

段発発破による発破振動の軽減（第1報）

小型モデル実験

田 中 一 三*

段発発破による発破地振動の軽減を検討した。ここでは簡単な条件のモデル実験場を作り、電気雷管を単位装薬とした小型実験を行った。はじめに段発発破における振動を測定した。そのあとで段発発破の際の地振動は、単発発破の振動の単なる重ね合わせとなることをたしかめた。そして測定点の固有振動をもとにして、波の位相を 180° ずらすような段発発破をすれば、明らかに振動が軽減されることを知った。

1. 緒言

住宅地周辺での発破や、大切な設備建物の近くでの発破が、発破地振動による公害問題をひき起こすことがあり、発破における地振動軽減対策は、重要な研究課題となっている。

大量の爆薬を爆発させる発破作業のとき、ボアホールに装填した複数の装薬を、全部同時に爆発させる斉発発破よりも、これらを数十ないし数百ミリ秒の時間差をおいて爆発させる段発発破の方が、発生する地振動は小さくなると言われている¹⁾。現在のところ段発発破は、もっぱら作業能率を上げる目的で使われているが、実際に振動軽減に役立つならばまさに一石二鳥である。

段発発破の地振動がなぜ小さくなるかについては定説がない。斉発発破にくらべて一発あたりの薬量が小さくなるからという「分割説」と、波形の干渉によるという「干渉説」が主なもので、後者はさらに干渉が線型か非線型かに分けられる。これについて名和氏等は、実験結果を引用しながら、線型的な干渉作用が最も有効であろうとしておられる²⁾。この考え方は、平たく言えば「段発発破の地振動は単発発破のその重ね合わせに等しい」ということである。すなわちある測定点において、単発発破で得られる地振動波形を $u(t)$ とすると、同じ点で測った時間差 T の二段発発破の波形は、 $u(t) + u(t+T)$ になるというものである。

干渉説では、段発の時間差が重要な意味を持つ。つまり波の重ね合わせは、必ず振幅が小さくなるときまったわけではなく、二つの波の山と山が重なるか、山と谷が重なるかによって、大きくも小さくもなり得るからである。

発破振動の測定は、実験の規模が大きくなると地盤構造の不均一や地形の影響などのためか、なかなかきれいな結果が得られなくなる。

ここでは実験条件を単純化した小型モデルを使って、単発発破および段発発破の地振動測定を行い、干渉説で言う「波の重ね合わせによる振動軽減」を示す結果が得られた。

実際の発破は、必ずしもモデル化された理想条件と異なるが、干渉説が成り立つとすれば、地振動軽減のための段発発破の設計は、本文に述べた方針に従えば容易である。

この研究報告は2報からなり、第1報に主として実験結果を述べ、これを補足する形で行ったシュミレーション計算を第2報とした。

2. 実験方法

モデル実験場の配置をFig.1に示す。この実験場は、最初は別の目的の実験³⁾のために作られたが、この目的にも適していることがわかったので、途中で研究所の移転があった後も、再度同じ形のものを設けて使用した。

モデル装薬には電気雷管を用いた。これを図の×印の砂中で爆発させると、2個のコンクリートと砂層からなる振動系の周波数が、通常スケールの発破振動に見られるのと同じ数十ヘルツのオーダーになった。

この配置は地表から深さ1mまでに、砂とコンクリ

昭和56年3月6日受理

*化学技術研究所

〒305 茨城県筑波郡谷田部町東 1-1

TEL 0298-54-4792

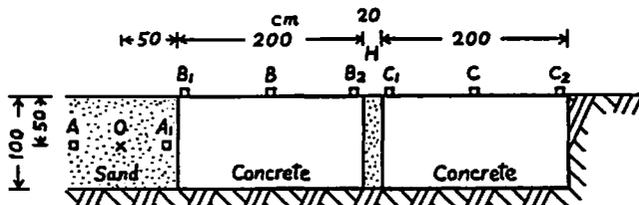


Fig. 1 Experimental condition for the simplified blasting model.

ートが交互に並んでおり、爆源の深さを50cmにとることによって、振動が一次的に伝播することを期待したものである(紙面に直角な奥行は1mである)。

この研究は実施時期によって二つに分けられ、実験条件には若干差がある。前半は単発発破のときの地振動波形をくわしく測定したが、これはFig.1で $H=10$ cmの条件で行った。後半は段発発破の実験で、その間実験場を作りかえて $H=20$ cmにしている。この差は、測定点の固有振動数に若干の違いを与えるだけで、本質的な違いにはならない。

図のA, A₁, B₁, B₂, C₁, C₂は単発発破の実験で加速度計を設置したところである。装薬の近くの砂中の測定には、DJBの圧電型加速度計A/03/W(DC~50kHz)を、コンクリートブロックの測定には、日本測器の圧電型加速度計541AS(~10kHz)を用いた。

後半の段発発破の実験では、B, C点の測定のみを行ったが、現象的にも比較的低周波の振動が問題になるので、扱いの容易な共和電業のひずみ計型加速度計AS-B(DC~1kHz)を用いた。

DJBの加速度計は、辺長が1cm以下の超小型のもので、そのまま砂中で埋めた。コンクリートブロックを測定した加速度計は、石膏で固定した。コンクリートには、そのための金属板を表面に埋め込んでおいた。いずれの場合も、現象を一次的にみなして水平動成分を測るようにした。

爆源からコンクリートに入射する振動を砂中で測るには、本来はA₁点で測定すべきであるが、実際にそれを行ってみると、コンクリートからの反射波が混ってしまう。そのため反対側のA点でも測定を行って、波形を比較した。

コンクリート表面での測定は、実験の前半にはB₁, B₂のようにブロックの両端で測ったが、問題とする数十ヘルツの振動に関しては、コンクリートは一体となって動いているとみなされたので、実験の後半ではB, Cのように中央で測定した。

モデル装薬としての雷管はすべて瞬発電気雷管で、段発時間差のコントロールは、発破器の側で行った。

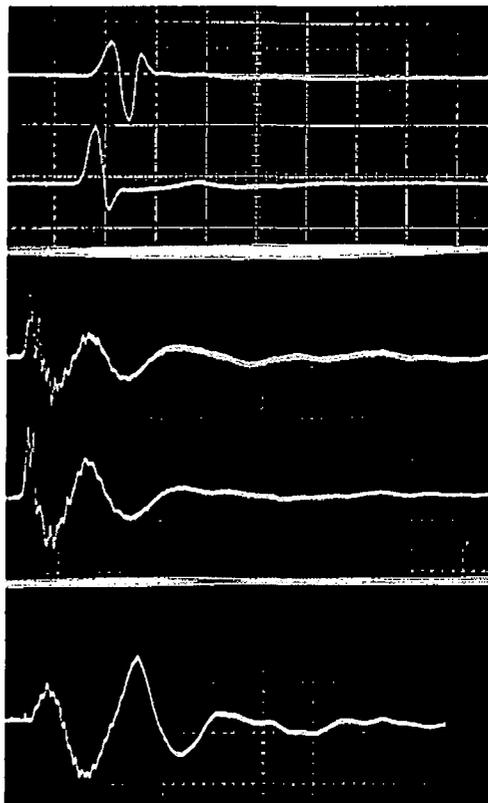


Fig. 2 Recorded acceleration signals of single shot, obtained at various points (upper to lower).

- A₁ 2500gal/div, 2ms/div.
- A 2500gal div, 2ms/div.
- B₁ 90gal/div, 10ms/div.
- B₂ 90gal/div, 10ms/div.
- C₁ 30gal/div, 10ms/div.

使用した発破器は、時間差をデジタル的にセットできる5段階発用の自作品である。各段の発破電圧は15V(使用した母線抵抗からみて電流は10A以上)で、通電から爆発までの時間遅れは0.2msec以下と推定される⁴⁾。

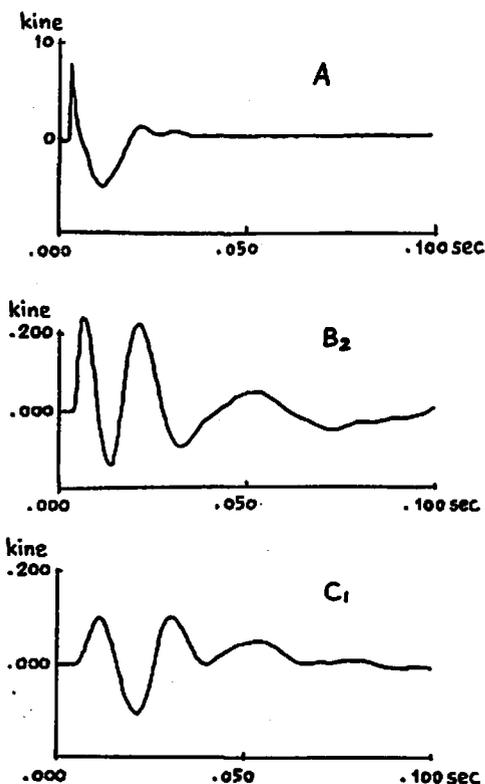


Fig.3 Velocity signals of single shot.
(Obtained by the integration of acceleration signals, at points A, B₂ and C₁)

段発発破のときの装薬は、紙面と直角方向に、砂を介して約20cm 間隔に雷管を必要な数だけ並べた。

加速度計の信号は、Ampex または TEAC のデータレコーダー (DC~20kHz) に記録し、必要があれば AD 変換の後、コンピューターによる波形処理を行った。

3. 単発発破の地振動

単発発破で得られた加速度波形を Fig.2 に示した。上の A, A₁ 点の波形に関しては、前節に述べた理由から、A 点の波形の方が純粹の入射波に近いはずである。中の B₁, B₂ 点の波形では、両者がほとんど同じであることがわかる。

固体中を一方向に進行する応力波は、圧力 (応縮応力をプラスにとったものを圧力と呼ぶ) を p 、粒子速度を u とすると、

$$p = Zu \quad (1)$$

の比例関係がある。ここに Z は媒体のインピーダンスである。そのため加速度波形は時間で積分して速度波形にすると、上のように圧力波と相似のプロファイルとみなされる。ただしそれは A 点のような純粹の入射波

に限られる (第 2 報参照)。

Fig.3 は Fig.2 の波形を積分したものである。

Fig.3 の A は、砂中を伝わる圧力波のプロファイルと相似と考えられる。測定は数回行ったが、最初のピークの高さにばらつきがあるものの、波形はほとんど同じであった。ここで最初のピークは、本来はこの値より高いと思われる。それは加速度計が衝撃波に追従できるほどの周波数特性を持たないことから予想された。図の波形をもう一度積分して変位にすると、最終的な変位がマイナスになってしまう等の矛盾は、そのためと思われる。

B₂, C₁ 点の波形は、積分したことによって、最初の衝撃的な立上りがいくぶんだらかになっている。そして速度波形に見られるゆるやかな振動は、入射衝撃波の波形にはあまり依存しない固有振動のように思われる。その観点から、次のようにして、入射衝撃波が刺激になって固有振動が発生する様子を、シュミレーション計算で明らかにした。

シュミレーションでは、モデルを一次元的に考える。そして Fig.1 から、爆源で発生した応力波は、順番に砂、コンクリート、砂、コンクリート、そして表土の層を伝播する。シュミレーションにあたっては、これらの層のインピーダンス Z と、両端を除いた中間の各層の厚さ X が必要になる。

インピーダンスに関しては、コンクリートおよび砂の音速を実測から 4000m/sec および 150m/sec とし、密度をそれぞれ 2.0 および 1.6 として計算した。そして各層の厚さは実験条件に等しくとった。こうして入射圧力波に Fig.3 の A の波形 (これは速度振幅の実測波形であるが、前述のように圧力波に相似とみなされる) を仮定して、B, C 点で得られる波形をシュミレートした結果は、Fig.4 のようになった。これらは速度振幅の波形であるが、Fig.3 の B, C 点の実測波形とよく似ていることがわかる。

シュミレーションの方法は第 2 報でくわしく述べるが、Fig.1 の C₂ の外側は一樣な媒体とみなし、弾性定数を適当に仮定した。実際にはこの数十メートル先には建物の基礎などがあって、必ずしも一樣な媒体ではなかったが、計算を簡単化している。

この場合に、波が 2 個のコンクリートを通過する時間は数 msec で、Fig.4 の波形の全体からみれば極めて短い。つまり図に見られる大きな波は 圧力波が 2 個のコンクリートの間を、何十回となく反射するうちに除々に形成されたものである。その意味では、実験場から数十メートル先の構造も、時間的には十分この波形に関与しうるはずである。そのことを考えに入れた上で見て、Fig.4 のシュミレーションが実測波形に

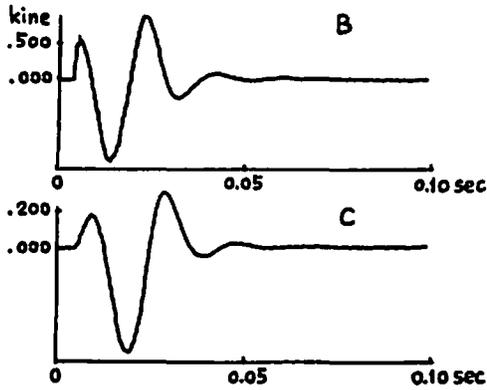


Fig.4 Velocity signals at B and C (by the simulation)

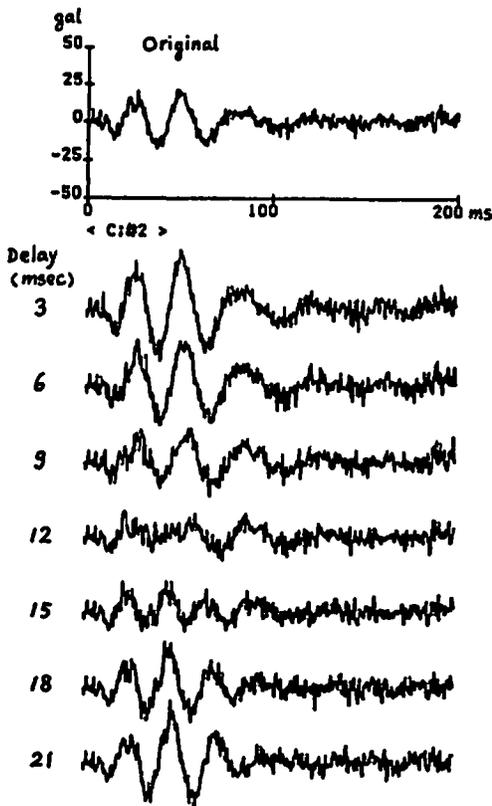


Fig.5 Superposition by delayed signal.

この程度似ているのは、一次元モデルとしての扱いがかなり良い近似になっていることを示している。

4.2 2段段発破の地振動

ここで行ったような実験条件については、前述のようなシミュレーションが可能であることから、段発破で複数の装薬を爆発させたときの地振動は、単発破

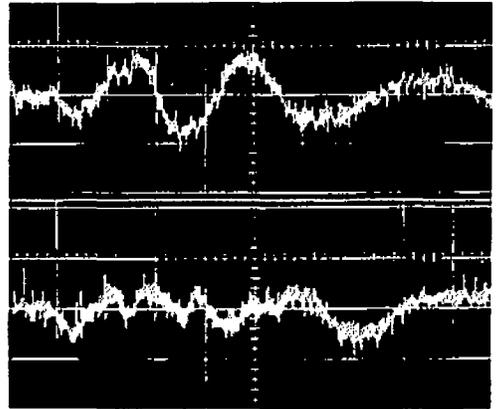


Fig.6 Measured vibration of single shot (upper) and two shot delay blasting of $T=12.5\text{ms}$ (lower). 30gal/div, 10ms/div.

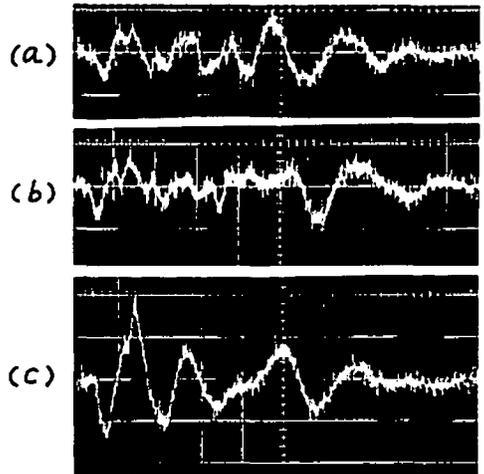


Fig.7 Measured vibration of multiple shot delay blasting. 30gal/div, 20ms/div. (a) 3 shots, interval 12 and 36ms. (b) 4 shots, interval 12, 36 and 12ms. (c) simultaneous shot of 4 charge units.

破のときの波形を、時間的にずらして重ね合わせたものになることが予想される。それはシミュレーションのもとになっている方程式が、線型的な重ね合わせを許すからである。

2段段発破では、重ね合わせた波の振幅を最小にするには、段発破のときの振動の固有周期から、その半分の時間だけずらせて位相を 180° 変えてやるのが最適であろう。実際には単発破の振動も、一つの周波数だけを持つ単振動ではないから、これでうまく行くかどうかは、計算で試してみるのがわかりやすい。

Fig. 5の一番上は、 $H=20\text{cm}$ の条件で単発発破をしたときのC点での実測波形である。ひずみ計型の加速度計によるものでややノイズが多い。この波形をもとに、適当な時間だけずらして重ねたものを下に描いた。目盛をつけてないが、いずれも上と同一スケールである。左端にはずらした時間 T を書いた。この中では $T=12\text{msec}$ のときの振幅が最も小さいように思われる。もとの波形は、周期的 24msec の固有振動を含んでおり、 $T=12\text{msec}$ はその $1/2$ 周期である。

実測の加速度波形を Fig. 6 に示した。上は単発のときで、Fig. 5 の計算に使ったのはこの波形である。下に $T=12\text{msec}$ の段発のときの波形を示した。この形は Fig. 5 の計算で予測したのとほとんど一致している。そしてこのような方法で振動軽減の可能なことがわかる。

5. 多段段発の場合

上に述べたことを施行すれば、3段以上の多段段発発破も同じように考えられるであろう。Fig. 7 に、測定波形例の幾つかを示した。

雷管を装薬単位とする等薬量の3段段発発破では、2段段発のときのようなまい条件が見つからなかった。3段段発では、 T_1 (1段目と2段目の間隔) T_2 (2段目と3段目の間隔) の二つをきめることになる。2段段発では $T=12\text{msec}$ が最適であったが、3段段発で同じように $T_1=T_2=12\text{msec}$ とすると、1段目と3段目の間隔がちょうど同位相の重ね合わせになるので、良い結果を与えない。

Fig. 7 は一番上が $T_1=12\text{msec}$ 、 $T_2=32\text{msec}$ の3段段発、真中はこれに $T_3=12\text{msec}$ を加えた4段段発の加速度波形である。一番下は、比較のために4発斉発のときの波形を示した。いずれもC点の加速度波形である。

これらは試行錯誤で振幅の小くなる条件を求めたものであるが、それをするのに実際の発破によらないでも、2段段発のときに Fig. 5 で行ったように計算してみればよい。ここでは図示しなかったが Fig. 7 は計算で求めた波形ともよく一致している。

Fig. 7 で3段段発のときに見られた 100msec 附近の山は、4段目を重ねることで打消されている。しかしその分だけ後方の振動が若干大きくなっている。発破の段数を重ねて振動のはじめの部分が消すと、消された波が後方にしわ寄せされた感じで出てくる。これは単発発破の波形が、後方に行くとき振動の周波数が変わってくるので、その部分が重ね合わせで強調されるような結果になるのであろう。しかしそれでも、波の振幅は斉発発破と比較すれば小さい。

薬量 W が変化したときの地振動振幅は、 $W^{2/3}$ に比

例するとされている¹⁾。この実験では特に薬量との関係を求めることはしなかったが、斉発発破のときの振幅はほぼ上の関係を満足していた。もしこの関係が一般化されるならば、薬量を変化させたときの段発発破で得られる振動 $F(t)$ は、単位薬量の単発発破のときの振動波形を $f(t)$ として、

$$F(t) = \sum_i W_i^{2/3} f(t+T_i) \quad (2)$$

となるであろう。ここに W_i 、 T_i は、 i 番目の装薬の装薬量と発破時刻である(ただし(2)式は厳密なものではない。つまり T_i の等しい斉発発破については合わないからである)。

一般に装薬量での振動波形 $f(t)$ が与えられたとき、その装薬量を細分化して段発発破とし、(2)式の $f(t)$ の振幅を最小にするような W_i 、 T_i を求めるのは、純粋に数学的な問題である。そして実際にそのような発破を行ってみて、地振動が予期されたほど小さくなるかどうか。これは今後の課題として興味あるテーマである。

6. 結 言

段発発破による地振動の軽減効果を図るため、できるだけ簡単な条件として、一次元配置のモデル実験場を作り、電気雷管による発破で地振動測定を行った。その結果、次のような知見が得られた。

振動測定のための加速度計をいろいろな場所に置いて測定することにより、爆源から発生した衝撃的な波形が、距離とともにだらかかな波形になり、実験場の構造からくる固有振動が発生する様子を知った。そしてこの固有振動は、モデル実験場を弾性的性質の異なる次元の多量層とみなして行ったシミュレーションと、よく合致した。

段発発破における振動の干渉効果を見るため、段発発破の測定波形を、単発発破の波形の重ね合わせと比較し、よく一致することを知った。また測定点で測った固有振動周期が約 24msec であったことから、その $1/2$ の 12msec の段発発破により、振動の山と谷が重なって振動が軽減できることが期待でき、実験結果もそのようになった。

2段以上の段発発破でも、測定波形は単発のときの重ね合わせとよく一致した。

実際の発破においてもこのような重ね合わせの干渉効果が成り立つとすれば、あらかじめ小薬量の試験発破を行って振動波形を求め、計算で重ね合わせの振幅が最小になるような段発条件を探ることが可能であろう。そして少なくとも2段発破で、時間間隔を測定点の振動周期の $1/2$ にすれば、振動はかなり軽減することが期待できよう。発破現場での実験は、今後の課題で

ある。

なおこの方法は、一般的にはある特定の地点を対象とすることになろう。これは発破地振動の波形は、測定点の固有振動に依存する部分が大きいためである。従って発破現場のまわりで、固有振動が場所ごとに異なるような場合には、そのすべてに有効な段発発破の条件は見つけにくいことになる。

謝 辞

この研究に関して測定の手伝いをして下さった大成

建設技術研究所の川上純氏、および日本油脂武豊工場の森伸生氏に、厚く感謝致します。

文 献

- 1) 工業火薬協会：「発破ハンドブック」, 山海堂 (1976)
- 2) 名和, 誉田：工火誌, 23, 61, (1962)
- 3) 川上, 田中, :工火誌, 42, 70 (1981)
- 4) 田中一三：工火誌, 35, 50 (1974)

Reduction of Seismic Vibration of Blasting by the Technique of Multiple Shot (I)

Small Scale Experiments

by Kazumi TANAKA*

The reduction of seismic vibration of blasting has been examined by the technique of multiple shot. Small scale experiments have been carried out in prepared simple conditions. Measurements were made on single shot and multiple shots. And it was recognized that the vibration of multiple shot could be thought as the superposition of delayed single shot. The reduction of vibration was possible by superposing two natural waves at measuring point, correlated to the inverse phase each other.

(*National Chemical Laboratory for Industry, 1-1, Yatabe-cho, Tsukuba-gun, Ibaraki-ken, Japan.)