

発破振動低減手法に関する研究

和田有司*, 馬 貴臣**, 中嶋敏秀***, 昔 哲基****

緒方雄二*, 勝山邦久*, 三宅淳巳**, 小川輝繁**

発破時の振動を互いに干渉させて低減させるための最適な起爆時間差を振動波形の相関関数を用いて決定する手法を開発した。そして、この手法をモルタルブロック供試体を用いた小規模発破実験に適用し、振動低減効果を検討した。その結果、この手法を用いた雷管の5孔列状発破における振動変位速度は、最大値と比較すると観測位置から最も近い孔で単独で雷管を起爆した場合よりも小さく、5孔からの振動が重なり合って最大となる条件の場合の約1/5に低減されることを確認した。

1. はじめに

発破作業は鉱山や土木の分野で重要な技術として古くから利用されてきた。最近では都市部の構造物解体にも適用が試みられるようになり、あらためてその有用性が認識されつつある¹⁾。発破作業は機械的工法よりも経済面や安全面等で有利な場合があることが知られている。しかし、法令によって火薬類の利用が制限されていること、火薬類に対する危険な印象や騒音、振動、飛石等に対する忌避感から社会的に受け入れられ難い情勢にあることから、効率的な利用がなされていない。

そこで、本研究は発破作業を社会的に受け入れられ

易くし、公共の安全を確保しながら効率的に利用するために解決すべき問題点の1つである免振振動を低減することを目的とした。

従来の発破作業は、段発雷管を用いた段発発破によって振動エネルギーを時間的に分散させる振動低減手法がとられてきた。しかし、その段発間隔すなわち起爆時間差は経験的に決定されており、発破位置の状態、振動の伝播距離や伝播経路の状態によっては振動低減に資した時間差となっていないことが予想される。

これに対して本研究は、複数の振動源からの振動を積極的に重ねあわせ、互いに干渉させることによって低減することを基本概念とし、そのための最適な起爆時間差を振動波形の相関関数を用いて理論的に決定する手法を開発した。

2. 实 验

2.1 振動低減の理論

本研究における発破振動低減手法の基本概念は以下の通りである。

例えば、図1に示すような一定の周期で減衰する三角関数で表される振動波形を仮定する。この振動に半周期だけ遅らせた同じ振動を重ねあわせると互いに干渉して弱め合い、時間差がない場合に比べて最初のピークの振幅が半分になりその他の部分でも振動が低減できる。ところが、実際の振動波形は複雑で、与えるべき時間差を決定することは容易ではない。そこで筆者らは相関関数を用いて振動低減のための最適時間差を決定する方法を考案した。

相関関数には自己相関関数と相互相関関数があり、

1994年2月28日受理

*資源環境技術総合研究所 安全工学部

破壞工學研究室

〒305 茨城県つくば市小野川16-3

TEL 0298-58-8563

FAX 0298-58-8565

**横浜国立大学 工学部 物質工学科

〒240 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台156

TEL 045-335-1451 (Ext. 2887)

FAX 045-334-2320

***三井金屬資源開發株 開發本部 設計部

〒140 東京都品川区大井 1-23-1

TEL 03-3778-6028

FAX 03-3778-6202

****機力コ一 企画開発部

〒101 東京都千代田区神田西福田町 4-1

メディックスビル

TEL. 03-3255-7770

FAX 03-3255-7780

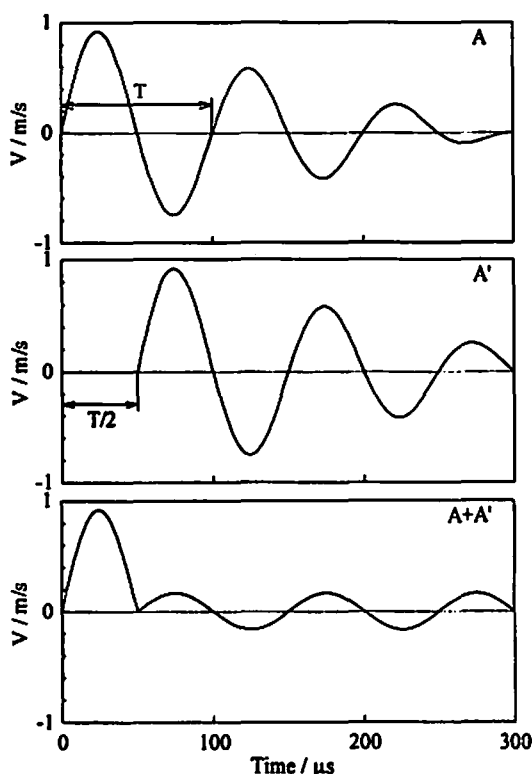


Fig. 1 An idea to control vibration

それぞれ以下の式で定義され、ある時間差における自分自身あるいは他の波との相関の程度を時間差の関数で与える²⁾。

自己相関関数 (Auto-correlation)

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau)dt \quad (1)$$

相互相関関数 (Cross-correlation)

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau)dt \quad (2)$$

ここで、 R は相関関数、 T は相関を求める区間、 x 、 y は振動波形、 t は時間、 τ は時間差を表す。

そして、最も負の相関が高くなるような時間差でこれらの波を重ね合わせれば、互いに干渉し、弱め合う効果が期待できる。図2に先に仮定した振動波形の自己相関関数と起爆時間差の決定方法を示す。

2.2 供試体および実験装置

実験はモルタルブロック供試体に1孔から5孔を穿孔し、それぞれの孔に雷管を装填して起爆したときに供試体表面で観測される振動変位速度を低減することを目的とした。

実験は資源環境技術総合研究所内の爆発実験場で実

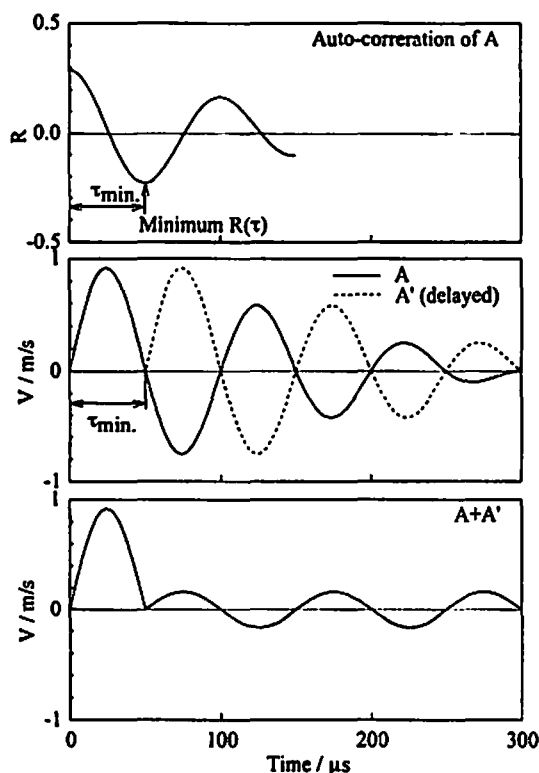


Fig. 2 How to decide the effective delay time

施した。

供試体はモルタル製で縦700mm、横700mm、高さ900mmの直方体である。ある側面中央の縦方向に列状に150mm間隔で孔径8mm、深さ220mmの孔を穿孔した。孔径は雷管が無理なく挿入できる大きさに、深さは雷管を装填したときに雷管中央までの深さが200mmとなるように決定した。各孔には便宜上上から1番孔から5番孔までの番号を付けた。各孔からの距離と振動の伝播時間とを最小二乗法によって解析して求めた振動伝播速度は約3,360m/sであった。

各孔には日本化薬製の精密雷管を1本ずつ詰め物を用いないで装填し、日本化薬製の精密起爆器で起爆した。精密雷管の装薬はベンスリットだけで薬量は0.7gである。精密起爆器は5チャンネルの起爆回路を持ち、この起爆システムによって各チャンネル1μs単位で1μsから9,999,999μsまで起爆時間の制御が可能であることが確認されている³⁾。

振動変位速度はPolytec社製のレーザー振動計OFV-300を用いて測定した。実験では、穿孔した側面と隣接する側面の上面から350mm、穿孔面から200mmの位置に反射板を添付し、レーザー振動計からのレーザー光を垂直に照射して反射光のドップラー効果を利用して、非接触で振動変位速度を測定した。レーザー

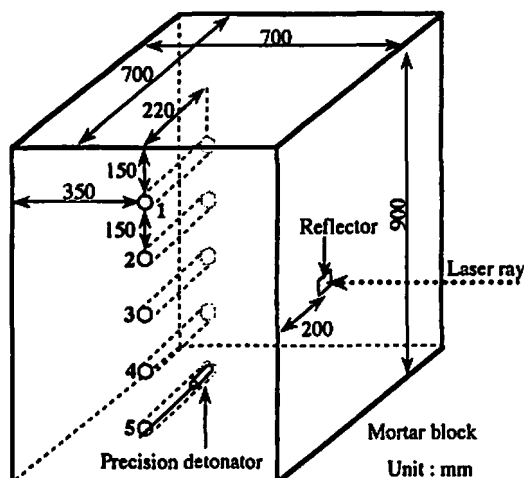


Fig. 3 Experimental set-up for blasting of mortar block

振動計からの信号はHewlett Packard社製のデジタルオシロスコープHP54504Aを用いてサンプリング間隔0.4 μ sでA/D変換して記録し、Apple社製のパーソナルコンピュータ-Macintosh Centris650上でMicrosoft社製のソフトウェアExcel Ver. 4.0を用いて解析した。

供試体の概略を図3に示す。

2.3 計測および計算

最初に1番孔、2番孔、3番孔で単独で雷管を起爆した場合の振動を測定した。1番孔と5番孔、2番孔と4番孔はそれぞれ条件が等しいと仮定して4番孔と5番孔は測定しなかった。また、それぞれの起爆位置から測定位置までの距離と起爆から測定位置に振動が到達するまでの時間とから供試体の振動伝播速度を求めた。

次に1番孔および2番孔の振動波形の自己相関関数をそれぞれ計算し、1番孔-5番孔(1-5と略記、以下同様)、2番孔-4番孔(2-4)の順でそれぞれ起爆する際の最適時間差を決定した。また、この時間差で2孔を起爆した場合の振動を測定した。

次に1-5と2-4の振動波形の相互相関関数を計算し、1番孔-5番孔-2番孔-4番孔(1-5-2-4)の順で起爆する際の最適時間差を決定した。また、この時間差で4孔を起爆した場合の振動を測定した。

最後に1-5-2-4と3番孔の振動波形の相互相関関数を計算し、1番孔-5番孔-2番孔-4番孔-3番孔(1-5-2-4-3)の順で起爆する際の最適時間差を決定した。また、求められた時間差で5孔を起爆した場合の振動を測定した。

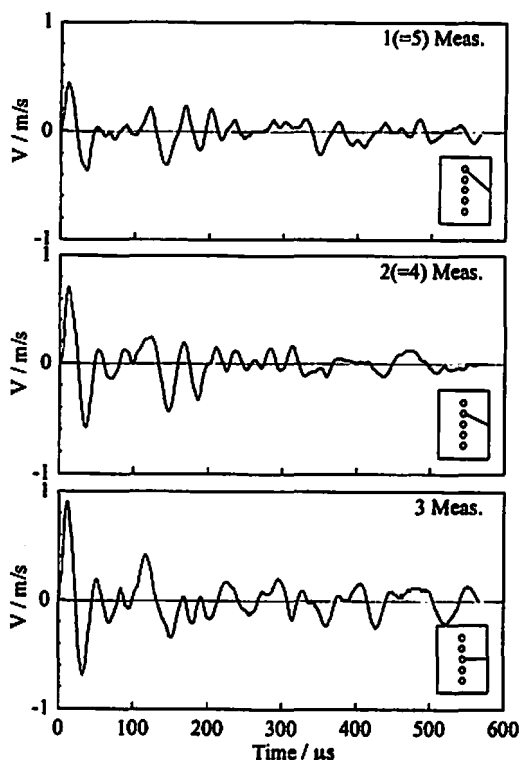


Fig. 4 Vibration waves caused by a detonator
1, 2, 3, 4 and 5 : Number of hole
Meas. : Measured data

複数孔の場合の起爆順序は最初に到達するピークの振幅を小さくするために、遠距離からの振幅の小さい振動に近距離からの振幅の大きい振動が重なるようにした。

また、比較のために5孔全てからの振動が同時に測定位置に到達するような時間差で起爆した場合(以下最大条件と記述)の振動を測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 単独起爆の振動波形

1番孔(=5番孔)、2番孔(=4番孔)、3番孔をそれぞれ単独で起爆した場合の振動波形を図4に示す。起爆位置から測定位置までの距離の増加に伴って振幅が減少している以外は類似の波形であった。振幅、周期、振動伝播速度等の解析結果を表1に示す。

3.2 2孔起爆の振動波形

1番孔(=5番孔)および2番孔(=4番孔)の自己相関関数の計算結果、振動波形の重ね合わせの状態、単純な振幅の和による1-5および2-4の2孔起爆の数値計算の結果と測定された振動波形をそれぞれ図5、図6に示す。

自己相関関数による起爆の最適時間差はそれぞれ20.8 μ s、21.2 μ sで振動波形のサンプリング間隔を考

Table 1 Analysis of vibration wave caused by a detonator

No. of hole	D/mm	D'/mm	T _d /μs	V _{max} /m/s	T/μs	V _d /m/s	V _{MLS} /m/s
1 (=5)	300	461.0	134.8	0.435	45.2	3,420	
2 (=4)	150	380.8	110.4	0.712	46.8	3,449	
3	0	350.0	102.0	0.902	44.8	3,431	3,363

D : Distance from the center of blasting point

D' : Distance from the measuring point

T_d : Time from blasting to arriving the vibration wave

V_{max} : Maximum vibration velocity

T : Period of the first vibration wave

V_d : Velocity of vibration wave ; $V_d = D'/T_d$

V_{MLS} : Velocity of vibration wave calculated by the method of least square

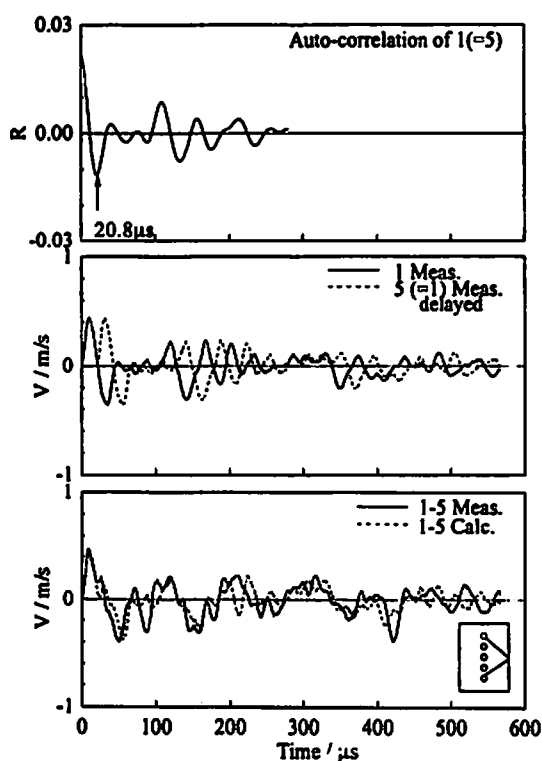


Fig. 5 Vibration wave caused by two detonators
Calc.: Calculated data

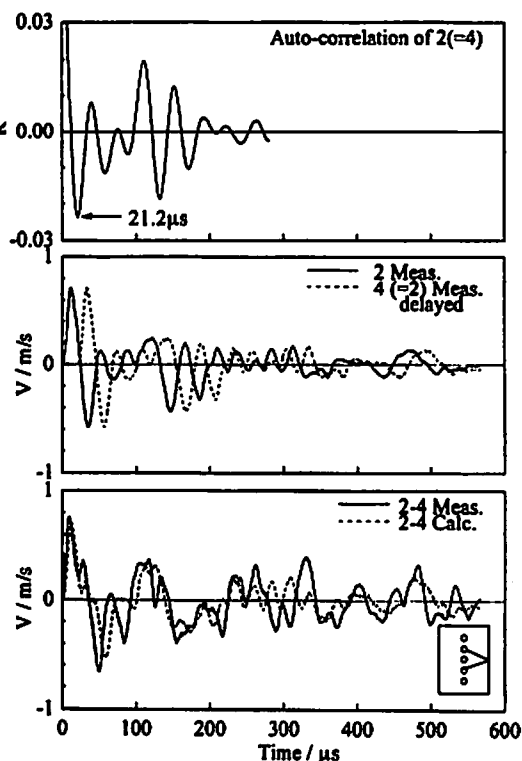


Fig. 6 Vibration wave caused by two detonators

慮すると等しいと見なされる。これはそれぞれの単独の波形が類似していることが原因である。

いずれの場合も数値計算の結果と測定された振動波形は良好に一致しており、本モデルにおいて単純な振幅の和による数値計算の手法が適用可能であることが示唆された。

3.3 4孔起爆の振動波形

1-5, 2-4の振動波形による相互相関関数の計

算結果、振動波形の重ね合わせの状態、1-5-2-4の4孔起爆の数値計算の結果および測定された振動波形を図7に示す。

この相互相関関数において負の相関が最も高くなるのは146.8μsであるが、振動を時間的に分散させないで干渉させるために1番孔と2番孔の最適時間差として2番目に負の相関が高い38.4μsを採用した。したがって、1-5-2-4の時間差は0-20.8-38.4-

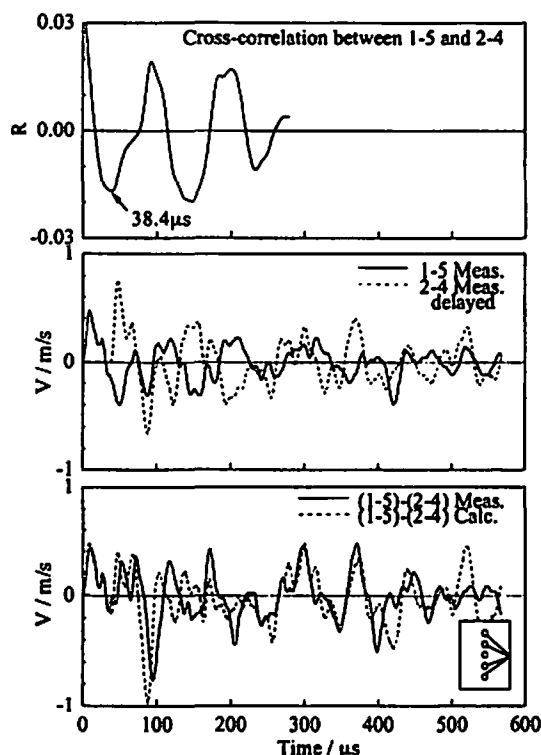


Fig. 7 Vibration wave caused by four detonators

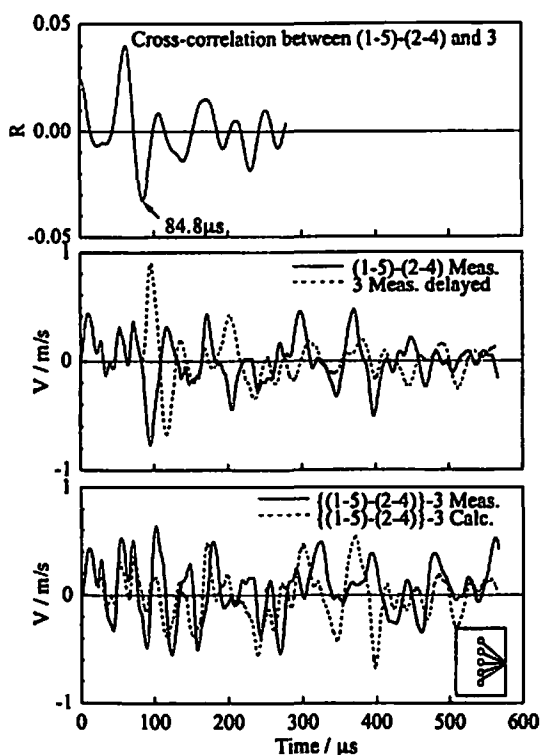


Fig. 8 Vibration wave caused by five detonators

59.6 μ sとなる。ただし、ここで得られる時間差は振動が到達したときの時間差であるから実際の起爆時間差はこれに距離による到達時間の差を加減している。

この場合も数値計算の結果と測定波形は良好に一致した。

3.4 5孔起爆の振動波形

1-5-2-4と3番孔の振動波形による相互相関関数の計算結果、振動波形の重ね合わせの状態、1-5-2-4-3の5孔起爆の数値計算の結果および測定された振動波形を図8に示す。1番孔と3番孔の最適時間差は84.8 μ sとなった。したがって、1-5-2-4-3の時間差は0-20.8-38.4-59.6-84.8 μ sとなる。

実験の結果、振動速度の最大値は0.63m/sとなり、3番孔を単独で起爆した場合の振動速度の最大値0.90m/sより小さくすることができた。

5孔起爆の場合、約50 μ sから数値計算の結果より測定された振動波形の振幅が大きくなった。それぞれの振動変位速度を時間で積分して変位を求めた結果を図9に示す。数値計算では変位が0付近に戻るが、測定波形では変位が時間と共に増大している。これは写真1に示すように5孔起爆では供試体が割れて移動することが原因と考えられる。一方、4孔起爆の場合ま

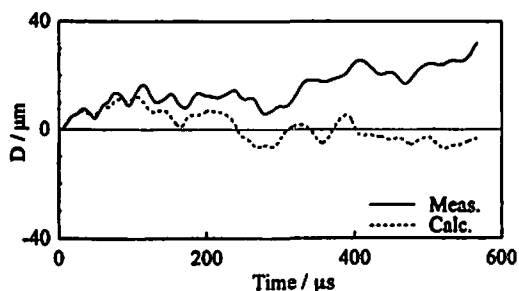


Fig. 9 Displacement caused by five detonators

では供試体が割れなかったので、数値計算の結果と測定された振動波形が一致したと考えられる。

3.5 最大条件との比較

5孔起爆の最大条件の数値計算の結果と測定された振動波形を図10に示す。両者が一致しない原因は変位の計算と実験後の供試体の状態から最適時間差の場合と同様に供試体の破壊現象が考慮されていないためであると考えられる。

最大条件と相関関数による最適時間差起爆との測定された振動波形の比較を図11に示す。最大条件の振動速度の最大値は3.28m/sとなり、最適時間差の場合と比較すると最初のピーク値は0.47m/sで約1/7、最大

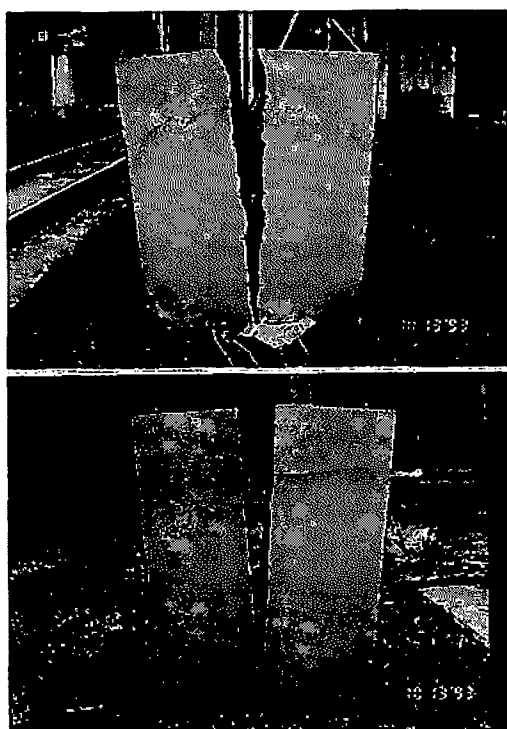


Photo 1 Photographs of mortar block after blasting five detonators
Upper: Hole side
Lower: Opposite side

値は0.63m/sで約1/5に低減されている。

3.6 破断面の状態

写真1に見られるように μ s精度の時間差起爆では発破による破断面が非常に滑らかになることが確認されており、本手法を実際の発破に適用することによって、目的とした振動低減効果に加えて、スムーズブラッシング効果が期待できる。

4. まとめ

発破時の振動を互いに干渉させて低減させるための最適な起爆時間差を振動波形の相関関数を用いて決定する手法を開発した。そして、この手法をモルタルブロック供試体を用いた小規模発破実験に適用し、振動低減効果を検討した。その結果、この手法を用いた精密雷管の5孔列状発破における振動変位速度の最大値は0.63m/sとなり、観測位置から最も近い3番孔で単独で精密雷管を起爆した場合の最大値0.90m/sよりも小さく、5孔からの振動が重なり合って最大となる条件の場合の最大値3.28m/sの約1/5に低減された。

本手法を実発破に適用するためには、スケールアップの効果、測定位置の距離と方向による振動低減効果の相違等を検討しなければならない。しかし、例えば

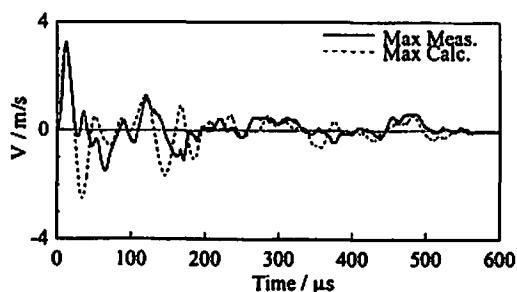


Fig. 10 Vibration wave caused by five detonators on the maximum condition

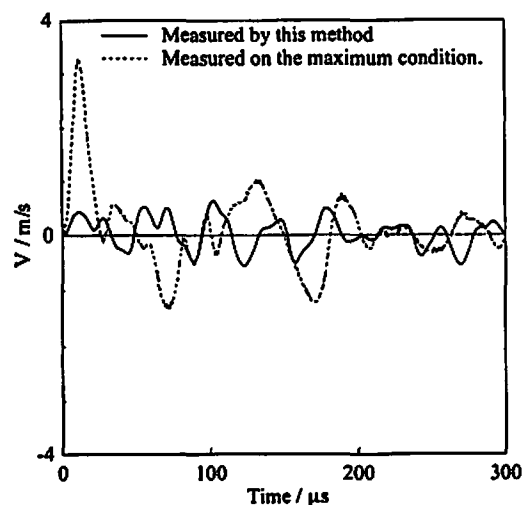


Fig. 11 Comparing this method with the maximum condition

発破位置の周囲に部分的に振動を低減したい施設があるような場合に、観測される振動波形が単純な振動波形の重ね合わせによって計算される振動波形と等しくなるような条件において本手法は適用可能で、振動低減の有効な手段になることが期待できる。

謝 辞

本研究で用いた供試体は大成建設株式会社技術研究所の川上 純氏より御提供頂いた。ここに謝意を表します。

文 献

- 1) 工業火薬協会編、「工業火薬 発破特集号」、工業火薬、54 (6)、255 (1993)
- 2) 南 茂夫、「科学計測のための波形データ処理」、p.111 (1986)、CQ出版
- 3) 緒方雄二、松本 榮、勝山邦久、橋爪 清、工業火薬、53 (4)、200 (1992)
- 4) 昔 哲基、三宅淳巳、小川輝繁、緒方雄二、勝山邦久、工業火薬協会平成4年度年会講演要旨集、p.80 (1992)

A study on the control of vibration caused by a blasting

by Yuji WADA*, Gui-Chen MA**, Toshihide NAKAJIMA***, Chul-Gi SUK****
Yuji OGATA*, Kunihisa KATSUYAMA*, Atumi MIYAKE**
and Terushige OGAWA**

We developed a method to control vibration from some blasting points. This method uses a correlation of vibration waves to decide the most effective delay time to control vibration by interfering vibration waves with each other. We applied this method to the small blasting using mortar blocks and examined the effect on controlling vibration. As the result of the examinations, the maximum vibration velocity by this method caused by five detonators blasting in row of five holes became smaller than that by a detonator blasting in the nearest hole from the measuring point. And the velocity was about one fifth of that of maximum condition in which vibration waves caused by the five detonators arrived at the same time to the measuring point.

(*Fracture Mechanics and Explosives Laboratory, Department of Safety Engineering, National Institute for Resources and Environment (NIRE), AIST, MITI, 16—3 Onogawa, Tsukuba 305, JAPAN,

**Department of Safety Engineering, Faculty of Engineering, Yokohama National University, 156 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240, JAPAN,

***Mitsui Mineral Development Engineering Co., Ltd. (MINDECO), 1—23 —1 Ohi, Shinagawa-ku, Tokyo 140, JAPAN,

****Kacoh Co., Ltd., 4—1 Kanda-Nishifukuda, Chiyoda-ku, Tokyo 101, JAPAN)