

重畳孔数の考え方に基づくトンネル掘進発破振動の評価について

宮地明彦*・古川浩平**・吉川和行***・
中川浩二**

本研究は、従来から問題とされていた発破振動予測式の問題点を再検討し、まず現場での実測データを基に、雷管秒時のばらつきの程度を明らかにした。さらに、 K 値に含まれている各種要因を識別した上で、有効孔数の考え方を再検討し、重畳孔数の概念を取り入れることにより発破振動予測をより精度よく行えることを示した。

Key Words : blast vibration, overlapping holes, time delay, detonator

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、従来から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の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から多くの研究がなされている¹⁾が、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²⁾。そのため、規制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 とを用いた式 (1) がよく用いられてきた^{3),4)}。

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

ここに、 PPV は受振点の最大速度振幅、 K 、 a 、 b は定数である。なお本研究では $a=2/3$ 、 $b=2$ を用いる。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く、かつ K 値のばらつきが非常に大き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る。

市街地あるいは住居近くでの発破工事は細心の注意が必要であり、慎重な管理下で制限発破がしばしば行われている。発破振動の予測精度を上げることができれば、

より制限発破を効果的に利用でき、その必要性は大きいと考えられる。そのためには、発破振動予測式 (1) における K 、 W 、 D の意味についてさらなる検討を加えることが必要と考えられる。

これらの観点から本研究においては、トンネル掘進発破振動が公害問題として取り上げられることの多い切羽との距離 100~300 m で計測される振動を念頭においた上で、現場での実測データを基に、雷管秒時のばらつきの程度を明らかにした。さらに K 値に含まれている各種要因を識別した上で、有効孔数の考え方⁵⁾を再検討し、重畳孔数の概念を取り入れることにより発破振動予測をより精度よく行うための基礎的検討を行ったものである。

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 (1) において、 D は発破中心と観測点の間の距離であり、その意味は明確である。従って式 (1) 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。通常トンネル発破においては、芯抜きから始まり順次切り抜きの段発破が行われる。そのため発破は一般に DS 雷管を用いた多段の発破となり各段毎に複数孔の発破となる。従って本来発破振動は各孔からの振動が相互に重畳、干渉しつつ伝播し、その結果として観測点における振動波形が与えられる。このことを考慮すると発破振動予測式にも多数孔の振動源からの振動の重畳を考慮した薬量の取り扱いがあつてしかるべきと考えられる。

さらに、DS 雷管を用いた発破においては、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

* 正会員 日本国土開発(株) 第二営業本部
(〒107 港区赤坂4-9-9)

** 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

*** 正会員 工修 フジタ工業(前山口大学大学院生)

表-1 X社のDS雷管の工場における段毎の起爆時間測定結果

段番号	基準値 (msec)	標準偏差 (msec)
1	0	0
2	250	12
3	500	16
4	750	31
5	1000	28
6	1250	18
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	120

測定された結果がいくつか公表されている。一例を表-1に示す。

この結果を見ると、同段の雷管間に大きな秒時誤差があるのは明らかである。この工場での測定においては、測定温度や湿度は一定に保たれ、また出荷してから保管状況も良好と思われる。これに対して一般の現場では発破時の温度は一定していない上、湿度も場所により大きく異なる。また保管状況や出荷時から使用するまでの時間も様々ではない。このように、現場における発破では雷管の秒時誤差が工場での測定結果より大きくなると考えられるが、測定の困難さもある。現場における測定結果に関してはほとんど公表されていない。トンネル工事を考えると、現場で測定されたデータが何よりも必要であり、これに基づいて発破振動予測式をたてる必要がある。

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値が大ききばらつき原因を特定できないことが多い。これを少しでも明らかにするため、例えば雑喉はK値を次の5要因からなると考えた⁴⁾。

$$K = C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 \dots \dots \dots (2)$$

ここに、C₁はベンチカット発破、トンネル掘進発破など発破の種別により定まる要因、C₂は発破のかかり方の良否により定まる要因、C₃は受振点の地盤状況により定まる要因、C₄は装薬された爆薬の種類による要因、C₅は発破域に対する受振地の方向の差による要因である。

これらの要因のばらつきは発破全般を考えた場合当然考慮すべき要因であるが、トンネル発破の場合はC₁、C₄については基本的に同じであり考える必要はない。また、居住地あるいは重要構造物近くでの発破の場合は、ある特定の地点での最大速度振幅が規制されることが多く、このような場合はC₃についても同じとなる。またC₅について一般にトンネル掘進発破ではトンネル進行方向の振動が最大となり、本研究で取り扱うような問題においてはトンネル掘進方向の振動のみを考慮すれば十分である。結局トンネル発破で最後まで重要な項目として残ってくるのは、C₂についてと考えられる。

C₂は発破のかかり方とされているが、発破時の荷の重さ軽さと考えることもできよう。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、発破の破壊力が発破音あるいは飛石として逃げ、振動は小さくなると予想される。発破設計においては荷の重い発破に対しては薬量を大きくし荷の軽い発破に対しては小さくすることにより、確実にかつ経済的な発破が追求されている。しかし、岩盤の状況、装薬に対する自由面の状況が異なるトンネル発破の全サイクルにおいて、荷の重さ軽さを同じにすることは不可能である。そのためこれによりK値がどの程度影響されるかを検討する必要がある。

また式(1)を発破振動管理に用いる場合のK値は一般に一連の発破中最大のPPVを記録した段のK値を用いている。そのため、これではどの段で最大値が生じたか、言い換えるとどの段の発破が荷が重かったかを明らかにすることはできない。このことは発破振動予測式のばらつきを大きくさせる一因でもある。このように考えると、まず式(1)は各段毎に書き換える必要がある。

重畳孔数あるいは有効孔数の考え方が、Gustafsson⁶⁾、佐々⁵⁾によって説明されている。Gustafsson⁶⁾によると多数孔の発破のうち何分の一かの振動が重なりとされている。また佐々⁵⁾によると「2段以降の有効孔数は、多数孔に装填されている爆薬を同一段のDS雷管で起爆した場合に発生する振動の大きさはそのうちの何孔分の装薬を瞬発電気雷管で起爆したと考えた場合の振動の大きさに等しくなるか、としたときの孔数」と説明されている。今、これらの考え方をGustafssonに従い記述すると、

$$PPV_i = K_i \cdot m^{-1} (N_i W_i)^a D^{-b} \dots \dots \dots (3)$$

となり、佐々に従い記述すると、

$$PPV_i = K_i (a_i W_i)^a D^{-b} \dots \dots \dots (4)$$

となる。ここに、m⁻¹は振動が重なり合うとされる孔の割合、N_iは実孔数、a_iは有効孔数、W_iはi段の孔当たり薬量である。本研究では何孔かの振動が重畳したと考えるGustafssonに近い考え方から、

$$PPV_i = K_i \cdot n_i (W_i)^a D^{-b} \dots \dots \dots (5)$$

の考え方をとり、このn_iを佐々の有効孔数と区別して重畳孔数と呼ぶことにする。

式(5)のPPV_i、W_i、Dは既知の値であり、K_iおよびn_iは未知の値である。しかるに、1回の発破では各段毎のPPV_iは1つしか測定できず、このままでは式(5)からK_iとn_iの値を求めることは不可能となる。しかしこれらを分離しない限り、これらの各々の影響を明らかにすることはできない。

これらの問題点を踏まえ、本研究においては雷管の秒時誤差に伴う重畳孔数の問題と発破時の荷の重さ軽さにもなる問題の2つに的を絞って、これらを明らかにす

表-2 Aトンネルの現場で用いていたY社のDS雷管の工場における段毎の起爆時間測定結果

段番号	基準値 (msec)	平均値 (msec)	標準偏差 (msec)
1	0	0	0
2	250	244	10
3	500	503	17
4	750	744	20
5	1000	1019	22
6	1250	1274	19
7	1500	1522	23
8	1750	1772	30
9	2000	2007	35
10	2300	2330	42
11	2700	2727	49
12	3100	3123	43
13	3500	3552	44
14	4000	4042	52
15	4500	4541	52
16	5000	5144	61

表-3 Aトンネルの現場で用いていたY社のDS雷管の現場における段毎の最初の起爆時間測定結果

段番号	平均値 (msec)	標準偏差 (msec)
2	228	5
3	499	20
4	761	15
5	1014	28
6	1316	32
7	1604	32
8	1936	16
9	2215	121
10	2513	151
11	2906	250
12	3275	209
13	3715	117
14	4115	286
15	4584	319
16	5838	145

るため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、実測データから明らかにする。第2にこの結果を用いて後述する発破振動の重畳シミュレーションを行い、重畳孔数 n_i がどれ位になるのかを考察する。第3にトンネル現場の発破振動の計測データを基に、発破時の荷の重さ軽さが発破振動に及ぼす影響を K 値を用いて明らかにする。最後にこれらを用いて、より精度の高い発破振動予測式を構築するにはどのように考えればよいかを考察する。

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、表-1に示すように従来より知られているところである。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。

表-2は今回実験を行ったAトンネルの現場で実際に用いていたY社の雷管を、各段50個ランダムに抽出し、雷管製作の工場で雷管検査用装置を用いて起爆時間の測定を行った結果である。ほぼ表-1と同じ程度の秒時誤差が得られている。今日流通しているDS雷管の工場での測定結果はほぼこの程度と考えられるが、各段ともある程度ばらつき、同時に起爆していないことは明らかであろう。これらのばらつきは各メーカーの生産時の管理体制に大きく依存するものであるが、ここではこの点は論じないものとする。

これらの表-1, 2はいずれも工場で、測定温度を18°C~20°Cと一定にして測定された結果である。しかし実際の現場の温度はまちまちであり、この温度とはかなり異なっていると考えられる。また、湿度も現場により大きく異なる。それに加えて火薬庫での保管状況や現場へ運び込まれてからの保管状況や使用までの時間も異なる。このように、現場における雷管の状況は工場での測定と大きく異なっている可能性がある。

この点を明らかにするため、以下の4現場のうち①~

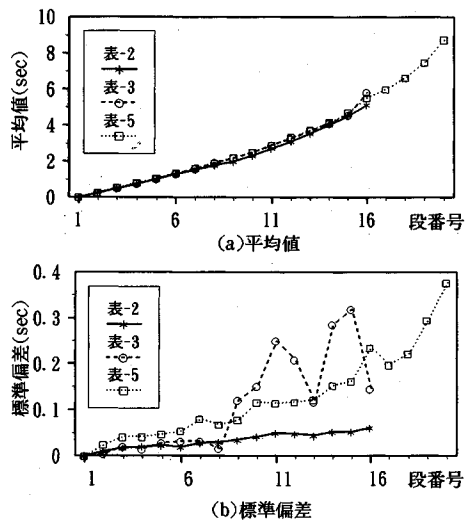


図-1 Y社のDS雷管の段毎の起爆時間測定結果

③現場において実際の工事中の発破振動を測定し、現場における秒時誤差のデータを求めた。①A現場(2車線道路トンネル, 上半先進, 地質:安山岩), ②B現場(2車線道路トンネル, 上半先進, 地質:第4紀堆積岩), ③C現場(明かり, 1段1孔ずつの発破, 地質:凝灰岩), ④D現場(2車線道路トンネル, 上半先進, 地質:比較的新鮮な花崗岩)の4現場である。なお④のD現場のデータは5.で用いる。

表-3はA現場で測定した発破振動の記録から各段毎に最初に起爆したと考えられる時刻を特定し、それらの平均値および標準偏差を求めたものである。なお、各段の途中の起爆時間は、波形が重なり特定は不可能であった。これらの表-2および表-3の違いを明らかにするために、これらの平均値および標準偏差を横軸に段数、縦軸に起爆時刻(sec)をとって描いたものを図-1に示す。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瞬発雷管の発破がないため、瞬発雷管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。なお図中には後に出てくる表-5の結果も合わせて描いてある。

図-1(a)の起爆時間の平均値はほぼ段数と共に大きくなり、表-2の工場で試験した結果(×印)と表-3のトンネル現場で測定した結果(○印)とはほぼ等しい。これに対して図-1(b)の標準偏差は工場での測定結果ではほぼ段数に比例しているが、現場での測定結果では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大きく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に示す工場で測定された結果のみであり、表-3に示すように現場における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らかで、これらを

表—4 B現場（トンネル）におけるDS雷管の
段毎の起爆時間測定結果
（段の最初の起爆時間）

段番号	平均値 (msec)	標準偏差 (msec)	データ数
2	275	32	11
3	484	34	9
4	677	37	8
5	962	36	9
6	1170	55	9
7	1479	43	10
8	1749	33	4

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段以降ばらつきがかなり大きくなるが、11段以降の雷管は低段のものとは延時薬が異なり、かつ延時薬量が多くなるためと考えられる。9、10段の雷管のばらつきが大きいのは、保管その他の理由によるものと考えられる。また一般に10段までは常時生産されているが11段以降は受注生産となるため、品質管理面に差が出たとも考えられる。

表—4はさらに別のトンネル現場であるB現場で測定を行った結果である。この現場もA現場と同じく各段数孔以上の発破を行っているため、波形は重畳しており、各段の最初の起爆時刻の特定のみを行った。この場合は実験回数も少なく、用いた段数もA現場より少ないが、やはり、表—1、2に比べるとそのばらつきは大きくなっている。

A、B現場の測定は実際のトンネル現場での測定である。トンネル工事では一般に各段毎に数孔以上の発破を行っているため、各段の最初の起爆時間しか特定できなかった。起爆時間の特定を容易にするため、Aトンネルで用いたのと同じY社の雷管を用いて各段1孔ずつの発破実験をA、B現場とは別のC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を多数回行うこと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。その反面、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—5はC現場で1段～20段を用いて、100回の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。特に高段は波形の重畳が大きく読み取り不可能なものが多かったためデータ数は極端に少なくなっている。そのため高段の実際のばらつきはこの結果よりかなり大きいと考えられる。ま

表—5 C現場（明かり）におけるY社のDS雷管の
段毎の起爆時間測定結果

段番号	平均値 (msec)	標準偏差 (msec)	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	1982	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

たこの平均値、標準偏差を図—1中に□印で示す。表—1、2と比較すると明らかなように、表—3、4と同じく工場で測定されたデータよりそのばらつきははるかに大きい。特に10段以降のばらつきはA現場での実測結果と同じくかなり大きくなる。現場は工場と異なり、温度、湿度等の条件がかなり多様化するためと思われる。その場合、特に延時薬量が多かつその種類も異なる10段以降にその影響が顕著に現れていると言える。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かなり大きく、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

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—5に示した2、5、10、15段の起爆時刻をヒストグラムで表したものが図—2である。また2～15段のデータをその平均値からのばらつきとしてヒストグラムに描いたものが図—3である。図—2を見ると段によっては必ずしも正規分布をしているとは言えないが、全データを合わせた図—3を見るとほぼ正規分布をしているものと考えられる。そこで各段ごとに同段の雷管の起爆時刻は正規分布をしているものと考え、表—5の起爆時刻の平均値、標準偏差を用いた正規乱数で起爆時間を求めた。また、個々の孔から発生する発破振動は一般的な発破振動波形と考えられる図—4(a)に示す実発破振動の記録かこれを単純化した図—4(b)に示す減衰を有する正弦波のいずれかと考え、それらの波の重ね合わせにより発破振動が表されるものとする。この振動を発破孔数、継続時間分重ね合わせるにより発破振動のシミュレーションを行う。なおこのシミュレーションでC現場のデータを用いたのは、データ数が多く、各段1

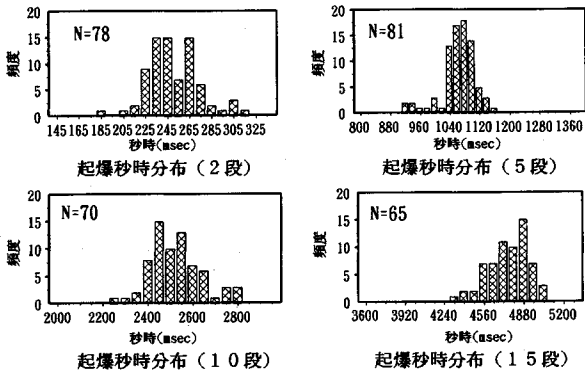


図-2 2, 5, 10, 15段における起爆時間のヒストグラム

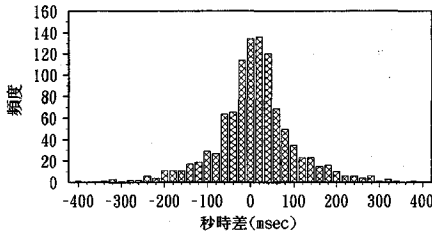


図-3 起爆秒時の平均値との差のヒストグラム (2段~15段), N=1048個

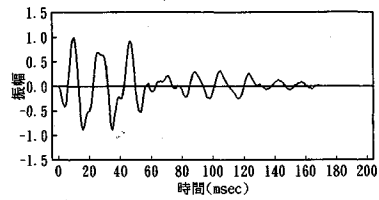
孔の発破で波形の読み取り誤差も小さく、また20段までのデータがすべてそろっていたためである。

このように多数の振源で生じた振動波形が伝播、重畳して一つの波形を形成する考え方は地震波形の断層シミュレーション解析でもしばしば見られるものである。

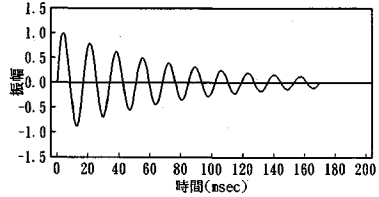
ここで継続時間に関しては、発破の初動からほぼ1/10程度にまで振動が減少する時間をC現場の全てのデータから求めた。その結果を表-6に示す。この場合も波形の読み取りの問題があり、明瞭に読み取れたもののみをデータとして用いた。そのためデータ数にはばらつきがあり、表-5よりもデータ数はさらに少なくなっている。これは波形が最後まで完全に読み取れたデータはより少なかったことを意味している。この表から分かるように継続時間は各段により少しばらつきがあるがそのばらつきは余り大きくなく、平均的にほぼ170 msec位と考えられるのでその値を用いた。

また減衰正弦波の振動数に関しては受振点の特性と発破源から受振点までの距離が大きく影響するものと考えられるが、ここではトンネルの発破振動が公害問題として取り上げられることの多い距離100~300m程度を念頭におき、A, B, C現場の測定記録から60 Hzと想定した。図-4 (a)の実波のフーリエスペクトルを図-5に示すが、卓越振動数は約50 Hzと65 Hzであり、平均的には60 Hz前後の波が卓越していると考えられる。

このように、図-4 (a)の実波形あるいは図-4 (b)の減衰正弦波の開始時刻を、用いる雷管の段数に対応し



(a) 実波波形



(b) 減衰正弦波波形

図-4 シミュレーションで用いた波形

表-6 C現場(明かり)におけるY社のDS雷管による発破振動の継続時間

段番号	平均値 (msec)	標準偏差 (msec)	データ数
1	173	46	87
2	176	37	83
3	165	36	69
4	160	37	82
5	173	45	84
6	165	50	82
7	182	57	56
8	170	56	83
9	188	59	60
10	170	47	58
11	184	54	88
12	167	47	61
13	192	52	56
14	179	57	53
15	178	45	58
16	171	49	56
17	202	56	54
18	174	46	51
19	177	48	37
20	176	46	25

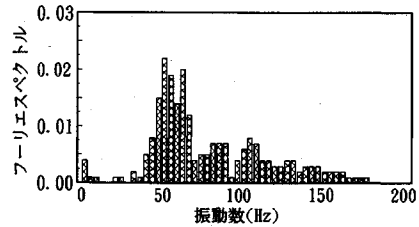


図-5 実波のフーリエスペクトル

た平均値と標準偏差を持つ正規乱数から求め、これらの波を重ね合わせた合成波形の最大振幅が元の波形の最大振幅の何倍になっているのかを求めると、それが式(5)で与えられる重畳孔数 n_i となる。すなわち1回のシミュレーションでは、雷管の段数 i と発破しようとする実孔数 N_i を与えると N_i 個の開始時刻の異なる波形が得られ、それらの合成波形から重畳孔数 n_i が求まる。これをシミュレーションの必要回数分繰り返す。ここで、発破孔数10孔を用いた2段及び3段雷管のシミュレーション結果を図-6に示す。シミュレーション回数はいずれも1000回である。減衰正弦波の方がシミュレ-

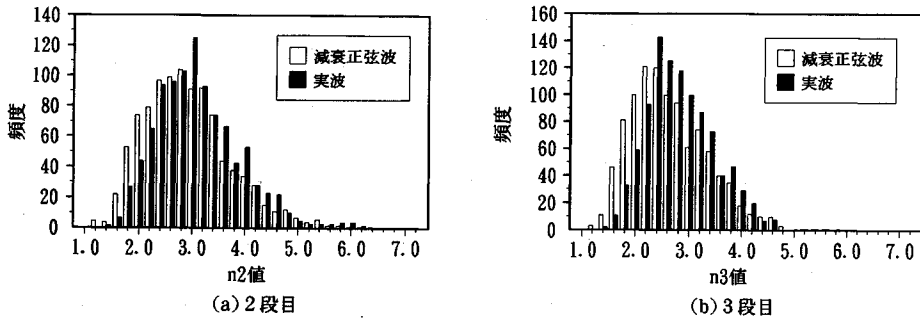


図-6 発破孔数10に対する重畳孔数の分布状況(シミュレーション回数1000回)

表-7 各段各孔数における重畳シミュレーション結果から得られた重畳孔数

孔数	項目	段番号及びその段における現場での雷管の起爆秒時誤差(msec)															
		2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	17					
2	平均値	1.303	1.221	1.221	1.255	1.228	1.166	1.170	1.153	1.131	1.132	1.126	1.074				
	標準偏差	0.316	0.268	0.268	0.262	0.268	0.230	0.210	0.222	0.208	0.206	0.238	0.150				
3	平均値	1.507	1.419	1.419	1.424	1.390	1.299	1.355	1.285	1.263	1.265	1.258	1.202				
	標準偏差	0.431	0.342	0.342	0.376	0.345	0.316	0.332	0.324	0.285	0.296	0.284	0.252				
4	平均値	1.781	1.617	1.617	1.608	1.588	1.511	1.536	1.506	1.399	1.402	1.396	1.335				
	標準偏差	0.497	0.450	0.450	0.385	0.448	0.395	0.424	0.381	0.349	0.359	0.353	0.299				
5	平均値	1.944	1.830	1.830	1.786	1.787	1.650	1.701	1.654	1.566	1.566	1.555	1.442				
	標準偏差	0.578	0.530	0.530	0.463	0.496	0.455	0.438	0.435	0.421	0.410	0.408	0.337				
6	平均値	2.134	1.898	1.898	1.869	1.897	1.774	1.847	1.788	1.695	1.695	1.688	1.532				
	標準偏差	0.595	0.604	0.604	0.506	0.525	0.452	0.504	0.436	0.427	0.419	0.420	0.329				
7	平均値	2.241	2.027	2.027	2.003	2.007	1.851	1.962	1.870	1.769	1.776	1.764	1.598				
	標準偏差	0.598	0.593	0.593	0.503	0.522	0.463	0.512	0.461	0.426	0.420	0.413	0.323				
8	平均値	2.374	2.174	2.174	2.181	2.121	1.969	2.030	1.967	1.873	1.867	1.871	1.710				
	標準偏差	0.671	0.603	0.603	0.526	0.608	0.528	0.614	0.540	0.451	0.437	0.437	0.347				
10	平均値	2.670	2.419	2.419	2.420	2.379	2.210	2.279	2.202	2.050	2.063	2.036	1.839				
	標準偏差	0.729	0.557	0.557	0.636	0.678	0.588	0.699	0.582	0.522	0.517	0.537	0.375				
15	平均値	3.502	3.137	3.137	2.937	2.878	2.636	2.699	2.628	2.480	2.521	2.472	2.169				
	標準偏差	0.928	0.671	0.671	0.769	0.782	0.663	0.717	0.696	0.604	0.678	0.676	0.459				
20	平均値	4.086	3.566	3.566	3.417	3.435	3.046	3.079	3.025	2.872	2.906	2.897	2.458				
	標準偏差	1.087	0.919	0.919	0.798	0.883	0.769	0.776	0.801	0.748	0.762	0.752	0.520				

ションで求めた重畳孔数が少し小さくなる。これは、図-4 (a), (b) を比べてわかるように、実波はほぼ同じ程度の大きさの波動が3波続くためであろう。

同様に、10孔を用いて2段~12段雷管について重畳孔数の平均値、標準偏差を求めたものを図-7に示す。同図はシミュレーション回数1000回と100回の結果を示している。図から明らかなように重畳孔数の平均値、標準偏差は段数とともに減少している。重畳孔数が減少するのは表-5を見ると分かるように段数とともに雷管の秒時誤差のばらつきが大きくなっているため、波形の重畳が少なくなったからであろう。また、シミュレーション回数1000回と100回の差は小さく、100回のシミュレーションで重畳孔数を求めても余り問題のないことがわかる。

各段のばらつきに対し、任意の発破孔数に対応する重畳孔数を求めるため、減衰正弦波を用いて、孔数と段数を変化させ、そのときの重畳孔数の平均値、標準偏差を一覧表にしたものを表-7に示す。表-7は横に段数、縦に孔数をとっている。この表を用いれば、i段でj孔用いたときの重畳孔数を簡単に求めることができる。表-7では、13段以降は17段しか示していないが表-5を見てわかるように、16段以降は標準偏差が200 msec以上であり、13段以降は17段の値を参考にできよう。

図-8に表-7の重畳孔数の平均値を段数を横軸に

とって示す。重畳孔数は段数に関わらずほぼ一定で、実孔数よりはるかに小さいことがわかる。

このように雷管の秒時誤差による重畳孔数への影響は無視できないため、式(5)を用いる際には孔数 n_i として、実孔数でなく表-7に示した重畳孔数を使う方がより実際の発破の振動に近くなると考えられる。

5. 雷管の秒時誤差を考慮したK値に対する検討

3., 4. で述べた雷管の秒時誤差を考慮に入れた上で、発破時の荷の重さ軽さを表すK値について検討を行う。2. でも述べたようにK値には薬量及び距離以外の全ての要因を含ませているため、一般にそのばらつきはかなり大きいと考えられる。トンネル発破においては、芯抜きと払いとはK値が別に設定され、例えばA社の例を取ると芯抜きでは500~1000、払いでは300~500とされ、B社の例では芯抜きが450~900、払いは200~500の値が用いられている¹⁾。またトンネルによっては芯抜きのK値を払いのK値の3~5倍とする試験発破の結果も得られている⁷⁾。このK値についてはトンネル毎、計測条件毎に差が大きく、試験発破を行ってK値を定め、後の管理に用いるのが通常である。

一般に装薬量は荷の重さ軽さに対応して決められるものであるから、同一の薬量に対してK値が大きく異なる

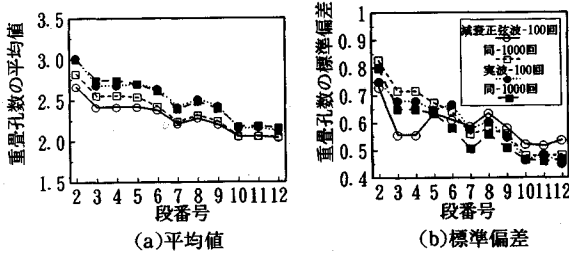


図-7 発破孔数10に対する重畳孔数の平均値・標準偏差の分布

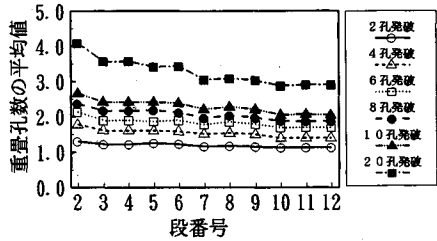


図-8 重畳孔数の平均値の分布

表-8 初段に瞬発電気雷管を用いたときの式(1)によるA, DトンネルのK値

種類	A/D初		D/初	
	芯抜き	払い	芯抜き	払い
平均値	1740	362	2809	639
標準偏差	494	180	532	313

る、すなわち、荷の重さが著しく異なるという考え方は、発破設計上の概念と矛盾する。発破設計においては若干の重みづけはあるとしても本来全段全孔同じ荷の重さになるよう薬量や孔の数、位置などを決めてはいるはずである。このように考えると、芯抜きと払いでK値を大きく変えるということは問題であろう。

今筆者らの計測したAトンネルとDトンネルにおいて、初段に瞬発電気雷管を用いた時の鉛直方向の発破振動を通常の方法である式(1)に従って、段当たりの平均K値を求めたところ、表-8となった。表-8によると、初段に瞬発電気雷管を用いた場合芯抜きのK値は払いのK値の5倍近くにもなっている。また、A, DトンネルのK値の値には大きな差があり、また先のA, B社の例と比べても大きい、この様な大きなK値の例は、前述の式(2)の主としてC₂, C₃の差によると考えられる。

A, Dトンネルにおける芯抜きと払いのK値の大きな差の原因としてはすでに何度も述べているように、芯抜きでは瞬発電気雷管を用い、払いでは2段雷管以降を用いているにもかかわらず、その秒時誤差の違いが考慮されていないこと、芯抜きと払いの荷の重さ軽さが反映され、このように大きな違いになったものと考えられる。

これらの点を検討するためA, D両トンネルで、同一の発破パターンで初段を瞬発雷管とした発破と初段を2段雷管とした発破を行って、その振動を計測した。初段で瞬発と2段の雷管を用いたのは、1つには、発破振動が問題となるような場合、芯抜きでの振動を軽減するため、初段に2段雷管を用いる発破が時に行われ、この影響を把握したかったからと、2つには、雷管の秒時誤差が発破振動に与える影響を明確に把握したかったからである。

Aトンネルではこれらの発破を交互に行った。これ

は発破パターンを同じにして、発破時の荷の重さ軽さを同じになるようにしたとしても岩盤の状況が場所により微妙に異なることが考えられ、その影響をなるべく小さくしようと考えたからである。Aトンネルでの実験は合計18回行ったが、データにノイズがあって読み取りが不可能であったり、コードがたまたまけもの道を横断していたためか、コードがくいちぎられたりしたこともあって有効なデータは11データで、初段に瞬発雷管を用いた分が7データ、初段に2段雷管を用いた分が4データであった。この間の岩の状況は目視や切羽観察記録では顕著な変化は認められなかった。

また、Dトンネルでは、それまで初段に瞬発電気雷管を用いていた発破を初段で2段雷管を用いた発破に発破パターンは同一のまま変更した。この場合は切羽進行に伴う種々の条件の変化を考慮し、ここでは変更前後各5回の発破のデータを用いた。

表-9にA, Dトンネルで初段に瞬発雷管を使ったときの式(1)の段当りK値を求めた結果を示す。表-9(a)のAトンネルでは初段のK値(K₁)と2段以降のK値(K_i)の比K_i/K₁は0.09~0.36、表-9(b)のDトンネルでも0.12~0.38で両トンネルとも平均的に1/5以下である。表-10に、A, Dトンネルで初段に2段雷管を用いた場合の式(1)の段当りK値を示すが、初段のK値に比べるとそれ以降のK値は、表-10(a)のAトンネルで0.4~0.9倍程度、表-10(b)のDトンネルでも0.3~0.8倍程度で表-9の場合より初段のK値との違いは小さくなる。また、初段のK値そのものも瞬発雷管の場合に比べて1/3程度となり、初段に2段雷管を用いることにより、発破振動を軽減できることは明らかである。

これは図-8を見てわかるように、2段雷管であっても重畳孔数は実孔数よりはるかに小さく、(このことは雷管にばらつきのあることを意味している)その段の薬量の全てが発破振動に寄与していないため発破振動が小さくなり、結果としてK値が小さくなったものと考えられる。これらの場合、同じ発破パターン、同じ岩盤状況と考えられるため、平均的には荷の重さ軽さは同じであったと考えられ、表-9, 10の違いは主として瞬発雷

表-9 初段に瞬発雷管を用いた場合の段当り K 値

(a)Aトンネル

発破番号	距離 (m)	段番号														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A-01	115.2	816	154	255	153	357	140	233	447	396	187	145	173	204	153	530
A-05	102.4	1370	179	184	351	363	282	299	282	432	229	241	109	322	242	503
A-08	101.4	1560	445	316	396	335	367	289	263	225	218	148	149	350	219	740
A-09	95.7	1754	351	446	440	352	290	327	616	477	547	183	136	384	351	406
A-12	91.4	2241	462	329	998	421	361	294	463	294	405	313	170	436	640	1184
A-16	87.0	2220	668	295	411	525	381	291	655	520	584	305	192	327	218	530
A-18	85.9	2199	390	374	372	891	293	381	390	448	454	295	208	461	288	517
平均値		1740	378	314	446	471	277	302	445	399	366	233	162	342	302	630
標準偏差		494	163	77	242	184	75	41	146	97	143	89	31	100	150	244
K1/Ki		1.00	0.22	0.18	0.26	0.27	0.16	0.17	0.26	0.23	0.21	0.13	0.09	0.20	0.17	0.36

(b)Dトンネル

実験番号	距離 (m)	段番号											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
D-01	257	1977	768	494	644	620	427	297	354	268	335	283	707
D-02	253	2714	675	550	706	724	515	550	334	337	486	170	889
D-03	251	3076	1250	938	798	717	1597	547	421	384	345	510	1508
D-04	249	3496	1559	749	782	1029	815	736	513	447	617	524	856
D-05	245	3282	1245	630	571	636	394	410	461	329	511	465	790
平均値		2909	1105	652	700	745	749	508	416	353	459	390	951
標準偏差		532	327	126	85	148	449	148	66	60	106	140	286
K1/Ki		1.00	0.38	0.22	0.24	0.26	0.28	0.17	0.14	0.12	0.16	0.13	0.33

表-10 初段に2段雷管を用いた場合の段当り K 値

(a)Aトンネル

発破番号	距離 (m)	段番号														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A-02	111.9	577	235	178	289	220	132	176	254	144	265	111	131	301	180	500
A-07	98.5	537	560	498	373	336	373	308	485	270	239	162	101	336	224	310
A-11	93.9	406	901	347	636	372	434	430	413	392	313	215	299	474	339	1198
A-17	86.4	890	445	296	446	680	593	790	626	470	2488	523	481	431	348	888
平均値		603	535	329	436	402	383	426	444	319	826	253	253	385	268	585
標準偏差		177	241	115	128	170	166	228	134	124	960	160	152	70	80	361
K1/Ki		1.00	0.89	0.55	0.72	0.67	0.63	0.71	0.74	0.53	1.37	0.42	0.42	0.64	0.44	0.97

(b)Dトンネル

実験番号	距離 (m)	段番号											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
D-06	242	1045	1008	538	836	743	283	508	570	479	323	469	1069
D-07	240	1253	711	500	712	468	590	671	575	421	255	459	506
D-08	238	1106	885	848	552	592	637	496	486	545	419	301	1285
D-09	235	1756	1364	1162	1016	524	592	593	622	418	487	408	661
D-10	232	1021	1032	606	1260	1178	512	892	599	516	348	380	691
平均値		1236	998	730	875	701	523	632	570	476	366	403	842
標準偏差		272	217	248	245	256	127	145	46	51	80	61	283
K1/Ki		1.00	0.81	0.59	0.71	0.57	0.42	0.51	0.46	0.39	0.30	0.33	0.68

管はほとんど秒時誤差なしに起爆し、2段雷管は起爆秒時にばらつきを有しているためと考えられる。

これに対して、表-7に示した重畳孔数を式(5)に用いて同様にして K 値を求めたものを表-11、表-12に示す。表-11、表-12それぞれにおいて重畳孔数を用いた場合の芯抜き K 値は A トンネルの瞬発雷管で 957、2段雷管で 932 であり、D トンネルの瞬発雷管で 1832、2段雷管で 1749 となりトンネル毎にほぼ同程度の値となっている。すなわち芯抜き発破においては、発破振動の重ね合わせの考え方、換言すれば重畳孔数の考え方が正しいことを示している。また、払いの K 値についても表-11に示す瞬発の場合、A トンネルでは2段以降の K 値 (Ki) は初段の K 値 (K1) の 0.45~0.97 倍、D トンネルでは 0.45~0.93 倍となり、表-12に示す初段に2段雷管を用いたのも同様で、A トンネルでは初段の K 値の 0.52~1.16 倍、D トンネルでも 0.52~0.99 倍とほぼ全段同じ程度の K 値となっている。

今ここで、たとえ重畳孔数の考え方をを用いても芯抜きと払いの発破において K 値に差が生じることについては次のように説明される。すなわち、その1つは従来言われてきたように V カット芯抜きが1自由面発破であ

り、払いが2自由面発破になることによる荷の重さの差が考えられる。他の1つの理由としては、払い発破において前段の発破によるオーバーブレイクのため後段の発破の荷が結果的に著しく軽くなり、その影響によることが考えられる。

例えば、筆者らがあるトンネルで計測した SB (スームプラスチック) を例に取ればこのことがよく分かる。吉見ら⁸⁾によると、節理系の岩盤ではあるが、SB 孔のみ跡率はわずか 22% で、このことは SB 孔であっても、かなりのオーバーブレイクのあることが明らかである。もちろん、他の払い孔のオーバーブレイクは測定できないので分からないが、SB 孔の結果からするとかなり大きいと考えても問題ないであろう。しかもこのトンネルでは、SB 孔の薬量を当初の SB 孔の薬量の 70% にまで減少させた発破も行ったが、なんら問題は起きなかったことが報告されている。これらのことを考え合わせれば、一般には払い発破はこのオーバーブレイクを考慮したとき結果的にかなり過装薬となっていると思われる。

すでに表-5の考察でも述べたが、表-5の雷管の秒時誤差はかなり過小評価であると考えられる。C 現場では1段1孔の発破であっても、後段になると重畳する

表—11 初段に瞬発雷管を用いた場合の式(5)のK値

(a)Aトンネル

発破番号	距離(m)	段番号														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A-01	115.2	449	259	429	276	652	264	474	799	730	398	346	460	427	343	778
A-05	102.4	754	276	339	547	663	514	608	504	879	519	571	289	636	513	738
A-06	101.4	370	688	607	688	548	693	537	469	474	494	433	398	691	465	1085
A-09	95.7	966	543	341	703	643	546	664	1102	933	1169	462	360	461	745	595
A-12	91.4	1233	716	631	1594	861	388	596	827	597	917	776	457	982	1359	1737
A-16	87.0	1222	944	533	857	960	680	542	1171	841	997	628	493	646	463	777
A-18	85.9	1210	804	688	594	1629	552	773	697	877	1028	731	537	910	645	758
平均値		957	576	581	723	851	520	606	796	762	789	563	428	679	647	924
標準偏差		272	227	154	380	344	142	87	250	158	286	148	78	192	315	358
K1/K1		1.00	0.60	0.61	0.76	0.89	0.54	0.63	0.83	0.80	0.82	0.59	0.45	0.71	0.68	0.97

(b)Dトンネル

実験番号	距離(m)	段番号											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
D-01	257	1245	1220	929	1120	1132	834	644	780	620	837	656	997
D-02	253	1710	1044	1063	1298	1332	1074	1280	787	804	1215	395	1253
D-03	251	1938	1948	1583	1389	1173	2779	1169	948	878	863	1147	2126
D-04	249	2202	2411	1414	1411	1613	1558	1595	1159	1022	1542	1217	1211
D-05	245	2067	1926	1220	1031	1167	859	946	1053	772	1231	1080	1140
平均値		1832	1710	1242	1250	1284	1421	1127	945	819	1137	899	1340
標準偏差		335	506	235	150	176	727	319	143	132	262	319	403
K1/K1		1.00	0.93	0.68	0.68	0.70	0.78	0.62	0.52	0.45	0.62	0.49	0.73

表—12 初段に2段雷管を用いた場合の式(5)のK値

(a)Aトンネル

発破番号	距離(m)	段番号														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A-02	111.9	393	443	324	527	415	288	347	411	298	597	277	357	618	339	750
A-07	98.5	831	974	955	859	613	798	606	895	576	537	398	275	712	474	465
A-11	93.9	629	1567	666	1041	679	881	861	762	836	705	536	817	1006	719	1795
A-17	86.4	1377	774	545	730	1240	1204	1411	1014	847	2488	1304	1298	884	742	496
平均値		932	940	622	739	737	788	806	771	639	1082	629	687	805	568	876
標準偏差		275	409	228	189	306	336	394	226	225	814	400	409	150	169	542
K1/K1		1.00	1.01	0.67	0.79	0.79	0.85	0.87	0.83	0.69	1.16	0.67	0.74	0.86	0.81	0.94

(b)Dトンネル

実験番号	距離(m)	段番号											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
D-06	242	1479	1754	1007	1310	1354	585	1076	1319	1122	800	1068	1513
D-07	240	1773	1237	940	1301	882	1279	1513	1350	1053	632	1074	717
D-08	238	1585	1505	1583	975	1117	1318	1035	1126	1276	1037	686	1819
D-09	235	2485	2372	2185	1856	912	1242	1168	1439	996	1229	931	936
D-10	232	1444	1795	1139	2063	2147	1012	1833	1429	1242	840	883	979
平均値		1749	1733	1375	1501	1283	1087	1345	1332	1138	908	930	1193
標準偏差		385	377	468	399	464	273	359	113	107	206	142	408
K1/K1		1.00	0.99	0.78	0.86	0.73	0.82	0.77	0.76	0.65	0.52	0.53	0.68

割合が多くなり、表—5のデータ数を見ても分かるように実験回数よりはるかに小さい。表—5では前後で重なり合わず読みとられたもののみを用いているが、重なり合って読みとり不可能だったデータを考え合わせると、秒時誤差のばらつきはさらに大きくなる。すなわち、実際の重畳孔数は表—7で示されるものよりさらに小さくなるものと考えられる。このことは表—11, 12に示すように後段のK値ほど一般に小さくなることを意味し、表—11, 12の結果は妥当性を持つものと考えられる。

これに比べて、芯抜き発破では岩盤の状況が既知であり、管理のできた発破が可能なため薬量に対する荷はほぼ同じくらいになっていると思われる。そのため、芯抜きのK値はほぼ同じ値になったものと考えられる。また、芯抜きにおいては払いの場合と比較すれば若干弱装薬ぎみになるのであろう。

これまでは、雷管の秒時誤差を基礎にして求めた重畳孔数を用いて芯抜きと払いのK値について検討した。今、芯抜きと払いのK値に変化がないものとして実計測されたPPVを用いてA, Dトンネルの初段に瞬発雷管を用いた場合について重畳孔数を求めたものが、表—13である。これによると定義上芯抜きの重畳孔数が実孔数と一致するのは当然としてAトンネルで0.7～

2.6, Dトンネルで0.6～3.2となり、表—7で求めたものよりかなり小さくなっている。ちなみにAトンネルでのこのケースの実際の孔数は、2孔～27孔で平均は8.2孔、Dトンネルでは2孔～14孔で平均は7.7孔であった。この点についてはK値、重畳孔数の両者について芯抜きと払いで、今後のさらなる検討を必要とするところであると思われる。

このように、雷管の秒時誤差によるばらつきを考慮にいった重畳孔数の概念を取り入れてK値を求めると、初段に瞬発雷管あるいは2段雷管を用いた場合であっても、全段においてK値はほぼ同じような値になり芯抜きと払いのK値を大きく変える必要はないと考えられる。この結果は全段にわたり、発破時の荷の重さ軽さを同じにするという発破設計の概念と一致する。このように従来芯抜きと払いのK値が大きく異なりうると考えられていた原因の多くは、雷管の秒時誤差による重畳孔数を考慮せず、全孔が有効と考えていたことに起因することが明らかになった。また、各段のK値は少し異なるが、これが結果として荷の重さ軽さを表しているものと考えられる。

表-13 K値から推測した重畳孔数

(a)Aトンネル															
発破番号	段番号														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A-01	6	1.500	1.875	1.125	2.625	1.125	1.875	2.625	2.625	1.500	1.500	1.875	1.500	1.125	1.875
A-05	6	0.706	0.882	1.059	1.588	1.235	1.588	1.235	2.294	1.412	1.765	1.235	1.412	1.059	1.059
A-06	6	1.350	1.350	1.200	0.900	1.350	1.200	0.900	1.200	0.900	1.200	1.200	0.750	1.350	
A-09	6	1.200	2.000	1.333	1.333	1.200	1.200	1.867	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200
A-12	6	1.238	1.238	2.095	1.238	0.667	0.667	0.667	0.952	1.238	1.238	1.238	1.238	1.238	1.238
A-16	6	1.377	0.885	0.984	1.574	1.190	0.787	1.770	0.885	1.379	0.787	1.082	0.885	0.590	0.889
A-18	6	1.065	0.065	0.774	2.323	0.968	1.268	1.065	1.365	1.742	1.548	1.161	1.268	0.871	0.677

(b)Dトンネル												
発破番号	段番号											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
D-01	4	2.585	2.277	1.846	1.989	1.723	1.354	1.785	1.415	1.846	1.231	1.046
D-02	4	1.579	2.263	2.000	2.053	2.105	2.474	1.684	1.579	2.000	0.632	1.000
D-03	4	2.722	2.680	1.608	1.278	3.216	1.649	1.443	1.361	1.237	1.443	1.567
D-04	4	2.964	2.107	1.536	1.393	1.893	2.071	1.760	1.393	1.964	1.393	0.786
D-05	4	2.408	2.041	1.224	1.429	1.388	1.388	1.633	1.224	1.592	1.265	0.735

6. ま と め

本研究において従来から問題とされていた発破振動予測式の問題点を再検討し、雷管の秒時誤差を実測データから明らかにした上で、重畳孔数の概念を明確にしこれを用いて発破時の荷の重さ軽さを表すK値について考察を行ったものである。

本研究の結果は次のようにまとめることができる。

(1) 現場における雷管の起爆秒時誤差を実測データから明らかにし、その秒時誤差は従来考えられていたものよりかなり大きく、発破振動管理においてはこの点を十分に考慮に入れることが必要である。

(2) 現場で使用している雷管の秒時誤差を考慮したシミュレーションにより、任意の段、任意の孔数で発破した時の重畳孔数を示した。

(3) 従来の段当り薬量を用いた発破振動予測では芯抜きと払いのK値には大きな差が生じることがあったが、これは基本的に雷管の秒時誤差に伴う重畳孔数を考慮に入れていないためであることを明らかにした。さらに(2)で示した重畳孔数の表-7と式(5)を用いることにより、ほぼ同じK値を用いて全段にわたる発破振動予測が精度良く行えることを示した。

(4) 発破時の荷の重さ軽さは高々2倍程度で、K値の大きさの差も最大でもこれぐらいと考えてよいことを明らかにした。

このように、従来から言われていた発破振動予測の大きなばらつきが雷管の秒時誤差を考慮しないことに起因

することを明らかにしたが、雷管の秒時誤差に伴う重畳孔数の概念を用いても発破時の荷の重さ軽さに伴うばらつきについては、将来とも不可避であり、発破振動予測の精度を向上させるにはこのばらつきを正しく把握する必要がある。これらについては今後も実測例を増やし更なる精度の向上を試みる予定である。

参 考 文 献

- 1) 例えば、日本トンネル技術協会、トンネル爆破技術指針、第5章トンネル爆破に係る環境技術指針、pp.137~176、1982年2月。
- 2) 例えば、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/VI-10、pp.199~208、1989年3月。
- 3) 上掲 1)、pp.142~143。
- 4) 雑喉 謙：発破振動の周辺への影響と対策、鹿島出版会、pp.14~23、1984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、1976年。
- 6) Gustafsson, R. 原著・和田満穂 監訳：新しい発破技術、森北出版、p.224、1981年。
- 7) 玉川トンネル発破振動検討委員会：一般国道305号玉川トンネル発破振動検討委員会報告書、1991年3月。
- 8) 吉見憲一・古川浩平・井沢幸一・中川浩二：節理系岩盤のトンネル掘削におけるスムーズプラスティング効果の検討、土木学会論文集、第391号/VI-8、pp.220~227、1988年3月。

(1993.3.29 受付)

ESTIMATION OF BLAST VIBRATION DUE TO TUNNELLING BASED ON THE OVERLAPPING HOLE NUMBER

Akihiko MIYAJI, Kohei FURUKAWA, Kazuyuki YOSHIKAWA and Koji NAKAGAWA

In this study, one practical blast vibration estimating method was proposed, taking into account the overlapping holes. In the first step, we proposed that the time delay deviation of the detonator in actual field blasting is larger than the values measured in a factory. On the basis of the former deviation, we calculated the simultaneously blasted hole numbers which produced the same magnitude of blast vibration as produced by the larger number of holes blasted with the same delay number detonators. In the third step, we proposed the new blast vibration estimating method based on the number of overlapping holes. The results confirm the method is more accurate than the usual one.