



低振動発破法に関する現場実験

宮地明彦*, 国松 直**, 井清武弘**, 中川浩二***

発破振動を低く抑えるための発破方法としては、低爆速の爆薬を用いる、孔当たりの薬量を小さくする、デカップリングを大きくする、抵抗線長を小さくする、などの一般的ないくつかの方法が考えられる。しかし、これらの方法をごく手近に用いる場合の問題点を与える情報は意外に多くない。

そこで、本報告では発破振動の低減方法に関して、現場作業として比較的容易に行うことができる発破方法について実際に実験により検討し、発破方法を変えた場合に生じる振動の計測結果について報告する。

1. はじめに

トンネル、ダム、地下発電所等の岩盤掘削を主体とする建設工事にあつては、通常発破作業を伴うことになるが、近年の社会環境は発破により発生する振動に対してますます厳しい規制を強いる傾向にある。また、都市部周辺の再開発や宅地造成などに伴って、人の居住空間近傍で発破作業が行われる機会が増加したことも発破環境としては厳しい状況になっているといえる。

原子力発電所に代表されるような重要構造物や周辺家屋への影響に対する保全対策が問題になるとき、発破振動の低減技術の如何がその工事の成否を大きく左右することも少なくない。そのため、爆薬による強大なエネルギーを発破環境に適合するように制御し、しかも能率よく作業できるような発破手法が開発されれば今後の岩盤掘削工事に大きく貢献することと思われる。

一般に振動の低減方法には、①振動源対策、②伝搬対策、③受振部対策の3つが考えられるが、発破振動の場合、建設工事の特殊性から、振動源対策のみに拠

らねばならない場合が多い。発破振動を規制値以下に低減する方策として、通常は段当たり装薬量を減らす方法が取られるが、そのために施工能率が低下し、工事計画に支障をきたす事例も少なくない。

発破振動を低く抑えるための発破方法としては、低爆速の爆薬を用いる、孔当たりの薬量を小さくする、デカップリングを大きくする、抵抗線長を小さくする、などの一般的ないくつかの方法が考えられる。しかし、これらの方法をごく手近に用いる場合の問題点を与える情報は意外に多くない。

そこで、本報告では発破振動の低減方法に関して、現場作業として比較的容易に行うことができる発破の打ち方について実際に実験により検討し、発破方法を変えた場合に生じる振動の計測結果について述べる。

2. 実験概要

2.1 地形・地質の概要

現場実験を行った場所は、中生代白亜系の砂岩と頁岩の互層で構成されている。地層は単斜構造をなし、層理面の走向はN20'~25'W、傾斜は40'~65'Eである。

岩盤は砂岩が主体で頁岩層がところどころに薄く介在する。風化状態は場所によって若干の相違が認められるが、概してき裂の発達が著しい。また、地山弾性波速度(P波速度)は1.5 km/s~3.0 km/s程度と見られ、ボーリングコア状況等も考慮すると岩盤区分のB~CHに相当するものと考えられる。

2.2 実験方法

発破方法はすべて盤打ちで行い、発破位置に合わせて観測位置は随時移動させた。短期間にできるだけ多くのデータを得るためにDS10段までの雷管を使用し

1993年4月30日受理

*日本国土開発(株)第二営業本部

〒107 東京都港区赤坂4-9-9

TEL 03-3403-3311

**資源環境技術総合研究所安全工学部安全システム研究室

〒305 茨城県つくば市小野川16-3

TEL 0298-58-8573, 8570

FAX 0298-58-8558

***山口大学社会建設工学科

〒755 山口県宇部市常盤台

TEL 0836-35-9439

FAX 0836-35-9403

Table 1 Conditions of exp. ①

Kind of explosive , low explosive	Charge quantity of explosive per detonator (kg)	Number of holes	Charge quantity of explosive per hole (kg)	Depth of borehole (m)
AN-FO	2.0	1	2.0	2.8
	2.0	2	1.0	2.25
	2.0	3	0.67	1.5
	1.6	1	1.6	2.4
	1.6	2	0.8	2.0
	1.6	3	0.53	1.5

Table 2 Conditions of exp. ②

Kind of explosive , low explosive	Charge quantity of explosive per detonator (kg)	Number of holes	Charge quantity of explosive per hole (kg)	Depth of borehole (m)
AN-FO	0.6	1	0.6	1.5
	1.2	2	0.6	1.5
	1.8	3	0.6	1.5

Table 3 Conditions of exp. ③

Kind of explosive , low explosive	Charge quantity of explosive per detonator (kg)	Number of holes	Charge quantity of explosive per hole (kg)	Depth of borehole (m)
AN-FO	0.3	1	0.3	1.0
	0.3	1	0.3	1.3
	0.3	1	0.3	1.5
	0.3	1	0.3	2.0
	0.3	1	0.3	3.0

Table 4 Conditions of exp. ④

Kind of explosive , low explosive	Charge quantity of explosive per detonator (kg)	Number of holes	Charge quantity of explosive per hole (kg)	Depth of borehole (m)
AN-FO	0.1	1	0.1	1.5
	0.2	1	0.2	1.5
	0.3	1	0.3	1.5
	0.4	1	0.4	1.5
	0.5	1	0.5	1.5

Table 5 Conditions of exp. ⑤

Kind of explosive , low explosive	Charge quantity of explosive per detonator (kg)	Number of holes	Charge quantity of explosive per hole (kg)	Depth of borehole (m)	Decoupling
low explosive	0.6	6	0.1	1.2	with
TNT explosive	0.9	9	0.1	1.2	with
	1.8	6	0.3	1.5	without
	2.7	9	0.3	1.5	without

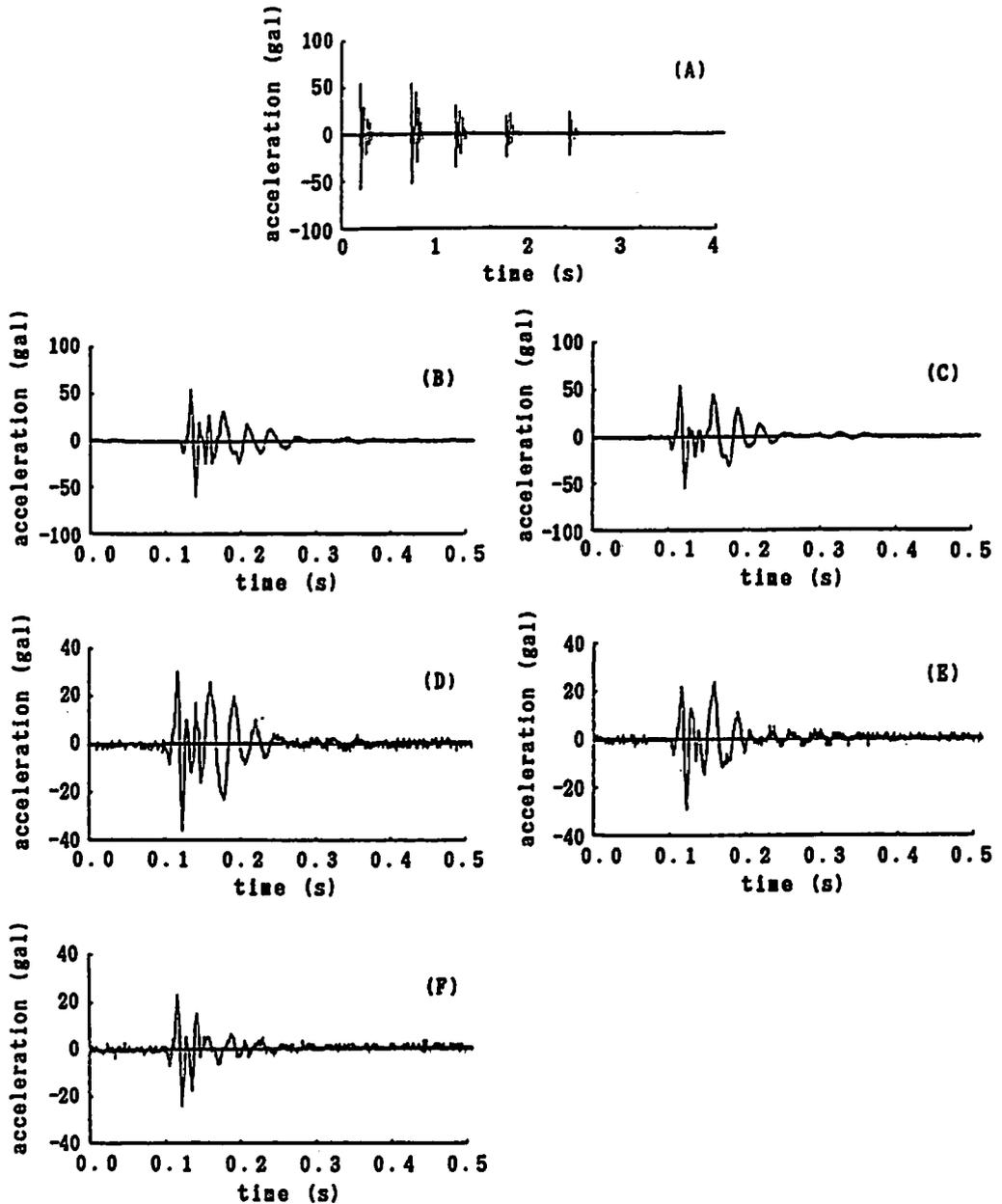


Fig. 1 Examples of observed acceleration waves

- (A) An observed acceleration of grand vibration due to a DS delay blasting operation
 (B) one step extraction (first step, detonator No.1)
 (C) one step extraction (second step, detonator No.3)
 (D) one step extraction (third step, detonator No.5)
 (E) one step extraction (fourth step, detonator No.7)
 (F) one step extraction (fifth step, detonator No.9)

て、各段ごとに実験条件を設定し、全段の波形を取録後、解析時に各段ごとの波形に分離して、それぞれの実験条件での波形とした。Fig.1は観測された波形の一例である。Fig.1のように各段の波形が分離できる波形のみを解析の対象とした。DS雷管10段までを使用していることにより、DS1段以降の雷管には当然

秒時誤差が含まれ、数孔を同段で起爆させる条件の場合でも必ずしも同時に、瞬発雷管の精度で起爆されるとは言い難い。実験結果がこのような実験条件のもとに得られていることを付記しておく。

2.3 実験内容

発破振動の低減を振動源の問題として考えるとき、

その対策は①装薬量, ②爆薬の装填方法, ③爆薬の種類などがあげられる。爆薬による岩盤の破碎に当たっては岩盤破碎の効果から破碎する岩盤に最適な m^3 当たりの装薬量が決定される。従って, 装薬量を変える場合には m^3 当たりの装薬量を一定とするように孔間隔, 穿孔長も変える必要がある。実験で m^3 当たりの装薬量を意図的に変化させた実験も行った。以下に実験内容を示す。

1) 分割効果実験(爆薬の種類: AN-FO)

実験①: 段当たり装薬量を一定とし, 複数孔に分割して装薬した実験

本実験では m^3 当たりの装薬量が一定となるように孔間隔, 穿孔長を変えているので m^3 当たりの装薬量を一定として薬量を分割したときの振動の大きさの変化を知ることを目標とする。

装薬量は段当たり2kgと1.6kgの2種類とし, 段当たりの斉発発破孔数を1, 2, 3孔と変化させた。孔径は65mmである。

実験②: 孔当たりの装薬量を一定にし, 孔数を変化させた実験

本実験では段当たり装薬量の増加と孔数の増加による振動の大きさの変化を知ることを目標とする。

装薬量は孔当たり0.6kgとし, 段当たり斉発発破孔数を1, 2, 3孔と変化させた。穿孔長は1.5mで一定である。孔径は65mmである。

2) 最小抵抗線効果実験(爆薬の種類: AN-FO)

実験③: 孔当たり装薬量を一定にし, 穿孔長を変化させた実験

本実験では過装薬状態から弱装薬状態での振動の大きさの変化を知ることを目標とする。

装薬量は孔当たり0.3kgとし, 穿孔長を1.0m~3.0mと変化させた。孔径は65mmである。

実験④: 穿孔長を一定にし, 孔当たりの装薬量を変化させた実験

本実験でも過装薬状態から弱装薬状態での振動の大きさの変化を知ることを目標とする。

穿孔長は1.5mとし, 孔当たりの装薬量を0.1kg~0.5kgと変化させた。孔径は65mmである。

3) デカップリング効果実験

実験⑤: デカップリング処理の有無による実験

本実験ではデカップリングの有無による振動の大きさの変化を知ることを目標とする。

実験ではTNT系爆薬(商品名: コーズマイト)と低爆速爆薬(爆速1500~2000m/s)(商品名: アーバナイト)の2種類の爆薬を用いた。TNT系爆薬は通常はデカップリング処理を行わない状態で起爆される。これに対し, 低爆速爆薬は原理的には高性能の爆薬を小

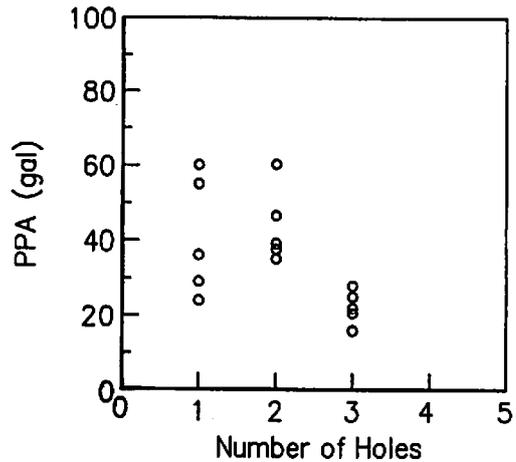


Fig. 2 Relation between peak acceleration and number of holes at an observation point (Exp.①)

口径で長装薬とすることによって爆速を遅くしたものであり, 通常の使用ではデカップリング処理を施した形式で発破が行われる。

孔径は45mmで一定とし, TNT系爆薬と低爆速爆薬の両方についてデカップリング処理を行った場合と行わない場合の振動の大きさを調べた。デカップリング指数は0.4である。

2.4 計測方法

振動の計測にあたっては加速度ピックアップ(リオン製: PV-87), プレアンプ(リオン製: VP-14A), 直流増幅器(日電三栄製: 6LO2)による信号をデータレコーダ(TEAC製: R-61)に記録した。ピックアップの設置にあたっては, 鉄板を良好な岩盤上に石膏で固定し, その上にマグネットで固定した。測点は発破位置から20m~150mの距離で5箇所設置した。計測した振動成分は鉛直成分である。

実験では発破する岩盤の状態がなるべく変化しないように, 発破箇所を1つの実験では1つの発破区域となるようにしている。

3. 実験結果及び考察

3.1 分割効果実験

実験①: 段当たり装薬量を一定とし, 複数孔に分割して装薬した実験

Fig.2は測点3の段当たり装薬量2kgの結果であり, 縦軸に加速度(gal), 横軸に孔数を取り, 加速度波形中の最大加速度をプロットした図である。全体にバラツキはあるものの, 段当たり装薬量が同じでも分割孔数を多くした方が振動の大きさは低減される傾向にあることを示している。この原因として, 各孔の起爆によって発生する振動が雷管起爆の時間的な差や起爆位

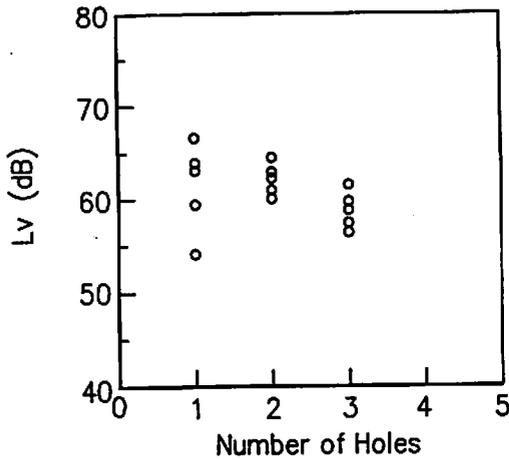


Fig. 3 Relation between vibration level and number of holes. Date shown in Fig.2 is used.

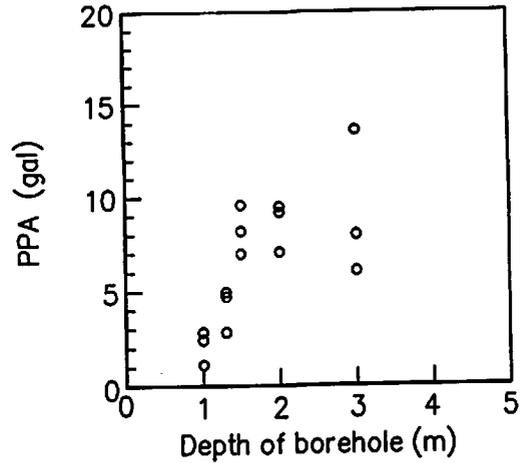


Fig. 5 Relation between peak acceleration and number of holes at an observation point (Exp.③)

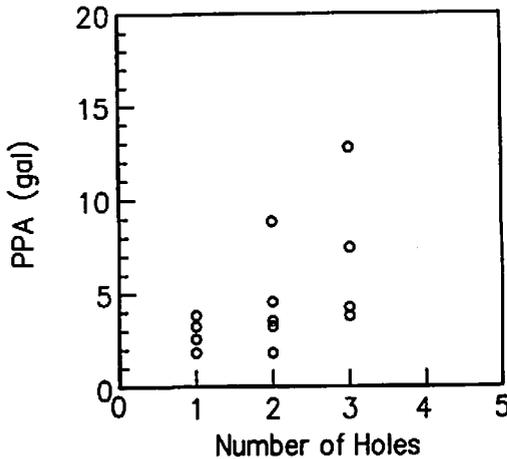


Fig. 4 Relation between peak acceleration and number of holes at an observation point (Exp.②)

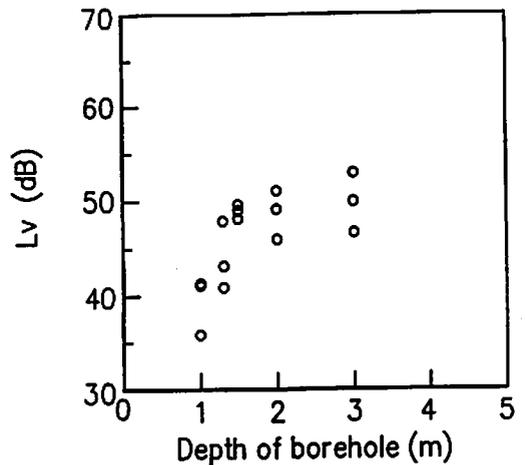


Fig. 6 Relation between vibration level and number of holes. Date shown in Fig.5 is used.

置の空間的な差のために相互干渉した結果によることなどが考えられるが、いづれにしてもこの結果から、各孔の振動波形が重畳した結果として生じる振動の大きさは段当たり装薬量のみによっては決定されないといえるようである。段当たり装薬量 1.6kg の結果についても同様の傾向が見られている。

Fig.3 は同じ加速度波形について振動レベルを算出し、その結果を孔数に対してプロットした図である。振動レベルにおいても分割効果が顕著であることがわかる。

実験②: 孔当たりの装薬量を一定にし、孔数を変化させた実験

Fig.4 は測点3の観測結果であり、縦軸に加速度

(gal)、横軸に孔数を取り、加速度波形中の最大加速度をプロットした図である。孔数の増加に伴い最大加速度値も増加する傾向にある。その増加の割合は孔数(段当たり装薬量)が2倍になっても2倍とはならず若干低い値となっているようである。この原因についても、各孔の起爆によって発生する振動が雷管起爆の時間的な差や起爆位置の空間的な差のために相互干渉した結果によることなどが考えられる。

以上より、一回に起爆する爆薬の量を少なくし、分割して複数孔に充填する方法は振動低減に対して有効であるといえる。また、分割発破により生じる振動の大きさは孔当たり装薬量と比例する傾向にあり、発破振動の大きさの推定には段当たり装薬量よりも孔当た

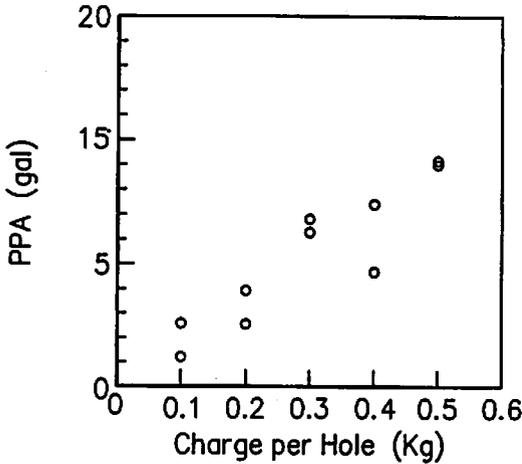


Fig. 7 Relation between peak acceleration and number of holes at an observation point (Exp.④)

り装薬量に着目する必要があるように思われる。

3.2 穿孔長効果実験

実験③: 孔当たり装薬量を一定にし、穿孔長を変化させた実験

Fig.5 は測点3の観測結果であり、縦軸に加速度 (gal)、横軸に穿孔長をとり、加速度波形中の最大加速度をプロットした図である。穿孔長を長くするに従って最大加速度値は急激に増加するが、ある長さ(約1.5m)以上からその勾配は緩やかになっている。約1.5m以浅での振動の急激な減少には盤打ち発破のための岩盤表面のゆるみ領域の影響が含まれている可能性もある。

Fig.6 は縦軸に振動レベル (dB) をとりプロットした図である。Fig.4 と同様の傾向を示していることがわかる。

実験④: 穿孔長を一定にし、孔当たりの装薬量を変化させた実験

Fig.7 は測点3の観測結果であり、縦軸に加速度 (gal)、横軸に装薬量をとり、加速度波形中の最大加速度をプロットした図である。この実験結果はほぼ装薬量に比例して最大加速度値は増加する傾向にある。

以上より、破砕効果との関連はあるけれども、穿孔長を短くすれば振動が低減することが判明した。

3.3 デカップリング効果実験

実験⑤: デカップリング処理の有無による実験

2つの実験が別々の場所で行われたので両者を比較するために、本現場で求められている最大加速度 (PPA) と装薬量、距離との関係 ($PPA = K \cdot W^{0.76} \cdot D^{-2.69}$) を用いてK値を算出し、検討を行った。Fig.8 は縦軸にK値、横軸に段当たり装薬量 (kg) をとり、

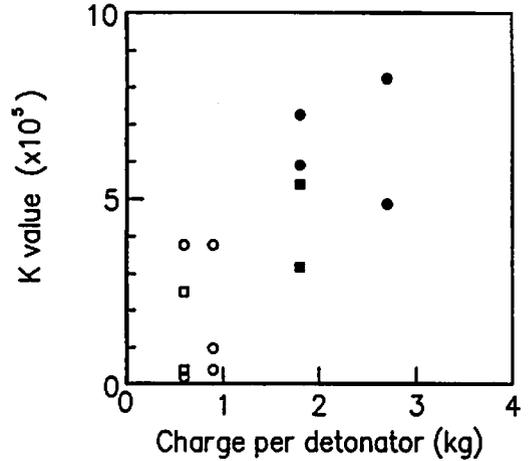


Fig. 8 Relation between K value and charge quantity of explosive per detonator hole at an observation point (Exp.⑤)

○ : low explosive ● : low explosive
□ : TNT explosive ■ : TNT explosive

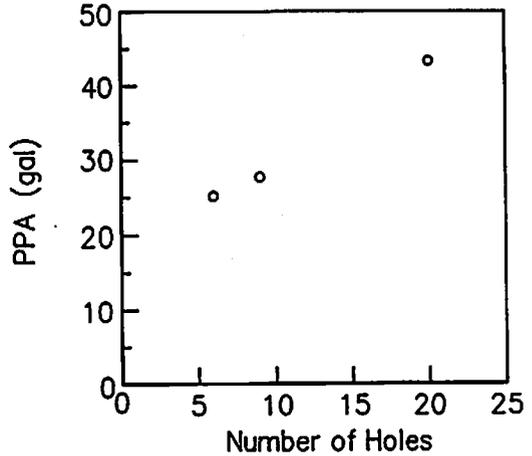


Fig. 9 Relation between peak acceleration and number of holes at an observation point (Exp.⑥)

プロットした図である。○、□印はデカップリング処理を行った場合の結果であり、●、■印はデカップリング処理をしない場合の結果である。(○、□)と(●、■)との差が顕著であり、低爆速爆薬とTNT系爆薬との間には明瞭な差は認められないようである。

以上より、デカップリング効果についてはかなり有効であることが認められる。

4. まとめ

低振動発破に関するいくつかの方法について現場実験を行い、定性的な傾向を得ることができた。以下にその要点を記述する。

1) m³当たりの装薬量を同じにし、段当たり装薬量を分割して複数孔に充填する方法は発破振動の低減に対して有効である。孔当たり装薬量を一定にして、孔数を増やした場合には孔数に比例して振動の大きさは大きくなる。しかし、その勾配は孔数倍ではなくそれより小さい。

2) 岩盤の破碎効果との関連を考慮する必要があるけれども、穿孔長を短くすれば発破振動は低減する。

3) デカップリング処理は振動低減に対して有効であると思われる。

4) 今回の実験結果から振動の大きさには孔当たり装薬量が密接に関連しているようである。

今回の実験結果からは上記のような定性的な傾向しか得ることができなかった。一般に、発破振動や岩盤の発破による破碎効果は発破対象である岩盤の状況に

より大きな影響を受ける。従って、厳密な意味での発破振動の検討を行うには十分に管理された岩盤に対して実験を行うことが必要となる。本研究においては「実務の中で若干の検討を行う」という形での実験であったため岩盤や雷管の管理にいくつかの問題点を残しているが、実務的には本研究の成果のような状況が起こりうるということも一つの参考とはなるであろう。

今後は、今回検討したいくつかの低振動発破法についてさらに定量的な評価およびそれぞれの発破法の相互の比較を行う必要があると思われる。さらに、今回の実験では振動の大きさのみに着目しているが岩盤の破碎効果との関連、発破音との関連、現場状況に合わせた低振動発破法の選択基準などについて検討することも必要であろう。

Field blasting experiments to reduce the magnitude of ground vibration

by Akihiko MIYAJI*, Sunao KUNIMATSU**, Takehiro ISEI**
and Koji NAKAGAWA***

For the purpose of reducing the magnitude of ground vibration, field blasting experiments were carried out at a construction field where floor ripping blasting is conducted.

There are several ideas to reduce the magnitude of the vibration practically. To examine four effects, five experiments were conducted as follows.

- 1) Effect of dividing the charge quantity of explosive,
- 2) Effect of burden,
- 3) Effect of decoupling,
- 4) Effect of detonation velocity.

As a results of experiments, qualitative tendencies to reduce the magnitude of the vibration were confirmed.

(*Sales Division, J. C. D. Corporation, 4—9—9 Akasaka, Tokyo 107, Japan

**Safety Engineering Dept., National Institute for Resources and Environment, AIST, MITI, 16—3 Onogawa, Tsukuba 305, Japan

***Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Tokiwadai, Ube 755, Japan)