

発破振動のばらつきの要因分析とこれを考慮した 重畳シミュレーションによる振動評価

塩月隆久¹⁾・橋爪正博²⁾・古川浩平³⁾・中川浩二³⁾

¹⁾ 正会員 (株)青木建設 研究所 (〒300-26 茨城県つくば市大字要36-1)

²⁾ 学生会員 山口大学大学院 工学部社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台)

³⁾ 正会員 工博 山口大学 工学部社会建設工学科

市街地近郊でのトンネル工事あるいは宅地造成工事等の建設工事において発破工法を用いる場合、その発破振動の合理的な管理あるいは精度の良い予測が必要となる。本研究は、発破振動のばらつきの要因を抽出した上で、発破破砕効果の要因によって生じる速度振幅と速度波形のばらつきを現場実測データを基に明らかにする。これに、雷管の起爆秒時のばらつき要因を加えた速度波形の重畳孔数シミュレーション解析結果から、これらの要因が発破振動の最大速度振幅 (PPV) のばらつき (平均値 μ , 分散 σ^2) に及ぼす影響を明らかにする。さらに、トンネル掘進発破と明かり発破におけるばらつき特性の違い、また、実測データとシミュレーション結果との対比から重畳シミュレーションの妥当性と重畳孔数を用いた発破設計の有効性を明らかにする。

Key Words : rock blasting, ground vibration, overlapping holes, blast vibration

1. まえがき

トンネル工事や宅地造成工事等の発破工法を用いた建設工事において、発破振動が周囲の住民あるいは構造物に与える影響が問題となる場合が多く、そのとき、発破振動の予測あるいはその管理が重要となる。しかし、発破の方法、地盤条件等の要因によって発破振動はばらつき、これらの要因の制御の難しさからその予測あるいは管理を困難にさせていることが多い。一般に、発破振動の予測式として下式が用いられている¹⁾。

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

ここに、PPVは最大速度振幅、Wは爆薬量、Dは発破点から受振点までの距離、a、bは定数である。本研究ではa=2/3、b=2を用いる。また、Kは発破条件、地盤条件等によって決まる定数であり、Kの設定が適切かどうかによって予測式の精度が大きく左右される。

しかし地盤条件等を事前に正確に把握することは極めて困難であり、筆者らはこれまで発破振動予測を確定論として取り扱うのではなく、確率論として各要因によるばらつきの程度を求めた上である確率で発破振動を管理する手法を提案してきた^{2) 3)}。しかし、精度

の高い発破振動予測および管理に関する研究はまだ十分とは言えず、多くが熟練した現場技術者の技術力に委ねられているのが現状である。

本研究では、まず発破振動のばらつきにかかわる個々の要因を抽出した上で、それらの中で発破源の荷の重さ・軽さで表現される発破破砕効果の違いによる要因について、現場の実測データを基にその要因にかかわる速度振幅・加速度振幅および速度波形パターンのばらつきの大きさを把握する。さらに、宮地ら⁴⁾が明らかにした雷管の起爆の秒時誤差 (あるいはばらつき) を加えて、それらが発破振動のばらつき、ここでは最大速度振幅 (PPV) の分布 (平均値 μ , 分散 σ^2)、に及ぼす影響の度合いを速度波形を用いた重畳シミュレーションによって求め、その要因の影響の大小を明らかにする。これによってトンネル発破あるいは明かり発破のそれぞれの場合の各要因が発破振動に及ぼす影響の違いおよび発破振動管理上の特性の違いを明らかにする。また、シミュレーションより得られた重畳孔数と、2つの施工現場の実測データより得られた重畳孔数との比較を行い、シミュレーションの妥当性と重畳孔数を用いた発破振動の予測の有効性を明らかにする。

2. 発破振動のばらつきを主要因

一般に、発破振動は、最大速度振幅（PPV）を用いて管理が行われることが多く、PPVは先に示した式（1）で表される。この式（1）から分かるように、K、WおよびDが、PPVを直接的に支配している。この中でWおよびDは物理的な意味は明確であり、これらの項にかかわるばらつきは少ないと考えられる。特に、Wとして段当たり薬量を用いるよりも孔当たり薬量を用いた場合の方が、PPVのばらつきを小さくする上で有効とされている²⁾³⁾⁴⁾。このように考えると、PPVのばらつきはW、D以外の要因をすべて含んだKの項（K値）の影響を多く受けるものと考えられる。雑喉⁵⁾はこのK値を以下のように整理している。

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

ここに、

- C₁：発破工法等の種別による要因
- C₂：破碎効果の良否によって変わる要因
- C₃：受振点の地盤状況の差異により変わる要因
- C₄：装薬される爆薬の種類による要因
- C₅：発破域に対する受振点の方向の差により変わる要因

これらの要因を発破振動を管理する上で問題となるものとそうでないものに整理してみると以下のように考えられる。まず、C₁、C₄については、設計・施工段階での工法等の決定によってある程度管理は可能でその制御も可能な要因と考えられる。次に、C₃、C₅は地質、地形等の地盤条件によって波動の伝播特性、振動特性が変わることによって支配されるものであり、発破振動PPVのばらつきに影響する程度は大きくまたその制御あるいは管理も困難なものである。しかし、C₃については管理対象とする受振点を特定することで管理できると考え、また、C₅も同様に受振点を特定し、方向別にK値を定めることで管理を行えるものとする。残る要因のC₂は、破碎効果の良否によって変わる要因で、起砕量、発破箇所の岩盤の状態あるいは起爆順序等によって左右されるものと考えられ、一般に荷の重さ・軽さと表現されているものである。これは、他の要因に比べ、制御あるいは管理が困難と考えられる。

他方、制御が困難な他の要因として雷管の起爆秒時のばらつきも考えられる。例えば、宮地らによってトンネル発破における雷管の起爆の秒時誤差（あるいはばらつき）が発破振動結果に及ぼす影響が明らかにされている⁴⁾。表-1に雷管の起爆秒時のばらつきを示す。このように雷管の起爆秒時のばらつきは後段にな

表-1 D S雷管の起爆秒時のばらつき

段番号	平均値 (msec)	標準偏差 (msec)
2	251	24
3	539	41
4	803	41
6	1340	54
7	1615	80
8	1882	68
9	2219	78
11	2892	114
13	3735	122
14	4164	153
15	4717	162
16	5545	285
19	7482	295
20	8740	377

表-2 発破工法諸元

工種	削孔長	削孔間隔	孔当たり薬量
盤下げ発破	3m	1.8~ 2.2m	1.975~ 2.350Kg
使用爆薬	3号桐ダイナマイト、AN-F0		
使用雷管	6号電気雷管（DS1~20）		

るほど大きいことが分かる。

以上のように、発破振動を制御あるいは管理する上での問題点は、K値に含まれる不確定要素（C₁、C₂、C₃、C₄、C₅）によるばらつきに加え、雷管の持つ起爆秒時のばらつきが影響し合っ、発破振動PPVのばらつきが生じ、実際これらを管理する場合の複雑さ、困難さを生じさせているものと考えられる。それにもかかわらず、これらの個々の要因のばらつきの大きさやそれらが発破振動PPVに及ぼす影響の大きさは明らかにされていない。特に管理上最も問題となるC₂にかかわる要因の発破振動に与える影響を明確にすることができれば、発破振動のより合理的な管理を行う上で非常に有効なものであると考えられる。

次章では、以上のC₂の要因にかかわるばらつき因子の大きさを明らかにするために、実施工で計測された発破振動の加速度あるいは速度波形を用いてばらつきの程度を明らかにする。

3. 実測データに基づくC₂要因中のばらつき因子

(1) 計測概要

本研究では、ある明かり発破の現場内で行った2地点計100回の発破実験で計測された盤下げ発破の鉛直振動の加速度波形を解析に用いる。発破工法の諸元を

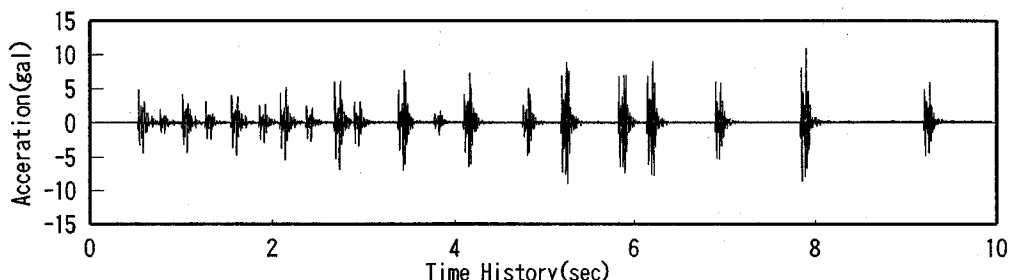


図-1 段発発破の加速度波形から見た各段での最大加速度振幅のばらつき

表-2に示す。実験を行った場所は、火山礫凝灰岩が多く分布しており硬岩～中硬岩に属するものであった。発破はすべて3mの盤下げ発破である。この発破では、1～20段のDS雷管を用い各段とも1段1孔で、第1地点の発破は5ピット（ピット名P-1～P-5、面積約15m×30m）で1ピットの発破全孔数は144孔～260孔、第2地点は6ピット（ピット名P-6～P-11、面積約12m×16m）で1ピットの発破全孔数は80孔で、孔当たり薬量および孔間隔を、1.95～2.75kg/孔および1.8～2.0mに変化させた。但し、1回の発破における薬量は全孔同一にした。発破振動の波形は1段1孔の段発発破の波形として最大20段までのものが加速度波形として記録されているが、各孔毎の発破による振動が分離して波形が比較的読みとりやすかった51回の段発波形を今回の解析に用いている。

発破を行った第1地点のP-1～P-5および第2地点のP-6～P-11は同じ場内ではあるが離れた場所である。なお、第2地点の方が、二次破砕を必要とする大塊が多く発生しており、第1地点と比べ割れ目間隔が大きく岩質も硬質なものであった。発破振動の計測場所は第1地点で1箇所、第2地点で1箇所にそれぞれ固定した場所で計測を行った。いずれも現場内の岩盤上にあり、発破箇所からの距離もほぼ同じ約150～200mの範囲であった。

(2) 加速度、速度波形から見た振幅のばらつき

図-1に上記現場で計測された段発発破の加速度波形の一例を示す。各段での最大加速度振幅（PPA）が大きければらついている事が分かる。各段とも1段1孔で薬量は一定であり、受振点と爆源との距離もほぼ一定である。爆源は20孔分の広がりを持つが、爆源と受振点間の経路による差は無視できると考えられる。また、振動の計測箇所は同一であり、受振点による違いはない。また他の発破も上述のように固定した地点で計測している。このことから、ここで得られた各段毎のPPAの最大値のばらつきは、発破箇所の地山の岩盤の割れ目等の状態あるいは前段までの発破による

岩盤のゆるみの程度の違いによる発破の荷の重さ・軽さ、つまり、 C_2 の要因によって生じたものと考えられる。そこで、まず、 C_2 の要因による発破振動加速度あるいは速度の振幅のばらつきがどの程度なのか、実測データに基づき明らかにする。

ここでは同じ現場の実測データより、各段の最大加速度振幅（PPA）および加速度波形を数値積分した速度波形から求めた各段の最大速度振幅（PPV）のそれぞれのばらつきの程度を求めた。

現場で行った発破は毎回孔間隔または孔当たり薬量を変化させている（ただし1回の発破では全孔同一薬量）ためこれらを統一するために、一回の段発発破での各段の最大加速度振幅を式(3)を用いて正規化を行う。

$$PPAi = PPAi' / \overline{PPA} \quad (3)$$

ここに、

PPAi: i段目の正規化された最大加速度振幅

PPAi': i段目の最大加速度振幅

\overline{PPA} : 一回の段発発破の各段の最大加速度振幅の平均値

以上のようにして、計51回の発破振動波形（全PPAiデータ数=690）について得られた正規化された加速度振幅の分布をヒストグラムで示したものが図-2である。ここでは、雷管の起爆秒時のばらつきによる前段と後段の波形の重畳による影響を排除するため、全く重畳が認められないものに対して調査を行った。また、発破時に20段全てを用いない発破もいくつか存在したため、全PPAiデータ数=51回の発破×20段とはなっていない。

更に、PPVについて同様にして正規化した速度振幅の分布をヒストグラムで示したものを図-3に示す。これらの図を見ると、発破の荷の重さ・軽さに起因する最大加速度あるいは最大速度の振幅はほぼ正規分布していることが分かる。また、図-2、3の関係において、PPAiおよびPPViに対して得られた振幅の変動

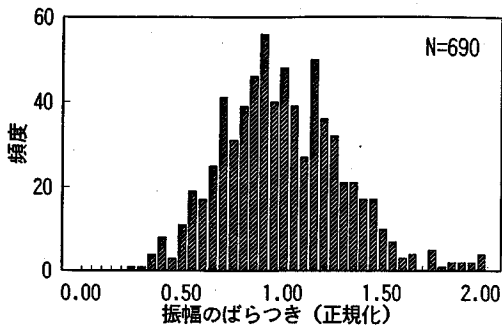


図-2 正規化した加速度振幅のばらつきのヒストグラム

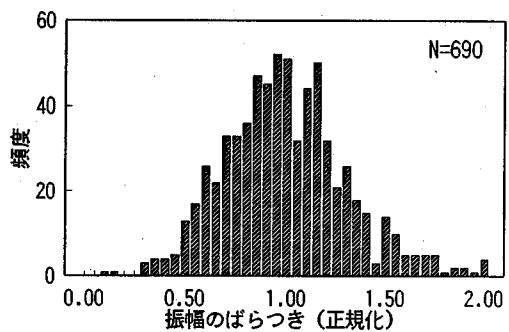


図-3 正規化した速度振幅のばらつきのヒストグラム

表-3 振幅のばらつき

	変動係数
加速度波形から求めた振幅のばらつき	0.283
速度波形から求めた振幅のばらつき	0.293

係数を表-3に示す。なお、表-3の変動係数は一回の発破毎にPPAi, PPViの変動係数を求め、これを全発破51回について平均したものである。これらの図表より振幅のばらつきはかなり大きいことが分かる。

(3) 波形のばらつき

次に、同じように実測された発破振動の波形を見ると発破振動波形パターンの違いが観察される。これもC₂の要因による影響と考えられる。そこで、計測により得られた加速度のデータを数値積分して求めた発破振動速度波形を用いて1孔毎の単発発破振動の波形の抽出を行い目視によりその波形の分類を行った。

図-4に目視によって分類された代表的な単発発破振動の速度波形の5パターン(A~E)を示す。Aパターンは振幅のピークが振動の始めに発生しそれが減衰する形のもの、Bパターンはピークが2つあるもの、Cパターンはピークが3つあるもの、Dパターンはピークが遅れて生じるもの、Eパターンはピークが正側

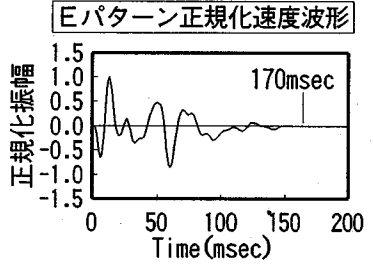
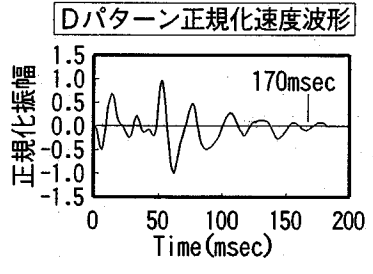
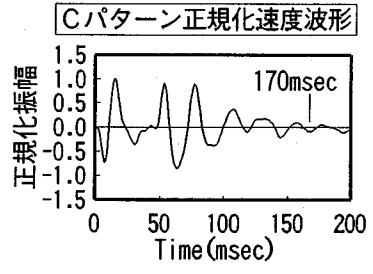
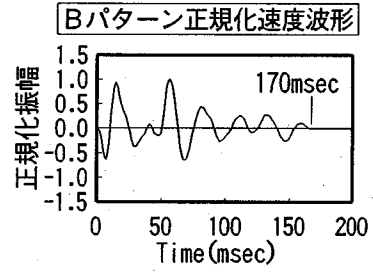
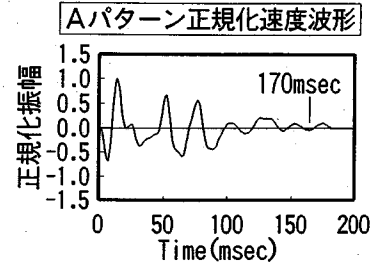


図-4 速度波形パターン(A~Eパターン)の違い

と負側に1つずつあるものであり、全PPAiデータ数=690の中から波形を読みとれた506のPPAiデータ数が、ほぼこの特徴を持ったパターンに分類できた。

図-5に全データについて5つのパターンの出現頻

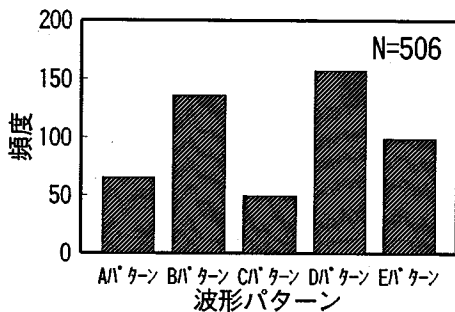


図-5 全データによる速度波形パターンの発生頻度

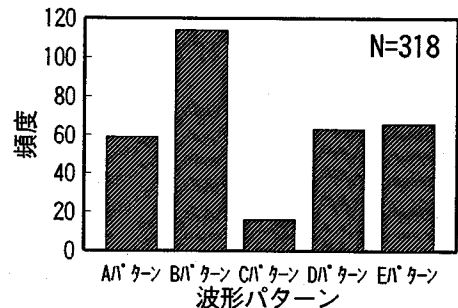


図-6 第2地点発破 (P6~P11) のデータによる速度波形パターンの発生頻度

度のヒストグラムを描いた。これを見ると5パターン中でD、Bパターンの出現が多く、Cパターンが少ないが特に卓越した波形のパターンは見い出せない。また、1回の発破について見ると、各段毎にパターンの異なることが多く、前段・後段によるパターンの違いやピットによる違いも明瞭な差はなかった。たとえば、図-6に第2地点の発破(ピット名P-6~P-11)の波形パターンのヒストグラムを示すが、この結果からも特に卓越した速度波形はなく、5パターンの波形がばらついて発生していることが分かった。

以上、発破箇所周辺の地盤状態等あるいは破碎効果の違い等によって発生する最大加速度振幅値のばらつきおよび波形パターンの違いによるばらつきを実測の振動波形データからある程度明らかにすることができた。

4. 重畳シミュレーションによるばらつき因子の最大速度振幅への影響評価

(1) 発破振動速度波形を用いた重畳シミュレーションについて

発破振動に影響する要因の一つとして破碎効果の違いによる要因(要因C₂)を絞り込んだ。そして、その要因の影響を受けた 1)振幅のばらつき、2)速度波形パターンの違いを求めた。この章では、速度振幅、速度波形のばらつきおよび雷管の起爆秒時のばらつきが、最大速度振幅 (PPV) の分布 (平均値 μ , 分散 σ^2) にどのように影響しているかを明らかにする。

解析手法として、前章で求めた単発発破の速度波形を用いてこれに以下に示す各条件を与え発破振動波形を合成する重畳シミュレーション⁴⁾を行った。ここに、シミュレーションに用いるパラメータを以下のように考えた。管理できるパラメータとして、

1)段当たり孔数 (N)

2)使用段数 (i)

さらに、管理できないパラメータとして、

3)雷管の起爆秒時のばらつき

4)速度振幅のばらつき

5)速度波形パターンの違い

を用いた。これらを組み合わせることにより、一連の発破振動波形を創出する重畳シミュレーションを行った。シミュレーション回数は、1000回である。なお、今回のシミュレーションにおいて最大速度振幅への影響評価の指標として重畳孔数を用いている。ここに重畳孔数とは、宮地らが提案しているように⁴⁾、多数孔 (N) の発破の場合、複数 (N) の波がある起爆秒時のばらつきをもって重ね合わされると、得られた合成波形の最大振幅は必ずしも単孔の振幅のN倍にならないことから、得られた合成波形の最大振幅が1孔の場合の最大振幅の何倍 (n) になっているかを表したものである。重畳孔数 (n) を用いて最大速度振幅 (PPV) を表すと下式のようになる。

$$PPV = K \cdot n \cdot (W_k)^a \cdot D^{-b} \quad (4)$$

ここに、 W_k は孔当たり薬量、Dは発破点から受振点までの距離、K、a、bは定数を表す。

シミュレーションの手順は、以下のとおりである。まず、使用段数 (i) および段当たり孔数 (N) を与え、次に、段当たり孔数 (N) に応じた個々の発破孔から発生する単発の発破振動波形を、図-4に示す代表的な発破振動速度波形 (A~Eパターン) の中から乱数を用いて発生させる。なお、実現象を再現させるため、先の図-5に示した全データによる速度波形パターンの頻度に応じてシミュレーション上で発生させている。このときの起爆秒時は、使用段数 (i) に対する雷管の起爆秒時のばらつきに基づき正規乱数により与えられる。また、その速度振幅の大きさは、表-3に示した変動係数に基づき正規乱数で与えられる。この手順を、段当たり孔数 (N) 分繰り返して、これらN個の速度波形を重ね合わせることで各段の重畳速度波形を求めた。このようにして1段~20段まで

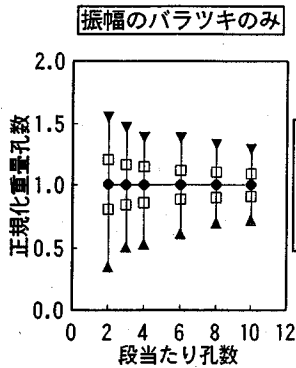


図-7 シミュレーション1-1

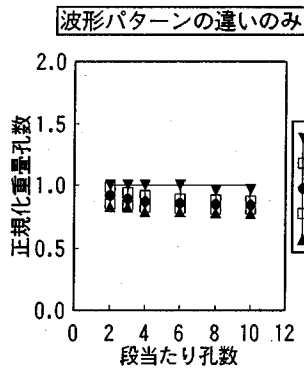


図-8 シミュレーション1-2

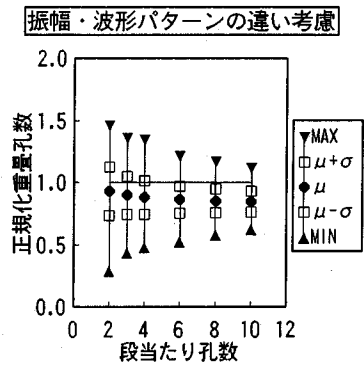


図-9 シミュレーション1-3

の波形を創出させ、これを1000回繰り返すことにより、発破振動の重畳シミュレーションを行った。ここで、発破振動の継続時間とは、一般に単発発破の速度波形の振動の立ち上がりから振幅が初動振幅の1/10程度に減少するまでの時間を意味し、その時間は平均的に170msec程度であったと示されている⁴⁾。当現場の振動速度データについても継続時間を測定したところ、ほぼ上記の値程度の継続時間であった。そこで継続時間については170msecとし、図-4に示すように振動の立ち上がりから170msecまでの波形を用いてシミュレーションを行った。

(2) 瞬発雷管を用いた発破に対する重畳シミュレーション

以下の3ケースについてシミュレーションを行った。
シミュレーション1-1: 速度振幅のばらつきのみを考慮した場合

シミュレーション1-2: 速度波形パターンの違いのみを考慮した場合

シミュレーション1-3: 速度振幅のばらつきと波形パターンの違いを考慮した場合

これらの結果を図-7, 8, 9および表-4に示す。ここで、段当たり孔数(実孔数)を基準に重畳孔数の正規化を以下に行い、図中に正規化重畳孔数として示す。

$$n_i = n / N \quad (5)$$

ここに、 n_i は正規化重畳孔数、 n は重畳孔数、 N は段当たり孔数(実孔数)を表す。

ここでのシミュレーションは、瞬発雷管を用いた発破を考えている。そのため、雷管の起爆秒時のばらつきによる発破振動のばらつきは考慮していない。すなわち、 C_2 の要因にかかわる速度振幅のばらつきと速度波形パターンの違いの2つが発破振動のばらつき、

ここでは最大速度振幅の分布(平均値 μ 、分散 σ^2)、に影響を及ぼす要因となる。

図-7は、シミュレーション1-1の速度振幅のばらつきのみを考慮した場合の結果である。速度振幅は、表-3に示した変動係数より正規乱数で発生させている。正規化重畳孔数の平均値は、段当たり孔数にかかわらず1.0と同じである。しかし、標準偏差(σ)および最大値・最小値で表されるばらつきは大きく、特に、段当たり孔数が少なくなるに従って大きくなっている。たとえば、

段当たり 2孔の場合が、 $\sigma = 0.200$

段当たり 10孔の場合が、 $\sigma = 0.092$

であり、それらには約2倍の差がある。振幅のばらつきには起爆の秒時誤差(あるいはばらつき)にかかわる要因がないため、実孔数全数がすべて斉発し、その結果、平均重畳孔数は実孔数と等しくなったものと考えられる。しかし、速度振幅のばらつきは、そのまま重畳孔数のばらつきに影響したと考えられる。各段の重畳孔数そのもののばらつきはほぼ同じであるが、正規化して実孔数に対する重畳孔数のばらつきの大きさを見ると、段当たり孔数が少なくなるほど、ばらつき(標準偏差)は大きくなっている。

図-8は、速度振幅の影響を考慮せず図-4に示す速度波形パターンのみを図-5の発生頻度に応じて乱数を用いて発生させたものである(シミュレーション1-2)。これを見ると、正規化重畳孔数の平均値 μ は段当たり孔数が多くなるほどわずかであるが小さくなっている。

段当たり孔数 2孔で、 $\mu = 0.92$

段当たり孔数 10孔で、 $\mu = 0.84$

であり、約0.91倍の差がある。但し、各段の正規化重畳孔数の標準偏差は、速度振幅のみを考慮したシミュレーション1-1の標準偏差と比べ、

段当たり孔数 2孔の場合、 $0.065/0.200 = 0.33$ 倍

段当たり孔数 10孔の場合、 $0.031/0.092 = 0.34$ 倍と小さくなっている。

表-4 瞬発雷管を用いた発破の場合の正規化重畳孔数

段当たり孔数	シミュレーション1-1 振幅のみ考慮		シミュレーション2 波形のみ考慮		シミュレーション3 振幅、波形を考慮	
	平均値 μ	標準偏差 σ	平均値 μ	標準偏差 σ	平均値 μ	標準偏差 σ
2	1.00	0.200	0.92	0.065	0.93	0.196
4	1.00	0.144	0.87	0.046	0.88	0.135
6	1.00	0.117	0.86	0.038	0.86	0.108
8	1.00	0.103	0.85	0.034	0.85	0.084
10	1.00	0.092	0.84	0.031	0.84	0.084

速度波形パターンの違いは換言すれば振幅のピーク数の違いを表したもので、波形パターンによってそれは異なる。そして、このピークとピークとのずれが、実は雷管の起爆秒時のばらつき的な役割をシミュレーション上果たしており、この見方に立てば全実孔数は見かけ上斉発をせず、その結果、重畳の確率が小さくなったものと考えられる。また、段当たり孔数が多くなるほど、振幅のピークのずれによるばらつきが大きくなり重畳の確率が小さくなるため、その結果、重畳孔数が小さくなったものと考えられる。但し、波形パターンの違いそのもののばらつきは、さほど小さくなく、そのため重畳孔数のばらつきも小さく、その結果、速度振幅のみを考慮したシミュレーション1-1の結果と比較して明らかにばらつきは小さくなったものと考えられる。

次に、図-9が速度振幅と速度波形パターンの両方のばらつきを考慮したシミュレーション3の結果である。実際の瞬発雷管を用いた場合の発破振動のばらつきに対応するものと考えられる。これを見ると、図-7（シミュレーション1-1）と図-8（シミュレーション2）の結果を重ねたような結果となっている。表-4の正規化重畳孔数の平均値 μ を見ると、

シミュレーション2が、 $\mu = 0.92 \sim 0.84$

シミュレーション3が、 $\mu = 0.93 \sim 0.84$

と両者は近い値である。また、標準偏差 σ を見ると、

シミュレーション1-1が、 $\sigma = 0.200 \sim 0.092$

シミュレーション3が、 $\sigma = 0.196 \sim 0.084$

と近い値を示している。

以上のことから、瞬発雷管を用いた場合、発破振動のばらつきに速度振幅のばらつきおよび速度波形パターンの違いがそれぞれ影響していることが分かる。特に、重畳孔数の平均値には速度波形パターンの違いが主な影響を及ぼしており、また、重畳孔数のばらつきには、速度振幅のばらつきが主に影響している。雷管の起爆秒時のばらつきのみを考慮した発破設計では、瞬発雷管を用いた場合の発破振動のばらつきは考慮されていない。しかし、実際は、発破振動はばらついており、その原因が C_2 の要因にかかわる速度振幅のばらつきあるいは速度波形パターンのばらつきによって発破振動がばらつくことが今回のシミュレーション結

果から知見されたと考えられる。

また、段当たり孔数の違いによる C_2 の要因にかかわる速度振幅、速度波形パターンのばらつきの影響を見ると、たとえば、

2孔/段のときの正規化重畳孔数の

平均値は、 $\mu = 0.93$

標準偏差は、 $\sigma = 0.196$

また、10孔/段のときは

平均値は、 $\mu = 0.84$

標準偏差は、 $\sigma = 0.084$

である。段当たり孔数が2孔から10孔に増えることによって、

平均値は、 $(0.84/0.93) = 0.90$ 倍

になっているのに対し、

標準偏差は、 $(0.084/0.196) = 0.43$ 倍

になっている。段当たり孔数が多いとき、そのばらつきは比較的少なく、しかも重畳孔数も小さくなっている。このことを、発破振動の予測あるいは管理の立場から見ると、段当たり孔数が多いことは、発破振動のばらつきが少なく管理上有利であると考えられる。これに対し、段当たり孔数が少なくなると、そのばらつきは大きくなり、重畳孔数も実孔数に近くなってきて、段当たり孔数が多い場合に比べると、発破振動の予測あるいは管理を行う上で、不利であることが分かる。

C_2 の要因にかかわる速度振幅、速度波形パターンのばらつきが発破振動のばらつき、つまり最大速度振幅の分布（平均値 μ 、分散 σ^2 ）に影響を与えており、かつ段当たり孔数の違いによってその特性が異なることが知見された。

(3) 段発雷管を用いた発破に対する重畳シミュレーション

段発雷管は、そこに装置された延時薬等の延時装置によって起爆秒時が設定される。しかし、表-1に示したようにそれには起爆秒時のばらつきがあり、発破振動のばらつきに影響を及ぼしているものと考えられる。そのため、重畳孔数の概念を用いた発破設計を考える場合、この雷管の起爆秒時のばらつきによる重畳孔数への影響を考慮する必要があると考えられ、過去、

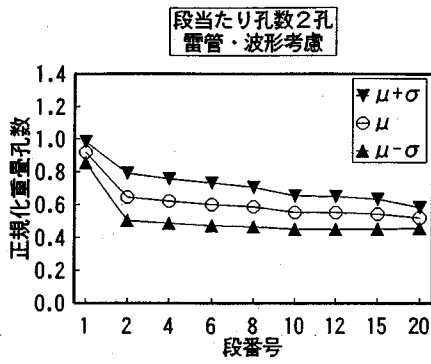


図-10 シミュレーション2-1

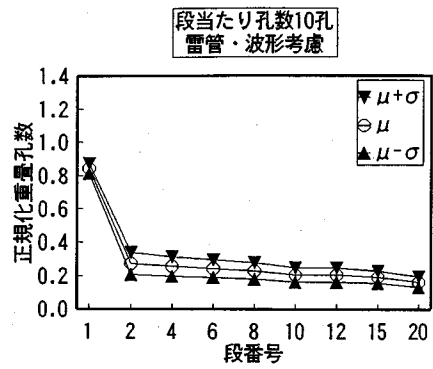


図-11 シミュレーション2-1

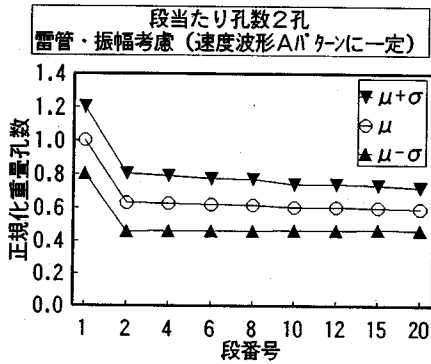


図-12 シミュレーション2-2 (A)

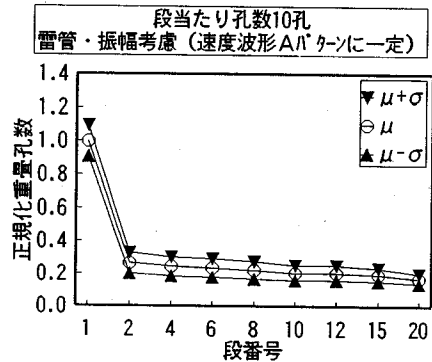


図-13 シミュレーション2-2 (A)

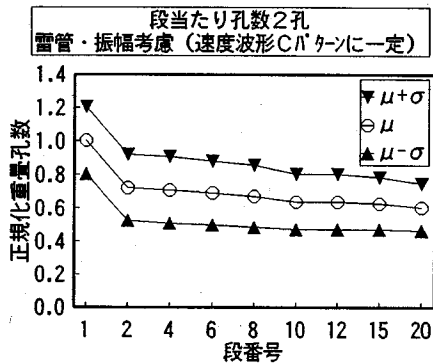


図-14 シミュレーション2-2 (C)

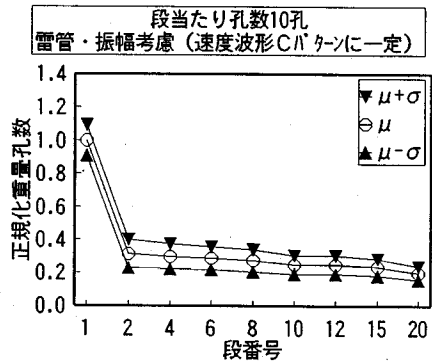


図-15 シミュレーション2-2 (C)

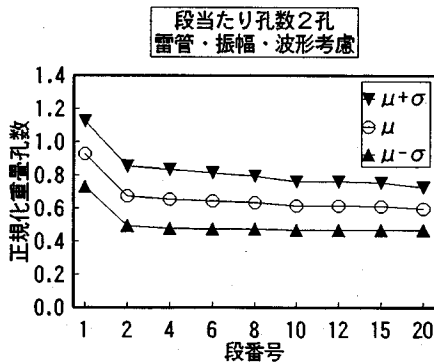


図-16 シミュレーション2-3

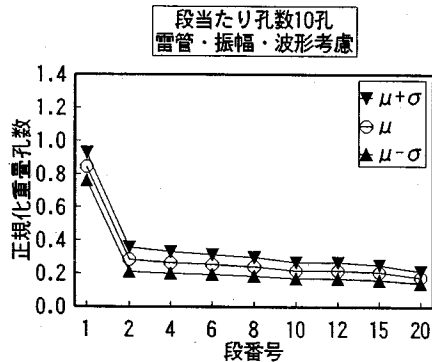


図-17 シミュレーション2-3

表-5 振幅のばらつきによる影響の大きさの把握
(シミュレーション2-1とシミュレーション2-3の比較)

正規化重畳孔数の平均値 μ				
2孔/段	シミュ2-3 μ_3	シミュ2-1 μ_1	$\mu_3 - \mu_1$	$\frac{\mu_3 - \mu_1}{\mu_3}$
初段	0.93	0.92	0.01	0.01
2段	0.67	0.64	0.03	0.04
10段	0.61	0.55	0.06	0.10
20段	0.60	0.52	0.08	0.13
10孔/段				
初段	0.84	0.84	0.00	0.00
2段	0.28	0.27	0.01	0.04
10段	0.22	0.21	0.01	0.05
20段	0.18	0.16	0.02	0.11
正規化重畳孔数の標準偏差 σ				
2孔/段	シミュ2-3 σ_3	シミュ2-1 σ_1	$\sigma_3 - \sigma_1$	$\frac{\sigma_3 - \sigma_1}{\sigma_3}$
初段	0.196	0.065	0.131	0.67
2段	0.181	0.144	0.037	0.20
10段	0.146	0.101	0.045	0.31
20段	0.131	0.064	0.067	0.51
10孔/段				
初段	0.084	0.031	0.053	0.63
2段	0.073	0.066	0.007	0.10
10段	0.049	0.043	0.006	0.12
20段	0.035	0.031	0.004	0.11

表-6 波形パターンの違いによる影響の大きさの把握
(シミュレーション2-2(A), シミュレーション2-2(C)およびシミュレーション2-3の比較)

正規化重畳孔数の平均値 μ					
2孔/段	シミュ2-2(A) μ_A	シミュ2-2(C) μ_C	シミュ2-3 μ_3	$\mu_C - \mu_A$	$\frac{\mu_C - \mu_A}{\mu_3}$
初段	1.00	1.00	0.93	0.00	0.00
2段	0.63	0.72	0.67	0.09	0.13
10段	0.60	0.64	0.61	0.04	0.07
20段	0.59	0.61	0.60	0.02	0.03
10孔/段					
初段	1.00	1.00	0.84	0.00	0.00
2段	0.26	0.31	0.28	0.05	0.18
10段	0.20	0.25	0.22	0.05	0.23
20段	0.17	0.20	0.18	0.03	0.17
正規化重畳孔数の標準偏差 σ					
2孔/段	シミュ2-2(A) σ_A	シミュ2-2(C) σ_C	シミュ2-3 σ_3	$\sigma_C - \sigma_A$	$\frac{\sigma_C - \sigma_A}{\sigma_3}$
初段	0.200	0.200	0.196	0.000	0.00
2段	0.173	0.200	0.181	0.027	0.15
10段	0.139	0.166	0.146	0.027	0.18
20段	0.127	0.141	0.131	0.014	0.11
10孔/段					
初段	0.092	0.092	0.084	0.000	0.00
2段	0.063	0.086	0.073	0.023	0.32
10段	0.046	0.057	0.049	0.011	0.22
20段	0.031	0.040	0.035	0.009	0.26

研究がなされている⁴⁾。この節では、段発雷管を用いた発破において、 C_2 にかかわる要因に雷管の起爆秒時のばらつきが加わった場合どのような影響を発破振動に及ぼしているのか、また、それが発破の仕様によってどのような特性を持つのかを明らかにする。

ここでは、以下のケースについて、段当たり孔数を2孔および10孔としてシミュレーションを行った。

シミュレーション2-1: 速度波形パターンの違いに雷管の起爆秒時のばらつきを考慮した場合

(図-10, 図-11)

シミュレーション2-2(A): 振幅のばらつきに雷管の起爆秒時のばらつきを考慮した場合(但し、速度波形パターンはAパターンに固定)

(図-12, 図-13)

シミュレーション2-2(C): 振幅のばらつきに雷管の起爆秒時のばらつきを考慮した場合(但し、速度波形パターンはCパターンに固定)

(図-14, 図-15)

シミュレーション2-3: 振幅のばらつき及び波形パターンの違いに雷管の起爆秒時のばらつきを考慮した場合

(図-16, 図-17)

これらの結果から、まず、 C_2 の要因にかかわる速度振幅のばらつきおよび速度波形パターンの違いが、

段発雷管を用いた発破の場合、最大速度振幅の分布(平均値 μ 、分散 σ^2)に対してどのような特性を持つか明らかにすることを試みた。

はじめに、速度振幅のばらつきの影響を検討する。速度波形パターンの違いに雷管の起爆秒時のばらつきを考慮した場合(シミュレーション2-1)(図-10, 図-11)と振幅のばらつき及び波形パターンの違いに雷管の起爆秒時のばらつきを考慮した場合(シミュレーション2-3)(図-16, 図-17)の結果を比較した。シミュレーション2-3の結果は、 C_2 の要因にかかわる振幅、波形パターンのばらつきおよび雷管の起爆秒時のばらつきすべてを考慮したものである。これに対し、シミュレーション2-1は、振幅のばらつきに関する影響は考慮されていない。つまり、この2つのシミュレーション結果を比較することで、速度振幅のばらつきの影響を把握できると考えたからである。表-5に比較の結果を示す。正規化重畳孔数の平均値 μ に関して、シミュレーション2-1とシミュレーション2-3の差(表中の $\mu_3 - \mu_1$)が大きいほど、速度振幅のばらつきの影響が大きいものと考えられ、また、全体の重畳孔数に占める影響の度合いが、表中の $(\mu_3 - \mu_1)/\mu_3$ で表されると考えられる。これらの結果を見ると、いずれの値も比較的小さく、最大速度振幅(PPV)の平均値 μ への影響はさほど大きくない。これに対し、標準偏差 σ を見ると、平均値の結果に比較してその影響は大きく、特に、2孔/段の

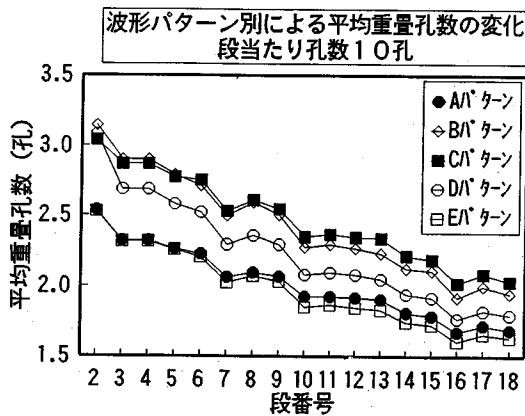


図-18 速度波形パターン別による重畳孔数の平均値の変化

2段以降では、

$$(\sigma_3 - \sigma_1) / \sigma_3 = 0.20 \sim 0.51$$

である。このことから、速度振幅のばらつきが、最大速度振幅 (PPV) のばらつき (分散 σ^2) に大きく影響を及ぼしていることが分かる。このことは、瞬発雷管を用いた発破の場合のシミュレーションと同様な結果である。

次に、速度波形パターンの違いが、最大速度振幅の分布 (平均値 μ , 分散 σ^2) に及ぼす影響を検討する。3. (3)で明らかにしたようにA~Eパターンの5つの速度波形パターンが生じている。図-18に段発発破の場合の波形パターンのみを変化させた場合の重畳孔数の平均値を示す。ここで明らかのようにAパターンとCパターンがほぼその最大と最小を与えている。前節で述べたように、速度振幅のピークのずれの間隔が、雷管の起爆秒時のばらつきの役割を果たしていると考えられる。このことから、振幅のピーク数が最も少ないAパターンと、最も多いCパターンを用いて、速度波形パターンの違いによる影響の大きさを考察する。つまりシミュレーション2-2(A)の結果 (図-12, 図-13) とシミュレーション2-2(C)の結果 (図-14, 図-15) の差が、速度波形パターンの違いによる影響の大きさに相当し、それをシミュレーション2-3の結果 (図-16, 図-17) と比較することで、最大速度振幅 (PPV) に対する影響の度合いを定量的に把握できると考えた。

表-6に、正規化重畳孔数の平均値 μ 等の比較を示す。これを見ると、10孔/段の2段以降の結果が、

$$(\mu_C - \mu_A) / \mu_3 = 0.17 \sim 0.23$$

であり、2孔/段の結果より値が大きくなっている。このことから、波形パターンの違いが最大速度振幅 (PPV) の平均値 μ に及ぼす影響は、段当たり孔数が増えるほど大きくなっていることが分かる。この結

果は、瞬発雷管の場合のシミュレーション結果と合致する。また、標準偏差 σ を見ると、2孔/段、10孔/段ともその影響は大きく、瞬発雷管の場合のシミュレーション結果とは異なり、波形パターンの影響が最大速度振幅 (PPV) のばらつき (分散 σ^2) にも及んでいることが分かる。

以上、速度振幅のばらつきおよび速度波形パターンの違いが最大速度振幅 (PPV) の分布に及ぼす影響の度合いをそれぞれ明らかにした。しかし、速度振幅のばらつきおよび速度波形パターンの違いは、 C_2 の要因にかかわる因子であり、上記のシミュレーション解析はその因子の持つ特性を個々に明らかにできただけである。さらに、工学的な知見を得るためには、 C_2 の要因にかかわる因子および雷管の起爆秒時のばらつきが発破振動のばらつき全体に及ぼす関係を明らかにする必要があると考えられる。そこで、次に、 C_2 の要因にかかわる速度振幅、速度波形パターンのばらつきに雷管の起爆秒時のばらつきを考慮した場合のシミュレーション結果 (シミュレーション2-3) を基に以下、考察を行う。

シミュレーションは、DS雷管の初段~20段を対象に行っている。初段と2段目以降の重畳孔数の結果を比較することによって上記の2つの要因が発破振動に与える影響を明らかにしたいためである。つまり、初段は、瞬発雷管を用いた場合の結果と同じ結果であり、雷管の起爆秒時のばらつきによる影響は含まれていない。 C_2 の要因にかかわる速度振幅、速度波形パターンのばらつきの影響のみによって発破振動がばらついた結果である。これに対し、2段以降の結果は、各段の段発雷管が持つ起爆秒時のばらつきによる影響が発破振動をばらつかせる要因として初段の結果に加わった結果であると考えられる。

たとえば、図-19にその概念を示すように、実孔数を正規化した1の値と初段の正規化重畳孔数 (以下、Aと称す) との差 (以下、Bと称す) が、 C_2 の要因にかかわる速度振幅、速度波形パターンのばらつきによる影響の程度を表していると考えられる。また、初段と各段との差 (以下、Cと称す) が雷管の起爆秒時のばらつきによる影響の程度を表していると考えられる。つまり、A、BおよびCを定量的に把握し、これらを比較することで、 C_2 の要因にかかわる速度振幅、速度波形パターンのばらつきと雷管の起爆秒時のばらつきのそれぞれの発破振動に与える影響の度合いを明確にすることができると考えられる。また、シミュレーションは、段当たり孔数を2孔、10孔の2ケースとした。段当たり孔数が異なる場合の2つの要因が発破振動に及ぼす影響の違いを明らかにするためである。

図-16, 17を見ると、図-16の2孔/段の場

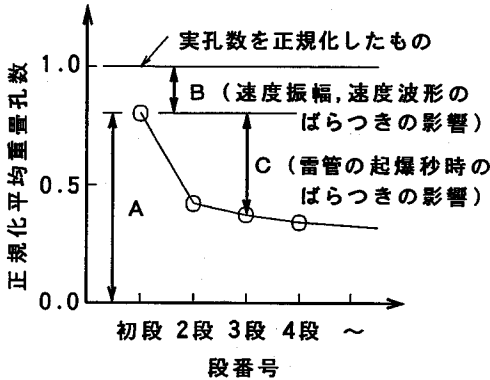


図-19 発破振動全体に及ぼす速度振幅，速度波形および雷管の起爆秒時のばらつきの影響に関する概念図

合に比べ，図-17の10孔/段の場合の方が，初段と2段以降の正規化重畳孔数の平均値の差が大きいことおよび正規化重畳孔数のばらつきが小さいことが分かる。

表-7にこのシミュレーションで求めた正規化重畳孔数の平均値，標準偏差，それらの各段の差および比を示す。

まず，初段の正規化重畳孔数の平均値及び標準偏差を見ると，初段（前述のA）と1（実孔数を正規化した値）との差（前述のB）は，先に述べたようにC₂の要因によって生じた速度振幅，速度波形パターンの影響を表す値であると考えられる。このことから，表-7に示すBの値を見ると，瞬発（初段）での速度振幅，速度波形パターンのばらつきによる影響は，正規化重畳孔数の平均値μで表すと以下のようになることが分かる。

2孔/段で， $\mu=0.07$

10孔/段で， $\mu=0.16$

また，そのときのばらつきは，表-7中のF，Gの標準偏差σで示すと，以下のようになることが分かる。

2孔/段で， $\sigma=0.196$

10孔/段で， $\sigma=0.084$

このように，速度振幅，速度波形パターンのばらつきの影響はすでに述べたものと同様に，正規化重畳孔数の平均値に関しては段当たり孔数の多い方が，標準偏差に関しては段当たり孔数の少ない方が影響が大きい。

また，初段と各段との差（前述のC）は，各段での雷管の起爆秒時のばらつきによる影響を表す値であると考えられる。これを正規化重畳孔数の平均値μで示すと，たとえば，表-7中のC₁₋₂，C₁₋₁₀およびC₁₋₂₀より，

2孔/段の場合 2段では， $\mu=0.26$

表-7 雷管の起爆秒時のばらつきによる影響の大きさの把握（シミュレーション2-3の段当たり孔数が異なる場合の比較）

正規化重畳孔数の平均値μ		
	2孔/段	10孔/段
A: 初段	0.93	0.84
B: 1(実孔数)-初段	0.07	0.16
2段		
C ₁₋₂ : 初段-2段	0.67	0.28
C ₁₋₂ /B	3.7	3.5
C ₁₋₂ /A	0.28	0.67
10段		
C ₁₋₁₀ : 初段-10段	0.61	0.22
C ₁₋₁₀ /B	0.32	0.62
C ₁₋₁₀ /A	4.6	3.9
C ₁₋₁₀ /A	0.34	0.74
20段		
C ₁₋₂₀ : 初段-20段	0.60	0.18
C ₁₋₂₀ /B	0.33	0.66
C ₁₋₂₀ /A	4.7	4.1
C ₁₋₂₀ /A	0.35	0.79

正規化重畳孔数の標準偏差σ				
	初段	2段	10段	20段
F: 2孔/段	0.196	0.181	0.141	0.131
F/F	1.00	1.00	1.00	1.00
G: 10孔/段	0.084	0.073	0.049	0.035
H/F	0.43	0.40	0.35	0.27

10段では， $\mu=0.32$

20段では， $\mu=0.33$

であることが分かる。

次に，段発雷管を用いた発破での，瞬発（初段）の速度振幅，速度波形パターンのばらつきの影響に対する，雷管の起爆秒時のばらつきによってもたらされた影響の度合いは，どのくらいであろうか。表-7中の，初段の正規化重畳孔数の平均値（A）と1（実孔数の正規化した値）との差（B）に対する初段と各段との平均値の差（C）の比（表中のC₁₋₂/B，C₁₋₁₀/BおよびC₁₋₂₀/B）によって，その度合いが表されていると考えられる。これを見ると，雷管の起爆秒時のばらつきの影響（C）は，速度振幅，速度波形パターンのばらつきの影響（B）に対して，たとえば，

2孔/段の 2段で， $(0.26/0.07=)$ 3.7倍

10段で， $(0.32/0.07=)$ 4.6倍

20段で， $(0.33/0.07=)$ 4.7倍

10孔/段の 2段で， $(0.56/0.16=)$ 3.5倍

10段で， $(0.62/0.16=)$ 3.9倍

20段で， $(0.66/0.16=)$ 4.1倍

であることが分かる。段当たり孔数の違いにかかわらず，ほぼ同じ割合で段数に応じて影響がでている。

このことから，各段の雷管の起爆秒時のばらつきに

よる影響は、段当たり孔数の違いにかかわらず程度であることが知見される。また、雷管の起爆秒時のばらつきによる影響の方が、 C_2 の要因にかかわる影響よりかなり大きいことも知見される。

しかし、全体の発破振動のばらつきから見た場合、雷管の起爆秒時のばらつきによる影響の度合いはどうか。初段の正規化重畳孔数の平均値(A)に対する初段と各段との正規化重畳孔数の平均値の差(C)、つまり、各段の雷管の起爆秒時のばらつきによる影響の度合いとの比を見てみると、表-7の C_{1-2}/A 、 C_{1-10}/A および C_{1-20}/A に示すように以下のようなになる。

2孔/段の	2段で、(0.26/0.93=) 0.28倍
	10段で、(0.32/0.93=) 0.34倍
	20段で、(0.33/0.93=) 0.35倍
10孔/段の	2段で、(0.56/0.84=) 0.67倍
	10段で、(0.62/0.84=) 0.74倍
	20段で、(0.66/0.84=) 0.79倍

これらを見ると、最大速度振幅(PPV)の平均値 μ に対して、雷管の起爆秒時のばらつきによる影響は、段当たり孔数が少ないほど小さく、段当たり孔数が多くなるほど大きくなることが分かる。

つまり、発破振動を最大速度振幅の平均値 μ から見た場合、雷管の起爆秒時のばらつきの要因は、段当たり孔数の違いによってその影響の度合いが異なることが知見される。

次に、最大速度振幅のばらつき(分散 σ^2)に対する影響の程度について、表-7の正規化重畳孔数の標準偏差から見てみる。2孔/段の標準偏差 σ_2 (表中のF)と10孔/段の標準偏差 σ_{10} (表中のG)を比較すると、段当たり孔数によって、ばらつきの程度が異なっていることが分かる。たとえば、雷管2段での標準偏差 σ_{10} と σ_2 の比を見ると(表-7中のH/F)。

$$\sigma_{10}/\sigma_2=0.073/0.181=0.40$$

となっており、10孔/段の標準偏差は、2孔/段の標準偏差の0.40倍になっている。段当たり孔数が2孔から10孔へと多くなるに従って、標準偏差は小さくなっている。このことは、10段目あるいは20段目でも同様な傾向が見られる。段当たり孔数が少ないほどばらつきが大きく、段当たり孔数が多いほどばらつきが小さいことが分かる。明らかに、段当たり孔数によって、正規化重畳孔数(あるいは最大速度振幅)のばらつきが異なる。

ばらつきの存在は、管理または設計を行う上で制御困難なものである。段当たり孔数が異なるとき、ばらつきの大きさが異なることは、留意すべき特性と考えられる。

(4) シミュレーション結果および考察

シミュレーションの結果を以下にまとめてみる。

① 瞬発雷管を用いた発破では、 C_2 の要因にかかわる速度振幅、速度波形パターンのばらつきの影響が、また、段発雷管を用いた発破では、速度振幅、速度波形パターンのばらつきと雷管の起爆秒時のばらつきが合成された影響による重畳孔数の変化が見られた。

② これによると、瞬発(初段)での C_2 の要因にかかわる速度振幅、速度波形パターンのばらつきによる影響を、正規化重畳孔数の平均値および標準偏差で定量的に把握することができた。

③ また、段発雷管を用いた発破での、瞬発(初段)の C_2 の要因にかかわる速度振幅、速度波形パターンのばらつきの影響に対する、雷管の起爆秒時のばらつきによってもたらされた影響の度合いを、正規化重畳孔数の平均値の比較によって定量的に把握でき、段当たり孔数にかかわらず、同じ割合で段数に応じて影響が生じていること、また、 C_2 の要因にかかわる影響より3~4倍大きいことが明らかにされた。

④ 一方、最大速度振幅の平均値 μ から見た場合、重畳孔数の平均値から、雷管の起爆秒時のばらつきによる影響は、段当たり孔数が少ないほど小さく、段当たり孔数が多くなるほど大きくなることが分かる。

⑤ しかし、最大速度振幅のばらつきを重畳孔数の標準偏差で見ると、雷管の起爆秒時のばらつきによる影響によって、段当たり孔数によってばらつきの程度が異なり、段当たり孔数が少ないほどばらつきが大きく、段当たり孔数が多いほどばらつきが小さいことが分かる。

以上のように、瞬発雷管あるいは段発雷管を用いた場合の発破における、 C_2 の要因にかかわる速度振幅、速度波形パターンのばらつきによる影響、また、雷管の起爆秒時のばらつきによる影響の度合いをある程度定量的に把握することができ、その特性も明らかにすることができた。

これらの結果から以下のことが考察できる。

① C_2 の要因にかかわる速度振幅のばらつき、速度波形パターンの違いが、発破振動に影響を及ぼしている。

② 特に、瞬発雷管を用いた発破あるいは段当たり孔数が少ない発破ではその影響が大きく、ばらつきの大きい発破となる傾向があり、重畳孔数で管理する場合そのばらつきを十分に考慮することが必要となってくる。

③ 但し、雷管の起爆秒時のばらつきによる影響も

表-8 シミュレーションより求めた重畳孔数の平均値と標準偏差

段当たり孔数	重畳孔数 (孔)	段番号									
		1段	2段	4段	6段	8段	10段	12段	15段	20段	
2孔	平均値	1.85	1.35	1.31	1.29	1.27	1.23	1.23	1.22	1.19	
	標準偏差	0.392	0.362	0.354	0.343	0.322	0.292	0.291	0.287	0.262	
3孔	平均値	2.68	1.61	1.54	1.50	1.47	1.39	1.39	1.35	1.29	
	標準偏差	0.462	0.429	0.391	0.386	0.367	0.328	0.327	0.306	0.258	
4孔	平均値	3.51	1.83	1.75	1.69	1.65	1.54	1.54	1.49	1.38	
	標準偏差	0.539	0.491	0.443	0.447	0.408	0.367	0.366	0.335	0.277	
5孔	平均値	4.33	2.05	1.94	1.87	1.80	1.67	1.67	1.60	1.47	
	標準偏差	0.595	0.536	0.488	0.482	0.441	0.379	0.378	0.370	0.296	
6孔	平均値	5.15	2.22	2.09	2.01	1.93	1.79	1.79	1.70	1.54	
	標準偏差	0.649	0.592	0.517	0.509	0.474	0.415	0.411	0.385	0.313	
8孔	平均値	6.79	2.56	2.39	2.28	2.19	2.00	2.00	1.89	1.67	
	標準偏差	0.752	0.662	0.584	0.562	0.533	0.464	0.457	0.415	0.340	
10孔	平均値	8.44	2.84	2.64	2.53	2.40	2.18	2.17	2.05	1.78	
	標準偏差	0.839	0.727	0.651	0.600	0.568	0.495	0.487	0.444	0.353	
15孔	平均値	12.54	3.48	3.19	3.03	2.89	2.59	2.58	2.44	2.05	
	標準偏差	0.984	0.864	0.752	0.718	0.682	0.563	0.559	0.508	0.399	

大きく、特に、段当たり孔数が多い発破であるほど、その影響が大きくなっており、この場合は、雷管の起爆秒時のばらつきのみを考慮することによって、十分、発破振動の予測あるいは管理が可能であることが分かる。

5. 発破工法の違いから見たC₂の要因および雷管の起爆秒時のばらつきが及ぼす影響特性について

前章で考察したようにシミュレーション結果を見ると特徴的なことは、段当たり孔数の違いによって、発破振動のばらつきの影響にかかわる要因が異なることである。つまり、段当たり孔数が少ない場合、雷管の起爆秒時のばらつきによる影響の度合いが小さく、C₂の要因にかかわる速度振幅、速度波形パターンのばらつきによる影響が大きくなる。これに対し、段当たり孔数が多くなると発破振動のばらつきは、雷管の起爆秒時のばらつきによる波の重畳の度合いが大きく影響し、C₂の要因による発破振動のばらつきの影響は小さくなっている。

一方、発破は、その工法によって段当たり孔数や使用段数が異なってくる。たとえば、トンネル掘進発破では、使用段数は18段あるいは20段等の場合があり、段当たり孔数も10孔あるいは20孔等の場合もある等、多段多孔の発破を用いる。これに対し、造成地等の岩盤掘削で見られる明かり発破では、使用段数、段当たり孔数ともトンネル掘進発破と比較が少ない傾向にある。特に、発破振動の低減を考慮した盤下げ発破では、段当たり孔数が1, 2孔の場合もある。

以上のことから、明かり発破においては、C₂の要因すなわち破砕効果の良否によって変わる要因による速度振幅、速度波形のばらつきが、雷管の起爆秒時の

ばらつきによる要因よりも発破振動のばらつきに大きく影響を及ぼしていると考えられる。明かり発破では、特に孔当たり起砕量がトンネルのそれと比べ遙かに多く、発破の荷の重さ・軽さで表現されるC₂の要因にかかわる影響がさらに大きくなるものと考えられる。

これに対し、トンネル発破では、多段多孔の発破を用いることから、雷管の起爆秒時のばらつきの影響が大きいと考えられる。事実、雷管の起爆の秒時誤差（あるいはばらつき）をトンネル発破振動の評価に取り入れることで、全段ほぼ同じK値を用いて発破振動の予測が精度良く行えることが宮地らによって示されている⁴⁾。つまり、雷管の起爆秒時のばらつきを設計に考慮すれば、発破の荷の重さ・軽さで表現されるC₂の要因にかかわる影響が小さく、ほぼ同じK値とはなるということであり、今回の重畳シミュレーション結果とも合致するものと考えられる。

6. 実測データによる重畳シミュレーション結果の検討

以上のことが考察されたが、今回の重畳のシミュレーション結果が実際の施工データと比較してどれだけ適合しているか、以下検討を行った。

なお、上記の重畳シミュレーションと同等にC₂の要因と雷管の起爆秒時のばらつき以外の発破振動のばらつきに及ぼす影響因子を排除した上で重畳孔数を比較したいため、用いた実データは、発破源と受振点との伝播経路および受振点の地質がほぼ均一な地盤条件での計測結果を用いている。

現場Xの計測では、発破点から計測点までの距離は50~80mで、計測点は固結度の高い堆積層の上にあった。また、現場Yでの計測では、発破点から計測点までの距離は160~200mで、計測点は割れ目の少ない砂岩の岩盤上にあった。両現場で計測された波形が、

表-9 トンネル掘進発破の現場Xの実測より求めた重畳孔数 (n_{REAL})、シミュレーションより求めた重畳孔数 (n_{CAL}) およびこれらの比 (R = n_{REAL}/n_{CAL})

		使用段								変動係数
		1段	2段	3段	4段	5段	6段	7段	8段	
CASE1	実孔数(孔)	2	2	4	8	13	9	10	2	
	シミュレーションCAL(孔)	1.85	1.35	1.75	2.39	3.09	2.53	2.36	1.27	
	実測n _{REAL} (孔)	1.87	1.36	1.59	1.67	2.27	2.18	3.24	1.78	
	R1	1.01	1.01	0.91	0.70	0.73	0.86	1.37	1.40	
CASE2	実孔数(孔)	4	4	6	9	16	16	11	2	
	シミュレーションCAL(孔)	3.51	1.83	2.10	2.64	3.09	3.03	2.36	1.27	
	実測n _{REAL} (孔)	2.55	1.92	2.10	3.03	3.50	3.57	1.78	1.28	
	R2	0.73	1.05	1.00	1.15	1.13	1.18	0.76	1.01	
CASE3	実孔数(孔)	4	4	8	8	14	14	10	2	
	シミュレーションCAL(孔)	3.51	1.83	2.39	2.39	3.09	3.03	2.36	1.27	
	実測n _{REAL} (孔)	4.00	1.35	2.54	2.53	3.24	1.76	2.54	1.64	
	R3	1.14	0.74	1.06	1.06	1.05	0.58	1.08	1.30	
CASE4	実孔数(孔)	2	2	4	8	13	9	10	2	
	シミュレーションCAL(孔)	1.85	1.35	1.75	2.39	3.09	2.53	2.36	1.27	
	実測n _{REAL} (孔)	2.21	1.58	1.14	2.33	3.04	1.75	2.52	1.60	
	R4	1.19	1.17	0.65	0.97	0.98	0.69	1.07	1.27	
CASE1~4R平均値		1.02	0.99	0.91	0.97	0.97	0.83	1.07	1.24	

表-10 明かり発破の現場Yの実測より求めた重畳孔数 (n_{REAL})、シミュレーションより求めた重畳孔数 (n_{CAL}) およびこれらの比 (R = n_{REAL}/n_{CAL})

		使用段								変動係数
		1段	2段	4段	7段	10段	14段	18段		
CASE1	実孔数(孔)	2	2	2	2	2	2	2	2	
	シミュレーションCAL(孔)	1.85	1.35	1.31	1.26	1.23	1.23	1.22		
	実測n _{REAL} (孔)	1.46	0.92	1.20	1.37	1.32	1.13	1.19		
	R1	0.79	0.68	0.91	1.09	1.08	0.92	0.97	0.18	
CASE2	実孔数(孔)	2	2	2	2	2	2	2	2	
	シミュレーションCAL(孔)	1.85	1.35	1.31	1.26	1.23	1.23	1.22		
	実測n _{REAL} (孔)	1.12	0.91	1.15	1.36	1.44	1.51	1.22		
	R2	0.60	0.67	0.87	1.09	1.17	1.23	1.00	0.24	
CASE3	実孔数(孔)	2	2	2	2	2	2	2	2	
	シミュレーションCAL(孔)	1.85	1.35	1.31	1.26	1.23	1.23	1.22		
	実測n _{REAL} (孔)	1.12	0.95	1.45	0.79	1.69	1.43	1.71		
	R3	0.61	0.71	1.11	0.63	1.37	1.16	1.41	0.28	
CASE4	実孔数(孔)	2	2	2	2	2	2	2	2	
	シミュレーションCAL(孔)	1.85	1.35	1.31	1.26	1.23	1.23	1.22		
	実測n _{REAL} (孔)	1.43	0.95	0.90	1.37	1.71	1.14	1.54		
	R4	0.77	0.71	0.69	1.09	1.39	0.93	1.26	0.23	
CASE1~4R平均値		0.69	0.69	0.89	0.97	1.25	1.06	1.16		

伝播経路、受振点の地盤状態による異常な増幅あるいは反射波等によって乱されていず、前章までで行った重畳シミュレーションで用いた波形とほぼ同じ段発波形であることを確認している。それぞれの発破諸元を表-11に示す。

表-8に第3章で示した実測データを用い重畳シミュレーションを行った重畳孔数の平均値と標準偏差を示す。また、表-9にあるトンネル現場Xの4回の発破の実測データを用い式(4)から求めた重畳孔数と上記の重畳シミュレーションの重畳孔数およびそれらの比(表中ではRと示す)を示す。また、同様に、表-10にある明かり発破の現場Yの4回の発破の実測データから求めた重畳孔数と上記重畳シミュレーション結果との比較を示す。なお、Rは下式から求めた、

$$R = n_{\text{REAL}} / n_{\text{CAL}} \quad (6)$$

表-11 現場Xと現場Yの発破工法諸元

	現場X	現場Y
段当たり装薬量	0.6~4.9kg	1.6~4.7kg
孔当たり装薬量	0.3~0.4kg	1.6~2.35kg
段当たり孔数	2~16孔	1~2孔
使用爆薬	2号樓ダイナマイト	3号桐ダイナマイト, AN-F0
使用雷管	DS1~8	DS1~20

ここに、n_{REAL}は、実測から求めた重畳孔数であり、n_{CAL}は、表-8に示すシミュレーションから求めた重畳孔数の平均値である。Rが1に近いほどシミュレーションの妥当性が高いことを意味する。

表-9および表-10の結果を見ると、概ねRが1に近くになっている。一部、表-10の1段及び2段のRにばらつきが見られるが、これらは、いずれも段当たり孔数が2孔と孔数の少ない発破であり、上述の

ように、 C_2 にかかわる要因の影響が大きく速度振幅のばらつきの大きい領域の発破である。しかし、これらの実測データは、いずれも図-9の $\mu-\sigma$ 内には入っており、CASE1~4がたまたまこの小さい方の値になったものと思われる。逆に、表-9のトンネル掘進発破のRはほぼ1に近い。すでに何度も述べたように、トンネル掘進発破が多孔発破であり、そのため重畳孔数のばらつきが小さくなったためであろうと考えられる。また、Rの変動係数も現場Xで0.16~0.25、現場Yで0.18~0.28となっている。今回のシミュレーションが、実際の施工データと比較して妥当性が高いことが分かる。

これらのことから、シミュレーション結果がある程度実施工での現象を再現していること、また、この重畳孔数を発破設計に取り入れることで、トンネル発破あるいは明かり発破においてより精度良く発破振動の予測が行えることが示唆されていると考えられる。但し、明かり発破においては、 C_2 の要因にかかわる影響によるばらつきが生じており、実際の施工では、このことを十分考慮した発破振動の予測あるいは管理が必要と考えられる。

また、今回のシミュレーションは C_2 の要因および雷管の起爆秒時のばらつきの影響に着目して発破振動のばらつきの検討を行ったが、爆源から受振点までの距離が離れ、また、伝播経路と受振点の地質条件等が変化する場合、 C_2 の要因および雷管の起爆秒時のばらつきの影響の他に C_3 の要因の受振点の地盤状況の差異により変わる影響等が加わり発破振動の波形、振幅のばらつきは変化していくものと考えられる。発破設計においてはこれら他の要因への考慮も当然必要と考えられる。

7. まとめ

本研究の結果は次のようにまとめられる。

- 1) いままで不明確であった発破振動のばらつきの要因の一つである発破の荷の重さ・軽さと表現される発破による破碎効果の良否によって変わる要因(C_2 の要因)について、まず、これによって生じると考えられる発破振動速度波形及び速度振幅の個々のばらつきの程度を、実測データに基づき明らかにした。それによると、速度振幅のばらつきはほぼ正規分布しており、その変動係数は0.293であること、また、速度波形はほぼ5つのパターンに分類することができ、ある頻度をもって出現することが分かった。
- 2) 次に、これら C_2 の要因にかかわる発破振動速度波形、速度振幅のばらつきおよび雷管の起爆秒時のばらつきが発破振動のばらつきに及ぼす影響の度合いに

ついて、発破振動速度波形シミュレーションで得られた正規化重畳孔数を用いて定量的に評価することを試みた。

3) その結果、瞬発雷管を用いた発破では、速度振幅のばらつきは重畳孔数の標準偏差に、速度波形パターンの違いは重畳孔数の平均値に主として影響を及ぼすことが知見され、 C_2 の要因にかかわる影響の度合いを定量的に把握することができた。

4) また、段発雷管を用いた発破では、雷管の起爆秒時のばらつきによる影響が大きいものの、 C_2 の要因の影響は無視できず、特に段当たり孔数が少ない発破では、むしろ、 C_2 の要因にかかわる発破振動速度波形、速度振幅のばらつきの影響が大きくなり、発破振動のばらつき(正規化重畳孔数の標準偏差)が大きくなることが知見された。

5) これらのことから、段当たり孔数の少ない発破を行う明かり発破では、 C_2 の要因にかかわる影響によって発破振動のばらつきが大きくなる傾向があり、このことを考慮に入れた発破振動の予測あるいは管理が必要であること、また、段当たり孔数の多い発破を行うトンネル掘進発破では、雷管の起爆秒時のばらつきを考慮することで発破振動のばらつきがある程度管理できることが考察された。

6) また、実測データによるシミュレーション結果の検討を行った。この結果、実測データから求めた重畳孔数とシミュレーションから求めた重畳孔数との適合度から、シミュレーション結果がある程度実施工での現象を再現していること、また、この重畳孔数を発破設計に取り入れることで、トンネル発破あるいは明かり発破においてより精度良く発破振動の予測が行えることが知見でき、その妥当性と有効性を明らかにすることができた。

8. あとがき

本研究の結果より、従来、発破振動予測あるいは管理を困難にしていた発破予測式の中の定数K値について、わずかな現場のデータながらそのばらつきにかかわる要因に関して知見を得たと考えられる。しかし、定数K値にかかわる要因には未だ不明なことが多い。たとえば、要因 C_3 の受振点の地盤状況の差異により変わる要因あるいは要因 C_3 の発破域に対する受振点の方向の差により変わる要因等がある。今後、受振点及び伝播経路にかかわる要因に関する研究も併せて行う必要があると考える。

参考文献

- 1) たとえば、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わる環境技術指針, pp. 142~143, 1982年2月.
- 2) 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/V-10, pp.199~208, 1989年3月.
- 3) たとえば, 塩月隆久, 橋爪正博, 古川浩平, 中川浩二: 生活環境に対する振動レベルを用いた発破振動の評価基準と発破振動管理手法に関する研究, 土木学会論文集, No.516/V-27, pp.143~153, 1995年6月.
- 4) 宮地明彦, 古川浩平, 吉川和行, 中川浩二: 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, 土木学会論文集, No.480/V-21, pp.53~62, 1993年12月.
- 5) 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.

(1995. 6. 8 受付)

THE ANALYSIS OF DISPERSION OF BLASTING VIBRATIONS AND ASSESSMENT OF GROUND VIBRATIONS BY MEANS OF THE SIMULATION BASED ON THE OVERLAPPING HOLE NUMBER

Takahisa SHIOTSUKI, Masahiro HASHIZUME,
Kohei FURUKAWA and Koji NAKAGAWA

In the case of using blasting method to construct tunnels and house-formations in the urban or suburban area, to protect the environmental from pollution, reasonable control and accurate prediction of blast vibrations would be very important and necessary. However, it is difficult to control the blasting vibration because of many factors which could affect the distributions of the blasting waves tremendously. These factors were found and the effect related to rock fragmentation by blasting were reported in this paper. By using the data of the actual blasting wave obtained in field, both the amplitudes and the type of the wave were studied and investigated in detail. Moreover, the influence between factors which are depending on the time delay deviation of detonators, and the effect of rock fragmentation have been assessed by means of the simulation of the blasting waves. The different features between tunnelling blasting and ground surface blasting were presented according to the results of the simulation. In conclusion, a new estimation method for blasting vibrations based on the number of overlapping holes were proposed and proved to be useful for practical purposes.