検討を行っていく所存である。

本研究のデータをまとめるに際し、山口大学工学部の中尾絵理子教務員の多大な助力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 吉岡幸雄・宮地明彦・古川浩平・中川浩二：確率論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，第403号，pp.199-208，1989年。
- 2) 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。