

(82) 雷管の秒時誤差を考慮した発破振動推定式に関する一考察

日本国土開発㈱	正会員	○ 宮地明彦
日本国土開発㈱	正会員	横田茂昭
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 Study on the Blast Vibration Estimation Method with Consideration of the Time Delay Deviation of the Detonator

Akihiko MIYAJI, JDC Corporation
Shigeaki YOKOTA, JDC Corporation
Kohei FURUKAWA, Yamaguchi University
Koji NAKAGAWA, Yamaguchi University

Abstract

In this study, a practical blast vibration estimating method was proposed in consideration of the time delay deviation of the detonator. In the first step, we proved that the time delay deviation of the detonator in actual field blasting is larger than that measured in the laboratory. Using the former deviation, we calculated the simultaneously blasted hole number's ratio which produces the same magnitude of blast vibration as that produced by a larger number of holes blasted with the same delay number detonators. In the second step, we tried to estimate the "K" value following the measured vibration record. Using these results, we proposed a new blast vibration magnitude estimation method which is more practical than the usual one.

1. まえがき

山岳トンネルの掘削には、発破が最も効率的なことから、従来主としてこの工法が用いられてきた。しかし近年、民家や重要構造物近くでトンネルを掘削する機会が多くなり、このような場合は、発破による振動、騒音を軽減するため厳しい制限発破がしばしば要求されている。発破を行った場合の振動や騒音に関しては従来より多くの研究がなされているが、いまだもって発破による振動は大きくばらつき、予測値と合わないことが多い。そのため、管理値を上回らないように、かなりの安全率を見込んだ管理値を設定し工事を行っているのが実情であろう。

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

$$PPV = K \cdot W^a \cdot D^{-b} \dots\dots\dots (1)$$

の式がよく用いられてきた。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 としては、従来段当り薬量が用いられているが、この場合雷管の秒時のばらつきが考慮されていないこと、また K として、薬量と距離以外の全ての要因を含ませているため、その意味が明確でないなどの問題点が挙げられ、これらを解明することにより、予測精度を上げられるものと期待されている。

これらの観点から本研究においては、現場での実測データを基に、雷管の秒時のばらつきの精度を明らかにし、さらに K 値に含まれている各種要因を識別した上で、有効孔数の概念を導入し、発破振動予測をよ

り精度よく行うことを試みたものである。

2. 従来の発破振動予測式の問題点

従来より用いられてきた発破振動予測式の問題点は1.でも述べたように、薬量 W に関するものと、係数 K に関するものに大別できる。

薬量 W に関しては一般に段当りの総薬量を用いているが、制限発破においては波の重畳を避け振動を小さくするため、MSあるいはDS雷管を用い、1段目を使用しないことも多い。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。従来、雷管の秒時誤差については、火薬工場で測定された結果がいくつか公表されているが、現場でどの程度の大きさになるかは明かでない。現場においては雷管の保管状況や温度、湿度が工場と異なり、よりばらつきが大きくなると考えられるが、現場で測定されたデータはほとんどない。

K 値に関しては、薬量及び距離以外の要因を全て含ませているため、 K 値が大きくばらつく原因を特定できないことが多い。そこで本研究ではトンネルの発破振動のみを対象とする。この場合、 K 値の意味としては発破時の荷の重さ軽さのみになると考えられる。荷の重い発破の場合、それに伴う発破振動は大きくなると考えられる。これに対して、荷の軽い発破は、発破の破壊力が逃げ、振動は小さくなると予想される。

このように問題点を雷管の秒時誤差に伴う問題と発破時の荷の重さ軽さに伴う問題の2つに絞り、段当りではなく孔当りで考え、有効孔数の概念を導入すると式(1)は次式のように書き換えることができる。

$$PPV_i = K_{ki} (n_i W_{ki})^a D^{-b} = K_{ki} n_i^a W_{ki}^a D^{-b} \dots\dots\dots (2)$$

ここに n は有効孔数、添字 K は孔当りを意味し、添字 i は発破段数を示す。

式(2)の PPV_i 、 W_{ki} 、 D は既知の値である。しかし、 K_{ki} および n_i は未知の値である。しかるに、1回の発破では PPV_i は1つしか測定できず、このままでは式(2)から K_{ki} と n_i の値を求めることは不可能となる。しかしこれを分離しない限り、これらの影響を明らかにすることはできない。有効孔数の考え方がかなり以前から言われながら、実際に用いられてこなかったのは、ここに原因があると考えられる。

これらの問題点をふまえ、本研究においては以下のことを試みる。まず第1に雷管の秒時誤差を工場と現場で測定し、現場における雷管の秒時誤差が従来考えられていたものよりかなり大きいことを、計測データから明らかにする。第2にこの結果を用いてシミュレーションを行い、有効孔数がどれ位になるのかを考察する。第3に各種の計測データを基に、式(2)の K_{ki} がどの程度の大きさになるかを明らかにした上で、式(2)を用いて発破振動予測を試みる。

3. 雷管の秒時誤差

雷管の秒時誤差（あるいはばらつき）については、従来より知られているところである。例えば筆者らが入手した工場や現場における雷管の秒時誤差測定結果を明らかにした¹⁾。この結果によると、段によって秒時誤差は異なるものの無視できない程度の誤差のあることは明らかである。

トンネルの現場では各段毎に数孔以上の発破を行っており、一般に各段の最初と最後の起爆時間しか特定できない。起爆時間の特定を容易にするため、各段1孔ずつの発破実験を別の現場で行った。ここは明かり発破を行っている現場である。本来はトンネル掘進発破で起爆時刻の特定をすべきであるが、トンネル掘進発破においては切羽は一般に1つしかなく、1段1孔というような手間のかかる実験はトンネル現場では不可能であったため、明かり発破を行っていた現場を用いた。トンネルと異なり明かり発破の場合、実験現場を比較的自由に選ぶことができ、各段1孔という手間のかかる発破実験も可能であったからである。そのため、トンネルに比べ温度、湿度、保管状況などの点で当然相違があるものと考えられる。

表-1はこの明かりの現場で1段～20段を用いて、ほぼ100回に及ぶ測定を行って得られた各段毎の起爆時間の平均値、標準偏差である。実験結果の読み取りに際して、各段1孔とはいえ前段や後段と重畳して起爆

時刻の特定が不可能なものもあり、それらはデータとして除いた。そのため、各段によりデータ数にばらつきがある。工場での測定結果と比較すると明らかなように、そのばらつきははるかに大きい。このように現場における発破では起爆時刻のばらつきが従来公表されていたものより大きく、このことを考慮に入れた発破振動管理が必要と言える。

4. 現場における雷管の秒時誤差を考慮した発破振動シミュレーション

表-1 現場で測定した雷管の起爆秒時測定結果

段	平均値	標準偏差	データ数
2	251	24	78
3	539	41	82
4	803	41	83
5	1055	47	81
6	1340	54	80
7	1615	80	73
8	1882	68	75
9	2219	78	79
10	2503	116	70
11	2892	114	76
12	3349	117	78
13	3735	122	68
14	4164	153	60
15	4717	162	65
16	5545	235	66
17	6005	198	63
18	6646	222	60
19	7482	295	50
20	8740	377	36

3. で明らかにしたように現場における雷管の秒時誤差のばらつきは無視できない大きさであり、これをいかにして発破振動予測に取り込むかが大きな課題と言える。そこでここでは簡単なシミュレーションを用いて雷管の秒時誤差が発破振動に及ぼす影響を考察する。

表-1に示した2, 5, 10段の起爆時刻をヒストグラムで表したものが図-1である。この図よりほぼ正規分布をしているものと考え、表-1の起爆時刻の平均値、標準偏差を用いて発破振動を図-2に示す減衰を有するsin波と考え、そのsin波の重ね合わせにより発破振動が表されるものとする。sin波の立ち上りの時間差を表-1の平均値と標準偏差($\sigma = 40\text{msec}$)を用いた正規乱数で出力し、それらを発破孔数、継続時間分重ね合わせる。計算にあたり振動継続時間は0.17秒とし、振動数は60Hzと想定した。

以上の値を用いて発破孔数を2孔～20孔へ変化させて、各1000回のシミュレーションを行った結果、波形の重畳の最大値の平均を表-2に示す。表-2から明らかなように、1孔のみの発破に比べると、多孔発破の場合当然波形が重畳されて大きくはなるが、孔数に比べるとはるかに小さい。実際のトンネル工事で用いられる孔数は4孔～15孔程度が多く、この場合1孔の発破による振動の1.6～3倍程度となることがわかる。

このように実際の現場での雷管の秒時誤差の測定結果を基に、発破孔数中の何孔程度が発破振動に有効かをシミュレーションで求めた結果は、実孔数よりかなり小さく、この面からも式(1)の N として段当り薬量を用いることには大きな問題のあることがわかる。

5. K_{ki} と n_i の分離

3., 4. で示したように、各段の全ての薬量が発破振動に寄与はせず、その一部のみが寄与すると考え、有効孔数の考えを取り入れる場合、すでに2. でも述べたように式(2)に示す K_{ki} と n_i とを分離して、それぞれが発破振動に寄与する大きさを明らかにする必要がある。しかし、一般のトンネル発破では各段で数孔以上の発破が行われ、これらの波形は重畳し、実際は各段で1つのPPVが計測されることになる。すなわち、式(2)では K_{ki} と n_i の2つの未知数があるが、1つのデータから2つの未知数を決めることは不可能である。

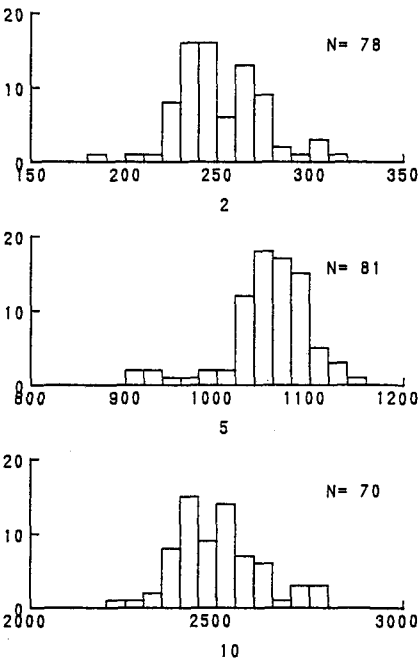


図-1 雷管の起爆時刻のヒストグラム (2, 5, 10段)

表-2 秒時誤差を考慮した発破のシミュレーション結果

孔数	最大値の平均
2	1.24
3	1.45
4	1.65
5	1.82
7	2.13
10	2.58
15	3.14
20	3.70

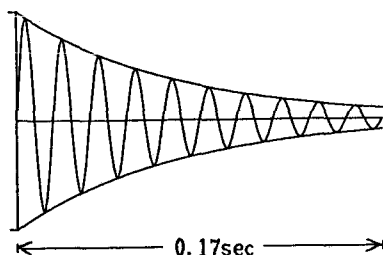


図-2 発破振動のシミュレーションに用いた減衰を有するsin波

表-3 荷の重さが平均的な場合の初段のK値(K_{k1})

発破No.	PPV	K_{k1} 値
1	0.028	1260
2	0.075	1073
3	0.070	985
4	0.055	760
5	0.051	938
6	0.099	1320
7	0.108	1161
8	0.068	1207
9	0.079	1016
10	0.087	1119
11	0.087	1098
12	0.073	922
13	0.088	1478
14	0.086	1417
15	0.090	1456
16	0.092	1488
17	0.039	448
18	0.058	653
平均	0.074	1100

実測データから n_i を明らかにするには、上述のようにあらかじめ K_{ki} が定まっていなければならない。そのため次のように考える。瞬発雷管を用いた場合、 n_i は全孔数でありこれを用いて K_{ki} は計測データより簡単に求めることができる。この K_{ki} から他段の K_{ki} が推定できないかを考える。 K_k が発破時の荷の重さ軽さを表すものと考え、連続した瞬発雷管を用いた発破において、いろんな段で最大のPPVを記録している場合、発破時の荷の重さ軽さが比較的平均していると考えられる。このような発破記録があると、その中での瞬発雷管の結果を用いて荷の重さ軽さを表す K_{ki} が類推できると考える。

Cトンネルはトンネル進行方向に民家があり、そのために制限発破を要請され、厳しい管理の下に完成させられたトンネルである。このトンネルで筆者らは詳細な発破振動の計測を行った。この施工の最終段階においては、心抜きに瞬発雷管を用いた。

このデータを見ると最大のPPVを記録した段はもちろん、振動が比較的大きかった段も発破毎に大きく異なっている。そのため、このデータの瞬発雷管の K_{ki} より荷の重さ軽さとしてのK値の大体の値を推定できると考えた。この最終段階の18発破での初段のK値(K_{k1})を表-3に示す。平均値1100、標準偏差282である。この表を見ても分かるように、初段での発破振動が大きかった場合、 K_{k1} の値が大きくなっており、我々が発破管理で必要とする最大PPVあるいは2,3番目までの発破振動においては、この1100よりももう少し大きな値になるものと思われるが、平均的には1100程度の値を考えればよいであろう。

6. 有効孔数を用いた発破振動推定式の構築と考察

すでに述べたように、有効孔数 n_i および K_{ki} 値は表-2および表-3で求まる。表-2の2~10孔のデータを用いて有効孔数 n_i は次のようにi段の実孔数 N_i を用いて表すことができる。

$$n_i = 0.185N_i + 0.87 \quad \dots\dots\dots (3)$$

K_{ki} を1100とすると、式(2)は次のようになる。

$$PPV_i = 1100(0.185N_i + 0.87)^a W_{ki}^b D^{-b} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式(4)を用いてCトンネルの施工の最終段階のデータを使って発破振動を予測し、実測値と比較したものを図-3に示す。縦軸が実測値、横軸が予測値であり、図中45度に引かれた実線上にデータがあれば、予測値と実測値が一致していることを示す。なお初段の n_i は式(3)ではなく、実孔数 N_i を用いている。いずれの段もほぼデータの中央付近を45度の実線が通り、式(4)の予測値で全段にわたって十分精度の良い発破振動予測の行えることが分かる。

図-4に示すのは、C現場の最終段階に至る手前の心抜きに2段雷管を使用していた施工区間のデータで、同じく予測を試みた結果である。この場合も全段にわたって予測値と実測値の相関は非常に良く、式(4)に

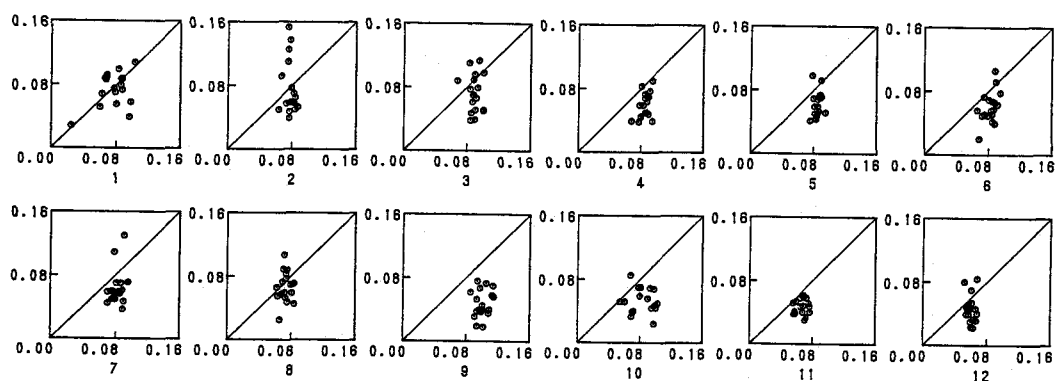


図-3 予測値と実測値の比較（施工の最終段階：瞬発雷管使用）

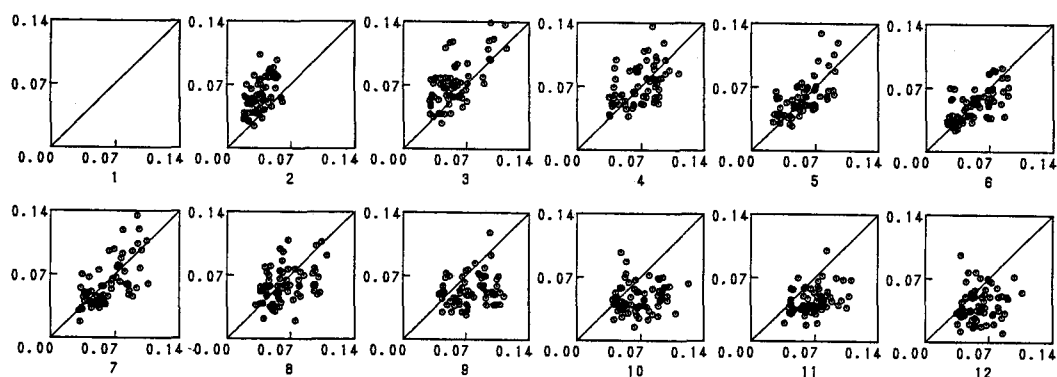


図-4 予測値と実測値の比較（施工の途中段階：瞬発雷管不使用）

より十分有効でかつ精度の良い発破振動の予測が行えるものと考えられる。

図-3, 4を見て分かるように、予測式(4)で平均的な発破振動の予測は十分可能ことがわかるが、当然のことながら予測値と実測値には差がある。これらの差の大部分は発破時の荷の重さ軽さと考えられる。また、表-2の有効孔数も $\sigma=40\text{msec}$ として求めた最大値の平均であり、ここにもばらつきは考えられるが、荷の重さ軽さに比べると小さいと推定できる。発破時の荷の重さ軽さをあらかじめ定量的に測定することは将来共不可能である。そのため、 K_k に荷の重さ軽さを考慮する意味を持たすことにより、十分精度良い発破振動推定式を導くことが可能であろう。

7. あとがき

本研究では、実測データを基に雷管の秒時誤差を明らかにし、シミュレーションにより有効孔数を求めた。また K 値を発破時の荷の重さ軽さと考え、実測データを用いて K 値を求めた。これらの結果を用いて全段にわたって精度の良い発破振動推定式を構築した。この式を用いることにより、平均的に発破振動を推定することが可能であると考えられる。今後、発破時の荷の重さ軽さの影響を明らかにすることにより、より合理的でかつ信頼性の高い発破振動推定を試みるつもりである。本研究をまとめるにあたり、山口大学工学部社会建設工学科中尾絵理子教務員の助力を得た。記して謝意を表す。

参考文献 1) 宮地明彦・二宮康治・古川浩平・中川浩二：有効孔数を考慮した発破振動管理手法に関する一考察，第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 236-240，1991年2月。