

爆薬猛度の実験的研究

第 XVIII 報 爆破エネルギーの測定、並びに猛度の物理的意義について

(昭和 33 年 11 月 24 日 受理)

桜井 武 尙

(日本油脂株式会社武豊工場)

1. 緒 言

今までの研究によつて、金属や岩石等の固体が爆轟のような強力な衝撃を受けたときの種々の応力波の様相が明らかとなつた。かかる高圧応力波、すなわち、高次塑性波領域においては岩石は高温下に靱性流動的挙動を示し、応力の解放と温度低下によつてきわめて微細な粒子に分たれる。又、衝撃波は、その物理的意義からみても明らかな如く、伝播過程でもろい破壊を与えることに重要な意義がある。

然し、これらの領域は、通常、爆源から比較的近距离に限られており、ここに、猛度、すなわち、爆薬の動的効果が爆源の近傍で主な働きをするという考えが妥当な理由がある。

従つて、このような見地より見ても、内部装薬下の工業爆破においては生成ガスによる準静的応力分布下の引張り破壊は猛度と同様に重視すべきであると思われる。

そこで、爆薬がもつエネルギーが、爆源近傍の破壊と、それよりも遠距離の引張り破壊にどのように分配されるかを調べるため、爆破エネルギーの実測を行い、爆薬猛度の物理的意義を考察した。

2. 実験方法

爆破エネルギーの測定には弾動臼砲を使用する。これは Fig. 1 のように小形の臼砲を振りにつけ、重量 15~17kg の弾丸を爆薬によつて発射し、その時の臼砲振子の後退角 θ を測定し、次式によつて爆薬のエネルギー E を算出しようとするものである¹⁾。

$$\left. \begin{aligned} E &= E_0(1 - \cos \theta) \\ E_0 &= WR(1 + J_g/w\gamma^2) \\ l &= g\tau^2/4\pi^2 \\ J_g &= WRl \end{aligned} \right\} (1)$$

ここに、 W : 臼砲振子重量 450kg, w : 弾丸重量 17kg, R : 支点より重心までの距離, γ : 支点と薬室中心までの距離 3.05m, J_g : 支点軸のまわりの慣性能率 l : 相当振子の長さ, τ : 臼砲振子の振動周期 3.45sec である。

実験に使用した装置では

$$E_0 = 36,600 \text{ kg-m}$$

である。もし、次にのべるように弾丸をコンクリートにかえた場合には

$$E_0 = 1372(1 + 4060/9.3w)$$

を用いる。(w は 3.7~3.9 kg)

この弾動臼砲による爆破エネルギーの測定原理と方法は次の如くである。(1) 先づ、正規の弾丸を用い、爆薬の全エネルギー E を求める。(薬量は 5g とする) このときの臼砲内の状態は Fig. 2.1 に示すごとくである。

(2) 次に、臼砲の薬室内に直径 50mm のセメントモルタル棒を挿入する。この棒には Fig. 2. II のように爆薬 (5g) が装置してある。そして、矢張り正規の弾丸を装填する。方法 I と II との相異はセメントモルタル棒の有無だけであ

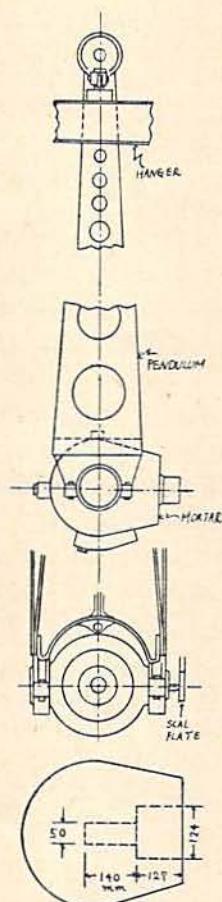


Fig. 1 Ballistic-mortar

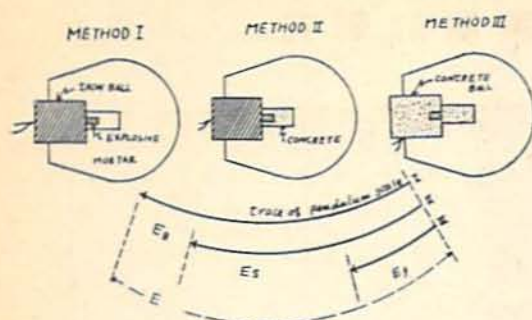


Fig. 2 Experimental method

る。従つて、このときの白砲振子の後退角から求めたエネルギーを E' とすれば、爆薬のエネルギーの一部は白砲薬室内のセメントモルタル棒を爆砕するのに消費されているから、

$$E > E'$$

となり、この差 E_B が爆砕に費されたエネルギーとなる。

$$E_B = E - E'$$

すなわち、白砲薬室に充填されたセメントモルタルを粉砕した後、尚残余のエネルギーがあれば、そのエネルギーは弾丸を発射し、且、白砲を後退せしめるわけである。

(3) 今度は、Fig. 2 III のように、弾丸をセメントモルタル製に替え、この弾丸に装薬しておく。そして白砲薬室はセメントモルタル棒で充填する。この時の後退角から求めたエネルギーを E'' とすれば、爆薬の周囲は II のように制限されていないので、 E_B に加え、さらに、セメントモルタル弾の破壊にエネルギーを消費するので

$$E > E' > E''$$

となり、 E' と E'' の差は I よりも一層準静的破壊の要素が強い破壊に費されるエネルギー E_S と目される。

$$E_S = E' - E''$$

そして、最後に残るエネルギー E'' が破壊した破片を飛散させるに要したエネルギー E_I となる ($E'' = E_I$)。このとき、白砲振子からエネルギーを求めるときの E_S は、セメントモルタル弾の重量 w で評価するの

で、破壊作用の系外に残つたエネルギーは振子の後退角から合理的に求め得ることは前記の通りである。ただ、III の場合、I と装薬位置が異なることになるが、これは白砲の構造上仕方がないことである。セメントモルタルの配合は、セメント4、砂(24~60メッシュ)6、水2の割合とし、爆薬は鉛箔で包み6号電気雷管で点爆した。振子の後退角は度盛板上の紙に鉛筆で自記させた。この結果は Fig. 3 のごとくである。

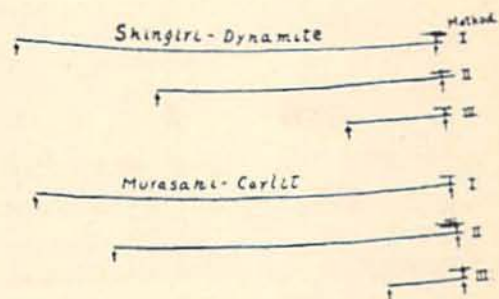


Fig. 3 Sketches of selfregistered Scale-papers

3. 実験結果

先づ RDX (5g) について実験した。この全エネルギー E は6回の平均として 690kg-m であり、Fig. 2, II の方法で白砲薬室内にセメントモルタル棒を挿入しこの粉砕にエネルギーを消費した後の残余のエネルギーは 342kg-m であった。それで差し引き 348kg-m が棒の爆砕に使用されたこととなる。これは全エネルギーの 50.4% に相当する。このとき、爆源は直径 35mm、長さ 85mm に拡大した。もとの棒内の薬室は直径 15、長さ 35mm である。次に、Fig. 2, III のように、セメントモルタル弾に装薬したときは残存エネルギーは 128kg-m、従つて、前の方法の測定エネルギーから差し引いて、214kg-m が E_S に相当する。これは全エネルギーの 31.0% に当る。この方法 I~III の誤差は Table 1 のように I が最も小さいが、III はかなりのばらつきを示す。これは、方法 III のセメントモルタル弾の破壊は本質的にばらつきの多い、もろい形式の引張り破壊によるものであることを物語っている。

次に、破壊をともしない例として、黒色火薬で実験した。点火は点火玉による。結果は Table 2 の如く方法 III におけるエネルギー損失は 5% にすぎず、セメントモルタル棒は何ら損傷せず、当然のことながら、破壊をともしなければエネルギーの相対的な低下はないことを示している。又、方法 III でセメントモルタル

Table 1 Experimental results and its confidence limit by RDX 5g. (Confidence level is 95%)

| method | n (times) | Mean energy measured \bar{X} (kg-m) | Confidence limit/ β (kg-m) | Absorbed energy (kg-m) |
|--------|-----------|---------------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| I | 6 | E : 690 | 11.5 | - |
| II | 5 | E' : 342 | 17.5 | E_B : 348 |
| III | 5 | E'' : 128 | 32.0 | E_s : 214 |

Table 2 Experimental results by Black-Powder or No. 6 Detonator

| | Method | Reduced angle of pendulum (degree-minute) | Measured energy (kg-m) | Absorbed energy (kg-m) |
|-----------------|--------|---|------------------------|------------------------|
| Black-powder | I | 5-25 | E : 163 | - |
| | II | 5-16 | E' : 155 | E_B : 8 |
| | III | 1-45 | E'' : 60 | E_s : 95 |
| No. 6 Detonator | I | 2-01 | E : 226 | - |
| | II | 0-28 | E' : 12 | E_B : 214 |
| | III | 0-07 | E'' : 0.32 | E_s : 11.7 |

Table 3 Experimental results by typical industrial explosives.

| | Method | Reduced angle of pendulum (degree-minute) | Measured energy (kg-m) | Absorbed energy (kg-m) |
|-------------------|--------|---|------------------------|------------------------|
| Shingiri-dynamite | I | 11-56 | E : 792 | - |
| | II | 8-09 | E' : 370 | E_B : 422 |
| | III | 2-56 | E'' : 209 | E_s : 161 |
| Murasaki-carlit | I | 11-34 | E : 743 | - |
| | II | 9-40 | E' : 520 | E_B : 223 |
| | III | 2-15 | E'' : 141 | E_s : 379 |

ル弾を使用した時も破壊は全く起らず、この時の消費エネルギーは弾の発射に消費されただけである。

次に、6号電気雷管のみで行うと、矢張り Table 2, 4 のように、雷管のエネルギーの 94.6% までが爆源の粉碎に用いられ、準静的破壊に 4%, セメントモルタルの移動に 1.4% を消費した。

又、二つの特徴的な工業爆薬として、新桐ダイナマイトと紫カーリットについて行くと、きわめて興味ある対比が得られた。結果は Table 3, 4 に示す。Fig. 3 はこの時の度盛板自記紙のスケッチを示すものである。爆源部の粉碎に対しては、新桐ダイナマイトは 53.3%, 紫カーリットは 30% と、新桐の方が多くの割合のエネルギーを費している。一方、準静的破壊に対しては、新桐は 20% であるのに対し、紫カーリット

は 51% も費している。すなわち、新桐ダイナマイトは爆源近くの粉碎に、紫カーリットは準静的破壊に消費するエネルギーの割合が大であるという二つの爆薬の特徴を良く示している。又、新桐ダイナマイトは初期の粉碎に強い効果を示し、その結果、その後の破壊が楽になり、より少ないエネルギーで効果的に準静的破壊を行って、尚、残余の破片飛散エネルギーは大に紫カーリットよりも過剰の状態となっている。

Table 4 Distribution of ratio of absorbed energy to total energy of explosive. (Object is concrete)

| Explosives | Energy ratio% | In crushed zone near cartridge E_B/E_s (%) | In quasi-static fracture zone E_f/E_s (%) | Flying-out fragments E_f/E_s (%) |
|-------------------|---------------|--|---|------------------------------------|
| | RDX 1.0g/cc | | 50.4 | 31.0 |
| Shingiri-dynamite | | 53.3 | 20.0 | 26.7 |
| Murasaki-carlit | | 30.0 | 51.0 | 19.0 |
| Black-powder | | 5 | 58.1 | 36.9 |
| No. 6 Detonator | | 94.6 | 4.0 | 1.4 |

この爆源におけるエネルギー吸収が、工業爆薬に及ぼす影響は、目的物のエネルギー吸収と粉碎効果の関係に支配され、(1) 爆源のエネルギー吸収が有効な粉碎効果と直接結びつく場合、例えばセメントモルタルその他の岩石等、(2) 爆源が、エネルギーを吸収した割合にもろい形式の破壊を示さぬとき、極端な場合、粘土等。の二通りについて異なる。従つて爆破に当つていづれの爆薬形式がのぞましいかは、目的物により自ら変わるわけである。ここに爆薬猛度を考える意義がある。

4. 破壊効果の観察

爆源は粉碎し、圧縮されており、この粉碎領域は別報の鉄シリンダーの爆破実験¹⁾や第 XVII 報²⁾の岩石内の応力波の研究結果等からみて、高次の脆性領域と見ることが出来る。この部分の粉碎は強力な動的圧縮により一旦熔融した後、応力の解放による容積の膨脹によつて発生する。鉄シリンダーの場合は低次脆性領域の解放がシリンダー内壁部の剪断亀裂をもたらすが、鉄よりも圧縮性に富み、且結合力の弱い岩石等では、応力の解放に当りもろい粉碎効果を発揮する。又、鉄においては低次の脆性領域から弾性波領域に入るが、セメントモルタルや岩石等では、高次脆性領域から急に数mmの破片をもつろい破壊をもたらす衝撃波領

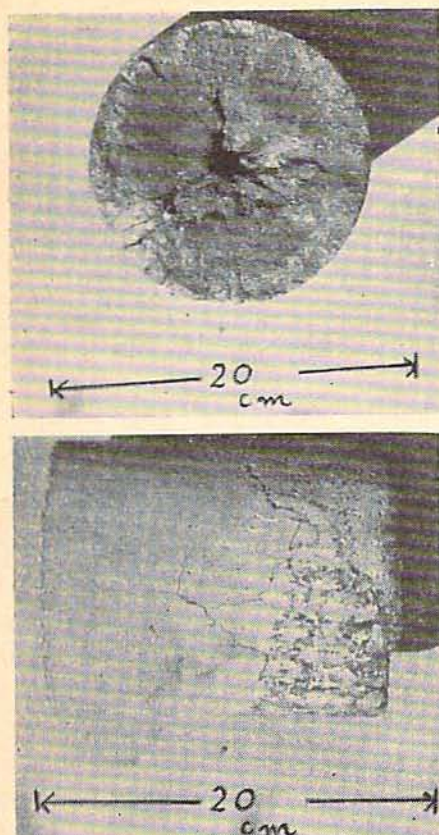


Photo 1 Aspects of Cement mortar Projectile after experiment with No. 6 Detonator

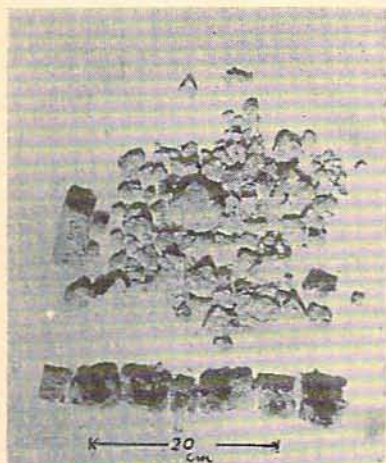


Photo 2 Fragments of Cement mortar Projectile after experiment by Shingirdynamite

域に入る。そして、このもろい形式の破壊は距離と共に次第に粗く、また統計的性質を帯びて行くことは本実験の破片の状態からうかがうことができ、この点は

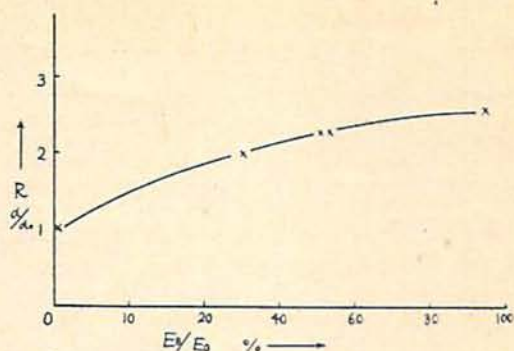


Fig. 4 R versus E_R/E_0

$$R(=d/d_0),$$

d : diameter of expanded bore hole

d_0 : original diameter of bore hole

第XVI報³⁾で得た知見と同様である。

一般に、破壊の様相は爆源からのびた放射状の亀裂が主体をなしている。これは、雷管の例 (Phot. 1) からみても明らかであり、さらに、爆薬をそえて破壊が一層強く起るようになると、放射状の亀裂は一そう遠くまでのび、また、枝分れて横方向と連結し合つてきわめて不規則な破片を形作る。

自由面からの波の反射距離は6号雷管では起つていない。(Phot. 1) 然し、爆薬をそえた場合は Phot. 2 に示すように、明らかにこの効果が発生した。然し、それ以外の破片の形は全く不規則で、自由面から深部にわたつての距離の形跡は認められなかつた。又、この自由面の距離破壊片重量は全体の約2割である。(自由面から距離面までは約4cm)

爆破の過装と弱装の区別は、爆薬のエネルギーが破壊に費された後、岩石を飛散させる残余のエネルギーの大小で区別するのが最も科学的な判別である。雷管による場合、破壊後の残余のエネルギーの全エネルギーに対する割合は1.4%にすぎず、きわめて弱装であつたことを示しているが、この場合では距離は全く起らず、このエネルギー配分率が19%で起つたことは興味深い。

距離は過装の状態ほど強く起る可能性があるが、破片飛散エネルギーが全エネルギーの19%の場合、破片は細かく、且烈しく飛散し、尚相当の過装である。従つて、過装の場合はこの値が19%以下であると考へて良いから、過装条件では Phot. 2 の場合よりも距離は起り難いであろう。

以上の実験によつて、一般に、内部装薬下の爆源近傍に消費されるエネルギーはかなり大であることを知つたが、爆源に吸収されたエネルギーの配分率 (E_R/E_0)

$E) \times 100$ と爆源の拡大半径比 $R(=d/d_0)$ の関係をしらべると Fig. 4 のようになる。但し、 d : 拡大半径 d_0 : もとの薬室半径である。 R は爆源で吸収されたエネルギーが大となるに従って大となつて行くが、その傾向は上に凸に一定値に飽和し、セメントモルタルの場合の飽和値は約 2.6 である。Fig. 4 の曲線は目的物によつて異なる筈であるが、 R と吸収エネルギーとの関係を示し得た意義は大きいと考えられる。

5. 引張り主応力爆破理論の猛度項の吟味

先に、村田、田中は工業爆破の際の変位ポテンシャルと体積変化の微分方程式を立て、適切な境界条件の下に解いて岩石内の引張り主応力の分布を求め、爆破係数の求め方を誘導した。

理論の展開は村田らの報文⁴⁾に詳しいので、ここには略し、結果のみ書くと、爆破係数 c は次のようになっている。

$$C = 3.58 \times 10^{-4} \frac{(1-0.3J)\sigma_t}{f} \frac{(1+K_1 q^2 J)^{3\tau}}{(1+K_2 q^2 J)^2}$$

ここに、 f : 火薬力、 q : 爆薬柱よりのガス噴出速度、 J : 爆薬比重、 τ : 爆発ガスの比熱比、 σ_t : 岩石の引張り強度に比例する常数、 K_1, K_2 : 夫々岩石の拡大、粉碎係数である。この理論は σ_t, K_1, K_2 等の岩石の破壊に関する特性値を導入し得た点において、爆破を数理的に取扱おうとした従来の試みのなかで最も合理的になつている。

尚、ガスの噴出速度 q は近似的に J の一次式で、

$$q^2 = D^2(1-0.47J)$$

としても厳密計算とあまり差がないことから、式は

$$C = 3.58 \times 10^4 (1-0.3J) (\sigma_t/f) \frac{\{1+K_1 D^2 J(1-0.47J)\}^{3.75}}{\{1+K_2 D^2 J(1-0.47J)\}^2}$$

としても良く、実際計算にはもつぱらこの式を用いる。 c は岩石の特性値の他には、 f 及び爆薬の比重と爆速によつて定まり、拡大半径を d_1 、粉碎半径を d_2 、装薬孔半径を a_0 とすれば、村田等の理論では、

$$d_1/d_0 = 1 + k_1 D^2 J(1-0.47J)$$

$$d_2/d_0 = 1 + k_2 D^2 J(1-0.47J)$$

となり、いずれも爆薬の $D^2 J(1-0.47J)$ に比例する。従つて、爆薬の猛度の効果はこの項で比較すれば良くこれを K として本報の実験結果と比較してみよう。

そこで、今使用した4種の爆薬について、比重、爆速を Table 5 の如くすれば、 K の値は同表第4欄となる。この K の値は圧力 (kg/cm²) の単位である。この K と本報告で求めた E_B との関係を示すと、Fig. 5 のように両者はきわめて直接的な関係があり、強いていえばほぼ比例的と見ることが出来る。

Table 5 Value of brisance term K in Muratás formula on blasting coefficient

$$K = D^2 J(1-0.47J)$$

J : density of explosive

D : velocity of detonation

| Explosive | $\Delta g/cc$ | $D km/sec$ | $K, 10^4 kg/cm^2$ |
|-------------------|---------------|------------|-------------------|
| RDX | 1.0 | 4.5 | 10.7 |
| Shingiri-dynamite | 1.45 | 5.0 | 13.3 |
| Murasaki-carlit | 1.1 | 4.0 | 8.5 |
| Black-powder | 0.9 | 0.3 | 0.05 |

この結果の意義は次のように考えることができよう。従来の研究で明らかのように、爆薬が爆轟すると周囲の固体に強い応力波を発生せしめ、その波の形式と強さは爆薬の動的特性値、 $K(J \cdot D)$ に支配される。

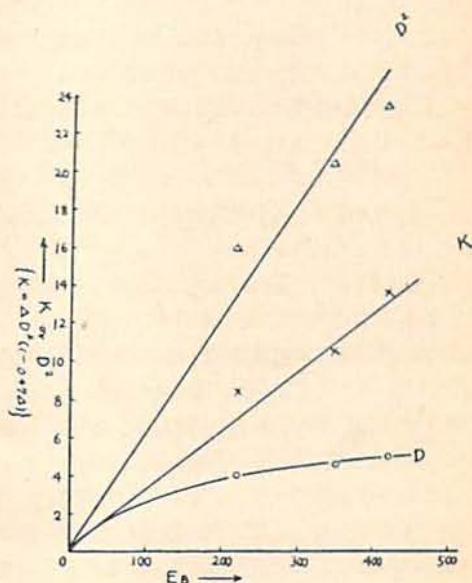


Fig. 5 K or D^2 versus E_B (kg-m)
 D is velocity of detonation (km/sec)

このとき、強い応力波ほど破壊の核を沢山与え、その破壊の完結に対して、爆発と同時に生成し始めるガスのエネルギーが多く吸収される。すなわち、爆源近傍に高次塑性波が発生すれば、その塑性仕事とその維持に生成ガスのエネルギーを消費するであろうし、それにつづく衝撃波によるもの破壊の進行は、さらに高圧ガスのエネルギーを消費せしめるであろう。従つて、圧力の単位で評価される $K(JD)$ が大であれば、爆源部に強い応力波を生じ、強い応力波は強い破壊の原因となり、それだけ多くの爆薬エネルギーが初期の爆源部の破壊に吸収される余地を与えるのである。ここに、爆薬の猛度項と、爆破における爆薬のエネルギー解放の時間的勾配との関係意義がある。従来、猛度の定義として、爆轟圧力、並びにエネルギー解放の時間勾配の二通りが与えられており、両者間の具体的区別は不明確であつた。然し、両者はこのような関係意義で結ばれており、猛度としいづれの定義をとつて良いわけである。

尚、我々は、爆薬の静的エネルギーと言うと、その語感から、爆薬が爆発してからある時間後、(爆速や比重の大小で速度が定まる噴出ガスが高速度で内壁を衝撃して引き起す種々の応力波現象が終つた後) 爆薬の静的エネルギーが作用し始めるような感じがする。然し、事実はそうでなく、爆薬が持つエネルギーの破壊作用への吸収は、当然、爆発開始から後期まで、その時の条件に応じて各機構に配分されて行くのである。

このようにして、爆破は、比重と爆速に支配される猛度と、火薬力との組合せによつて行われるものであるが、猛度の物理的意義は爆源に強力な圧縮応力波を生ずることにあり、それが強く起ればそれだけ後期の高圧ガスの破壊作用が容易に行われることとなる。従つて、この点を強調する村田等の引張り主応力爆破論は妥当であると考えられる。

ただ、爆源における粉碎半径の決定は理論の簡素化のため、有限の範囲に定めて行つたわけであるが、爆源の粉碎効果は距離と共に確率的となり、判然とした領域は定め難いという考え方は当然あるわけである。この粉碎効果の距離的な統計的性格の変化が比較的なだらからなければ、粉碎領域を一定の範囲に限定して考えることの難点は無視できなくなる。然し、爆源の応力波は第XII報でも明らかのように急速に減衰し、爆薬の種類による差はかなり近距離に限られる点からみても、粉碎半径を便宜上有限の値に定めることは許されると考える。

6. 摘 要

内部装薬下の爆破は(1)爆源近傍の動的破壊、(2)爆発ガスによる引張り破壊、(3)破壊片の飛散の三つの作用に分けて考えることができる。本報告は爆薬のエネルギーがこれらの現象に、夫々どのように配分されているかを明らかにするため、弾動白砲を応用して実験したものである。

装置の構造上、爆源近傍とは、装薬を中心として直径5cmの範囲とし、その中に吸収されるエネルギーを E_B とした。又、それ以上距離の領域に起る静的因子の強い破壊に要したエネルギーを E_s 、破壊後の破片飛散に要したエネルギーを E_f とする。

このようにして、数種の爆薬について、これらの配分エネルギーを求めた結果、新岡ダイナマイトのような高猛度の爆薬は E_B は大であり、全エネルギーに対する比率は53%を示した。一方、それより低猛度の紫カーリットは矢張り小さく30%である。しかし、 E_s は逆に紫カーリットの方が大である。すなわち、破壊現象は最小確率の性格をもつているので、現象初期に強い破壊を起すほど後期の破壊は楽になり、新岡ダイナマイトは紫カーリットよりも小さい E_s でも、結果として、大なる E_f を与える。

このような結果からみて、猛度の物理的意義は次のようであると思われる。先づ、爆薬の比重、爆速等で速度が定まる噴出ガスが高圧、高速度で目的物を衝撃し、爆源近くに高圧の応力波を与える。このとき、爆源の応力波が高圧であるほど波は強い攪乱を与えて進行するので、爆轟と同時に解放され始めた爆薬の静的エネルギーが、この攪乱にもつづく破壊に吸収される可能性が生ずる。従つて、爆薬が高比重、高爆速であることは、爆破現象初期にエネルギーの吸収を強く起し、その結果、現象後期の静的破壊が容易となる。ここに、従来行われて来た猛度の二様の定義、爆轟圧力そのものと、目的物に対する爆薬のエネルギー解放の時間勾配との関係意義が認められる。

本報の実験に関し資料の交換を求められ、多大の鞭撻を受けた西独 DYNAMIT-A. G. の J. F. Roth 博士に深謝する。

文 献

- 1) 桜井武尚：工火協誌投稿中
- 2) 桜井武尚：工火協誌 19 4 冊 (1958)
- 3) 〃 〃 19 181 (1958)
- 4) 村田勉、田中一三、日誌誌 73 205 (1957)

7. 本研究の総括

本研究は、爆薬の爆発による固体内応力波の伝播やその破壊機構を明らかにし、i) 工学上重要な高速度衝撃下の破壊、ii) 工業爆破における爆薬の動的効果の合理的な概念の確立、に役立てんとしたもので、その成果を総括すれば次の如くである。

(1) 衝撃によって発生する固体内応力波の形式に関する従来の理論と実験について述べた。

(2) 爆薬による破壊変形効果の一般の様相を観察し、応力波の衝突、反射等による亀裂と、他の破壊変形効果との再現性の差を明らかにし、また、高比重、高爆速の爆薬は強い応力波を発生させることを知った。

(3) 一つの試料を両端から対称に衝撃すると、試料中央に波の衝突による亀裂が生ずることを利用する簡単な波の速度測定法を考案した。この方法は波頭の捕捉を力学的衝突効果で行い、時間測定には爆速既知の導爆線を使用するので、力学・火薬、又は力学的方法と呼ぶことができる。鉛と TNT(40.95g/cc) による実験から、距離 8cm 以内では明らかに波は音速よりも速く、衝撃波の発生を認めることができた。

(4) この力学的方法にさらに工夫を加え、鉄内の波を正規弾性波と仮定して、鉄と鉛の組合せ実験を行い、(3) では未知であった鉛内の爆源近傍の速度を定め、一先づ、TNT-鉛の波の時間距離曲線が定められた。

(5) 鉄の代りに速度未知の物質を用いて、同上の手段により、固体、液体、空気、粉体内の衝撃波速度を求めた。

(6) 金属内の衝撃波速度を高速度掃引ブラウン管オシロスコープで測定し、先に仮定した鉄内の弾性波速度が定められ、それによって求めた各種の物質内の衝撃波速度の補正を行った。

(7) 固体内衝撃波が自由面で反射するときの様相を原理的に説明し、この現象を利用して行われる波の物質速度、及び波形の測定法を論じた。測定法には試料の自由面に試料と同一材質の円板をはりつけ、波の反射による円板の飛出速度を求める円板法、自由面の運動速度を直接測定する直接法がある。測定した速度は、いずれも物質速度の2倍と考える。

(8) これらの速度の測定距離や測定手段を色々に変えた一連の実験を行い、各方法の差異を論じ、金属内の合理的な物質速度と波形を明らかにした。

(9) 自由面に入射する衝撃波と反射稀薄波内の物質速度はほぼ等しく、円板速度、又は自由面速度の $\frac{1}{2}$ 、

を衝撃波の物質速度とすることは近似的に許されることを明らかにした。

(10) 自由面で衝撃波が反射する時の現象をシュリーレン瞬間写真で吟味し、物質速度測定法に関する種々の知見を確めた。自由面から空気中に投射される空中衝撃波速度から求めた自由面速度と、直接、自由面速度を電氣的に測定した値とはきわめて良く一致した。

(11) 以上は爆源からやや離れた距離の実験が主であったが、さらに爆源近くにさかのぼってしらべると鉛は純度が低下すると、爆源部に波の低速度伝播領域があり、又、この領域における物質速度は正規衝撃波のそれよりも異常に大である。波の速度が低下するのは変形が急に容易となり、応力を σ と歪を ϵ としたとき、 $d\sigma/d\epsilon$ が小となるためである。この性質はアルミニウムでも見出され、衝撃がある限界以上に烈になると、動的に硬化する ($d\sigma/d\epsilon$ は大) 衝撃波の性質から離れて、現象は粘性流動的になるためである。これは衝撃波よりも高次の衝撃形式であるので、高次粘性流動波もしくは高次塑性波と名づけた。このような衝撃形式の存在は、WHITE, GRIPPISS らによつて、かつて理論的に予言されていたが、本研究により始めて実験的に明確となつたものである。

(12) この現象は衝撃圧力、速度の臨界性をもっており、従つて、衝撃力が強力になるほど起り易いことを爆薬の薬勢を変化させた実験によつて裏付けた。

(13) 高次粘性流動現象(本実験の条件では)未だ鉄では見出せなかつた。

銅は軽微な徴候がある。ガラス、大理石、セメントモルタル等の鉱物質、又は、ゴム、パラフィン等の高分子場においても、10万気圧以下の領域で見出される。いずれも爆源に低速度伝播、高速度の物質移動の領域があり、又、この性質は爆薬の威力を強くすると発生領域が大となることは鉛と同様である。

(14) 爆薬による鉛の衝撃破壊の破片の形、飛散分布等をしらべることに、爆源部に波の低速度伝播領域を含む場合は粘性流動を起していることを裏づけた。

又、鉛製の弾丸を種々の弾速で鉄の標的に銃撃し、弾丸の変形、発光等の現象を明らかにし、280m/s 以上では、弾丸に高次粘性流動波が発生することを明らかにした。この弾速は、先の爆薬による臨界衝撃速度とほぼ一致した値である。

(15) これまでの波の伝播速度、並びに物質速度の実測値を RANKINE-HUGONOT の式に代入して、固体

の高圧下の動的状態図を求めた。これにも高次塑性波の発生源が明らかに示されている。

(16) この状態図をもとにして、各種固体内の波面温度を評価した。応力波が衝撃波の形式である間は、圧力による温度上昇は10万気圧でも高々200°C以下であるが、一たび高次塑性流動領域に入ると、急に2,000°C以上の高温となり、固体はここで熔融することは明らかである。

(17) 衝撃波の破壊効果には二通りあり、一つは反射による応力集中にもとづくもの、他は波の伝播による直接破壊である。この波の反射による応力集中効果を利用して材料の動的抗張力を求めることができ、これは、金属では静的な値の約10倍のオーダーであった。

(18) 波の反射による応力集中効果の他の応用例として、柱状装薬に隣接する固体内に伝播する応力波の形式を調べた。すなわち、爆薬の爆速 D が、固体の音速 C_0 よりも大であるときは、固体内の攪乱は有限の頂角をもつ円錐状波面を形作って進行し、この波面は試料の側面で反射して、反射波同志が衝突して亀裂を起す。もし $D < C_0$ であれば応力波は散乱し、かかる結果は生じない。

(19) 衝撃波が高速となることは、高圧となるに従って動的に圧縮性に乏しくなり、応力 σ と歪 ϵ の関係において、 $d\sigma/d\epsilon$ が大となることにもとづくものである。従つて、衝撃波の伝播は固体にきわめてもろい形式の破壊を与え、鉛やゴム等も、もろく破壊する。この衝撃波の伝播による破壊をしらべるため、ガラス、メタクリル樹脂等の衝撃破壊現象をシュリーレン瞬間写真でしらべた。その結果、衝撃源近くの強い亀裂の進行は速度過程としてでなく、運動量輸送過程として理解すべきことを知った。

(20) 一般に観測される亀裂速度 C_a は波頭速度 C 、核間距離 a 、核からの亀裂発生待ち時間 τ 、核間をむすぶ微視的亀裂速度 C_i 等のパラメーターで変化する。この内、 a と τ は統計的性格をもち、特に τ は最少確率的性格をもつて C_a の形成に関与する。

(21) C_i は亀裂進行機構の性格によつて、 $C_i > C$ 、 $C_i = C$ 、 $C_i < C$ の三形式に分けられ、最初のものは(19)で指摘した形式で、この亀裂の進行は微視的衝撃

波の進行とでも称すべきものである。さらに、他の二形式も含めて、かかる微視的応力波的考察が亀裂成長に成立するものとすれば、これは興味ある亀裂速度の問題を提示していることをのべた。

(22) 工業爆薬の実際上の資料を得るため、数種の工業爆薬による岩石内応力波の伝播性をしらべ、一般に、薬種による差は、十数cm程度の距離ではほとんど無くなるまでに急速に減衰し、薬種差は爆源近くにおいて強く現れることを明らかにした。又、工業爆薬による岩石の動的状態図を求め、先の単一爆薬による結果と比較して良く一致することを認めた。

(23) 弾動臼砲を使用して、直接に爆破エネルギーの実測を行い、爆破の個々の機構、すなわち、(i)爆源の粉碎、拡大、(ii)準静的破壊、(iii)破壊後の破片飛散等に消費されるエネルギーを求めて比較した。代表的な工業爆薬である新割ダイナマイトと紫カーリットの結果を例示すれば、高比重、高爆速の前者は、低比重、低爆速の後者よりも爆源で費すエネルギーは大であるが、準静的破壊に要するエネルギーは逆に後者が大である。そのため、新割ダイナマイトは爆源で強く破砕を起し、後期の準静的破壊は容易となり、破壊後の破片飛散エネルギーは紫カーリットよりも大となっている。ここに爆薬猛度の意義が認められる。又、村田、田中等の行つた爆破理論式における爆薬の動的作用に関する項を吟味した結果、この特性項(圧力の単位)は爆源で吸収されたエネルギーと比例的関係があることを知った。ここに、従来の猛度に関する二様の定義、すなわち、爆轟圧力と、爆薬のエネルギー解放の時間勾配の間の関係意義がある。

8. 謝 辞

本研究を行うに当たり、終始温情を以て筆者を指導された、日本油脂株式会社、村田勉博士、並びに東京大学工学部、山本祐徳、正田強両教授、同理学部、平田森三教授に厚く感謝する。

また、種々の実験に有益な助言と便宜を与えられた京都大学工学部、伊藤一郎教授、並びに、本稿を草すに当り多大の鞭撻を頂いた日本油脂株式会社、元常務取締役松室信夫氏並びに、現常務藤岡三郎氏に感謝の意を表して筆をおく。

On Brisance of Explosives (XVIII)

On measurement of blasting energies by ballistic mortar

by T. Sakurai

An energy E of explosive used to blast rock is divided into following three types of energy ;

- (1) E_R to crush a region around the bore hole
- (2) E_s to fracture quasi-statically beyond the crushed zone
- (3) E_f to throw the fragments

The author has attempted to measure these energies by using ballistic mortar such as shown in Fig. 1. The principles and methods to measure these energies are illustrated by Fig. 2.

Firstly, with an explosive of 5g weight, E is measured by usual method of ballistic mortar. Secondly, in order to measure the crushing energy E_R , a rod of cement mortar which has been charged is inserted into powder chamber of mortar, and when the charge is detonated, some part of total energy E is immediately absorbed to crush the rod before shooting an iron projectile. Thus the energy E' measured must be smaller than E ,

and $(E-E')$ become E_R . Thirdly, the powder chamber of the mortar has been also filled with a rod of cement mortar, then the other projectile of cement mortar which has been charged is placed in the mortar instead of iron projectile. If an energy obtained is E'' , $E_s(=E'-E'')$ is to be spent for static fracture and E'' makes the fragments throw from the mortar; ($E''=E_f$). In this experiment, the receded angle is measured by selfregistering scale as shown in Fig. 3

The results obtained by the above three methods are shown in table 1-3.

In this way, it can be recognized that considerable quantity of total energy is absorbed in crushing the region around the explosive.

It is very interesting that Shingiri dynamite has larger E_R than Murasaki carlite, but E_s of Murasaki carlite is larger than that of Shingiri dynamite. These distributions of blasting energies are shown in table 4.

(Nippon Oils & Fats Co., Ltd. Taketoyo Plant.)