

# 岩石発破の研究 (第3報)

## 爆発による固体内歪波の伝播並に衝撃破壊に関する研究\* (続)

(昭和31年12月6日 受理)

大川 禎三・平山 正夫・清田 堅吉

(旭化成工業(株)延岡工場) (熊本大学工学部)

### 6 衝撃破壊機構の考察

この実験においては各次元の供試体に就て、先ず破壊を伴わない小薬量で歪波の伝播・反射等を実験し、次に薬量を大きくして破壊を行い、その際の歪の大きさを測定し、それらの値より衝撃破壊の機構を考察した。

材料の破壊強度は比重、比熱、屈折率ないし弾性率等の物性と違って、組織感受性であり、荷重速度によっても変化し、破壊現象は統計的なもので、確率論的考察を無視して論ずることは出来ぬなど極めて複雑なものである<sup>15)</sup>。

しかしここでは爆発により材料のある個所での引張応力とその材料の引張強度より大きいか、或いは剪断応力とその剪断強度より大であれば、そこで破壊する

ものとして考察する。

なお又、5.4において考察したように著者等の実験では爆発の極く近傍付近では歪波は弾性波動とみなしてよいから、弾性論的取扱が可能である。

#### 6.1 一次元供試体

##### 6.1.1 細長角棒の破壊状況

細長角棒は雷管のみの場合は破壊しないが、その長さによつてメントリット3~6gでは破壊が起る。破壊は爆発付近は当然であるが、爆薬から離れた末尾の部分が切断する。細長角棒 I (10×10×400cm)及び角棒 II (同)の末尾の破壊状況を夫々写真21, 22に示した。写真中の例えば II<sub>1</sub>, II<sub>2</sub>とあるは2回目の爆発で切断した破片を示す。なおまた、この他の長さの異なる角棒に就ての薬量とそのときの破壊片の大きさを図32に示した。爆薬近傍の破壊状況は写真32に示

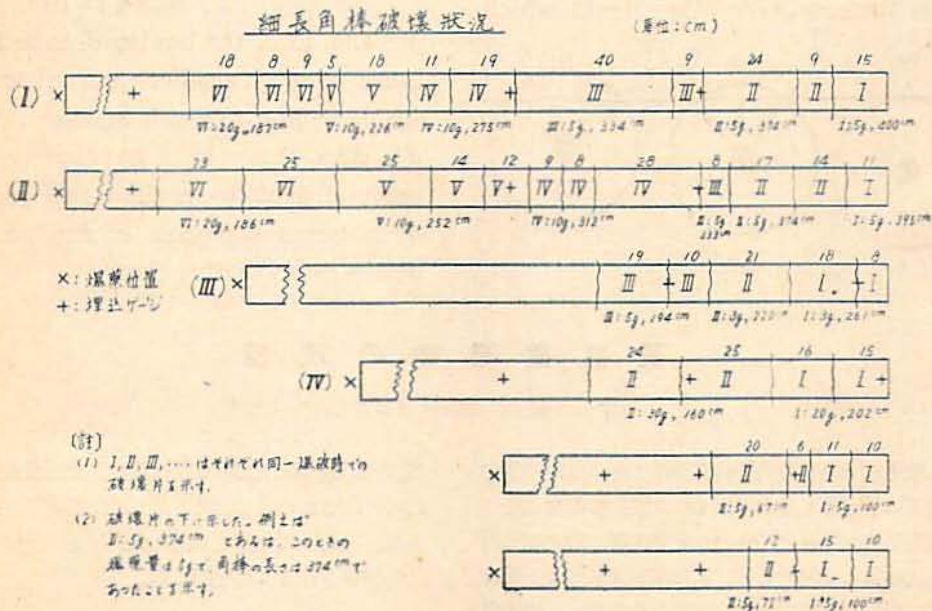


図32 各種長さの細長角棒切断状況

\* 本稿の写真は編集の都合上前稿の末尾に一括掲載したのでこれを参照せられたい。

した。

### 6.1.2 細長角棒の破壊機構の考察

写真及び図に示したように、細長角棒では爆薬近傍は勿論であるが、遠く離れた端面より破断が次々に起る。

(1) この遠くの端面よりの破断の機構に就て考察する。

細長角棒の一端で爆薬が爆発すると、それに伴う圧縮波が右方へ進み端面の自由面で図33に示すような過程を経て引張波として反射して左へ進行し、ある地点での引張応力が材料の引張強度より大になれば、その点で破壊が起り、破片は右方に投出される。

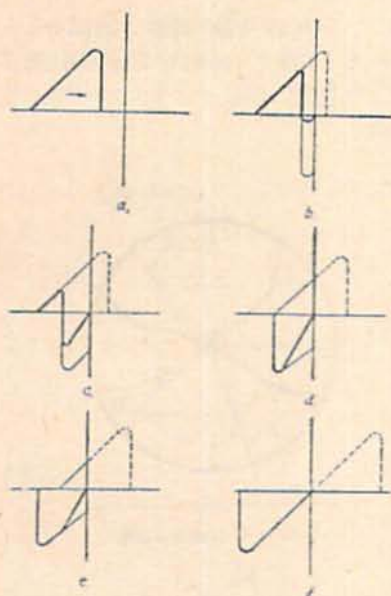


図33 圧縮波の自由面における反射

いま、細長角棒Iの実験でペントリット5gのときの歪波が400cmの端面での反射の状況を考えるに、このときの歪の大きさは図21より求まる。

一次元供試体に就ては弾性力学より歪 $\epsilon$ と応力 $\sigma$ の関係は

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

であり、供試体の動的ヤング率 $E$ も既知であるから、角棒の各点での応力は算出出来る。また、歪波の波長も既知であるから、400cmの端面(自由面)に到着したときの歪波は大略図34の $ABC$ で表わされる。但しここでは爾後の計算を簡略にするために応力波形を直角三角形で代用した。

歪波が端面に到着してより、更にある時間経過した

### 細長角棒破壊機構

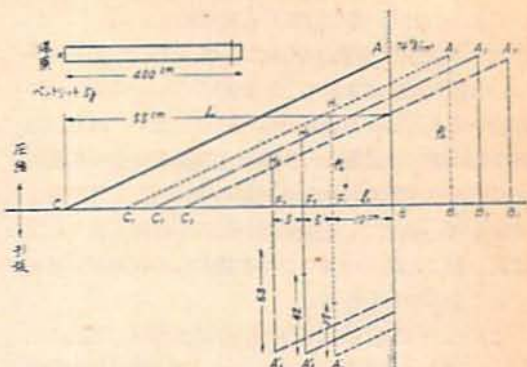


図34 細長角棒破壊機構の考察図

ときを考えると $ABC$ は $A'B'C'$ となるが $A'B'$ は自由面で引張波として反射している。

いま、自由面より10cm手前の $F_1$ 点での応力を考えてみるとこの点では自由面で反射した引張波の引張応力 $A'_1 F_1$ と進行波の圧縮応力 $H_1 F_1$ との合力として差引き $27 \text{ kg/cm}^2$ の引張応力が作用している。この材料の引張強度は $35 \text{ kg/cm}^2$ 前後(動的引張強度はこれより大であろう)であるから、ここでは破壊は起らない。同様に計算すると自由面より15cm( $F_2$ )では引張応力は $42 \text{ kg/cm}^2$ 、20cm( $F_3$ )では $53 \text{ kg/cm}^2$ となる。従つてこれらの附近では引張強度より大きくなり、破壊する可能性がある。なお、この際の実験では15cmのところまで切断了。

以上は応力波形その他を簡単にして行つた大略の計算であるが、このように細長角棒の末尾での切断は反射引張波によるものと解してよいであろう。

この反射引張波による破壊機構の考えは古くはB. Hopkinson<sup>16)</sup>が鋼棒に就て行い、その後J. W. Landon & H. Quinney<sup>17)</sup>はコンクリート棒、J. S. Rinehartは鋼・軟鋼・アルミ合金等の延性金属、H. Kolsky & A. C. Shearman<sup>18)</sup>、G. Christie & H. Kolsky<sup>19)</sup>、D. G. Christie<sup>20)</sup>は合成樹脂、H. Scharadin<sup>21)</sup>はガラス、日野<sup>22)</sup>は大理石、花崗石、砂岩に就て、それぞれの小試料を用いて爆破実験を行い反射引張波によると考えられる破壊を認めている。

(2) 細長角棒で得られた歪波例えば写真8に示した波をみると圧縮波に引続いて高周波部分があるが、これは断面10cmの間の伸縮によるものと思われるが、波形としては概ね図35の(1)に示したように考えると、圧縮波に引続いて引張波が記録されている。これは前出の二次元、三次元の歪波でも同様である。このような圧縮に続く引張波の存在はHopkinson bar

では測定されないものである。この引張波の存在は前述の Sharpe<sup>11)</sup>, Purall<sup>12)</sup>, 伊藤<sup>13)</sup> (図30, 31), Allen & Goldsmith<sup>20)</sup> 等の計算にも見られる。

この引張波は当然、破壊にも寄与するであろうから、これを考慮に入れると圧縮波のみを考えたスラブ生成の考え方は一部修正されねばならない。即ち圧縮波の自由面での反射した引張波と圧縮波に続く引張波との重なりがあり、単に圧縮波のみで考えられた時よりは小さい量量でも引張破壊が起る可能性があり、或は又、第2、第3のスラブの生成にこの引張波が寄与することが考えられる。

このような模様は簡単な波形を想定して図35の(2), (3), (4), (5)に示した。著者等の破壊実験の中にはこのような破壊機構を肯定さすような実例もあつた。

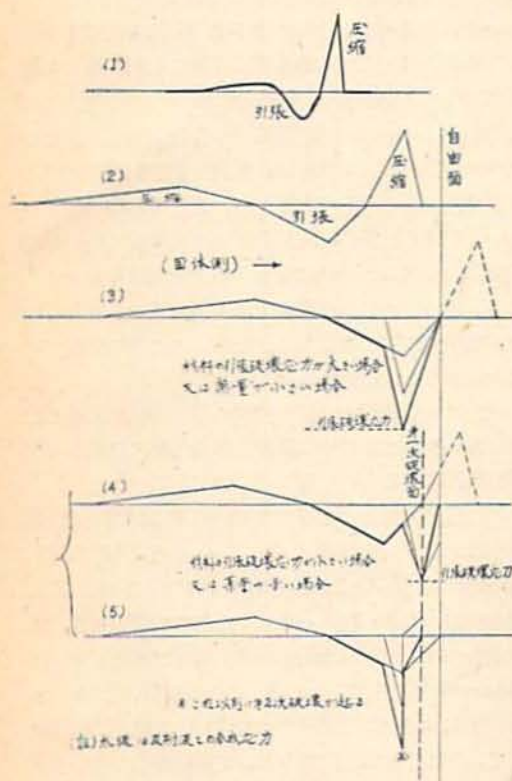


図 35

## 6.2 二次元供試体

## 6.2.1 二次元供試体の破壊状況

## (1) 平角板

ペントリット 30g を砂で研磨して爆破したとき供試体は写真24の如く破壊した。写真では亀裂の線がよく出ていないが図36の如く破壊している。

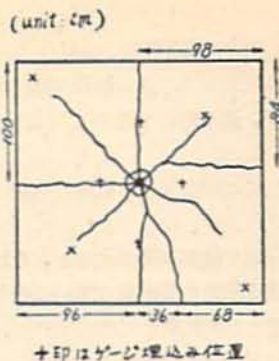


図 36

## (2) 平丸板

ペントリット 50g を砂で研磨して爆破せしめたとき写真25の如く破壊した放射状の亀裂が強く出ているが些細に見ると図37に示したようにリング状の亀裂も生じている。

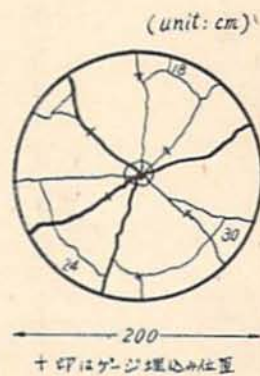


図 37

## 6.2.2 二次元供試体の破壊機構の考察

## I. 定性的考察

## (1) 平角板

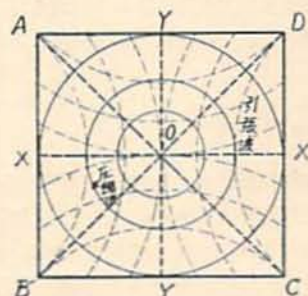


図 38

図38に示す如く、爆発による圧縮波は同心円状に伝

播して行き各自由面で反射して引張波として帰ってくる。このとき引張波の応力が十分に大きいと一次元供試体で考察したように自由面近くに引張破壊、所謂 Scabbing が起るが、そうでないときは引張波は進行して各面よりの反射波が干渉して、図38の XX, YY の線で上下、左右よりの反射引張波の会合により、その線に沿って引張応力が大きくなる。又、AC, BD の線でも相隣る自由面よりの反射波による引張応力の合力が作用する。

このようにして YX, YY, AC, BD の線に沿って亀裂の可能性が他の部分より大きい。

もつとも、縦波が自由面で反射するときは、その入射角によつて、反射波の振幅は変化するし、その上、反射引張波のほかに、横波も生ずるから<sup>24)</sup>、定量的にはそれらの点を考慮に入れなければならないが、ここでは簡単に考察することとする。

このような反射引張波の干渉による破壊を考えると図36に示した平角板の亀裂の生成は概ね説明されるようであるが、対角線上の亀裂は納得がゆかない。即ち反射波による引張波の強さは自由面に近いほど強いから、A, B, C, D に近い場所に亀裂が生ぜねばならぬが、実験結果はそうでない。即ち圧縮波に直角の  $\sigma_{\theta}$  (引張) を考えないと理解出来ない。

## (2) 平丸板

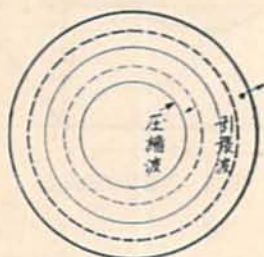


図 39

平丸板では爆発による圧縮波は図39の如く同心円状に進行し、自由面で引張波として反射してくる。そして一次元供試体のときに考察したように、ある点での引張応力がモルタルの引張強度より大きくなるとその点で破壊を生じ、切れた部分は外側に投げ出される。

このように考察すれば、平丸板の破壊実験で生じたリング状の亀裂は説明がつく。しかし、それよりも明確な放射状の亀裂の生成は如何なる機構によるものであろうか。この放射状の亀裂の生成に就いては単に反射引張による破壊機構のみでは説明がつかない。

### II 二次元供試体破壊機構の定量的考察

二次元供試体に就ては歪と応力との関係は弾性力学

より

$$\begin{cases} \epsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu \sigma_{\theta}) \\ \epsilon_{\theta} = \frac{1}{E} (\sigma_{\theta} - \nu \sigma_r) \end{cases}$$

$\nu$ : Poisson ratio

上式より

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_r + \nu \epsilon_{\theta}) \\ \sigma_{\theta} = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_{\theta} + \nu \epsilon_r) \end{cases}$$

著者等の実験では各点の  $\epsilon_r, \epsilon_{\theta}$  が測定され  $E, \nu$  も既知であるから、この式により各点での応力が算出できる。

平丸板・平角板の破壊実験の際に得られた歪の大きさ(図23, 24)より応力を算出すると図40の如くなる。

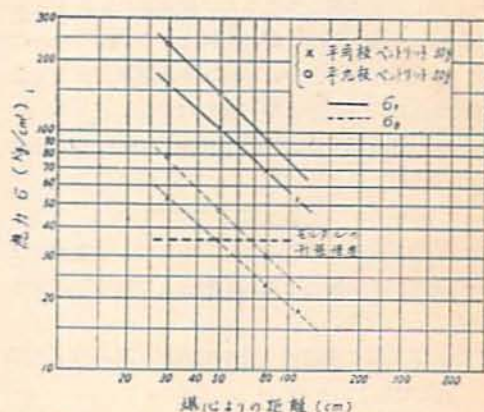


図40 平丸板・平角板における距離と応力

(イ) 平角板では自由面(100cm)における応力が小さく、反射引張波による Scabbing は生成しない。

(ロ) 平丸板

平丸板では反射引張による破壊がみられる。その破壊機構は一次元の場合と同様に応力波形その他を簡単にして図式に考察すると図41の如くなる。(波長は図18より求める)即ち自由面より20cm附近では引張応力が45kg/cm<sup>2</sup>程度になるから、この附近よりは破壊の生ずる可能性もあるであろう。

なお、平丸板では反射波は収斂波であるから、距離による減衰を図のようにとるのは妥当ではないが、ここでは一応減衰を延長上にとつて計算した。従つて実際は各点での引張応力はこの値よりも大であろう。

実験の結果は図37に示すように18~30cmのリング状破壊が見られる。

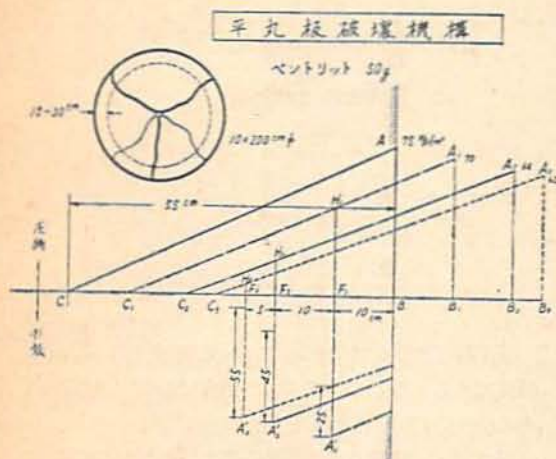


図41 平丸板破壊機構の考察図

#### (ハ) 放射状亀裂

平丸板の破壊に見られたリング状亀裂は反射引張波による機構で説明がつくが、それよりも明瞭な放射状亀裂の生成機構はどうか、写真25の破壊状況をみても放射状亀裂は、円周方向の引張力の方で横に引き裂かれたと云った感じがする。爆源より各点における進行波に伴う円周方向の引張応力 ( $\sigma_\theta$ ) は図40に示した。この  $\sigma_\theta$  がモルタルの引張強度より大であれば、そのところで破壊が起こると考えると図40からは、平丸板では60cm 附近、平角板では40cm 附近までは破壊が起こりうることになる。

また、平角板の周辺では最小抵抗線 (XX, YY) が  $\sigma_\theta$  が最大である。

破壊は組織敏感性であるから、応力集中源になるようなところ例えばゲージの埋込み場所等は他部分よりも破壊しやすい。

実験結果においても (図36, 37, 写真24, 25) に見るように概ねそのような場所が破壊している。

平角板の破壊も、このような進行波に伴う円周方向の引張応力 ( $\sigma_\theta$ ) と反射引張波の干渉による引張破壊との両者の総合結果として理解できる。

#### 6.3 三次元供試体

##### 6.3.1 三次元供試体の破壊状況

##### (1) 角 罫 (その1)

角罫はペントリット 70g で細い線の亀裂を生じた。更に内部の状況を見るために更にこれをペントリット 100g で爆破した。破壊の状況を写真26, 27, 図42に示した。写真27は、下部の破壊の部分を示したが、写

真に見るように、この部分は円錐でなく、稜線があり、各面は概ね平坦である。

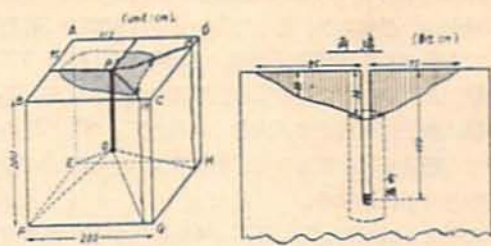


図42a 角罫の破壊状況 図42b 角罫の漏斗孔

##### (2) 角 罫 (その2)

予備実験で2x2x2mのモルタル・ブロックをペントリット 70g で破壊したときの状況を写真28, 29及び図43に示した。

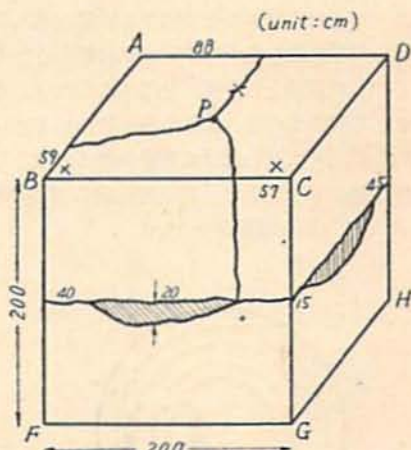


図43 角罫の破壊状況

##### (3) 円 罫

ペントリット 100g での破壊状況を写真30, 31及び図44a, 44b に示した。

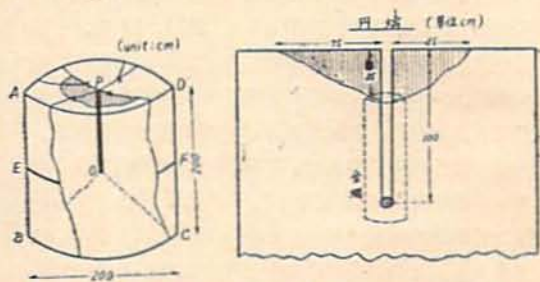


図44a 円罫の破壊状況 図44b 円罫の漏斗孔

##### (4) 爆源附近

写真32に角罫の爆源部の状況を示した。凹んでいる

部分がそれである。円壻でも殆んど同様である。

爆源での圧縮による粉砕圏は写真にみるように僅かであり、15mm程度の深さである。

6.3.2 三次元供試体の破壊機構

(1) 角 壻 (その1)

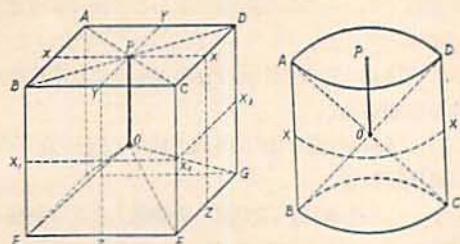


図45a

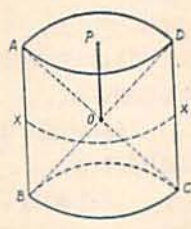


図45b

角壻の中心で爆薬が爆発し、それに伴う圧縮波の自由面での反射波にこの反射引張波の干渉を平角板(図38)の時と同様に考え、更にOPで示した装薬孔の存在を考慮に入れると破綻で示したような亀裂の可能性が考えられる。

実験では写真26及び図42aに示したように破壊しており、概ね図45aの破綻の部分破壊している。自由面での反射引張波による scabbing が見られないのは、ここでの応力が充分大きくないからであろう。しかし、写真26及び図42a, 42bに示したような反射引張波によると考えられる漏斗孔を生じている。これは装薬孔の存在及び埋込んだ金網の上縁針金の存在による影響と考えられる。

なお、以上のような反射引張波の干渉による破壊機構の外に二次元供試体の際に考察したような進行波に伴う円周方向の引張応力(σθ)による破壊も考慮せねばならない。それに就ては(4)において述べる。

(2) 角 壻 (その2)

予備実験でのこのものの破壊状況は写真28, 29及び図43のようである。このときは反射引張波による Scabbing (図51)の斜線部分が見られる。また、破壊も図45aの破綻の一部のものによっている。勿論この場合もσθによる破壊も考えねばならない。

(3) 円 壻

円壻の場合に就て、反射引張波による破壊を考えると、図45bの破綻で示したような亀裂が考えられる。実験の結果は写真30, 31及び図44a, 44bのようであり、平角板のときと同様、放射状の亀裂が大きく生じている。反射引張波による破壊のみでは、このような放射状の亀裂は説明できない。やはり、二次元供試体のときと同様、進行波に伴う円周方向の引張応力によ

る破壊を考慮せねばならない。

(4) 三次元供試体破壊機構の定量的考察

(1), (2), (3) においては定性的に反射引張波による破壊を考えたが、ここでは歪波の測定から得られた値を用いて定量的に考察する。

三次元供試体に就ては、歪と応力との関係は弾性力学より、

$$\begin{cases} \epsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_\varphi)] \\ \epsilon_\theta = \frac{1}{E} [\sigma_\theta - \nu(\sigma_\varphi + \sigma_r)] \\ \epsilon_\varphi = \frac{1}{E} [\sigma_\varphi - \nu(\sigma_\theta + \sigma_r)] \end{cases}$$

ν: Poisson Ratio

この式より σθ = σφ として σr, σθ を求めると

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{E}{1-\nu-2\nu^2} [(1-\nu)\epsilon_r + 2\nu\epsilon_\theta] \\ \sigma_\theta = \frac{E}{1-\nu-2\nu^2} [\epsilon_\theta + \nu\epsilon_r] \end{cases}$$

各点におけるεr, εθ, 及びE, νは既知であるからσr, σθは計算で求まる。

角壻・円壻に就て歪より(図18, 19)上式により応力を計算すると図46の如くなる。

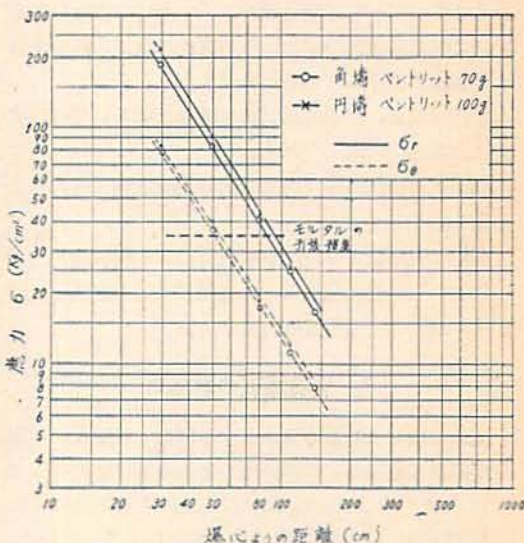


図46 角壻・円壻における距離と応力

(イ) 自由面(100cm)でのσrの大きさよりみて、自由面近傍での反射引張波による Scabbing は生じないであろう。

(甲) 角礫・円礫ともに上面において、反射引張波によると考えられる漏斗孔を生じているが、これは前述のように装薬孔の存在及び埋込んで金網の上縁の針金の存在によつて、この部分が他よりも引張強度が低くなつてゐるためである。

(ハ)  $\sigma_0$  の値よりすると、[角礫・円礫ともに概ね爆源より 40cm 附近までは、 $\sigma_0 >$  引張強度で、この附近までは  $\sigma_0$  による円周方向の引張破壊が生じうるであろう。

角礫ではその最小抵抗線の面 (YYZ, XXZ,  $X_1X_2$ ,  $X_3$ ) が  $\sigma_0$  が最大であり、円礫はその最小抵抗線の面が最大である。

円礫の場合、最小抵抗線の面に破壊が生じているが、上面よりの反射引張波は漏斗孔の生成にエネルギーを減じ、底面よりの反射引張波は側面よりの反射波との協同作用で円錐 OBO を生成したと考えると、上下面よりの反射引張波の協同作用が  $XXO$  面の引張破壊を生じたと考えるのは無理であろう。

この面では  $\sigma_0$  は他の部分よりも大であるから、 $\sigma_0 >$  引張強度の部分では  $\sigma_0$  による破壊と考えるのが至当であろう。

角礫における最小抵抗線の面における破壊もある程度、同様に考えてよからう。

(ニ) 円礫における放射状亀裂も  $\sigma_0$  によるものと考えればよいであろう。また、亀裂箇所は写真や図に見るようにゲージの埋込場所、リード線の存在部に多い。これはこの部分がこれらの存在のために他の部分より強度が低下しているためであろう。

(ホ) 結局、三次元供試体の破壊は主として次の応力によるものと考えられる。

(a) 進行波に伴う円周方向の引張応力 ( $\sigma_0$ ) によるもの。

(b) 自由面よりの反射引張波による引張応力

なお、この他に爆轟ガスの膨脹による上記 (a) の破壊の助長もある程度期待される。

## 7 岩石爆破の計算例

爆薬を用いて岩石等を破壊する場合、爆破計画の樹立が必要であるが、これに用いられる爆破理論としては古く A. W. Daw & Z. W. Daw により述べられた剪断破壊理論 (1909)<sup>20)</sup> を根本的に出るのはなく、従来経験的に  $L = CW^3$  の式 ( $L$ : 標準装薬量,  $W$ : 最小抵抗線,  $C$ : 岩石爆薬等により決まる常数) が古くから用いられているに過ぎない。

その後、爆破理論として西村・太原<sup>21)</sup> は力学的理

論を發展したが終局において剪断破壊説をとり、K. Hino & C. W. Livigston<sup>26), 27)</sup> はショック波の反射引張波による破壊説を提出しているが、既に述べたように、これのみでは充分でない。

著者等は既述の実験結果より、岩石のような脆性物体の爆破では、その破壊機構は主として次のような応力によると考えた。

(1) 爆轟に伴う圧力波の自由面よりの反射引張波による引張破壊。

(2) 進行圧力波に伴う円周方向の引張応力 ( $\sigma_0$ ) による引張破壊。

なお、このときは、圧力波の引張応力が夫々材料の引張強度より大なれば破壊が生ずると考えてある。

このような動的爆破理論による破壊の様相を図57に示した。

圧縮破壊の部分もあるが、これが生ずる範囲は極めて爆心に近い部分に限られているので、爆破計画を樹てる際に特別の考慮を払ふ必要はない。(図47ではこの部分が稍大きく書いてある)

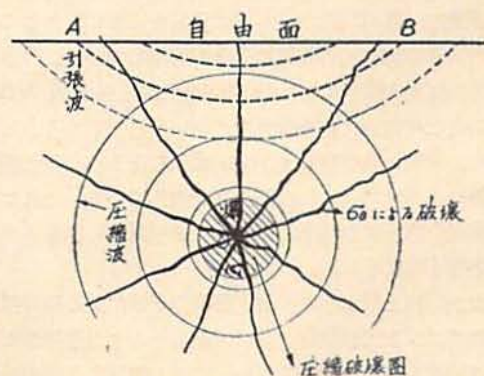


図47 動的破壊理論による破壊図

このような見解に基づき、石灰岩 (圧縮強度 750kg/cm<sup>2</sup>, 引張強度 50kg/cm<sup>2</sup>) 中に新桐ダイナマイト 1kg を埋めて自由面で爆破せしめた時の破壊の輪郭の概要を図式で求めてみた。

なお引張強度は動的な値が不明であるので、上記の値を使用した。また、応力波形も計算に便ならしめるため、簡単な直角三角形で表わし、圧縮波に続く引張波も考慮してない。

(1) 新桐ダイナマイト 1kg の爆轟圧力  
動的圧力として流体力学的熱力学的計算による<sup>22)</sup>

$$P_0 = 10 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$$

を使用することとした。

(2) 爆心よりの各距離における応力

各点での応力は Sharpe の式によるとしても不確定な要素があり、且、計算も容易でない。ここでは  $P_r = P_0 \left( \frac{a}{r} \right)^n$  として  $P_r$  を  $\sigma_r$  とし計算した。 $n$  は Duvall は実験値として 1.9~2.5 を得ているので、ここでは  $n=2$  とした。

各距離での  $\sigma_r, \sigma_\theta$  は表2の通りである。これは対数方眼紙により求めた。

表 2

減衰係数		$n=2$		
距離	$r/a$	$r$ (cm)		
			$\sigma_r$ (kg/cm <sup>2</sup> )	
			$\sigma_\theta$ (kg/cm <sup>2</sup> )	
1	5.4	5.4	100,000	50,000
5	27	27	4,200	2,100
10	54	54	1,090	545
20	108	108	270	135
30	162	162	123	62
40	216	216	70	35
50	270	270	43	21
60	320	320	-	-

(註) 1)  $a$ : 球状装薬の半径 5.4cm.

2)  $\sigma_\theta/\sigma_r=0.5$  とした。

(3) 破壊の計算

(イ) 最小抵抗線 100cm 及び 150cm の場合

爆心より距離 100cm での  $\sigma_r, \sigma_\theta$  を表2より求め、\*

\* 次に歪波の速度・周波数・波長を文献等より併せ考えて、表3の下方欄のようにおいて、自由面における反射引張波による破壊を図48のような要領で求めてみると表3のようによる。

勿論これは爆心の直上方向のみの計算で、それより以外の方向に対しては方向余弦を考慮に入れねばならず 6.2.2-I (1) で述べたように自由面への入射角による反射波の振幅、横波の発生等を考慮の要があるが、ここでは簡単に考えることとする。

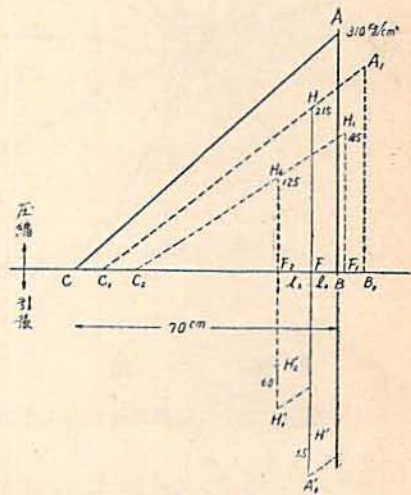


図 48

表3 石灰岩における爆破の計算例

新桐ダイナマイト 1kg ( $P_0=10 \times 10^4$  kg/cm<sup>2</sup>), 石灰岩の引張強度 50kg/cm<sup>2</sup>

減衰係数		$n=2$	
項目		100cm	150cm
最小抵抗線		100cm	150cm
$\sigma_r$ (半径方向圧縮応力)		310kg/cm <sup>2</sup>	140kg/cm <sup>2</sup>
反射波の有効引張応力による破断	① 自由面より 7cm (55kg/cm <sup>2</sup> )* ② それより更に 9cm (60kg/cm <sup>2</sup> ) ③ $\phi$ 10cm (65kg/cm <sup>2</sup> )	① 自由面より 20cm (57kg/cm <sup>2</sup> )	
$\sigma_\theta$ (円周方向引張応力)		155kg/cm <sup>2</sup>	70kg/cm <sup>2</sup>

(註) \* 括弧内はその点での有効引張応力を示す  $\sigma_\theta/\sigma_r=0.5$  とした。

距離 (cm)	100	150
歪波速度 (m/s)	3,500	3,500
周波数 (KC)	2.5	2.2
波長 (cm)	140	160

(ロ)  $\sigma_\theta > 50$  kg/cm<sup>2</sup> (石灰岩の引張強度) ならば

円周方向の引張応力による破壊があると考え。

(ハ) このように (a) 自由面での反射引張波による破壊と (b) 進行波に伴う  $\sigma_\theta$  による破壊とを考えると、最小抵抗線 1m の場合は図49, 1.5m のときは図50のような破壊が予想される。

破壊現象は複雑であるので、このように単純なものではないが、一応簡単な仮定のもとにその輪郭を示し



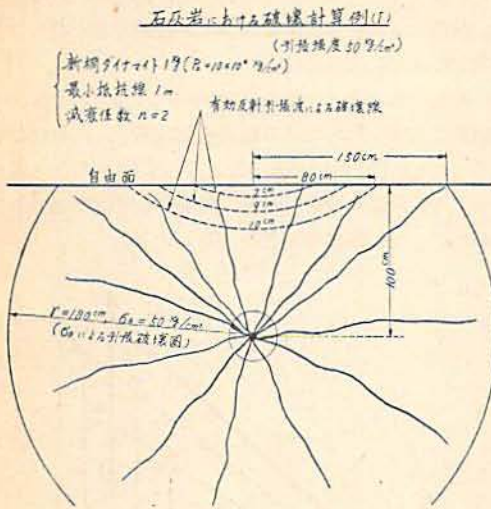


図 49

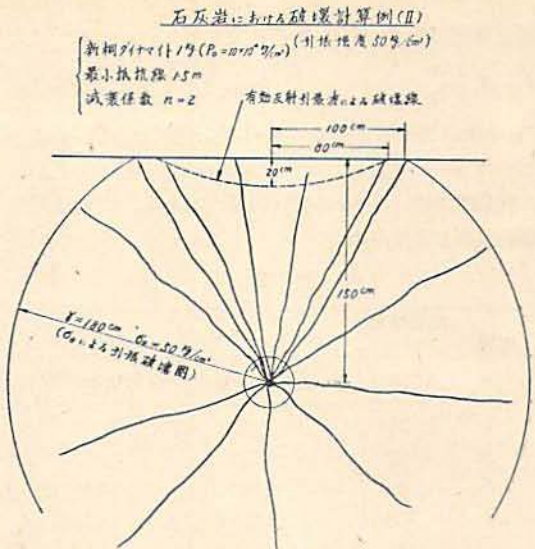


図 50

た。

## 8 総 括

8.1 以上の実験において歪波の測定法に就ては次の事が言える。

(1) セメント・モルタルの内部に電気抵抗線歪計を埋込んで水中養生を長期間行つても適当な方法で行えば、物体内部の歪の測定も可能である。

この実験のような周波数の大きい歪波ではゲージの絶縁抵抗は 50MΩ 程度のもので測定出来た。

(2) 進行波に対してリード線が供試体の材料傷として作用せぬよう配置したが、結果よりみれば反射波にも影響は認められない。但し静荷重や破壊強度には当然影響を与えるであろう。

(3) 爆薬の爆発による諸量を電氣的に測定する場合には爆発時に生ずる電磁波的ノイズの分離に注意せねばならない。本実験では爆源近くのゲージは金網でシールドする要があつた。

(4) 抵抗線歪計を適当に用いれば、10KC 程度迄の高周波数の歪波は捕捉再現出来る。

(5) 本実験程度の爆薬 (3~100g) にて爆波試験を行うには、装薬孔壁より供試体の自由面迄の距離は 1m 程度が必要である。

8.2 実験結果に就ては次の事が言える

(1) 弾性体内において小薬量を爆発せしめた時の進行波並に反射波の形、伝播状況及びそれらの減衰状況を測定出来た。

(2) 本実験の範囲 (装薬孔より 30cm 以上) においては、明らかに音速を超えると思われる歪波は測定されなかつた。また、破壊試験においても、その波形は小薬量による弾性振動の波形と相似のものであつて、明らかに塑性波と認められる歪波は記録されなかつた。

(3) 他の強度に比して引張強度の小さい脆性材料では、爆破による破壊を論ずるにも Sharpe や Duvall の弾性論的な取扱いを発展せしむれば充分だと思われるので、必ずしも塑性学の助力を必要としないと思われる。

(4) 半径方向の圧縮波の後に引張波を伴っているのが測定された。これは Sharpe, Duvall の計算からも予測出来ることで、爆源近くではこれによる破壊も考えられる。この波が自由面で反射する場合、圧縮波の反射した引張波との重なりを考えると、今迄の圧縮波のみを考えた Slab 生成の考え方を一部修正追加の必要を生ずる。

(5) Sharpe, Duvall の理論や Rinehart の実験等より脆性材料の爆破を論ずる場合、進行方向の歪波を重視するの余り、三次元の場合に生ずる進行方向に直角な引張歪を無視した議論があるが、本実験で示されたように、このための破壊を無視してはならない。

即ち爆破の際の破壊機構は主として次の諸項によるものを考慮せねばならない。

(a) 圧力波の自由面よりの反射引張波による引張破壊

(b) 進行圧力波に伴う円周方向の引張応力による破壊

(6) 測定せられた歪波形より小薬量の爆発による衝動圧は  $P_1 = P_0 e^{-at}$  又は  $P_1 = P_0 N (e^{-at} - e^{-bt})$  の形をとるを適当とし、 $P_1 = P_0 (1 - e^{-at})$  の形は不適当と思う。即ち爆轟生成ガスの膨脹圧(所謂後ガス)が破壊に直接の寄与をなすとは考えられない。

(7) 各孔夫々ベントリット 80 g, 段間隔 5ms の 2 段 MS 爆破を行つて爆源附近での歪波の干渉を測定したが、この程度の短間隔でも歪波の大きな重なりは認められなかつた。

附記: このような大規模の実験を遂行せしめられた旭化成の幹部の方々及び実験に協力された関係各位、殊に雷管部の御協力に深謝する。内容の一部は昭和 30 年 4 月 24 日及び 11 月 14 日の当協会研究発表会で講演した。

文 献

1) J. S. Rinehart et al.: J. Appl. Phys. 22 555, 1178 (1951), 23 434, 685 (1952), 24 462 (1953), 26 1431 (1955).  
 2) J. A. Sharpe: Geophysics 7 144 (1942).  
 W. I. Duvall: ibid 18 310 (1953),  
 H. Kolsky: Stress Waves in Solids (Oxford Press, 1953).  
 西村源六郎, 太原正: 火兵学会誌 32 140 (昭13).  
 山家信次: 工業火薬協会誌 10 51, 110 (昭24).  
 下村弥太郎: 日本鉱業会誌 68 519 (昭27).  
 日野熊雄: 工業火薬協会誌 15 233 (昭29), 17 2 (昭31).  
 桜井武尚: 日本物理学会誌 9 316 (昭29).  
 伊藤一郎他「ミリセコンド爆破の効果増進に関する研究」(京大工昭30).  
 3) 浜田稔著「材料試験法」p. 119 (昭30).  
 赤沢常雄「コンクリート圧縮による内部応力を求める試験方法」土木学会誌 (昭18.11).  
 4) 高林利秋著「コンクリートの無破壊試験法」(昭23).  
 樋口芳郎「音響学的方法によるコンクリートの強度の測定」土木学会誌 (昭25.3).  
 5) W. B. Dobie & P. Isaac: Electric Resistance Strain Gauges (1949) (三宅, 加藤訳: 電気抵抗歪計, 丸善, 昭28).  
 J. Yarnell: Resistance Strain Gauges (1951). (川口, 永倉訳: ストレン・ゲージ, コロナ出版

社, 昭28).  
 大井, 小林「電気抵抗線歪計および回路」朝倉書店発行「応力測定法」(昭30) pp. 158~257.  
 6) 荻原尊礼「振動測定」p. 303.  
 7) 桜井武尚: 応力物理 25 315 (1956).  
 工業火薬協会誌 15 257 (1954), 17 44 (1956).  
 8) 日野熊雄: 工業火薬協会誌 15 233 (1954).  
 9) T. von Karman and P. Duwez: J. Appl. Phys. 21 987 (1950), P. E. Dues and D. S. Clerk: Proc. Am. Soc. Testing Materials 47 502 (1947).  
 10) H. Kolsky: Stress Waves in Solids (1953) p. 195~196.  
 11) J. A. Sharpe: Geophysics 7 144 (1942).  
 12) W. I. Duvall: Geophysics 18 310 (1953).  
 13) 伊藤一郎: 水曜会誌 12 633 (昭30).  
 14) 伊藤, 藤中: 地下資源関係学会合同秋季大会 (昭30・10).  
 15) 横堀武夫著「材料強度学」(昭30). p. 1~18  
 16) B. Hopkinson: Phil. Trans. A. 213 437 (1914).  
 B. Hopkinson: Scientific Papers. p. 461 (Cambridge Univ. Press 1921).  
 17) J. W. Landon and H. Quinney: Proc. Roy. Soc. A 103 662 (1923).  
 18) H. Kolsky and A. C. Shearman: Research 2 384 (1949).  
 19) G. Christie and H. Kolsky: Trans. Soc. Glass Technology 36 65 (1952).  
 20) G. Christie: ibid, 36 74 (1952).  
 21) H. Schardin: Glastechnische Berichte 23 1, 67, 325 (1950).  
 22) 日野熊雄: 工業火薬協会誌 17 2 (1956).  
 23) W. A. Allen and W. Goldsmith: J. Appl. Phys. 26 69 (1955).  
 24) H. Kolsky: Stress Waves in Solids (1953) p. 24.  
 25) A. W. Daw and Z. W. Daw: The Blasting of Rock (1909).  
 26) C. W. Livingston and K. Hino: Principles of Blasting and their applications (1952), Colorado School of Mines.  
 日野熊雄: 九州鉱山学会誌 21 102, 136, 166, 195, 294 (28).  
 27) C. Beyling u. K. Drekhoph: Sprengstoffe und

Zündmittel. (1936) S. 56.

熊谷泰：九州鉱山学会誌 23 63 (昭30).

## Study of Blasting (III)

Stress Waves Produced in the Interior of a Concrete Block  
by an Explosion and the Resulted Fractures.

by Teizō Ōkawa,\* Masao Hirayama\* and Kenkichi Kiyota\*\*

Test blocks made of cement mortar are;

- (1) rectangular bar of  $10 \times 10 \times 400$ cm.
- (2) circular plate of  $10 \times 20 \phi$ cm.
- (3) rectangular plate of  $10 \times 200 \times 200$ cm.
- (4) Cube of  $200 \times 200 \times 200$ cm.
- (5) Cylinder of  $200 \phi \times 200$ cm.
- (6) Rectangular quadrangle prism of  $200 \times 200 \times 340$ cm.

In case of (1), 5~30g of PETN is exploded on an end surface and in cases of other blocks, 3~100g of PETN is exploded in a bore hole drilled in the center of the test block.

The stress waves produced in the test blocks are picked up by eight strain gauges which are insulated and sandwiched between two small pieces of cement mortar with araldite and buried in the block.

The gauge can measure the shape, the velocity, and the frequency (up to 10Kc) of the compression as well as tension waves.

Throughout the experiment, the velocities of stress waves are nearly equal to the sonic wave velocity and no supersonic and plastic waves are recorded.

Fractures of brittle materials like cement mortar will be explained by the dynamic theory of elasticity; the fracture is caused mainly by the tension stress of the dilatational wave reflected back at the free face and also by the tangential tension stress of the emitted compression wave. Static pressure of the explosion will promote the fracture due to the tangential tension stress, to some extent, but its contribution to the fracture may be small comparing with abovementioned factors.

( \* Nobeoka Factory, Asahi Chem. Ind Co. Ltd. Japan.  
\*\* Faculty of Engineering, University of Kumamoto, Japan. )