★★ 論 説 及 び 報 告 ★★

爆破に伴う土地の振動について*

正 会 員 伊 藤 一 郎**

正 会 員 村 田 勉***

清 水 達 英****

On the Ground Vibrations caused by Blasting

Ichiro ITO, Tsutomu MURATA and Tatsuhide SHIMIZU

In this paper the authors reported the results of an experimental research on the ground vibrations caused by blasting operation.

The results obtained can be summarized as follows: The relationship between seismic ground amplitude and quantity of explosive fired can be shown by the simple power relationship as previously shown by some other investigators.

The ground amplitude does not seem to decrease linearly with the distance travelled, but at the stations nearer to shot point the relationship between the ground amplitude and the distance travelled seems to take more complicated form.

Within the scope of this experiment the amplitude seems to increase with the static and dynamic powers of explosives used.

1. 緒 言

爆破に伴う土地の振動の問題は、石灰石鉱山の露天掘採掘場での大発破に伴う振動によつて、鉱山周辺の建物その他の構造物に及ぼす被害を軽減したいという見地から研究が行われている。わが国では、石灰石鉱山の大発破に対してはこのような苦情は少ないようであるが、単に苦情対策のためのみでなく、その操業に多量の爆薬を使用している鉱山では、爆破による振動が、たとえば坑内支柱あるいは落盤等に及ぼす影響も保安上の見地から軽視出来ない問題であると考えられるから、爆破による土地あるいは岩石の振動の性質を究めておくことは、いろいろの意味において重要であると考えらる。

この研究は、以上のような見地から、爆破に伴う土地の振動について、次のこと柄を確かめたい目的で行つたものである。

- (1) 爆薬の装薬量と振動の振幅との関係
- (2) 爆破による振動の振幅と距離との関係

(3) 爆薬の種類と振動の振幅との関係

一般に振動は、それが伝播して来る媒質の性質によつて、その性質を異にすることはいうまでもないことである。

したがつて土壌あるいはそれに近い性質を持つ岩石と、一般の硬い岩石とでは、その振動の性質も自ら異なつてゐるのであるから、鉱山作業を対象としてこの問題を研究するためには、やはり鉱山におけるように硬い岩石層について研究を進めるのが妥当と考えられるが、今回は研究上の便宜の得られ易かつた丘陵地を実験地として選定した。実際の鉱山における振動の問題については逐次研究を進めてゆく考えである。

2. 測定方法および計器

爆破試験を実施した場所は、日本油脂株式会社武豊工場において爆破試験場として使用している丘陵地であつて、附近一帯の地質は砂混りの赤色粘土層地帯で、地質学的には新第三紀に属している。

丘陵頂上部の比較的平坦なところに、ほぼ南北方向に約150mの測線を設け、測線上に爆破孔よりそれぞれ10, 20, 30 および 50m 間隔に測点を設けて振動計を設置した。地質の関係上、爆破孔は繰返して使用出来な

* 昭和28年6月8日受理 昭和28年春季学術講演会講演

** 工博 京都大学教授 鉱山学教室

*** 工博 日本油脂株式会社 武豊工場研究課長

**** 日本油脂株式会社 武豊工場研究課副課長

つたので、1発破毎に爆破孔も測点もそれぞれ5mずつ移動させた。したがって爆破孔および振動計の位置の條件は測定毎に少しずつ異なっているものと思われる。

使用した振動計は京都大学地球物理学教室の佐々教授の設計されたC型地震計で、上下動成分が測定出来るもので、振子の自己振動週期は1/15秒である。この振動計を横河電気製作所製のN-6型電磁オシログラフに直結して記録をとるようにした。オシログラフのバイブレーターにはD型を使用した。このような測定装置による倍率を使用条件に基いて計算した結果は、30サイクルの正弦振動に対しては800~900倍となる。測定室は爆破地点より約200m離れたところにある建物中に設けた。

実験には径35mm、深さ約2mの爆破孔を垂直に掘り、薬量1,000gおよび1,500gの場合には3~5gの薬量で予め底部発破を行つた後に装薬した。装薬後は孔口まで充分粘土を詰め、六号電気雷管と乾電池を用いて点火した。合計34回の爆破を行つたが、そのうち結果処理に利用しうる記録の得られたものは25回であつた。

使用した爆薬は新桐ダイナマイト、紫カーリットおよび硝安ダイナマイトの3種であつて、その性能は第1表に示す通りである。

第1表 使用爆薬の性能

	火薬力 (l-kg/cm^2)	発生ガス量 (l/kg)	爆発温度 ($^{\circ}\text{C}$)	爆発熱 (kcal/kg)	爆速 (m/sec)	比重
新桐ダイナマイト	9,294	875	2,540	704	6,000	1.5
紫カーリット	8,554	645	3,230	1,097	4,200	1.12
硝安ダイナマイト	6,200	736	1,950	985	3,000	0.95

3. 測定結果の概要

測定によつて得られた記録の一例を示すと第1図の通りである。記録に見られるように、振動の波形はおおむね単調であつて第2図に示すように、振動の最初の振幅はやや小さく、これに続く1波長分の振幅が最も大きく、それ以後は時間の経過とともに徐々に減衰してゆく。振動計は爆破点から10、20、30および50mの4つの距離において測定を行つたのであるが、30および50mの距離における振動の記録は余り明瞭なものを得られなかつた。

第2図
振動の波形

れなかつた。

以上のように振動の波形はおおむね単調であるから、以下の結果解釈に際しての振幅の比較は、第2図の A_1 および A_2 に示したように、最初の半波長分および第3の半波長分の振幅をそれぞれの記録について測定して、比較検討することにした。測定記録を整理検討した結果得られた実験地の土地の振動の特性は次の通りである。

まず初動の到達時間から走時曲線を描いて求めた直接波の伝播速度は、その平均値が641.9m/secで、これは爆薬の種類によつて大きな変動は見られないが、薬量については、薬量の多いものほど僅かではあるが大きい値を示す傾向が見られる。次に各波形毎に周波数を求め、その平均値を求めて見ると30.1サイクルとなる。

4. 装薬量と振幅との関係

一般に理想的な条件のもとにおいては、土地の振動の振幅は、爆薬の爆発によつて生ずるエネルギーの平方根に比例するものと考えられ、このエネルギーは一般に装薬量に比例するものであるから、結局土地の振動の振幅

は、装薬量の平方根に比例するものと考えられている。ところが実際の爆破においては、生じたエネルギーのかなりの部分

が媒質の破壊と移動その他に費されるために、振動として伝わつて来るエネルギーは比較的少ないものと考えられる。したがつて、実測によつて得られる振動の振幅と装薬量との関係は、以上のような簡単な関係で表わすことが出来ない。このことについては、第2表に示す通り、すでに2,3の研究結果が発表されている。これらの結果からも推測出来る通り、装薬量と振動の振幅との関係は、その振動の伝わつて来る媒質の性質、装薬量および距離などによつて影響され、ある一義的な関係で表わすことは困難である。

1. 距離 10m における記録
2. " 20m "
3. " 30m "
4. " 50m "

第1図 振動記録の一例 記録番号 11, 装薬量 新桐ダイナマイト 1,500g

第2表 既往の研究による装薬量と振幅との関係

研究者名	実験により得られた関係式	実験地の媒質
Rixmann ^{*2)}	$A=0.00854C^{0.5124}$, $A=0.10163C^{0.6079}$, A : 振幅 (ミクロン), C : 装薬量 (g)	乾燥した砂中 湿潤な砂中
Thoenen 及び Windes ³⁾	$A=0.027C^{0.5}/d$, 但し $20\text{ lb} < C < 200\text{ lb}$, $300\text{ ft} < d < 1,500\text{ ft}$, A : 振幅 (吋), C : 装薬量 (ポンド), d : 距離 (呎)	鉱山の岩石
Thoenen 及び Windes	$A=K C^{0.371}$ K : 常数 A, C は上と同じ単位	Rixmann と 同じ媒質と薬 量
Thoenen 及び Windes	$A=PC^{2/3}/(0.07e^{-0.001432}+0.001)/100$, P : site factor, A : 最大振幅 (吋), C : 装薬量 (ポンド) d : 距離 (呎)	採石場
Habberjam 及び Whetton ⁴⁾	$A=0.583C^{0.305}$, A : 振幅 (1/10,000吋) C : 装薬量 (ポンド)	採石場

* 表に示した関係式は、Rixmann の得た測定結果に基づき、計算によつて求めたものである。

今回の実験では、新桐ダイナマイトを使用して、その装薬量を 200g, 500g, 1,000g および 1,500g に選び、それぞれ数回の測定を行つて装薬量と振動の振幅との関係を求めた。その後おのおの場合に得られた記録から振幅 A_1 および A_2 を読み取り、測定装置の倍率から逆算してこれらに対応する土地の振動の振幅を求めた。その結果は第3図(a)および(b)に示す通りであつて、各

振動計の距離10mの場合
同 振動計の距離20mの場合

以上の関係を、既往の研究者によつて得られた第2表の結果と比較すると、振動計の距離10mの場合の振幅と装薬量との関係は Thoenen および Windes によつて得られている $A=0.027C^{0.5}$ の関係にほぼ近いが、振動計の距離20mの場合に得られた結果は、既往の研究者達

の結果とは趣を異にしている。前に述べた通り、土地の振動に消費されるエネルギーは、爆破によつて与えられるエネルギーの一部分であるから、有効な爆破が行われた場合の振動の振幅と装薬量との関係 $C=KA^x$ においては、指数 x の値は2以下の値をとるものと考えられるのに、今回の実験で得られた結果はいずれもこの x が2より多少大きい値を示している。これは装薬によつて与えられた爆破のエネルギーのほとんど大部分が振動として伝わり、なおその上に土地の性質そのものがその振動を伝え易く助長するように働いたものと考えられるのである。事実今回の実験では、1,500g の爆破によつても全くクレーターを生じなかつたことからこのことが窺える。これらの点が鉱山における爆破によつて得られた従来の結果と趣を異にする大きな理由ではないかと考えられる。

(a) 振動計との距離 10mの場合

(b) 振動計との距離 20m の場合

第3図 装薬量と振幅との関係

5. 距離と振幅との関係

今回の実験では、振動計を爆破点から 10m, 20m, 30m および 50m の 4 カ所において測定を行つたので、距離によつて振幅がどのように変化するかを求めて見た。振動計の特性はいずれも同一に製作されているが、製作後長年使用されておるためにそれぞれの癖を持っており、また使用条件や土地の性質によつても感度が異なつて来るものと思われるので、それぞれの振動計を爆破点から同一距離の円弧上に配列して各振動計の感度を比較し、その値を結果の解析に利用した。

実験結果から爆薬の種類及び薬量別に振幅の平均値を求めて、距離と振幅との関係を図示すると第 4 図の通りである。

第 4 図に示した各曲線について実験式を求めて見ると第 3 表の通りになる。

既往の研究発表によれば、多くの場合振動の振幅は距離に逆比例するように取扱われているものが多いが、今回の実験のように比較的爆破点に近い距離においては、振幅と距離との関係は必ずしもそのような簡単な関係で表わすことは出来ない。今回の実験の結果では、第 1 波

形の振幅 A_1 については、距離について二次曲線的に、第 2 波形の振幅 A_2 については同じく指数曲線的に減少する関係が認められた。一般に爆破点に近い距離では、その減少の割合が大きいことが認められる。

第 3 表 距離と振幅との関係を示す実験式

爆 薬 名	装薬量 (g)	振幅 種別	振幅と距離との関係を示す実験式
新桐ダイナマイト	200	A_1	$A=13.8705-0.6512d+0.007788d^2$
同	500	A_1	$A=16.1571-0.6074d+0.006464d^2$
同	1,000	A_1	$A=17.9263-0.5253d+0.004068d^2$
同	1,500	A_1	$A=26.9412-1.0766d+0.011444d^2$
紫カーリット	1,000	A_1	$A=27.1307-1.0913d+0.011897d^2$
硝安ダイナマイト	1,000	A_1	$A=15.5071-0.3959d+0.002215d^2$
新桐ダイナマイト	200	A_2	$A=2168d^{-1.9257}$
同	500	A_2	$A=906d^{-1.4786}$
同	1,000	A_2	$A=2001d^{-1.5978}$
同	1,500	A_2	$A=3397d^{-1.7794}$
紫カーリット	1,000	A_2	$A=1811d^{-1.5511}$
硝安ダイナマイト	1,000	A_2	$A=2629d^{-1.7175}$

A : 振幅 (mm), d : 距離 (m)

6. 爆薬の種類と振幅との関係

爆薬の種類と振幅との関係を調べるために、爆薬として新桐ダイナマイト、紫カーリットおよび硝安ダイナマイトの 3 種を選び、薬量を 1,000g に一定にして実験を行つた。使用した爆薬の性能はすでに第 2 表に示した通りである。

実験の結果を第 4 表に示した。

第 4 表より明らかな通り、振幅も使用爆薬の静的および動的威力にほぼ対応して増減している傾向が窺えるが、爆薬の種類も少なく、また実験回数も少ないために、この結果のみから明確な結論を出すことはなお早計であつて、更に多くの実験を行つて検討する必要があるものと考えられる。

7. 結 言

今回の実験により得られた結果を要約すると次の通りである。

(1) 実験地に選んだ新第 3 紀に属する粘土層地帯の弾性波の伝播速度は 640m/sec であり、振動の周波数は 30 サイクル前後である。

(2) この実験の結果得られた装薬量と振幅との関係は、

$$A=0.782C^{0.492},$$

$$A=1.786C^{0.468},$$

$$A=0.789C^{0.397},$$

$$A=1.093C^{0.398},$$

の関係で表わすことが出来る。

(3) 距離による振幅の減少については、従来発表されているような簡単な一次的な逆比関係でなく、今回の

第 4 図 走行距離と振幅との関係

第4表 爆薬の種類と振幅との関係

記録 番号	薬 種	装薬量 (g)	記録読取りによる振幅 (mm)		土地の振動の振幅 (mm)	
			A ₁	A ₂	A ₁	A ₂
7	新桐ダイナマイト	1,000	16.20	54.2	0.01723	0.05766
9		1,000	10.30	45.3	0.01096	0.04819
15		1,000	12.14	44.4	0.01291	0.04723
平均		1,000	13.13	47.87	0.01397	0.05093
3	紫カーリット	1,000	17.87	38.1	0.01901	0.04053
6		1,000	18.50	51.0	0.01968	0.05426
14		1,000	11.16	45.4	0.01187	0.04829
17		1,000	23.08	67.5	0.02455	0.07181
平均		1,000	17.65	50.5	0.01878	0.05372
10	硝安ダイナマイト	1,000	8.20	42.6	0.00872	0.04532
16		1,000	15.40	58.93	0.01638	0.06269
平均		1,000	11.80	50.77	0.01255	0.05402

実験の結果では、第1波形の振幅については距離について二次曲線的に、第2波形の振幅については指数曲線的に減少してゆくことが認められた。

(4) 爆薬の種類と振幅との関係については、使用した爆薬の種類も実験回数も少ないために、明確な結論を出すことは早計であると思われるが、この実験の範囲内では、爆薬の静的および動的威力に比例して振幅も増減するものと考えることが出来る。

附記 本研究を行うについて色々と御援助を頂いた日本油脂株式会社武豊工場工場長藤剛三郎氏、副工場長中井賢一氏並びに実験のお手伝いをお願いした同工場の研究課の方々に心からの感謝を捧ぐるものである。なお本研究の一部には文部省科学試験研究費の補助を受けた。併せて感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) G. M. Habberjam and J. T. Whetton: Geophysics, 17 (1952) 116~128
- 2) F. Rixmann: Zeitschrift für Geophysik, 11 (1935) 197~207
- 3) J. R. Thoenen and S. L. Windes: U. S. Bureau of Mines, Bull. 442 (1942)
- 4) G. M. Habberjam and J. T. Whetton: 前出

Book Review

ECONOMIC GEOLOGY

June-July 1952 No. 4

The Structure and Origin of the Banded Hematite Jaspers of Singhbhum, India.
Differential Thermal Curves of Selected Lignites.
Antimony Deposits of Tuscany.
Indicator Minerals, Coeur D'Alene Silver Belt.
The Relationship Between Polarization Colors and Rotation Properties of Anisotropic Minerals.
Research, Fellowship Grants Renewed by Shell Oil Company for 1952-3.
How to Write Geologese.

ENGINEERING AND MINING JOURNAL

May 1952

Yellow Pine Is Expanding Output of Strategic Metals.
How to Move a Headframe-and Why.
Trolley Haulage Speeded by Better Communication.

Florida Sands Boost Supply of Titanium Mineral.
Remedy Sought for Mica Shortage.
Leaching with Niter Cake.
A Better Way to Prepare, File, and Index Mine Maps and Drawings.
How the Variable-Speed Drive Can Raise Your Output.
Why Gold Premium Markets Aren Likely to Disappear.
Keeping Tab on Practice.

MINING ENGINEERING

Jan. 1952

The Selection of Drilling Machines.
Drilling with Coromant Equipment.
Testing Round Carbon Drill Rod.
The Selection and Use of Drill Steel.
The Selection of Rock Drill Bits.
Control of Conveyor Belt Acceleration.
Manganese Extraction by Carbonate Solutions and the Chemistry of New Manganese-Ammonia Complexes.

Super High Intensity Magnetic Equipment for Protecting Conveyors.
Frothing Characteristics of Pine Oils in Flotation.
Illinois Operations of the Eagle Picher Mining and Smelting Co.
Dimention Stone in Minnesota.

Feb. 1952

Annual Review-1951.
Mining Geology.
Metal Mining.
Beneficiation.
Open Pit.
Geophysics.
Industrial Minerals.
Coal.
Diamond Orientation in Drill Bits.
Underground Mining Trends in the Great Swedish Export Iron Ore Mines.
Adsorption on Quartz, From An Aqueous Solution, of Barium and Laurate Ions.
Recens Cosal Geology Research.

Book Review