

爆薬猛度の実験的研究

第XVII報 工業爆薬による岩石内応力波の伝播性

(昭和33年7月1日受理)

桜井 武 尙

(日本油脂株式会社武豊工場)

1. 緒 言

一般に、破壊は空間的な分布様式ばかりでなく、荷重が静的に加わるか、交替的に加わるか、かなり速く加わるか、突然に波動的に加わるか等の速度的因子によつても変化するものである。従つて、岩石の爆破にも色々な破壊形式があり、この種々の機構の内、どのような効果が経済的な岩石の採掘量の主因子となるものかを明確にすべきである。爆破では、最初にきわめて高速高圧の衝撃をもたらす爆薬の爆発を利用するので、初期の波動的特性に依する問題と、現象後期にわたつての準静的 (quasi-static) な場合との二段がまえの研究態度をとる必要があると思われる。

このうち、前者はきわめて高速度の現象でその持続時間が短く、又、超高圧という実験的な困難があつた。本報告は、特に工業爆薬による岩石内応力波の伝播性を調べ、それから岩石の動的な状態図を求め工業爆破との関連性を考察したものである。

2. 実験方法

長さ a の岩石試料を工業爆薬によつて衝撃した際に発生する応力波の速度 c 、並びに物質速度 v を求める。 c は衝撃開始から波が試料の自由面に到達するまでの時間 τ を求めて計算し ($c=a/\tau$)、 v は波が試料の自由面に到達したとき、自由面の初期の運動速度が物質速度の2倍に等しいという原理を利用して求める。又、 c と v が分れば、波頭圧力 P は次の運動量の式によつて与えられる。

$$P = \rho \cdot c \cdot v \dots\dots\dots (1)$$

ρ : 試料の密度

衝撃源である爆薬波が試料の端面に到達した時間は試料端面に置いたイオン探針で知り、波が試料の自由面に到達した信号は、自由面の運動によつて接触する電気的コンタクトにより、時間計器には高速度掃引ブラウン管オシログラフを用いた。

試料の自由面は平らに研磨し、アクリル樹脂系の接

着剤で錫箔 (厚さ 0.015mm) をはり、これを共通線に通じておく。この試料の下に、厚さ d の絶縁物を介して鉛柱を置き、これを被接合体とする。これらの具体的方法は、第 X, XII, XIII 報^{1) 2) 3)} と全く同様である。

測定方法図は図1、得られた掃引写真の一例は写真1の如くである。

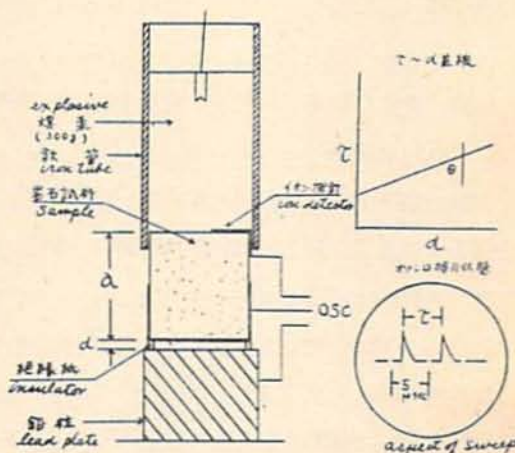


図1 測定方法図



写真1 掃引写真の一例

掃引方向、右から左、時間軸 5×10^{-6} sec 毎の破線、新桐ダイナマイト～セメントモルタル $a=80$, $d=0.025$ mm

爆薬には板ダイナマイト、新桐ダイナマイト、紫カーリット、硝安ダイナマイトをえらび、これらを内径 42mm、肉厚 4mm の鉄管に 300g 装填し、8号雷管で点爆した。

試料は、セメントモルタル (セメント4, 砂6)、大理石砂岩、花崗岩の四種で、直径 40mm の円柱形の

ものである。試料は約5mmの深さで上記鉄管内に挿入され、試料上端は直接、爆薬と接触している。

3. 実験結果とその考察

3.1 応力波の形式の変化

以上のようにして、コンタクト間隔 d を変えて c を求めて得たグラフの一例は図2の如きものであつて、実験結果をまとめれば Table 1 のようになる。

Table 1

Characteristics of stress wave in Rock
 a : length of specimen,
 c' : measured wave velocity in distance a .
 v : particle velocity,
 p : pressure

Rock	explosive	a mm	c' m/s	v m/s	p 10 ⁴ g kg/cm ² m
Concrete $V_0=5.07$ $\times 10^2$ cc/kg	Sakura	20.4	3,460	835	6.06
		41.1	3,610	84	0.65
	dynamite	61.1	3,950	39	0.29
		81.0	3,680	23	0.17
Marble $V_0=3.7+$ 10^2	Shingiri	21.0	3,750	1,000	6.64
		40.0	3,330	114	0.92
	dynamite	60.5	3,680	40	0.31
		80.1	3,640	23	0.16
Sand-stone $V_0=4.14$ $\times 10^2$	Murasaki	22.5	-	160	1.58
		60.0	3,160	35	0.29
	carlit	81.9	3,560	20	0.15
		Sekura dynamite	25.2	5,310	238
50.0	5,550		117	-	
Granite	Shingiri	25.0	5,160	1,000	16.7
		35.0	5,840	264	3.9
	dynamite	50.0	5,450	115	2.5
		Murasaki	25.2	5,860	209
carlit	35.0		5,800	122	0.91
	50.0	5,420	72	0.76	
Smmonia dynamite	Shingiri	25.2	5,860	84	-
		50.0	5,420	70	-
	dynamite	2.58	4,160	1,000	-
		34.0	3,400	-	-
50.0	3,130	-	-		
Murasaki	carlit	24.9	5,360	400	-
		50.0	4,270	173	-
Shingiri	dynamite	25.0	6,520	435	-
		50.0	5,260	345	-

第1表に示した波の伝播速度 c' は各距離 a 内の平均伝播速度である。そこで、これを局部速度に直して、伝播速度 c の距離的变化の様相を示すと図3のようになる。このとき、 c は次のようにして求める。

$$c_i = \frac{c'_i a_i - c'_{i-1} a_{i-1}}{a_i - a_{i-1}} \dots \dots \dots (2)$$

$$i=1, 2, \dots \dots n,$$

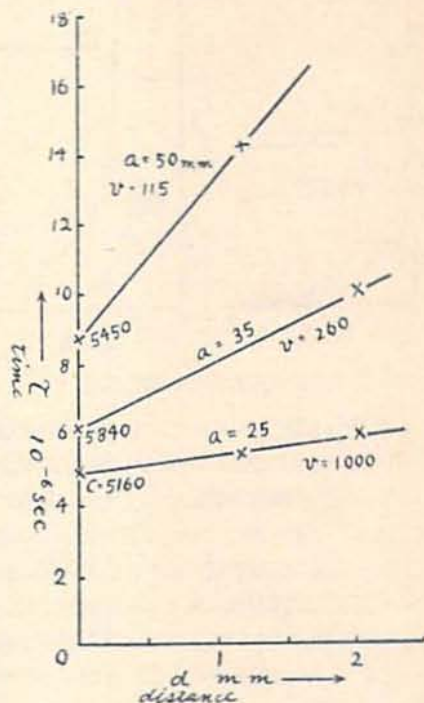


図2 $c \sim d$ 曲線の一例(大理石, 新桐)

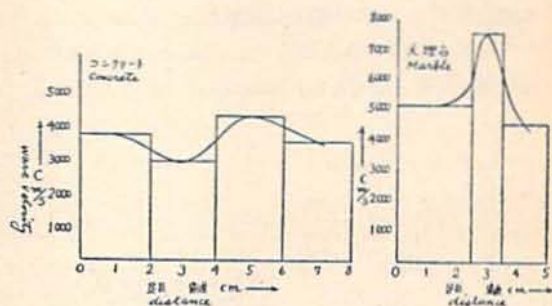


図3 伝播速度 c の距離的变化

(1)式による波の圧力は急速に減衰し、セメントモルタルを例にとれば、距離8cmに至れば薬種による差はほとんどなくなつて、1,500~1,700kg/cm²となり、薬種による差が明瞭なのは6cm以内である。

又、この爆源近くでは新桐ダイナマイト及び桜ダイナマイトは共に紫カーリットよりも高圧の様相を呈していることが注目される。

この圧力変化の様相は当然、岩石の種類によつても異なり、大理石ではセメントモルタルよりも遠くまで高圧の状態がつづき、かつ爆薬の特性による差も大きい。

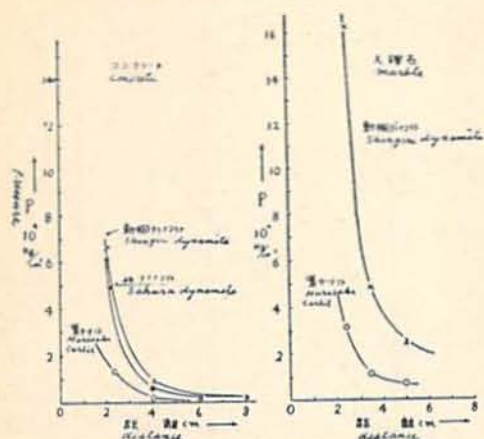


図4 波頭圧力Pの距離の変化

先に、第Ⅱ²⁾、Ⅲ²⁾報において、爆薬で固体を衝撃したとき、波の速度は爆源から直ちに連続的に減衰する、いわゆる正規衝撃波の概念のみでなく、場合によっては、爆源から数〜数十mmの短い領域ではあるが、むしろ低速度の伝播領域があり、この領域の終点から始めて高速度伝播領域に入ることを指摘した。工業爆薬と岩石の場合においてもこのような現象が認められる。これはcの距離的变化を示した図3から明らかに認めることができる。大理石では、5,000m/sの低速度伝播領域が約30mmつづき、次いで7,000m/sに急上昇する。この実験の信頼限界は、4,500m/sにおいて信頼度95%のもとに $\beta \pm 120(m/s^2)$ であるから、この差は誤差とは考えられぬものである。この特異な

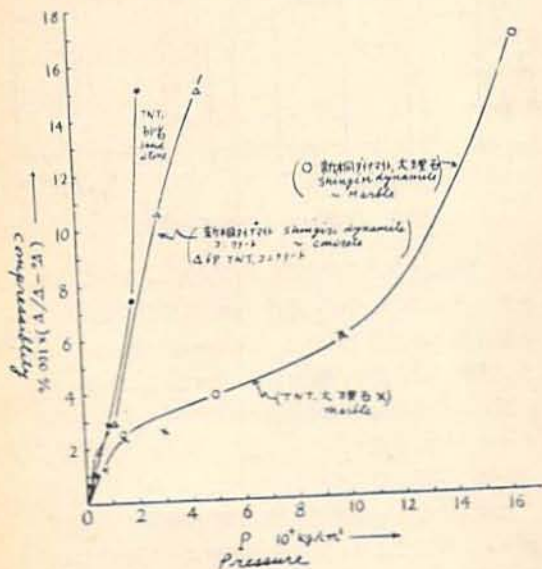


図5 岩石の高圧下の動的状態図

様相は第1に高速度の爆薬ほど強く現われることが注目される。第2に表から分るように、この低速度伝播領域では物質速度 v は高速度伝播領域よりも一段と高速である。この領域内では、 c は低くても v は高速のため、両者の積に比例する圧力は高い。このような現象は特に第Ⅱ、Ⅲ報で高次塑性流動波と名づけて論じておいた通りである。

3.2 岩石の高圧下の動的状態

以上の如く、 c と v の一連の関係が明らかになれば次式に従つて、圧力 P 〜比容 V の関係を求めることができる。

$$P = \frac{1}{V_0} \cdot c \cdot v \dots\dots\dots (3)$$

$$V = [(P - P_0)(V_0 - V)]^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

P_0 , P は波の前後の圧力、 V_0 , V は同じく比容である(3), (4)式に実験で求めた $c \cdot v$ の関係を代入すれば $P \sim V$ 関係が出る。但し、この式は厳密には正規の衝撃波に関するものである。結果は図4のようになった。セメントモルタル、砂岩の二例はTNTを用いた第Ⅴ報によるものであるが、工業爆薬である新桐ダイナマイトと、TNTの両者についての結果を比較する(大理石)。

その結果、薬種による差は認められず、言いかえれば、このような岩石の特性曲線(状態図)は物性的なもので、衝撃に用いた爆薬の種類とは関係がないことを示している。

3.3 種々の波動形式と岩石の特性が工業爆破に及ぼす影響

ここで、特に爆源部で明らかになつた波動の形式は一般に高次塑性流動波領域(数〜数十mmまで)正規衝撃波領域(数〜数十cm)であるが、この間の破壊機構は次のようになるものと思われる。高次塑性領域では岩石は液化されており、これは応力の解放と共に急激な温度の低下をともなつて岩石をきわめて微細な粒子に分つ。衝撃波領域では波の性質を考慮しても明らかのように、波面の伝播過程でもろい形式の破壊因子を与え、この効果は距離と共に急激な波面圧力の低下にともなつて統計的に粗くなる。この点については先に第Ⅴ報²⁾で観察した如くである。これらの高圧波動による直接的破壊効果は一般に比較的爆源に近い部分のみに起り、又、図4からわかるように、爆薬の動的特性(Brisance)に支配されるものである。

次に、岩石の特性が爆破効果に及ぼす影響は次の点にあると考えられる。第1に、図5に明らかなように、岩石の状態図はその種類によつてかなり異なるために、

同一爆薬による爆破効果にも大きな差が現れてくる。第2に、現象は爆源から減衰する性質のものであるから、初期条件が状態図に現われている各現象形式のどの領域に当るかが問題となる。但し、ここに示した状態図は、きわめて動的な特性に関するものであり、荷重がより静的になつた場合はこれらの曲線とは又異つた様相を呈してくることを考慮しておく必要がある。

尚、工業爆薬は今後統計的な考え方を導入することが必要であるが、ここではこのような問題にはふれず、物性的な主題に限定して実験、考察を進めた。それは、ここにとりあげた問題が爆源近傍の現象であり、そのような高速高圧の領域における現象は統計的性質をはなれて、むしろ、純力学的に考察しても本質的な誤りはないと思われるからである。

4. 総 括

本報告は、主として、工業爆薬の爆発によつて岩石内に生じた高圧の波動の形式や、それに従う岩石の特性差を論じたものであつて、これを総括すれば次の如くである。

(1) 爆薬には松ダイナマイト、新桐ダイナマイト、紫カーリット等を、岩石試料にはコンクリート、大理石、花崗岩等をえらび、衝撃端面から種々の距離における波の伝播速度 c と物質速度 v を測定した。信号の発生には、衝撃開始にイオン探針、波の検知に試料の自由面の運動によつて端終するコンタクトを用い、時間計はブラウン管オシログラフによる。

(2) 実験結果を図示し、工業爆薬と岩石の場合に

おいても、衝撃端面から数〜数十mm内に低速度伝播領域、すなわち、高次塑性流動波が存在することを明らかにした。

(3) 波頭圧力の減衰性は、同一薬種を以ても岩石の種類により異り、又、同一岩石内で薬種の差が現れるのはきわめて近距離に限られる。

(4) 松、新桐ダイナマイトの如く高比重、高爆速のものは、低比重低爆速の粉状系爆薬よりも、爆源近傍に高圧の波動を与える。

(5) 新桐ダイナマイトの実験値(c, v)について求めた大理石の圧力 P と比容変化 $\Delta V/V_0$ の関係を、TNTによる場合(第XV報)と比較し、両者は良く一致することを知つた。

(6) 応力波の形態の変化、並びに岩石の特性が工業爆薬に及ぼす影響を論じた。

本報告は試料作成を始め、京都大学伊藤一郎教授の直接の御指導による所が大であり、本稿の内容は同先生と共に日本鉱業会誌⁶⁾に報告した。深く先生に感謝する。

文 献

- | | |
|---------------------|--------------|
| 1) 桜井武尚：工火誌 | 17 35 (昭31) |
| 2) 〃 : 〃 | 18 225 (昭32) |
| 3) 〃 : 〃 | 18 308 (昭32) |
| 4) 〃 : 〃 | (投稿中) |
| 5) 〃 : 〃 | (〃) |
| 6) 伊藤一郎、桜井武尚、日鉱誌(〃) | |

On Brisance of Explosives (XVII)

On the Propagation of Stress Waves

produced by industrial Explosives in Rock

by T. Sakurai

The present paper includes the problems of typical stress-waves formed in rock attacked by detonation of industrial explosives and dynamic mechanical properties of rock.

By using Brown-tube oscillograph the author measured the velocities of wave propagation and particle velocities in rock occurred by detonation.

Previously, he pointed out the formation of

high-order plastic waves in almost solids under violent impact such as detonation. In his present experiment, this type of wave is also found. At this singular zone the propagation velocity is rather low and on the contrary the particle velocity is very high.

The tendency of this phenomenon is different from the kind of rock.

In marble high-order plastic deformation occurs more intensely than in cement mortar or sandstone.

The decaying of pressure is very rapid, and shows the fact that the difference of pressures by various explosives appears only within distance of few centi-meter from impact surface and brisance of explosive exhibits at rather near region from impact surface.

The pressure of wave produced by Shingiri-

dynamite is higher than the case of Murasaki carlit.

Further the author introduced the relations between pressure and volume change of rock from his present experimental results and discussed on their connection to blasting.

(Nippon Oils and Fats Co.,

Taketoyo Plant.)

爆薬によるメタン空気混合ガスの着火性に関する研究

第1報：高速度カメラによるメタン着火の観察

(昭和33年7月1日受理)

篠原昌史

(日本油脂株式会社武豊工場)

1. 緒言

爆薬によるメタンガスの着火については多くの研究がなされ、その着火機構については爆発で生じた高温ガス、衝撃波あるいは灼熱固体粒子等が考えられる。しかし実際の現象は、これらの個々の単独因子によるよりも、それらの共同作用によるものであると考えた方が妥当である¹⁾。また、着火限界薬量は同じ爆薬についても試験条件、即ち、白砲試験、懸吊試験、あるいは溝切り白砲試験等によつて異なり²⁾薬種によつてもこれらの試験法の影響が異なる事も認められている。この理由は爆薬の置かれる条件で前記各因子の作用機構の強弱があるためと考えられ、我々は上記の個々の試験法の実験結果を基にして、実際発破における安全度を推定するわけである。従つて、この問題はかなり複雑なものであるが、筆者は、第一段階として、現象として最も研究しやすい懸吊試験について、高速度カメラによる観察を行ったのでその結果を報告する。

2. 実験装置および方法

試験坑道としては直径43cm, 70cm, 120cm, 爆発室の長さ夫々150cm, 100cm, 250cmの三種を使用し、カメラは(1)福原式高速度カメラ(レンズ, F 1.7 タ

イマーは水晶発振器利用)(2)流し式回転カメラを用いることとした*。

使用爆薬は表1に示す如くである。

表1 使用爆薬

薬種	薬径	仮比重	爆速 (紙筒)	爆発 温度	火薬力	写真 No.
硝爆A (含NG)	40	0.96	2,700	2,073	7,206.2	
同上	30	0.96	2,500	2,073	7,206.5	10.11.
硝爆B	32	1.02	3,500	2,010	6,220.4	7.
硝ダイC	30	0.97	2,250	2,030	7,400.3.	
硝ダイD	30	1.00	2,100	1,950	6,200.6	8.
新桐ダイ ナマイト	32	1.45	5,300	2,540	9,290.9	

まづ、坑道軸と薬軸が一致する様に爆薬を吊し、爆発室にメタンガス 9±0.2% を含む空気を充し、よく攪拌して後セロファンを透過して爆発状況を撮影する。坑道よりカメラまでの距離は径43cm, 70cm, 120cmの各坑道につき夫々4, 5, 10mとした。

3. 流し写真による実験結果

直径43cmの坑道に爆薬を懸吊試験と同様な条件に

* フィルムは ASA 100