

報 文

岩石発破の研究

(昭和31年12月22日受理)

大 川 禎 三

旭化成工業(株) 延岡工場

第4報 小型ブロックの爆破Ⅱ (破壊の高速撮影・
亀裂進行速度・自由面の移動速度)

1 緒 言

著者は第1報¹⁾において小型(30×30×30cm)のモルタルブロック及び抗火石の爆破の様相を毎秒4,000駒程度の高速度撮影をした結果を報告したが、本報では更に立方体、円柱、小判型供試体に就て(1)破壊の様相及びその破壊機構の考察(2)高速度撮影のフィルム上に写つた亀裂の進行速度(3)供試体の表面に貼りつけた錫箔の切断時間の測定結果(4)爆破による自由面の移動速度等に就て報告する。

2 高速度撮影

2.1 供試体(図1)

- (1) 組成;セメント:浜砂(1:2)
- (2) 形状・寸法;立方体(30×30×30cm),円柱(30φ×30cm),小判型(高さ70,巾80,長さ130cm,ミリ秒爆破用)それぞれ2個
- (3) 爆薬の位置;立方体,円柱は中心;小判型は深さ40cm
- (4) 供試体には薄い錫箔(厚み0.008mm,巾10mm程度)を貼り付け,その切断時間を測定した。(図1,写真1,2;写真は纏めて末尾に掲げた。)
- (5) 構築は粘土で行つた。

(6) 写真1,2に示すように自由面の移動速度を測定するために銅板を対立して設置した。

(7) 装薬の爆発の時期を表示するため,発破用雷管と同一性能の瞬発雷管の周囲に石灰粉の少量をつめたものを供試体の後上部に吊した。

(8) 立方体,円柱は机上におき,小判型供試体は砂地に石炭殻を埋めた上に作製した。

2.2 実験結果並に考察

2.2.1 破壊の高速度撮影

各供試体の破壊の例を写真3,4,7,8に示した。但し立方体及び円柱は破壊の初期,中期,後期のみを掲げた。

2.2.2 破壊機構の考察

爆破によるモルタルの如き脆性物体の破壊の機構に就ては第3報において詳細に報じておいたが,それによれば破壊は主として次の機構の総合結果として理解される。

- (1) 爆轟に伴う圧力波による圧縮破壊(爆源附近のみ)
- (2) 進行圧力波に伴う円周方向の引張応力による引張破壊
- (3) 圧力波の自由面よりの反射引張波による引張破壊

(4) 爆発生成ガスの膨脹による上記破壊の助長

このような結果に基づいて,ここに得られた小型ブロックの破壊機構を考察することとする。

- 1) 円柱(30φ×30cm) ベントリット5g, 中心装薬

フィルム上で認知できる亀裂がまず

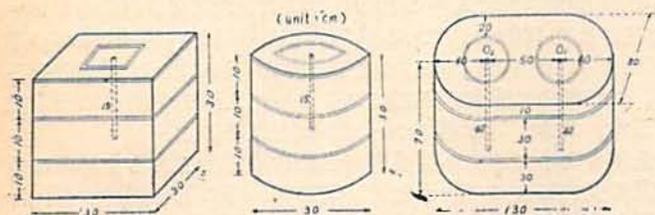


図1 供試体の形状・寸法

同様、深さ40cmである。この場合は写真8で見ると、最小抵抗線に沿った亀裂即ち図5の $B_1, B_2, B_3, B_4, P_2, O_2, R_2, P_1, O_1, R_1$ のみである。これらの亀裂は(1)で考察したように進行圧力波に伴う円周方向の引張応力によるものであろう。

3 亀裂進行速度並びに自由面の移動速度

3.1 高速度撮影よりの算出

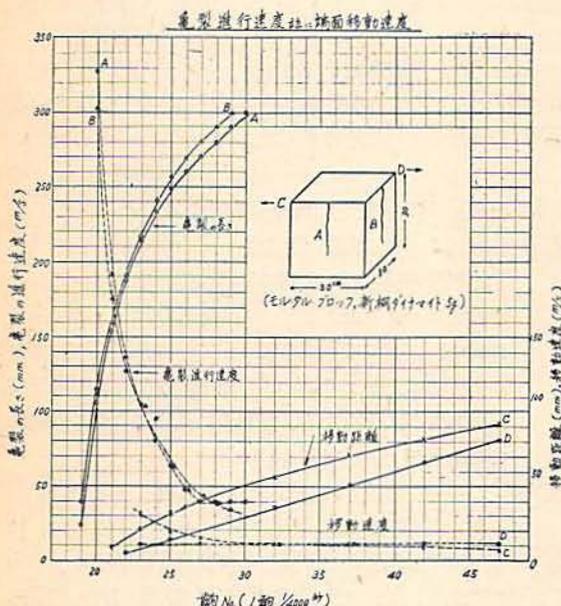


図6 モルタル・ブロック (30×30×30cm) の亀裂進行及び端面移動速度

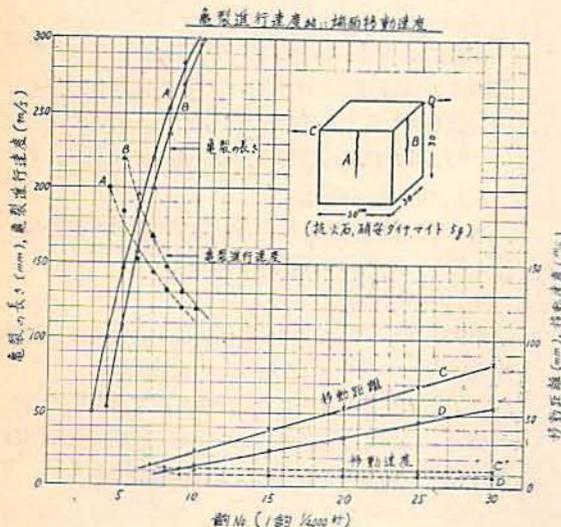


図7 耐火石 (30×30×30cm) の亀裂進行及び端面移動速度

3.1.1 亀裂進行速度

ここに亀裂として取扱うのはフィルム上で認知できるようなマクロなものである。第1報に掲げた小型ブロックの破壊写真の内、その写真No.1 (モルタルブロック) 及びNo.3 (耐火石) に就て計算したものを図6, 7に示した。計算は写真のある駒と次の駒との亀裂の長さの差に撮影速度 (駒/秒) を乗じて求めた。

3.1.2 自由面の移動速度

図6, 7中の右上に示したブロックの上面の両端C及びDの移動距離をフィルム上より求めて計算した。結果は図6, 7に示した。

3.2 供試体表面に貼付した錫箔の切断時間の測定による亀裂進行速度

供試体の表面に数箇所、錫箔 (厚み0.008mm, 巾10mm程度) をセメダインにて緊密に貼りつけ、雷管が爆発してからこれらの錫箔が切断する迄の時間を電磁オシロにて測定した。なおこの際高速度撮影をも併用した。

3.2.1 立方体 (30×30×30cm)

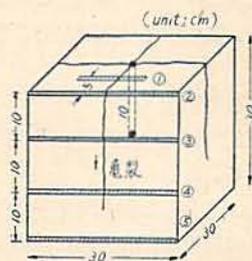


図8

(1) 供試体は図8に示すように錫箔を貼りつけた。

(2) 装薬の位置は次の表1に載せた供試体に就ては図8の如くに深さ10cmとし、破壊が上方から始まるようにした。

(3) 装薬量は破壊が概ね図8に示すように最小抵抗線に沿うて生ずるように加減した。個々の実験での破壊後の写真は省略するが大体図8に示すような亀裂を生じた。

(4) 各供試体に就て雷管爆発より各位置の錫箔の切断までの時間を表1に示した。(電磁オシロでの測定であるから1ms以下の精度に就ては自から限度があるが、以下一応の測定値を掲げた。)

3.2.2 円柱及び小判型供試体における錫箔切断時間及び自由面の移動速度

表1 雷管爆発時より錫箔切断までの時間及び亀裂進行速度

供試体	爆薬及び填塞物	①	②	③	④	⑤
モルタル ブロック	新桐ダイナマイト4g(赤土)	—	0.5(200)	1.0(140)	1.7(25)	5.7
	” ” ” ” ” ”	0.3(500)	0.4(250)	0.8(110)	1.7(13)	9.5
	LD硝安ダイナマイト4g(赤土)	0.2(500)	0.3(330)	0.6(50)	2.6	—
	” ” ” ” ” ”	0.5(130)	0.9(100)	1.9(23)	6.2	—
	” ” ” ” ” ”	0.1(250)	0.3(110)	1.2(100)	2.2	—
抗火石	” ” ” ” ” ”	0.1(500)	0.2(250)	0.6(27)	4.3	—
	新桐ダイナマイト4g(赤土)	—	0.5(160)	1.1(110)	2.0(24)	6.1
	LD硝安ダイナマイト4g(赤土)	0.7(170)	1.0(160)	1.6(120)	2.4(24)	6.5

註 1. 時間の単位はミリ秒

2. 括弧内は錫箔間の距離をその間の時間で割って得た亀裂の進行速度 (m/s)

3. * このときは亀裂は斜めに進行した。

これらの供試体は図1に示したように上面の装薬孔の周囲にも錫箔を貼り、且又、爆薬装填後、込め物の部分にも錫箔を貼りつけ、爆発により込め物が噴出してこの錫箔の切断する時も測るようにした。

自由面の移動速度は写真1, 2に示したように、所定距離を距てておいた銅片の接触する時間を測って計算した。

1) 円柱 (30φ×30cm)

ペントリット5g, 孔中央での破壊の様相の一部は写真3に示したものである。雷管爆発時より込め物の噴出により孔上の錫箔, 上面, 側面の錫箔の切断までの時間を測定した結果は表2の通りである。

表2 円柱における測定結果

込め物噴出	0.45ms
上面錫箔切断	0.26ms (642m/s)
側面錫箔切断	0.1 ms (1,500m/s)
自由面移動速度	18m/s

(註) 括弧内は爆心より錫箔迄の距離を時間で割って得た亀裂進行速度

2) 小判型供試体

小判型供試体で得られた結果を表3・4に示した。

表3 小判型供試体 (I) ペントリット40g

	第1段	第2段
雷管爆発	0	26.7
込め物噴出	0.24	0.24
上面錫箔	0.36 (1,186)	0.24 (1,779)
側面錫箔(下)	0.79 (506)	0.48 (833)
” (上)	2.92 (171)	3.52 (142)

(註) 1. 時間の単位はミリ秒

2. 括弧内は爆心より錫箔迄の距離を時間で割って得た亀裂進行速度 (m/s)

表4 小判型供試体 (II) ペントリット30g

	第1段	第2段
雷管爆発	0	18.4
込め物噴出	0.62	0.46
上面錫箔	0.25 (1,708)	—
側面錫箔(下)	1.2 (334)	0.9 (444)
自由面移動速度	9.4 m/s	9.6 m/s

(註) 1. 時間の単位はミリ秒

2. 括弧内は爆心より錫箔迄の距離を時間で割って得た亀裂進行速度 (m/s)

4 実験結果の考察

4.1 破壊の様相

既に2・2・2で考察したように、亀裂の発生個所は爆発による圧力波の進行、反射による応力を考える動的考察によつて理解できる。即ち

(1) 進行圧力波に伴う円周方向の引張応力

(2) 自由面よりの反射引張波による引張応力

による破壊機構によつて概ね諒解でき、静的考察では理解できぬ亀裂がある。

4.2 亀裂進行速度

脆性破壊の亀裂進行速度を Motto や Orowan は、Griffith による弾性ポテンシャルエネルギー、表面張力等を考慮に入れて弾性論的に、また Yoffe は弾性波を考慮に入れて動弾性論的に考察している²⁾。

著者のこの実験では相当マクロな亀裂を観察しているので、これらの理論と対比することは無理であろう。しかし、岩石爆破ではその爆破効果としては相当マクロな亀裂が必要である。

錫箔切断より求めた値では装薬量の十分な場合は、最小抵抗線附近では1,500~1,800m/sの如き高い値も

得られているが、一般には 10^2 オーダー或はそれより低い値であり、爆心より離れたところでは10のオーダーの低いものである。

材料の脆性破壊の亀裂進行速度の測定されたものとして次のような例が報告されている³⁾。

表5 脆性破壊の進行速度

材 料	縦波の速度 v_0 (m/s)	破壊進行速度 v (m/s)	v/v_0	研 究 者
ガラス	5,200	1,420~1,570	0.29}	Schardin & Struth (1938)
熔融石英	5,200	2,200	0.42}	
鋼	5,000	1,030	0.20	Hudson & Greenfield (1947)
ガラス	5,500	1,530	0.28	Egerton & Barstow (1941)
アセテート樹脂	1,130	300	0.27}	Smith & Ferguson (1950)
タ	1,130	420	0.37}	
鋼	5,000	1,370	0.27	Kennedy (1945)
鋼	5,000	1,400	0.28}	Boodberg & et. al. (1948)
鋼	5,000	2,020	0.40}	
鋼	5,000	1,830	0.36	Robertson (1953)

さきに述べたように爆破によるモルタルの破壊では、まず、破壊は進行圧力波及びその反射引張波によつて生じ、それらが爆轟ガスの膨脹により更に拡大されるであろう。著者の実験方法では高速度撮影によるものでは、レンズの解像力、フィルムの感光度、また、錫箔貼付法では供試体との接着具合、錫箔自体の切断時間などの問題があり、これらの方法で認知できた亀裂は、圧力波による亀裂よりも少し遅れて、爆轟ガスの膨脹で多少亀裂が拡大された段階のものが多くに思われる。ことに3.1, 3.2の実験例の如く、装薬位置を上方において、上方より下方へ進む亀裂を測定したものは、その実験結果よりみて爆轟ガスの膨脹過程での切断と考えられる。

3.2.2の実験で最小抵抗線附近で得られた1,500~1,800 m/sの速度は圧力波による破壊の領域により近いものであろうと思われる。

なお、著者は石灰山において実際の岩壁に錫箔を貼りつけ、最小抵抗線1m程度で爆発より錫箔切断迄の時間を前記と同様な方法で測定したが、それらの結果は亀裂進行速度に換算して $10\sim 10^2$ のオーダーであつた。これらに就ては第2報⁴⁾に述べておいた。

岩石爆破の際のガス膨脹はその際の負荷・亀裂の存在等のため単純でなく、膨脹速度の測定は困難であ

る。水中爆破では測定されており、例えば次のようなものがある。参考迄に掲げておく。

Ramsauer⁵⁾は精火薬1,610g、深度500cmで次の膨脹速度を得ている。*

また、頼⁶⁾はピクリン酸及びカーリット95gを用いて次の値を得ている。

	ピクリン酸	カーリット
0~25cm	34.5m/s	29.5m/s
0~40cm	23.4m/s	19.0m/s
0~60cm	—	13.3m/s

4.3 自由面の移動速度

圧力波が物質内を伝播するときの物質速度は次の関係式で表わされ、自由面の移動速度は物質速度の2倍となる⁷⁾。*

$$\sigma = \rho \cdot c \cdot v$$

σ : 応力, ρ : 物質の密度, c : 圧

力波の速度, v : 物質速度; いま、モルタル試料が反射引張波で破断を生じたときの自由面の速度($2v$)を $\sigma = 50\text{kg/cm}^2$ (モルタル引張強度), $\rho = 2.28\text{g/cm}^3$, $c = 4,000\text{m/s}$ として計算すると

$$2v = 2 \times \sigma / \rho \cdot c = 108\text{cm/s}$$

となる。しかし、これは細長い棒の端面で爆発せしめた際の他面の移動速度としては妥当であろうが、この実験のように爆轟ガスの膨脹により破片が更に運動のエネルギーを与えられる場合にはあてはまらないであろう。

著者がこの実験で得た自由面の移動速度は10~20 m/sのものであり、その実験方法よりみて、爆轟ガスの膨脹によるものと考えられる。

著者の石灰山の実験⁴⁾では、最小抵抗線1m内外の時では3~4m/sであつた。

岩石爆破の際の自由面の移動速度は負荷の大小、爆薬の量、種類、岩石の性状等によつても当然影響をうけるであろう。

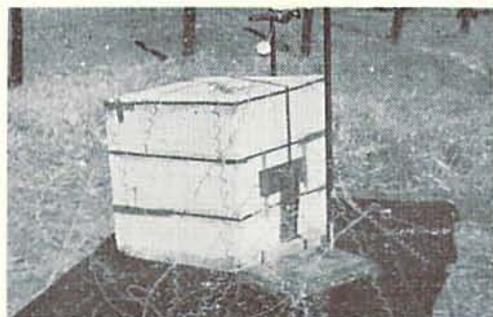
5 総 括

1. セメントモルタルで立方体、円柱、小判型の供試体を作り、その爆破の様相を2,000~4,000 駒/秒の

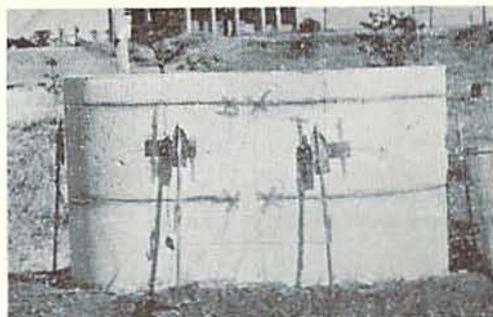
高速度で撮影した。

2. 既報の結果に基づき、これらの破壊の機構を進行圧力波に伴う

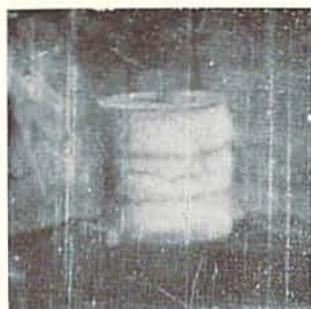
火薬よりの距離 (cm)	20	30	40	50	60	80	100	120	140	163
膨 脹 速 度 (m/s)	(120)	(86)	63	50	40	28	19	12.5	7.5	0



1



2



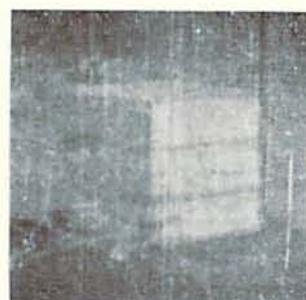
3-a



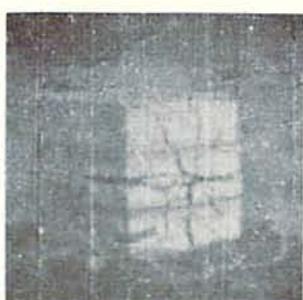
3-b



3-c



4-a



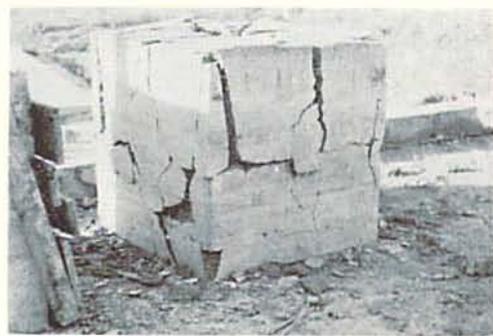
4-b



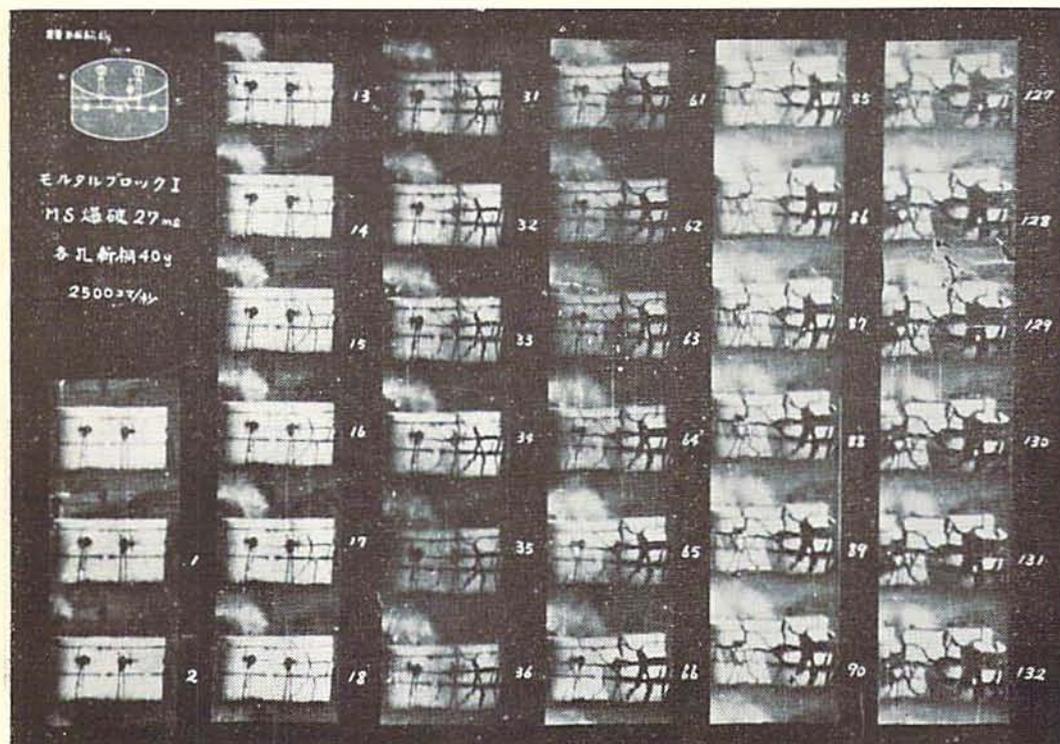
4-c



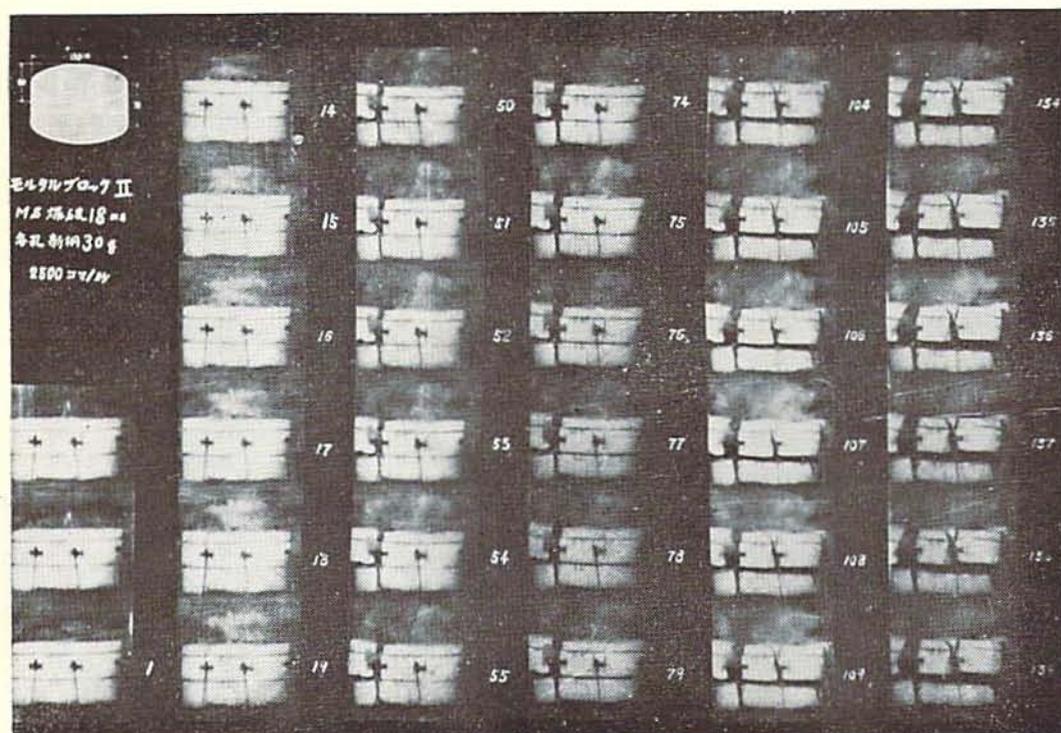
5



6



7 : ブロック I ・各孔新網 40g・MS 爆破 (27ms) ・2,500 コマ/秒



8 : ブロック II ・各孔新網 30g・MS 爆破 (18ms) ・2,500 コマ/秒

円周方向の引張応力並に自由面よりの反射引張波による引張応力に基いて考察した。

3. 爆破の際の亀裂進行を高速度撮影の写真より、或は又、供試体の表面に貼附した錫箔の切断時間の測定より算出した。得られたこれらの値は実験方法等より考え爆轟ガスの膨脹に関連するものであると考えた。

4. 爆破の際の自由面の移動速度を高速度撮影写真並に自由面に貼附した銅板と、それに近接しておいた銅板との接触時間の測定より算出した。

（附記）これらの内容の一部は昭和28年4月25日当協会の研究発表会で講演した。

実験の一部は延岡工場雷管部の東島課長・本間社員その他の各位の御協力のもとに行つた。衷心より感謝する。

文 献

- 1) 大川禎三 本誌 13 259 (昭27)
- 2) 横畑武夫著「材料強度学」(昭30) p.p. 110~112.
N. F. Mott: Engineering 165 16 (1948)
E. H. Yoffe: Phil. Mag., 42 739 (1951)

- 3) D. K. Roberts and A. A. Wells: Engineering 24 820 (1954)
H. Schardin & W. Struth: Glastechn. Ber., 16 219 (1938)
G. Hudson & M. Greenfield: J. Appl. Phys. 18 405 (1947)
H. E. Egerton & F. E. Barstow: J. Amer. Ceram. Soc. 24 131 (1941)
H. L. Smith & W. J. Ferguson: N. R. L. Progress Report, April (1950)
A. Boodberg et. al.: Welding Res. Suppt. 13 186 (1948)
T. S. Robertson: J. Iron and Steel Inst. 175 361 (1953).
- 4) 大川禎三 本誌 14 43 (昭28)
- 5) von Carl Ramsauer: Ann. d. Physik 72 265 (1923)
- 6) 山家信次 本誌 13 177 (昭27)
- 7) H. Kolsky: Stress Waves in Solids (1953) p. 91.

第5報・ミリ秒爆破に関する二三の考察

1 緒 言

ミリ秒爆破（以下MS爆破と記す）の効果については、さきに小野田セメント津久見工場採石場で実験を行い第2報¹⁾に報告した。石灰石のMS爆破では一般に岩石が奇発のときよりも小さく砕かれて小割発破が少なくなり好都合であることが認められている。

MS爆破によるこのような効果の機構については殆んど研究されておらない。

著者は大型モルタルブロックを作製して、2孔によるMS爆破の際の歪波の干渉を観察し、これに従来行つた爆破実験より得られた知見を加えて、MS爆破の機構を考察した。

2 MS爆破の際の歪波の干渉

2.1 供試体

第3報の爆破実験の際にMS爆破用としてセメントモルタル供試体(200×200×340cm)を作製した。モルタルの組成・養生等はすべて第3報のものと同じである。この他に予備実験の時の供試体の一部(100×200×200cm)をも使用した。供試体の寸法並に電気抵

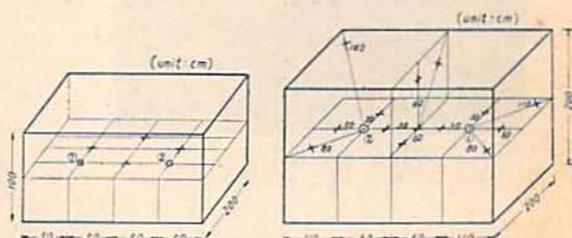


図1 ゲージ+及び装薬◎の位置

図2 ゲージ+及び装薬◎の位置

抗線歪計及び装薬の位置を図1、図2に示した。ゲージの埋込み、歪波の測定法等は第3報と同じである。

2.2 MS爆破用回路

この実験では、2孔による2段のMS爆破を行つた。発破回路は図3に示すデカトロンを用いた電子管回路を用いた。精度は0.1msである。

2.3 実験結果

1) モルタルブロック I (100×200cm)

図1の装薬孔①②を用いて実験した。得られた歪波を写真1に示した。写真の上段の歪波は両孔の中央のゲージに感じたペントリット5gの単発のときのものである。中段の左側のものは各孔ペントリット5g、

3ms 間隔で MS 爆破したときの中央のゲージでの歪波、下段の左側はこの時に歪波の下に記した×場所での歪波である。

中段及び下段右側の歪波は同じ実験の繰返しである

2) モルタルブロックⅡ(200×200×340cm)

各孔ペントリット80g, 砂にて填塞して5ms 段間隔で爆破した。その際に各地点のゲージで得られた歪波を写真2に示した。ゲージの位置は各歪波の下に×印で示してある。但し、この場合は3台の単振り時間軸装置により8台の陰極線オシロスコープを次の3種

に使い分けた。

(1) 掃引速度を遅くして両爆発による歪波の干渉を観察する。写真2の左側の上中下がそれである。

(2) 第1段による歪波のみを捕捉する。写真2の右側で歪波の下にⅠと記してあるもの。即ち上より2及び4つ目の歪波。

(3) 第1段の残存せる歪波と第2段の歪波とを捕捉する。写真2で右側の歪波の下にⅡと記してあるもの。即ち上より1及び3つ目の歪波

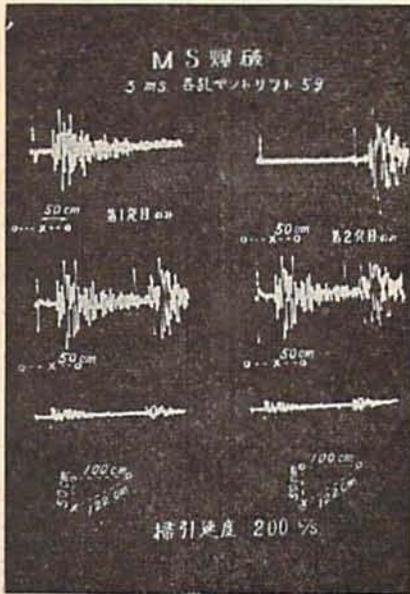


写真1 MS 用供試体Ⅰ

各孔ペントリット 5g. 段間隔 3ms.

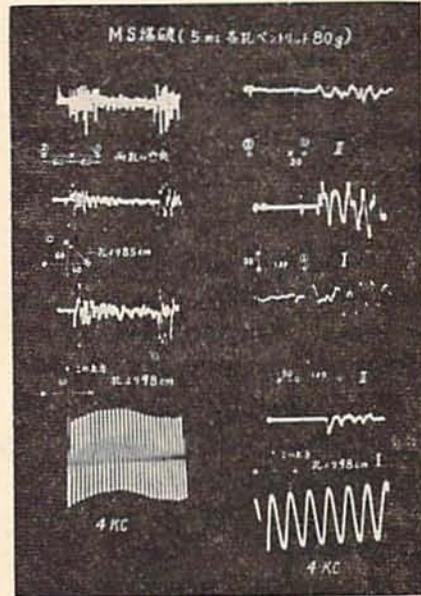


写真2 MS 用供試体Ⅱ

各孔ペントリット 80g. 段間隔 5ms

なお、この際の破壊の状況を図4に示した。第2段

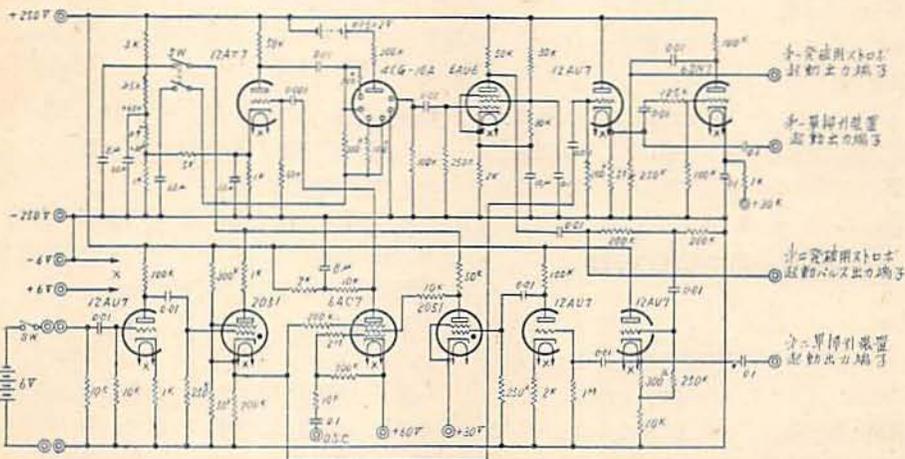


図3 ミリ秒遅爆破用電子管スイッチ回路図

の装薬孔に沿った太い線で書いた亀裂は明らかに認められるものであつたが、第1孔に沿った細い線の亀裂は、各孔ペントリット80gのMS爆破直後は明瞭でなく、更に第1孔にペントリット100gを入れて爆破した際、この亀裂が明瞭となつた。恐らく80gの時に内部では、このような亀裂が生じていたのであろう。

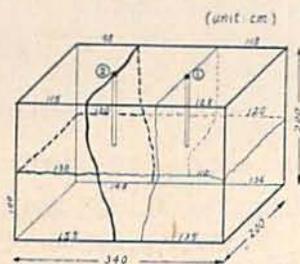


図4 MS 供試体IIの破壊状況

3 実験結果の考察

3.1 MS 爆破による歪波の干渉

MS 供試体Iにおける3ms段間隔での実験でも、両装薬孔の中央及びその他の場所においても、写真1に示す如く第1段の爆発による残留歪波は僅少であり、歪波の干渉による歪の増大は見られない。

MS 供試体IIにおける各孔ペントリット80g、5ms段間隔のMS爆破においても、写真2に示すように、このような薬量でも、5msも経過すれば第1段の爆破

による残留歪は僅少で、第2段の爆破による歪破との干渉は殆んどないとみなしてよいであろう。

このようなことは歪波の伝播速度を考慮すれば当然予想されることであろう。

通常、石灰山等で行われているMS爆破の段間隔は20~30msであり、波の速度よりすると各段での主要歪波の干渉は考えられない。

然らばMS爆破効果の機構は何んであろうか。

著者はさきに石灰山におけるMS爆破の実験において、最小抵抗線附近に錫箔を貼付して雷管爆発より錫箔切断迄の時間並に自由面の移動速度を測定した。それらの結果を表1に示した。

この表より爆心より錫箔迄の距離と、錫箔切断迄の時間とするとトップを図5の如くなり、距離が大となると切断迄の時間は急激に大きくなる。

第4報で考察したように、このようにして測定した時間は、爆轟ガスの膨脹による亀裂の拡大による切断と考えられる。このような亀裂の進行は負荷、装薬量、岩質その他によつて左右されるが10~10²m/sのオーダーであり、応力波の進行速度に比すれば桁違いに遅い。ガス膨脹速度もこのように遅いものであろう。爆破による自由面の移動速度も遅く表1では3~4m/sである。しかし、この移動速度はその際の負荷、装薬量等により異なり、第4報に示したように負荷が少なく

表1 爆薬による岩石破壊進行速度及び岩石の移動速度

実験番号	記号	孔長 (cm)	装薬量 (g)	込め物	最小抵抗線 (cm)	爆心より錫箔迄の距離 d (cm)	錫箔切断迄の時間 t (ms)	破壊進行平均速度 d/t (m/sec)	爆心より接片迄の距離 (cm)	接片間の距離 D (cm)	接片接触迄の時間 T (ms)	岩石の移動速度 D/T (m/Sec)	備考
1	S-1	34	35	粘土	60	45	2.1	214	60	2.0	5.5	3.6	横孔
2	M2-1	39	25	粘土	40	40	6.1	66	-	-	-	-	横孔
3	M2-1	120	85	岩粉	75	75	8.4	89	75	5.0	14.5	3.5	①55cm ②65cm 整孔 (1-2) 32.4ms (2-3) 24.4ms 第2段の薬量は29.2msで切斷し、第1段で切斷している
	M2-3	120	95	粘土	70	70	7.0	100	-	-	-	-	
4	M3-1	110	75	岩粉	70	70	-	-	70	2.0	5.7	3.5	①85 ②90 ③整孔 (1-2) 29.7ms (2-3) 26.8ms 第1段薬切れず
	M3-2	110	85	〃	70	70	16.2	43	-	-	-	-	
	M3-3	110	75	〃	90	90	8.4	107	-	-	-	-	
5	M3-1	165	225	岩粉	110	110	3.4	320*	110	1.8	7.1	2.5	①150②150③整孔 (1-2) 28.8ms (2-3) 29.2ms 高速薬量よりみるとこの場合は比し特別に早い様である
	M3-2	165	202	〃	110	110	14.9	74	-	-	-	-	
	M3-3	165	187	〃	95	95	6.6	144	-	-	-	-	
6	M3-1	165	262	岩粉	110	110	-	-	110	2.0	8.8	2.3	① ② ③ 整孔 (1-2) 27.7ms (2-3) 36.6ms 第1、第3段薬切れず
	M3-2	165	277	〃	100	100	9.5	105	-	-	-	-	
7	M3-1	63	25	粉土	50	50	2.6	192	-	-	-	-	約7tの岩を使用、整孔①-65③(1-2)/30.3ms
	M3-2	63	25	水	50	50	6.5	77	-	-	-	-	
8	M3-1	37	15	粘土	25	25	2.1	119	-	-	-	-	約5tの岩を使用 (150③) 整孔 (1-2) 26.0ms
	M3-2	37	15	水	25	25	2.6	96	-	-	-	-	

(註) (1) 使用した新製ダイナマイトのサイズは 25mm, 75g である (2) 込め物の岩粉さは穿孔粉のこまでである。

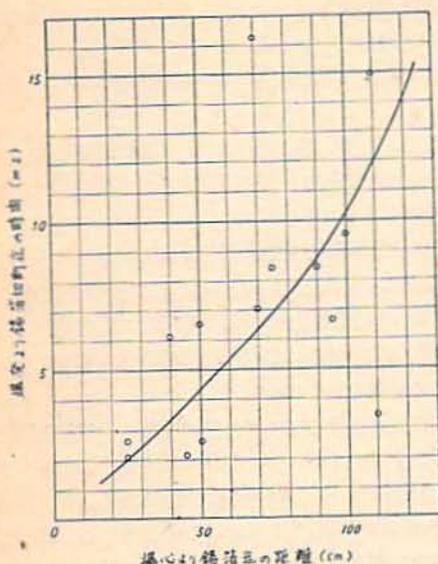


図5 爆心よりの距離と錫箔までの距離 (cm)

装薬量の十分な場合は 10~20m/s の場合もある。

また、写真3は石灰石でのMS爆破の第2段目が爆発した直後の亀裂の状態を示した。(1~2段間隔30ms, 横間隔2m, 孔長4.5m, 最小抵抗線1.7m, 装薬量1段は新桐1,275g+カーリット1,069g; 第2段新桐1,200g+カーリット1,112g)

この写真でみるように第1段の爆轟ガスの膨脹による亀裂の拡大中に第2段が爆発している。

一般に爆破は(1)自由面の多いほど、(2)前段の爆破による残留歪の多いほどよく効くであろう。

(1)の効果は普通の段発でもMS爆破でも同様である。(2)の内、静的歪は両者でも同一であるが、動的歪はMS爆破では、より効果がある。しかし、上の実験結果よりして、20~30ms後の残留歪の大きさは、岩石の性質にもよるが、左程大きいものではないように思われる。

MS爆破が取る段間隔の間(例えば10~70ms)で有効であることは、前段の爆破の進行中における後段の爆破が普通の段発のときより以上に何か更に有効に作用していることを示している。

MS爆破の際の応力波の大きな干渉の認められないことは前記の通りである。それならば、ガス膨脹過程にMS効果が存在するのであろうか。

さきに考察したように、ガス膨脹速度は遅く、これによる亀裂の拡大進行も遅い。このような亀裂の拡大進行中に第2段が爆発し、その際の衝動、岩石母体の振動或は揺れにより、第1段の爆発による破壊が更に



写真3 MS爆破(第2段目が爆発したところ)

二次的に助長され(亀裂の拡大等)、或は又、第1段による破壊により、第2段への負荷が小さくなり、第2段による破碎岩石中には、より大きい速度で飛散するものもあり、これらが第1段でのガス膨脹により移動中の岩石に衝突して、それらの破碎度を大きくすることも考えられる。

このようなことがMS爆破の効果をもたらすのではなからうか。

4 結 語

MS爆破の機構については未だ不明の点が多い。

著者は以上の実験より次のように推論した。

MS爆破により岩石が小さく破壊される理由としては

- (1) 前段の爆破により自由面が増加する。
- (2) 前段の爆破による残留歪の存在。
- (3) 前段の爆破でのガス膨脹過程による破壊の拡大中に後段が爆発し、その際の衝動、岩石母体の振動或は揺れによる前段での破壊の助長(亀裂の拡大等)
- (4) 前段での破壊により、次段への負荷が小となり、このために次段による破碎岩石中の飛散速度の大きいものが前段での破壊岩石に衝突して破碎を助長する。

これらの内1)は普通の段発と大差なからう。2)の内特に動的歪の残存はMS爆破に効果的なものであろうが、これの多寡及びその時間的経過は岩石の種類により異なりそれらは不明の点が多く今後の研究に待たねばならない。3)4)はMS爆破に特有のものであろう。

このように考えると2)(特に動的歪)、3)4)がMS爆破効果の要因と考えられるものではなからうか。

5 総 括

MS爆破効果の機構を考察するため、セメントモルタルの大型供試体を作り、その中にストレインゲージを

埋込んでMS爆破の際の歪波の干渉を観察した。そしてこれらの結果と、既に得た爆破の際の亀裂の進行速度、自由面の移動速度等よりMS爆破効果の機構を考察した。

文 献

- 1) 大川, 本間, 石本 本誌 14 43 (昭28)

Study of Blasting (IV)

by Teizō Ōkawa

Blasting of the Small Blocks. (II)

Using a high speed camera, the fracture of a cement mortar of cubic or cylindrical form when blasted by a solid explosive charged in the blocks has been studied.

From the photographic record the velocities of crack propagation and of

taking off of surface fragments are obtained.

Furthermore by measuring the time of breaking of thin tin-foils plastered on the surface of the mortar blocks, an information concerning the expansion of detonation gases is obtained.

Study of Blasting (V)

Some Considerations on the Millisecond Delay Blasting.

1. The interference of the strain waves caused by a millisecond delay blasting is observed in a large cement mortar block, in which several electric wire strain gauges were buried in various positions.

The appreciable superposition of the strain is not observed, say in the experiment of 5 ms delay two-stage blasting, each hole, 80g PETN.

2. Considering from the experimental results on the interference of strain waves, the expanding velocity of exploded gases and the removing speed of free surface, the effects of the millisecond

delay blasting may be summarized as follows.

(1) Formation of new free surfaces caused by the first shot.

(2) Remaining strains caused by the first shot.

(3) Further fragmentation by the shock, vibration or rolling of the ground and the collision between rock fragments caused by the second shot during the expansion of the exploded gas produced by the first shot

(Nobeoka Factory, Asahi Chem. Ind. Co., Ltd. Japan)