

段発発破による局地的振動制御に関する一考察

茂木源人*, 星野達也**, 安達 毅*, 山富二郎*, Shao-Quan KOU***

本論文では、目的地点における振動波の重ね合わせにより発破振動を低減するための段発発破の延時秒時設計に関し、その振動低減効果に対する雷管の延時秒時誤差の影響を考察したうえで、延時秒時誤差を無視し得るIC雷管の使用を前提とした、より効率的な発破振動制御のための新しい延時秒時設計コンセプトとして、“ユニット干渉発破”を紹介する。

薬量が等しい各発破孔間の延時秒時が一定の段発発破の場合、各孔から発生する振動波を同一なものとし、目的地点に到達するそれぞれの振動波を任意の時間間隔で重ねあわせる数値シミュレーションにより、その地点における最大振動速度(PPV)と延時秒時との関係を求め、これからPPVを最小にする延時秒時が得られる。しかし、雷管内の延時薬により制御される雷管の延時秒時は誤差を含むため、実際の発破で得られるPPVにはばらつきが生じる。このようなPPVの推定分布は、主に設計延時秒時近傍におけるPPVの感度に依存するため、段発発破の延時秒時を設計する際には、最適と推定される時間間隔のほかにも、それに近い良好な推定結果を与えるものも候補として考え、誤差を考慮した上でそれぞれについて検討する必要がある。

また、“ユニット干渉発破”については、その考え方とシミュレーション結果を紹介する。この考え方に基づいた段発発破による発破振動の推定低減効果は極めて良好で、このコンセプトによる、より効率的な局地的振動制御の可能性が示された。

1. 緒 言

発破は、今日なお岩盤を破碎するのにもっとも経済的で効率が良い方法であり、世界中の鉱山、採石場、建設現場において用いられている。しかしその一方で、居住地域近傍での発破振動や騒音はさまざまな問題を巻き起こしており、特に発破振動は近隣の建造物に構造的な被害を与える可能性があるため、その最大振動速度(PPV: Peak Particle Velocity)の低減・制御技術のさらなる開発が求められている。

段発発破は一段あたりの斉発薬量を少なくできることから、効果的な発破振動低減方法のひとつとして広く用いられている。しかし近年、段発発破の延時秒時を適切に設計し、各発破孔から広がる振動波を互いに干渉させることにより、目的とする地点における局地的な振動を制御しようという試みがなされるようにな

った^{1,2)}。しかし、実際には周辺岩盤の不均質性や延時秒時の誤差などの影響により、目的地点の振動を設計通りに制御することは非常に困難である。

2. 延時秒時誤差を考慮に入れた段差設計

目的地点で観測された単孔発破の振動時間履歴と、生産発破の起爆パターンをもとに、生産発破による目的地点における振動時間履歴の推定を試みる。各孔から広がる振動波が全て単孔発破の振動波と同一であるものと仮定すると、生産発破の起爆パターンに従って、単孔発破の振動時間履歴を重ねあわせることにより、生産発破の振動時間履歴が推定される。

Fig. 1に、スウェーデンの石灰石鉱山における単孔発破の振動時間履歴を示す。この発破の最小抵抗線は28m、孔径は76mm、削孔長は15mで、その振動時間履歴は発破地点から約250m離れた、振動低減の目的地点となる民家近傍で計測された。

Fig. 2は、上記の振動時間履歴と各孔の延時秒時を元に推定した、44孔の生産発破の目的地点における振動時間履歴で、Fig. 3はその実測データである。この場合、推定PPVに対する実測PPVの比は1.21である。同様にスウェーデンの石灰石鉱山で行われた10回の振

1999年6月18日受理

*東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻
〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

TEL 03-5841-7046

FAX 03-3818-7492

**三井金属鉱業(株)

***ルレオ工科大学(スウェーデン)

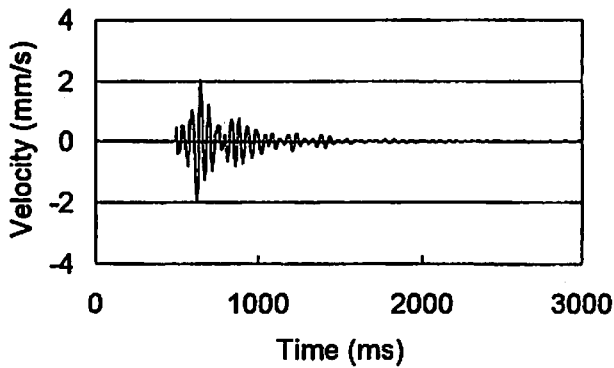


Fig. 1 Vibration time history of a single hole shot
PPV=2.04mm/s

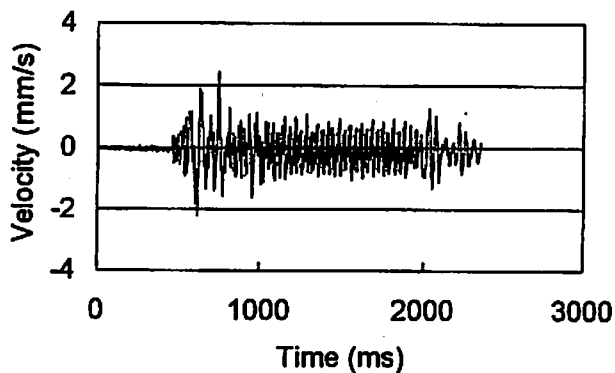


Fig. 2 Estimated vibration time history of a production blasting. PPV=2.42mm/s

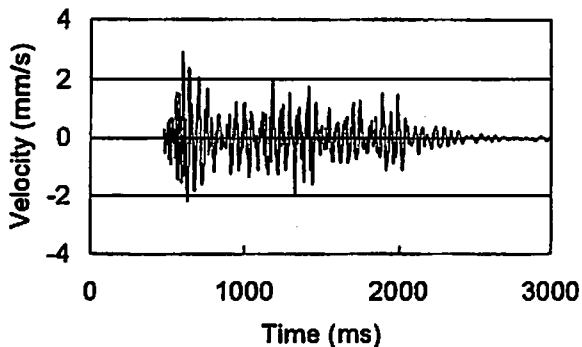


Fig. 3 Observed vibration time history of a production blasting. PPV=2.93mm/s

動計測の結果得られた、推定PPVと実測PPVの比の平均は1.248、標準偏差は0.328であった。各孔の延時秒時が、単孔発破の振動時間履歴を元に既定の段差の範囲でPPVを最小化するように設定されていることを考慮すると、実測される振動時間履歴におけるPPVが、おおむね推定値を上回る原因は、主に雷管の延時秒時誤差と岩盤の不均質性に起因するものと考えられる。

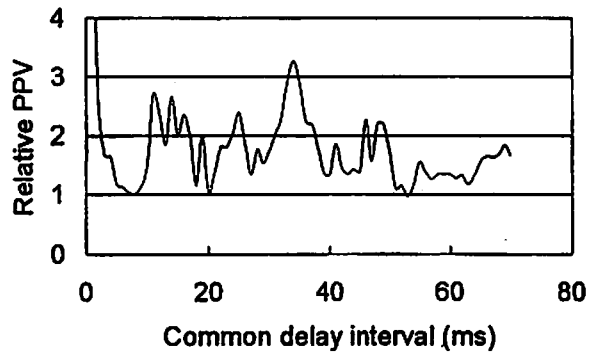


Fig. 4 Relationship between the relative PPV and the common delay interval

Fig. 4に、20孔をそれぞれ一律の時間差で起爆する段発破の延時秒時と、目的地点で推定されるPPVを、重ね合わせの基準となる単孔発破の実測振動データから求めたPPVによって正規化した相対PPVとの関係を示す。この場合、延時秒時のばらつきはないものとしており、推定される相対PPVが最小になる延時秒時は53msである。しかし、電気雷管の延時秒時には誤差があるため、実際の相対PPVにはばらつきが生じるものと考えられる。実際の相対PPVの期待値やばらつきは設定延時秒時近傍における相対PPVの感度特性や延時秒時の誤差分布に依存するため、必ずしも前述の計算上推定される相対PPVが最小となる延時秒時が最適であるとは限らない。このため、比較的小さな相対PPVを与える延時秒時の候補をいくつか選び、比較検討を行う必要がある。ここでは、53msだけでなく、8msと20msも候補として取り上げ、相対PPVに関して、延時秒時のばらつきを考慮したモンテカルロシミュレーションを行った。

一般に延時秒時の誤差は、設計延時秒時 μ を中心とした正規分布をすると考えられている。この、誤差の分布の標準偏差を σ とすると、実際の雷管では 3σ が μ の5%~10%の範囲に収まると言われている³⁾。Fig. 5は、設定延時秒時をそれぞれ8ms, 20ms, 53msとし、それぞれの誤差分布の 3σ が、それぞれの設定値の10%となる正規分布をすものと仮定し、それぞれ1000回の相対PPV推定を行った結果の分布を合わせて表示したものである。

誤差を無視した推定相対PPVが、設定延時秒時8ms, 20ms, 53msの場合、それぞれ1.01, 1.05, 0.97であるのに対し、モンテカルロシミュレーションの結果の期待値は、それぞれ1.08, 1.34, 1.36である。また、それぞれの分散は0.0045, 0.0187, 0.0175である。通常は相対PPVに対して、ある許容上限値が設定されるため、これを超える相対PPVが発生する確率が低い

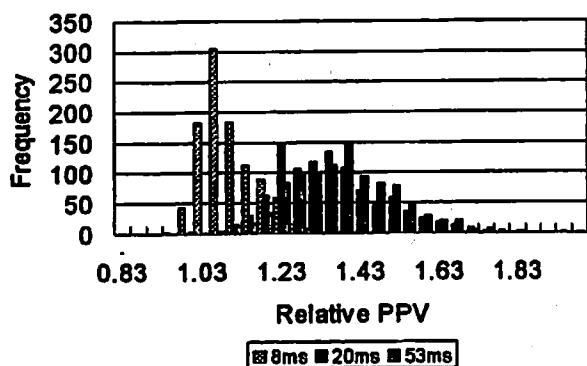


Fig. 5 Distributions of estimated relative PPVs

方が有利であることは言うまでもない。この例の場合では、相対PPVの許容上限値がよほど低い値でない限り、53msよりも8msの方が有利であることがわかる。

段発発破の段差を設計する際には、誤差を無視した延時秒時と推定相対PPVの関係から、比較的良好な相対PPVが得られることが予想されるいくつかの既定段差の候補を選び出し、それぞれの候補について、誤差を考慮した上で求められる推定相対PPVの分布を求め、それらと許容上限値との関係から最適な段差の組み合わせを決定することが望ましい。

3. IC雷管を用いたユニット干涉発破

3.1 ユニット干涉発破のコンセプト

IC雷管の延時秒時は、雷管内部のマイクロチップにより制御され、1ms刻みで0から6000ms程度まで自由に設定可能である。また、その誤差は実質的に0とみなすことができる。ユニット干涉発破はこのようなIC雷管の特性を最大限に生かす延時秒時設計法である。

目的地点において同一の波形を持つ2つの振動を、ある時間差をつけて重ね合わせるにより、その地点におけるPPVを低減できることは今まで述べてきたとおりである。いま、この合成振動波を新たな振動波と見なし、この元となる個別の震源をまとめて1つの新たな震源ユニットとみなす。次に、同様のユニットを別に設け、これらのユニット間に適切な延時秒時を設定することにより、それらの合成振動波のPPVはさらに低減される可能性がある。このように、合成振動波の元となる複数の震源を一つのユニットと見なし、これとまったく同じ震源構成によって新たなユニットを形成し、それらユニット同士に適切な延時秒時を設定することによりさらなる振動の低減を目指すというのがユニット干涉発破のコンセプトである。仮に、それぞれの重ね合わせで、卓越周波数成分を1つずつ除去していくものとする。2n段の発破ではn種類の周波数成分が除去できることになる。

振動低減の指標はPPVに限ったことではないので、ユニット間の延時秒時としては以下のようなものが考えられる。

- 1) 合成振動波のPPVが最小化される延時秒時。
- 2) 合成振動波の自己相関が最小化される延時秒時。
- 3) 合成振動波の卓越周波数を持つ正弦波の半周期。

それぞれの延時秒時設定基準を、PPV最小化基準、自己相関最小化基準、卓越周波数成分除去基準と称し、以下に具体的な計算例を示す。

3.2 PPV最小化基準

基準となる単孔発破の目的地点における振動時間履歴をFig. 6(a)に示す。これは、スウェーデンの石灰石鉱山で行われた、最小抵抗線3.3m、孔径89mm、孔長15mの発破の実測振動時間履歴で、そのPPVは3.25mm/sであった。

Fig. 7は、Fig. 6(a)の振動時間履歴を任意の延時秒時で重ね合わせた振動時間履歴により推定される、2孔の段発発破の相対PPVと延時秒時との関係である。この場合、延時秒時14msのとき最小の推定相対PPVが得られる。そこで、延時秒時を14msとしてFig. 6(a)の振動時間履歴を重ねあわせるとFig. 6(b)のよう

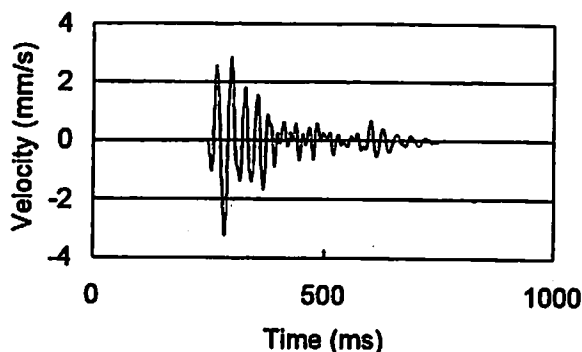


Fig. 6 (a) Vibration time history of a single hole shot. PPV = 3.25mm/s

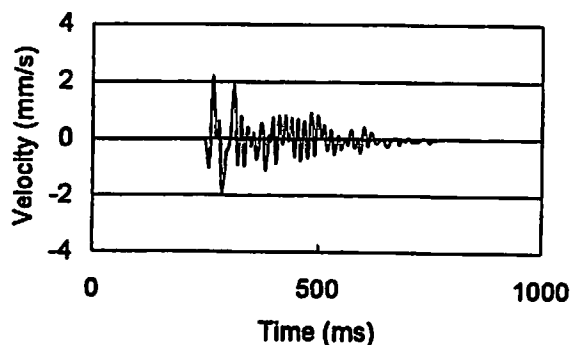


Fig. 6 (b) Estimated vibration time history of a two-holes delay blast. PPV=2.21mm/s

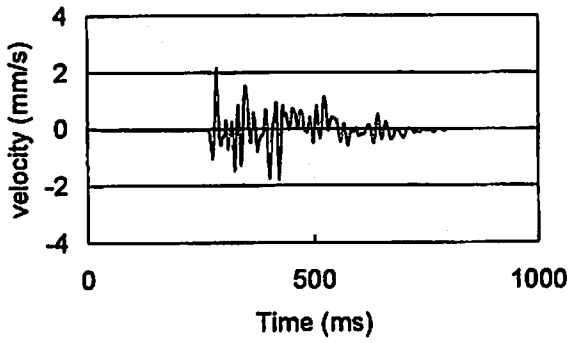


Fig. 6 (c) Estimated vibration time history of a four-holes delay blast. PPV=2.18mm/s

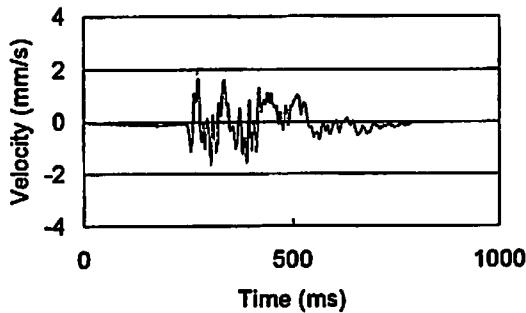


Fig. 6 (d) Estimated vibration time history of an eight-holes delay blast. PPV=1.70 mm/s

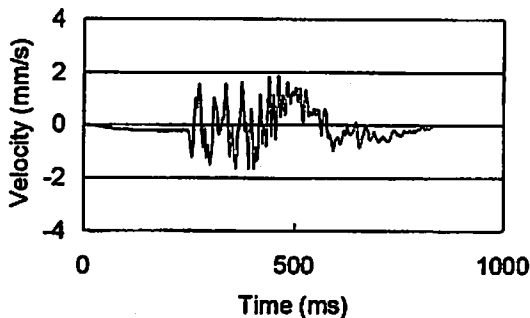


Fig. 6 (e) Estimated vibration time history of a sixteen-holes delay blast. PPV=1.89 mm/s

な2孔の段発発破の推定振動時間履歴が得られる。このときのPPVは2.21mm/s(基準振動の68%)となる。

さらに、Fig. 6(b)の振動時間履歴をもたらす震源群を1つのユニットと考え、まったく同じユニットをその近傍に配置し、これらに最適な延時秒時を上記と同様に求めると21msとなる。Fig. 6(b)の振動時間履歴を、延時秒時21msで重ねあわせた4孔のユニット干渉発破の推定振動時間履歴をFig. 6(c)に示す。このPPVは2.18mm/sとなり、2孔段発発破のものに比べても更に低くなる。この場合、それぞれの段の延時秒時設定

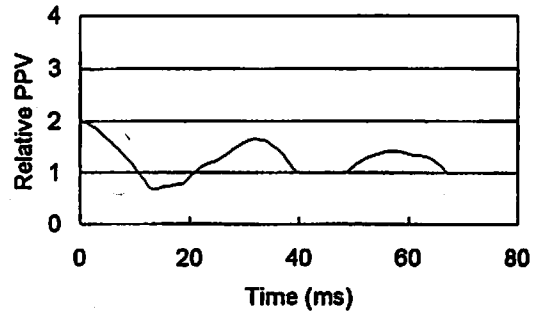


Fig. 7 Relationship between the relative PPV and the delay interval

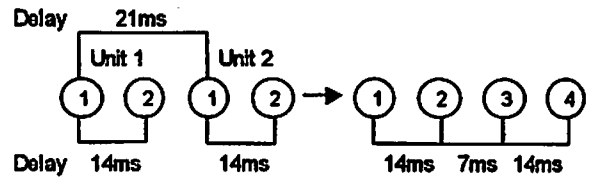


Fig. 8 An example of delay time setting for a unit interference blasting

の考え方はFig. 8の左側、また、実際の延時秒時設定はFig. 8の右側に示すようになる。

以上の操作を繰り返しながら、8孔、16孔の場合の振動時間履歴を推定したものを、それぞれFig. 6(d)、Fig. 6(e)に示す。

3.3 自己相関最小化基準

振動のピーク値だけではなく、その全体的な低減も目的とする場合には、自己相関最小化基準が適している。Fig. 9に、Fig. 6(a)の振動時間履歴を用いて求めた、延時秒時と自己相関係数との関係を示す。

Fig. 9において、自己相関係数が最小値を取る延時秒時は14msとなり、PPV最小化基準の場合と同じである。つまり、これを2孔の段発発破の延時秒時とし

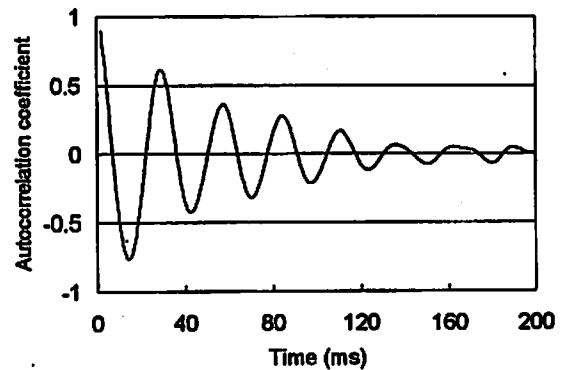


Fig. 9 Relationship between the auto-correlation coefficient and the delay interval

た場合の推定振動時間履歴はFig. 6 (b)と同様である。

同様の手順を用い、自己相関係数が最小となる延時秒時を用いてそれぞれのユニットの振動時間履歴を重ね合わせ、4孔、8孔及び16孔のユニット干渉発破の振動時間履歴を推定した結果をFig. 10 (a)～Fig. 10 (c)に示す。

3.4 卓越周波数成分除去基準

これは、振動時間履歴に対してFFTを行い、その卓越周波数成分を選択的に除去するため、この周波数成分に対して逆位相となるような延時秒時を設定する、という基準である。

Fig. 6 (a)の単孔発破の振動時間履歴に対してFFT

を行った結果をFig. 11に示す。この場合の卓越周波数は36Hzなので、その周期を約28msと考えると、設定すべき延時秒時はその半分に当たる14msとなり、前二例の場合と同様になる。このため、Fig. 6 (b)の振動時間履歴を新たなユニットが発生する振動時間履歴とし、これに対してFFTを行い、その卓越周波数をもつ振動波の半周期に相当する延時秒時で、これを重ね合わせた4孔の段発発破の推定時間履歴をFig. 12 (a)に、また、同様にして求めた8孔及び16孔の推定振動時間履歴を、それぞれFig. 12 (b)、Fig. 12 (c)に示す。

3.5 各基準の比較

以上3種類の基準に基づくユニット干渉発破の推定

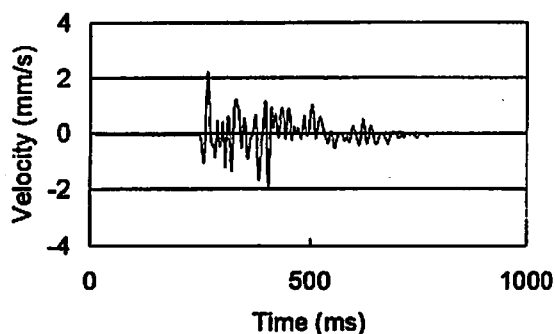


Fig. 10 (a) Estimated vibration time history of a four-holes delay blast. PPV=2.21mm/s

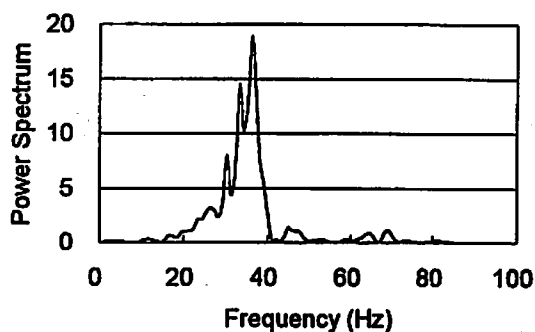


Fig. 11 Result of an FFT

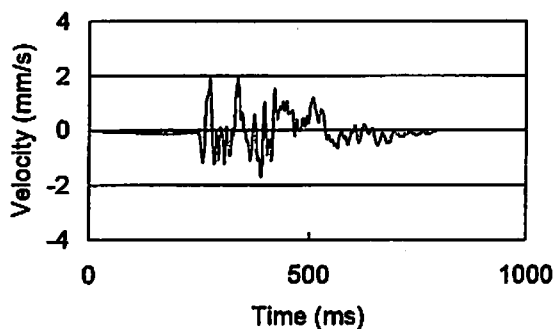


Fig. 10 (b) Estimated vibration time history of an eight-holes delay blast. PPV=1.96mm/s

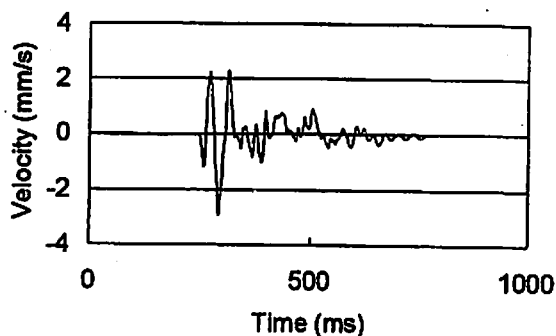


Fig. 12 (a) Estimated vibration time history of a four-holes delay blast. PPV=2.95mm/s

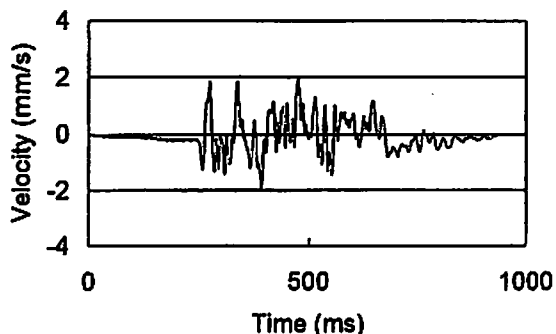


Fig. 10 (c) Estimated vibration time history of a sixteen-holes delay blast. PPV=1.96mm/s

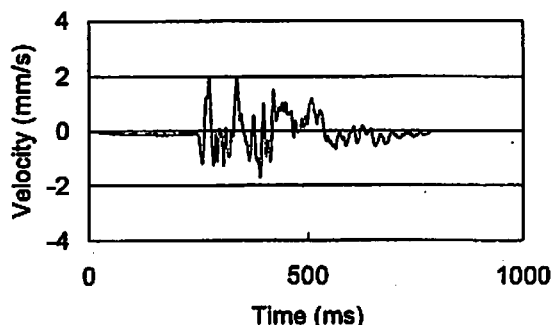


Fig. 12 (b) Estimated vibration time history of an eight-holes delay blast. PPV=1.96mm/s

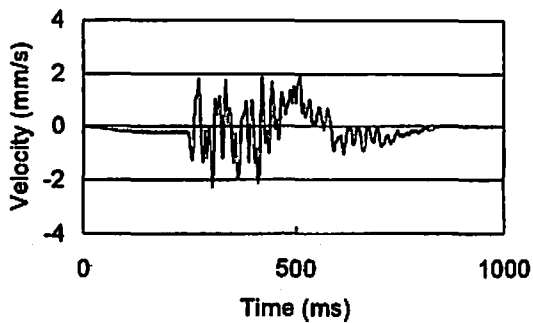


Fig. 12 (c) Estimated vibration time history of a sixteen-holes delay blast. PPV=2.30mm/s

Table 1 PPVの比較 (mm/s)

	PPV最小化	自己相関最小化	卓越周波数除去
2段	2.21 (68%)	2.21 (68%)	2.21 (68%)
4段	2.18 (67%)	2.21 (68%)	2.95 (91%)
8段	1.70 (52%)	1.96 (60%)	1.96 (60%)
16段	1.89 (58%)	1.96 (60%)	2.30 (71%)

振動時間履歴から求めたPPVをまとめてTable 1に示す。カッコ内は単孔発破のPPVに対するそれぞれの比率である。当然のことながら、PPVのみで評価する場合、PPV最小化基準に従った場合がもっとも有利であることがわかる。しかし、PPV最小化基準とほぼ同等のPPV低減をもたらす上、全体の振動レベルを下げる

効果が期待できる自己相関最小化基準も検討する価値があるものと考えられる。

4. 結 論

誤差を考慮した振動制御のための延時秒時設計の際には、まず誤差のない延時秒時と相対PPVの関係から、いくつかの候補を選び出し、それぞれについて誤差を考慮して解析することにより、最適な延時秒時の組み合わせを決定することが望ましい。

また、3種類の延時秒時設定基準に関して、ユニット干渉発破のシミュレーションを行った。基準となる振動時間履歴の再現性が前提となるものの、いずれの基準に関しても16孔による16段の段発破のPPVが、基準とした単孔発破のその58%~71%の範囲に収まり、局部的振動制御にきわめて有効である可能性が示された。それぞれの基準を効果的に使い分けることにより、ニーズにあった振動制御が行えるものと期待される。

文 献

- 1) 和田有司, 馬 貴臣, 中島敏秀, 昔 哲基, 緒方雄二, 勝山邦久, 三宅淳巳, 小川輝繁, 火薬学会誌, 55, 174 (1994)
- 2) 山本雅昭, 野田英宏, 金子勝比古, 火薬学会誌, 59, 221 (1999)
- 3) C.H.Dowding, "Blast Vibration Monitoring and Control", P. 241-243 (1985), Prentice-hall, Inc.

Consideration on local blast vibration control by delay blasting

Gento MOGI*, Tatsuya HOSHINO**, Tsuyoshi ADACHI*
Jiro YAMATOMI*, Shao-Quan KOU***

In this research, local blast vibration control based on the theory of superposition of waves was investigated. Firstly, the influence of delay time errors of conventional electric detonators upon the level of local blast vibration was examined. Secondly, for a further effective local blast vibration control, a new delay blasting design concept "combined delay blasting" that postulates the use of electronic detonators, which virtually have no delay time errors, is proposed.

For a delay blasting with uniform detonation time intervals, an optimum time interval to minimize the local PPV (Peak Particle Velocity) is obtained based on the relationship between the PPV and the time interval, which is derived by superposing identical vibration time histories of each single hole shot. However, due to the scattering of the actual delay time caused by errors, PPV of a production blast seldom coincides with the estimated one. Since the expected value and the variance of PPV mainly depend on sensitivity of PPV around the nominal delay time, it is proposed that not only the optimum but also several sub-optimum candidates of delay time should be examined taking error into consideration.

Concerning the "combined delay blasting", its concept and some simulation results are presented. The estimated reduction effect of blast vibration of a delay blast based on this concept was quite favorable, indicating a possibility for further effective local blast vibration control.

(*The University of Tokyo School of Engineering Department of Geosystem
Engineering 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656

**Mitsui Mining & Smelting Co., Ltd.

***Luleå University of Technology)