

### (63) 複数孔の爆源により生じる発破振動について

山口大学工学部 正会員 ○国松 直      山口大学工学部 正会員 中川浩二  
山口大学工学部 正会員 三浦房紀      宇部興産(株)      今村 威

#### 1. まえがき

発破振動の推定式は一般に最大速度振幅 (PPV) を用いて表現され、斉発発破あるいは斉発発破を1組とする段発破において各孔間の起爆秒時に若干の差がある場合でもPPVの推定は $PPV = K \cdot W^\alpha \cdot D^{-\beta}$  が用いられている。ここに、 $W$ は薬量、 $D$ は爆源からの距離、 $\alpha$ 、 $\beta$ は定数である。

このように、通常行われている多孔発破で、各振動波形が若干の秒時差をもって重畳し合うような場合でも同段の雷管が使われる場合には上式が用いられている。この場合、 $W$ として段当りの総薬量を取ることが多い。しかし、上式が各振動波形が重畳し合うような領域でも適用できるか否かの検討、およびその場合の薬量の取り扱い、また同段の雷管を使用せず明らかに秒時差をつけた段発破の場合の秒時差の影響等について十分な検討がなされていない。

そこで、本研究は振動波形が重畳し合う領域での発破振動の推定を行うことを目的に、孔当りの薬量は同じで孔数および秒時差を変化させた発破実験を行った。また、その結果について複数孔の爆源から生じる発破振動が単発破のその線形な重ね合わせの結果であるという仮定のもとに説明を試みた。

#### 2. 発破実験概要

実験は盛土砂質地盤(縦30m×横20m×高さ3m)上において行った。発破孔配列を図1に示す。図中の数字1,6,7,12,13,18は単発発破、2,3,4,5は秒時差0msの斉発発破でそれぞれ孔数が2~5である。また、8,9,10,11は秒時差20ms、14,15,16,17は秒時差40msの段発破である。穿孔、起爆にあたっては地盤条件の変化を防ぐために、最後列をまず穿孔した後、装填、起爆を行い、次に次列に移行するという手順を繰り返して行った。発破孔間隔は40cmである。発破規格は孔径50mm、穿孔長30cmとし、1孔当りの薬量は6号雷管と導爆線25cmとし、PETN換算で3gとした。測定点は図に示す発破孔配列の中心線上に設け、加速度ピックアップを最前列孔より2.8mの位置から1m間隔で5個配置した。測点番号は発破孔に最も近いものを1とし、順次5までとした。使用した計測機器の諸元を表1に示す。計測した発破振動は鉛直成分のみである。実験は同一条件で2回行った。それ以下実験A、実験Bと呼ぶ。

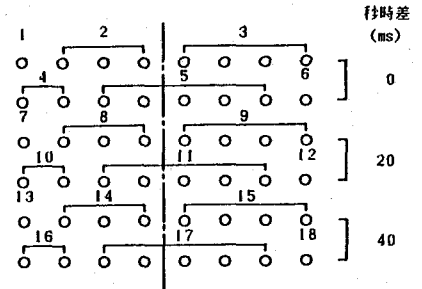


図1 発破孔配列

| 表1 使用計測機器 |      |        |
|-----------|------|--------|
| 加速度ピックアップ | リオン  | PV-87  |
| プリアンプ     | リオン  | VP-14A |
| 増幅器       | 日電三栄 | 6L02   |
| データレコーダ   | TEAC | R-61   |
| A/D変換器    | 岩通   | SS5802 |

#### 3. 実験結果および考察

データレコーダに記録された発破振動記録はA/D変換の後、マイコンへ取り込み、以下マイコン処理により加速度波形、速度波形を得た。なお、速度波形は線形加速度法により加速度を1回積分して得た。図2は実験A、発破番号13の発破に対して測点3で記録された加速度波形およびその数値積分による速度波形の1例である。この図より速度波形の継続時間は約100msである。今回の解析の対象はPPVであるので速度波形より最大速度振幅を求めて検討を行う。

図3は実験Aの単発発破および斉発発破のPPVを距離に対してプロットした結果である。また、図4、5はそれぞれ秒時差20ms、40msの段発発破のPPVに対して同様にプロットした結果である。ここで、多孔発破時の距離は発破孔列の中心と測点の距離とした。

図3より孔数が変化してもその勾配（距離減衰特性）は変わらないこと、孔数が増加すればそれにともないPPVも増加していることがわかる。そこで、いま1孔当りの薬量は同じであるから、図3のデータをもとに孔数 $n$ 、距離 $D$ を変数として重回帰分析を行った結果、次式が得られた。

$$PPV = 2.65 \cdot D^{-1.50} \cdot n^{0.51} \quad (1)$$

実験Bについても同様の分析を行った結果、ほぼ同じ値が得られた。これらの結果より、本実験において多孔斉発発破のPPVにおける孔数の効果は概ね $\sqrt{n}$ で表されるようである。

もし、ここで $\alpha$ が通常言われているように $2/3 \sim 3/4$ 乗で作用し、薬量として段当りの総薬量をとるなら $PPV = K \cdot (nW)^\alpha \cdot D^{-\beta}$ よりPPVは $n$ の $\alpha$ 乗（ $\alpha = 2/3 \sim 3/4$ ）で増加するはずであるがこの結果はその値を下回っている。

そこで、孔当りの薬量がすべて等しい斉発発破の場合の推定式として孔数 $n$ を含めた次式による表現が良いように思われる。

$$PPV = K \cdot W^\alpha \cdot D^{-\beta} \cdot n^\gamma \quad (2)$$

一方、図4、5の段発発破の結果に対しては孔数の増加にともなうPPVの増加が不明瞭となっている。また、勾配も単発、斉発の場合、秒時差20ms、40msの場合でそれぞれ異なり徐々に緩やかになっているようである。このことは段発発破の場合のPPVの推定が上式のように単純に表現できないことを意味している。

段発発破が斉発発破よりもPPVの低減に対して有効であるのか、また秒時差の影響が

どの程度あるかを調べるために $\beta = 1.50$ の値を用いて距離補正を行って検討した。図6は実験Aの測点3のデータに対して距離補正を行った後のPPVを秒時差に対してプロットした結果である。孔数に関わらず段発発破のPPVが斉発発破のそ

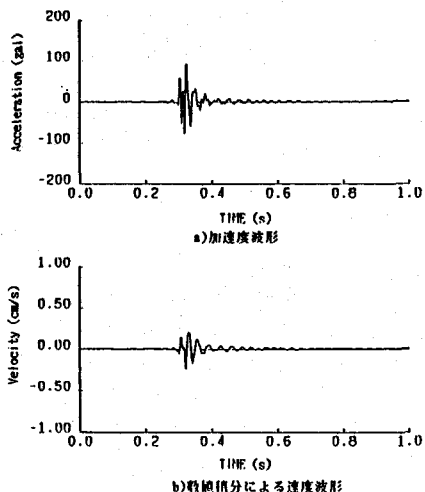


図2 発破振動波形例（発破番号13、測点3）

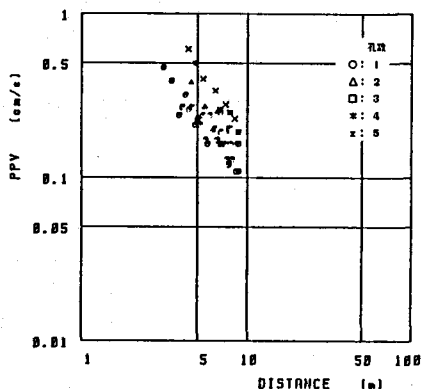


図3 単発・斉発発破のPPVと距離の関係

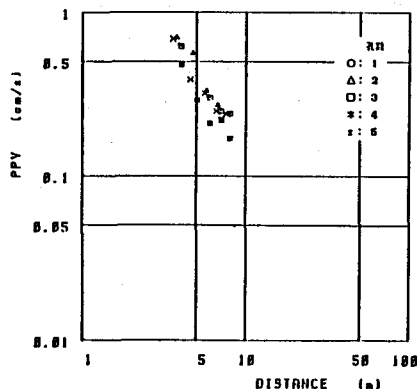


図4 段発発破（20ms）のPPVと距離の関係

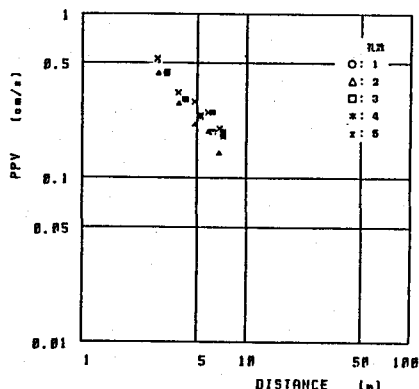


図5 段発発破（40ms）のPPVと距離の関係

れより低く、秒時差20ms、40msの順に低減していることがわかる。以上のような検討より斉発発破の場合の孔数の影響、段発発破の場合の秒時差の影響が明らかに存在することが判明した。今後、発破振動の推定を行う場合にこれら2つの影響まで考慮に入れて推定を行えば従来より精度の高い推定が行えるものと思われる。

#### 4. 発破振動の重畳シミュレーションによる検討

斉発発破の孔数の影響、段発発破の秒時差の影響を評価するための方法として、本研究では多孔発破の振動波形について各孔の振動波形の線形な重ね合わせを仮定し、孔数、秒時差を考慮して重ね合わせる重畳シミュレーションにより検討を行った。

従来より段発発破による振動減少に関する議論は数多く行われており、名和ら<sup>1)</sup>の整理によれば分割説、反結合説、干涉説の3説に分類される。この中の干涉説は各孔の振動波形の線形な重ね合わせによって振幅が減少するという説であり、Morris、Fish、Langeforsらにより支持されている<sup>2)</sup>。ちなみに、分割説は段発発破の秒時差が大きく波形が重畳しないために減少する

という説であり、反結合説は線形ではなく非線形な重ね合わせにより減少するという説である。

干涉説に従えば、斉発発破の孔数の影響も段発発破の秒時差の影響も次式で表現できよう。

$$V(t) = \sum_{n=0}^{N-1} (W_n/W_0) \cdot v(t - (n\Delta t + \varepsilon_n)) \quad (3)$$

ここに、 $V(t)$ は重ね合わせた後の振動波形、 $N$ は孔数、 $W_n$ は $n$ 番目の装薬量、 $W_0$ は振動波形 $v(t)$ を得たときの装薬量、 $\Delta t$ は秒時差、 $\varepsilon_n$ は秒時誤差、 $m$ は定数である。上式において装薬量は常に孔当りの装薬量であり、 $(W_n/W_0)^m$ が決定できれば各孔毎に装薬量異なる発破振動の推定をも重畳シミュレーション波形より行うことができる。

しかし、上式を適用するにあたっては発破箇所と計測箇所が固定されたとき振動波形の周波数特性が変わらず、

振幅は各孔の装薬量のみにより変化するということが前提となる。また、基本となる単発発破波形および $m$ の値を振動を予測しようとする箇所において得る必要がある。

今回の実験結果に対して重畳シミュレーションによりPPVの推定を行い、その妥当性について検討した。

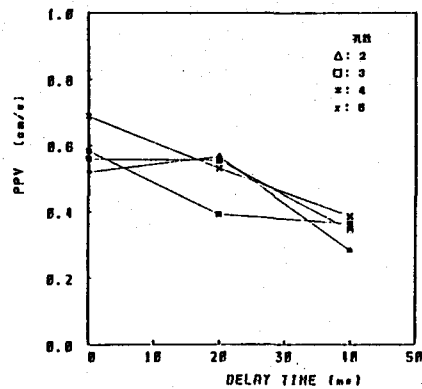


図6 距離補正後のPPVと秒時差の関係 (実験A、測点 3)

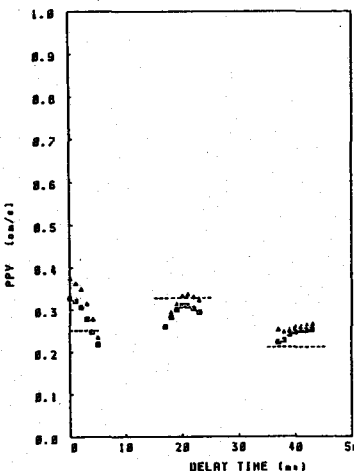


図7 重畳シミュレーション結果と実験結果との比較 (実験A、測点 3、2孔の場合)

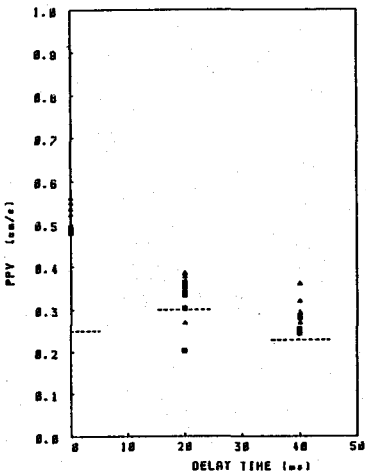


図8 重畳シミュレーション結果と実験結果との比較 (実験A、測点 3、3孔の場合)

実験においては距離の違いによる影響を避けるために各列で単発発破を行い、同一の秒時グループにおける2つの波形を基本波形とした。この基本波形  $v(t)$  を用いて多孔発破時に生じるPPVを(3)式により推定した。実験では各孔の薬量が全て同じであるので  $(W_n/W_0) = 1$  である。なお、 $\varepsilon n$  としては距離の影響を考慮し斉発発破の場合標準偏差  $\sigma = 1\text{ms}$  の正規分布に従うと仮定した。段発発破の場合には  $\Delta t = 20, 40\text{ms}$  とし、それぞれ  $\sigma = 3, 5\text{ms}$  として同様にPPVを求めた。2孔の場合には単純に波形をずらして合成した。図7～10は実験A、測点3についてのPPVの予測結果であり、縦軸にPPV、横軸に秒時差をとり孔数毎に示している。図中の破線が実験結果である。

これらの図より段発発破のPPVの予測において重畳シミュレーション結果は実験結果に対して妥当な値を示しているように思われる。しかし、斉発発破のシミュレーション結果は実験結果に比べかなり大きな値となっている。これは実験結果が  $n$  の  $1/2$  乗で増加しているのに対し、重畳シミュレーションでは  $n$  倍となるからである。斉発発破のPPVの予測に対して重畳シミュレーションでは過大評価を行うことになる。

## 5. おわりに

多孔発破において各振動波形が重畳し合う領域でのPPVの推定について、盛土砂質地盤での発破実験をもとに検討を行った。その結果、斉発発破と段発発破結果において孔数の影響に差異がみられ、斉発発破では孔数の影響が大きいことが判明した。その影響の程度については今後サイトを代えて検討して行く予定である。また段発発破については秒時差をつけることによりPPVが明らかに低減し、その影響についての検討も必要である。

以上、2つの影響を考慮に入れた推定方法として重畳シミュレーションにより検討を行った結果、段発発破の推定に対して十分評価できると思われる。しかし、斉発発破に対してはかなり大きな推定となる。この理由については今後、波形解析により検討を行っていく予定である。

最後に、本研究の遂行にあたりお世話になった宇部興産(株)伊佐鉱山の関係各位に謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 名和、菅田：MS遅発発破による地震動、工業火薬協会誌、Vol.23、No.2、pp.61-69、(1962)
- 2) 工業火薬協会編：発破ハンドブック、山海堂

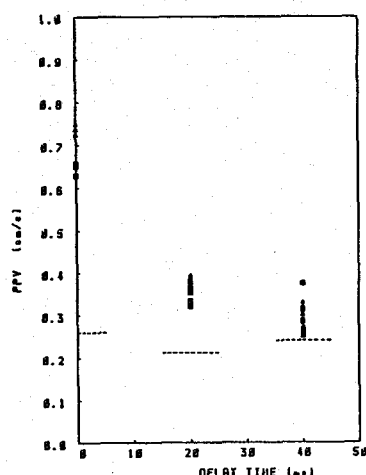


図9 重畳シミュレーション結果と実験結果との比較  
(実験A、測点3、4孔の場合)

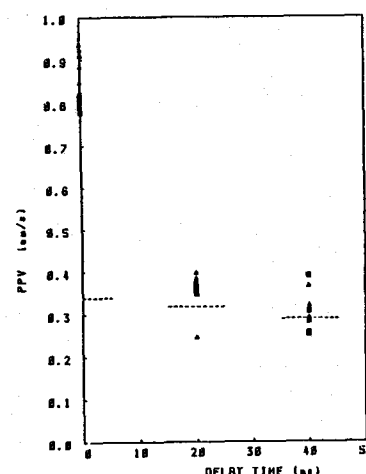


図10 重畳シミュレーション結果と実験結果との比較  
(実験A、測点3、5孔の場合)

(63) The prediction of the blasting vibration induced by multi-shot-blasting

by

Sunao KUNIMATSU, Koji NAKAGAWA and Fusanori MIURA \*  
Takeshi IMAMURA \*\*

We generally use the following equation for the predictor of the peak particle velocity (PPV) induced by the blastings.

$$PPV = KW^\alpha D^{-\beta}$$

where,  $W$  is usually the sum of charge in detonator of same delay time,  $D$  is distance from the source,  $K, \alpha, \beta$  are constants.

This study aims to estimate PPV accurately when the individual blasting vibrations of a multi-shot-blasting interfere each other. namely, we treat the simultaneous blasting and the delay blasting.

We conducted series of experiments in order to measure the blasting vibration records on fill-up soil ground. In these experiments, time delays were 0, 20, 40 ms and the number of shot holes in multi-shot-blasting was 1-5.

First, experimental results in simultaneous blasting vibration showed that PPV increased with the number of shot holes. This means that the following equation which includes the number of shot holes ( $n$ ) is valid for the estimation of PPV of the simultaneous blasting.

$$PPV = KW^\alpha D^{-\beta} n^\gamma$$

where,  $W$  is charge per shot hole,  $\gamma$  is a constant and about 0.5 in this experiment.

Next, with regard to estimation of delay blasting, we compared PPVs of experimental records and of synthesized ones. The latter was made on the basis of an assumption that the blasting vibration induced by a multi-shot-blasting consisted of linear superposition of the blasting vibration induced by a single-shot-blasting. The both showed good agreement.

\* Dept. of Construction Engineering, Yamaguchi University

\*\* Ube Industries Ltd.