

爆薬の爆発により駆動された金属板の飛翔速度

瀧沢 雄*・伊妻猛志**・恩沢忠男***

金属板の上におかれた爆薬層を、その一端から起爆すると、金属板は、爆薬の爆発の進行に伴ってつぎつぎと駆動され、ある時間たつと平衡速度に達するが、その速度は、爆薬の量と金属板の質量の比 R に関係していて、いくつかの実験式が発表されている。

実験の結果、使用する爆薬の厚さ毎に、平衡速度と R の関係が変化することを知り、この事実から従来の実験式を評価した結果、Gurney の式を基本として、これに薬厚に關係する補正項および、爆速に關係する補正項をつけ加えることにより、実測値とかなり良く一致する実験式を得ることができた。

1. まえがき

二枚の金属板を爆薬の爆発力で冶金的に結合させる爆発圧接においては、一方の金属板を爆薬の爆発力によって高速に加速し、他方の金属板に衝突させるのであるが、衝突するときの角度や、衝突点の移動速度などが、圧接の良否に影響を及ぼすことが知られている。そこで、金属板が爆薬によってどのように飛翔するかを把握することが、爆発圧接の研究、ひいては、その工業的利用にとって重要な問題になる。

爆薬による金属板の飛翔状態については、今まで多くの研究がなされていて、飛翔速度については、いくつかの計算式が発表されている。しかし、これらの式による計算値と実際の測定値の間には、かなりの誤差がみられる場合が多かった。

この報告は、これらの計算式と実測値を比較検討して、如何なる爆薬を用いても、飛翔する金属板（以下飛翔板と略記）の速度の計算値が実測値と合致するように、従来の計算式の補正を試みたものである。

2. 実験

2-1 飛翔速度の測定法

飛翔板の飛翔速度を知るには、高速度カメラやピンコンタクトによる方法も用いられるが、Fig. 1 のように、爆薬の爆発力で飛翔板が曲げられる角度を、瞬間 X 線や半円柱を用いて知れば、式(1)を用いて飛翔速度を求めることができる¹⁾。

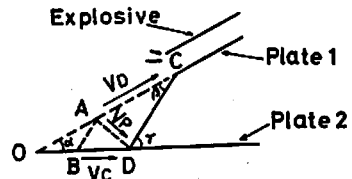


Fig. 1 Geometrical model of dynamic bend angle and relation between flyer plate velocity and detonation velocity

α : initial angle

β : dynamic bend angle

γ : collision angle

\overline{AC} : detonation velocity, V_D

\overline{AD} : flyerplate velocity, V_P

\overline{BP} : collision point velocity, V_C

$$V_P = 2V_D \sin(\beta/2)$$

$$\gamma = \alpha + \beta$$

$$V_C = V_D \sin \beta / \sin \gamma$$

$$V_P = 2V_D \sin(\beta/2) \dots \dots \dots (1)$$

ここで V_P は飛翔速度、 V_D は爆薬の爆速、 β は飛翔板の曲り角である。

今回の実験は、主として半円柱法により、補足的に瞬間 X 線法により、曲り角を測定してから、(1) 式の関係で飛翔速度を求めた。

2-2 半円柱法による曲り角の測定

半円柱により曲り角を測定する原理は、Fig. 2 に示したが、飛翔板が最初に半円柱に衝突した位置は、飛翔板と半円柱の間に冶金的な結合が起らず、半円柱面には爆発圧接に特徴的な波の発生もないことから容易に知ることができる²⁾。

昭和49年5月31日受理
 * 旭化成工業株式会社 〒100 東京都千代田区有楽町 1-12-1
 ** 同社あいはらの工場研究係 〒520-15 滋賀県高島郡新旭町野庭
 *** 東京工業大学工学部生産機械工学科
 〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1

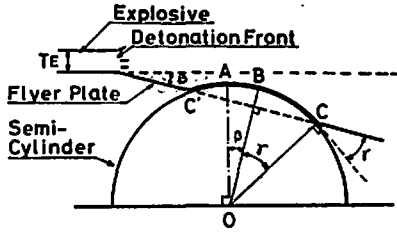


Fig. 2 Principle of measurement of Dynamic bend angle

- O : The center of semi-cylinder
- A : The top of semi-cylinder
- B : The first collision point of semi-cylinder and flyer plate
- C, C' : The travelling collision point along the semi-cylinder surface
- β : The dynamic bend angle of the flyer plate
- γ : The collision angle of the flyer plate and the semi-cylinder
- T_E : The thickness of the explosive

従来の研究では、爆接後、半円柱を爆轟方向に平行に切断して、飛翔板と半円柱の圧接界面を観察することによって衝突点を求めていたが、今回は、半円柱に圧接している飛翔板をたがねではつとり、半円柱の表面に残された模様から衝突点を求めた。Photo 1 に圧接後の半円柱の状態と、飛翔板をはつりとした後の半円柱表面を示した。

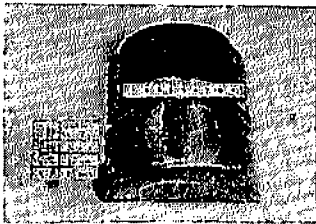


Photo 1. Appearance of semi-cylinder after collision with flyer plate (upper side) and wave like pattern arised on the semi-cylinder surface (under side)

軟鋼棒 (JIS G 3101; SS41) を半割りしたもので、外周面は、表面あらさ3ないし6sに平滑に仕上げたものであり、Fig. 3 に、曲り角を測定するときの配置を示した。

使用した半円柱は、直径 128mm、長さ 60mm のなお、ここで求めようとする飛翔速度は、飛翔板が爆薬により加速され、次第に速度を増して到達した最高速度であり、筆者等の以前の実験によると、ほぼ、

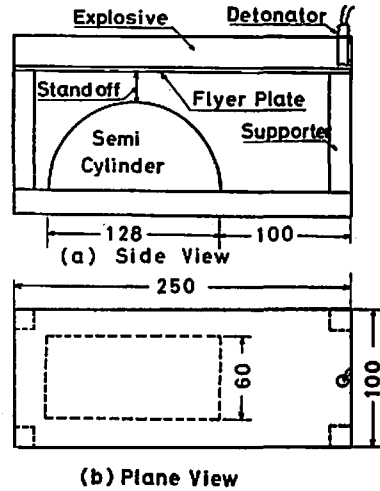


Fig. 3 Arrangement of semi-cylinder and flyerplate

飛翔板の厚さに等しい距離を飛翔した後、この速度に達する³⁾。

従って、半円柱法によって曲り角を測定する場合、半円柱と飛翔板との間隔は、少なくとも飛翔板の厚さ以上なければならない。今回の実験では、この点を考慮して、間隔は主として 10mm としたが、最大 40mm まで検討してみた。

2-3 瞬間 X 線による曲り角および飛翔方向の測定

半円柱によるほか、瞬間 X 線法によっても飛翔板の曲り角を求めたが、(1) 式の前提となる飛翔板の飛翔方向も、瞬間 X 線法によって求めた。飛翔方向は、金属板に目印になるビスをとりつけておき、飛翔開始前後の写真から、ビスの移動方向、すなわち、飛翔方向を求めた。

使用した瞬間 X 線装置は、Field Emission Corp. 製の Model 730/2710 で、放電電圧 300kV、パルス幅は 18ns (50%~50% points) である。

使用した X 線フィルムは、KODAK RP Royal の四つ切で、増感紙には KYOKKO HS を使用した。

飛翔板は、古タイヤを重ねた上にベニヤ板をおき、この上に、1.5cm x 1.5cm x 8cm の発泡スチロール柱で四隅を支えておいた。また、飛翔板の位置は、X 線管球面から約 2m、X 線フィルムカセットから約 1m であった。

2-4 爆薬および装薬法

実験に使用した爆薬は、旭化成工業(株)が、爆着クラッド鋼の製造に開発した爆薬 (略称 LEP-R) と、工業用爆薬の三号桐ダイナマイトおよび、諸外国で爆接実験に好んで用いられているニトログアニジン (以

Table 1 The Properties of Explosives used

Explosives	Specific Gravity	Heat of Explosion (cal/g)	Detonation Velocity (m/sec)
Nitro guanidine (NGU)	0.28	950*	2,500
LEP-R	0.5	1,100	2,100~ 2,600
Kiri No. 3	1.3	1,000	4,800~ 6,000
Metabel Sheet Explosive	1.47*	975*	7,000*
Trimonite No. 3	0.98*	1,150*	2,100~* 4,000

* after V. Shribman and Crossland⁴⁾

下 NGU と略記)の三種で、その特性値を Table 1 に示した。

なお、今回の実験結果の検討に際して、V. Shribman and B. Crossland の実験結果⁴⁾を参考としたので、彼等が使用した爆薬 (Metabel Sheet Explosive および Trimonite No. 3) も Table 1 に併記した。

これら爆薬は、飛翔板の周辺にブリキ板 (厚さ 0.25 mm) で所定の高さの枠をとりつけて箱とした中に装薬し、薬厚をコントロールする方法をとった。装薬した爆薬の重量は、装薬前後の枠付き飛翔板の重量を計量して求めた。

2-5 爆速の測定

爆速は Dautriche 法により、実験に使用した各薬厚について、2 回宛測定して平均した。

この場合、使用状態と同一条件での爆速が測れるように、厚さ 3mm、幅 100mm、長さ 250mm の軟銅板を底とし、その周辺に、厚さ 0.25mm のブリキ板で所定高さの枠をとりつけて箱とし、導爆線を起爆点から 100mm と 200mm の位置で、その先端が軟銅板の中心線に来るまで挿し込み、動かないように粘着テープで固定した後、爆薬を装薬し、薬厚を枠の高さでコントロールした。

なお、この薬箱は、平らにならした砂の上に直接装置した。

2-6 飛翔板の諸元

実験に使用した飛翔板は鉛板 (JIS H 4301, PbP)、ステンレス鋼板 (JIS G 4305, SUS 304)、チタン板 (JIS H 4600, TP 28)、およびアルミニウム板 (JIS H 4000, A 1050) で、厚さ 3mm、幅 100mm、長さ 250mm の寸法を主に、補足的に厚さ 1mm のもの、これを 2 枚または 3 枚重ねたもの、厚さ 10mm のもの、幅 200mm のものなどを使用した。

これら金属の通常の物理的性質の一部を Table 2 に示した。

Table 2 Some physical properties of flyer plates

Metals	Density (g/cc)	Tensile strength (kg/mm ²)	Yield strength (kg/mm ²)
Aluminium Plate (JIS H 4000, A 1050 P-H 14)	2.7	10~14	7~10
Titanium Plate (JIS H 4600, TP 28)	4.5	28~42	17~30
Stainless Steel Plate (JIS G 4305, SUS 304)	7.93	53~65	21~30
Lead Plate (JIS H 4301, PbP)	11.34	< 2	—

なお、これら飛翔板の幅および長さは、D. Ruppin が論じている飛翔途中における板周辺部の異常挙動⁵⁾ および、起爆位置から爆轟が安定するまでの誘導期間を考慮して定めたものである。

3. 実験結果

3-1 飛翔板の曲り角測定結果 (半円柱法)

半円柱法によって求めた飛翔板の曲り角と、(1) 式の両辺を爆速 V_D で除して無次元化した V_P/V_D の値を Table 3 に示した。

また、装薬量 (kg/m^2) と飛翔板重量 (kg/m^2) の比 R は、装薬の程度を示す無次元数であり、Table 3 に一緒に示しておいた。

3-2 飛翔板の曲り角と飛翔方向 (X線法)

瞬間 X 線法によって求めた飛翔板の曲り角と V_P/V_D の値を Table 4 に示し、飛翔方向の写真を Photo 2 に、その説明図を Fig. 4 に示した。



(a) Initial position



(b) Moving flyer plate

Photo 2. The flash X-ray photographs of flyer plate

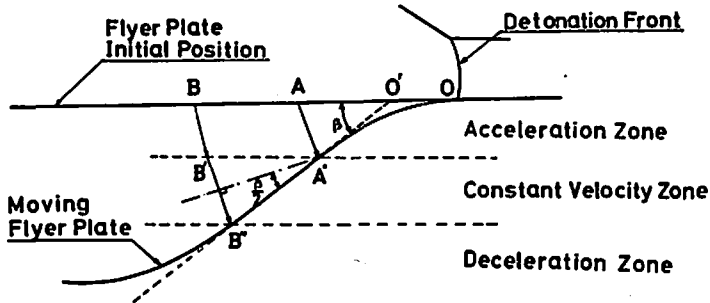


Fig. 4 Geometrical model of moving flyer plate
 $AA'//BB'$: moving direction of flyer plate in acceleration zone
 $B'B''$: moving direction of flyer plate in constant velocity zone
 $\angle A'B'BB'' = \angle A'B''B'$

Table 4 Dynamic bend angle and the ratio of flyer plate velocity to detonation velocity measured by Xray

Metels and dimension (mm)	Thickness of LEP-R=15mm			Thickness of LEP-R=30mm		
	R	β (deg)	V_P/V_D	R	β (deg)	V_P/V_D
A 1050 3×100×250	—	—	—	1.86	19	0.331
A 1050 (3+3)×100×250	—	—	—	0.93	16	0.279
A 1050 10×100×250	—	—	—	0.59	10.5	0.184
SUS 304 3×100×250	0.3	7.2	0.126	0.63	12	0.210
SUS 304 3×100×250	—	—	—	0.60	12.2	0.213

3-3 爆 速

爆速の測定結果を Fig. 5 に示したが、Metabel Sheet Explosive 及び Trimonite No.3 の文献値も併記しておいた。

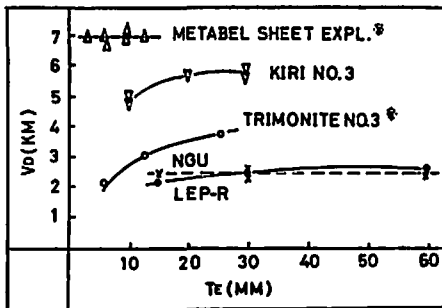


Fig. 5 The curves of detonation velocity change relating to thickness of the explosives
 (※ after Shribman¹⁾)

4. 考 察

4-1 飛翔方向

Photo 2 および Fig. 4 により、飛翔板の飛翔方向はほぼ、曲り角の2等分線に直角方向であることが確かめられ、式(1)によって精度良く飛翔速度の計算ができることがわかった。

4-2 飛翔速度の計算式との対比

飛翔速度 V_P の計算式は、比 R の関数として多くの研究者によって求められているが、つぎにあげた式が有名である。

$$V_P = \sqrt{2E} \sqrt{\frac{0.6R}{1+0.2R+0.8/R}} \dots\dots\dots(2)$$

$$V_P = \sqrt{2E_0} \sqrt{1 - \frac{W^2}{1.88E_0}} \sqrt{\frac{0.6R}{1+0.2R+0.8/R}} \dots\dots\dots(3)$$

$$V_P = 1.3V_D \frac{\sqrt{1 + \frac{32}{27}R} - 1}{\sqrt{1 + \frac{32}{27}R} + 1} \dots\dots\dots(4)$$

$$V_P = V_D \frac{0.6/2R}{2+R} \dots\dots\dots(5)$$

(2) 式は Gurney の式であり²⁾、 E は単位重量の爆薬が発生するエネルギーのうち、運動エネルギーに転換する分である。

(3) 式は Duvall と Erkman が (2) 式を補正した式で³⁾、 E_0 は単位重量の爆薬が発生するエネルギーであり、 W は爆轟波後方のガス流速である。

(4) 式は Deribas の式⁴⁾であり、(5) 式は Chadwick の式⁵⁾である。

これらの式と、今回の実験結果を対比するため、まず、薬厚によって爆速が変化しない NGU をえらび、 V_P/V_D 対 R の関係を Fig. 6 に示した。Fig. 6 で実線は、飛翔板の材質と板厚が同じで、装薬量を変化させた場合であり、点線は、同一薬厚の点をなめらかに結んだ線である。

Table 3 - The ratio of flyer plate velocity to detonation velocity

Explosive	Flyer plate	Measurements of flyer plate	$t_e = 15 \text{ mm}$			
			S/O	R	β	V_P/V_D
LEP-R	SUS 304	1×200×250				
		(1×200×250)×2				
		(1×200×250)×3				
		1.5×100×250	10 "	0.59 0.59	14.5 14	0.254 0.244
		3×100×250	10 "	0.32 0.32	9.4 9.8	0.164 0.171
		3×200×250				
	TP 28	3×100×250	10 "	0.52 0.52	14.5 15.5	0.254 0.270
	A 1050	3×100×250	10 "	0.89 0.86	20.5 20.5	0.356 0.356
	Pb	3×100×250	10 "	0.22 0.23	7 7	0.122 0.122
NGU	SUS 304	3×100×250	15 "	0.179 0.181	5 5	0.087 0.087
	TP 28	3×100×250	15 "	0.316 0.318	10 10	0.175 0.175
	A 1050	3×100×250	15 "	0.51 0.53	14 14	0.244 0.244
KIRI No. 3			$t_e = 10 \text{ mm}$			
	Pb	3×100×250	20 "	0.5 0.49	6 6.5	0.105 0.114
	SUS 304	3×100×250	20 "	0.685 0.68	8 8	0.140 0.140
	TP 28	3×100×250	20 "	1.26 1.28	11 11	0.192 0.192
	A 1050	3×100×250	20 "	2.0 2.05	14.5 12.5	0.254 0.218

Note t_e : Thickness of explosives
 S/O : Stand off between flyer plate and semi-cylinder
 R : Mass ratio of explosives charge to flyer plate

calculated form dynamic bend angle whith by semi-cylinder method

$t_e=30\text{ mm}$				$t_e=60\text{ mm}$			
S/0	R	β	V_P/V_D	S/0	R	β	V_P/V_D
20	1.77	25.5	0.442				
"	1.84	25.5	0.442				
20	0.9	15.8	0.275				
"	0.9	16.5	0.287				
20	0.58	12.5	0.218	20	1.25	13.8	0.241
"	0.62	13.6	0.237	"	1.24	14.8	0.258
10	0.67	11.9	0.207	10	1.23	12.4	0.217
"	0.64	12.2	0.213	"	1.22	12.5	0.218
				"	1.22	12.5	0.218
				"	1.26	12.0	0.210
				25	1.19	15.5	0.270
				"	1.24	15.3	0.267
				40	1.24	14.5	0.254
				"	1.26	15.0	0.262
20	0.62	13.3	0.231	10	1.27	12.9	0.226
"	0.62	13.3	0.231	20	1.26	13.6	0.237
30	0.62	13.1	0.229	"	1.25	13.6	0.237
"	0.62	13.1	0.229	30	1.26	13.6	0.237
				"	1.30	15.2	0.265
10	1.06	16.5	0.287	10	2.13	18.5	0.322
"	1.0	18.1	0.315	"	2.06	19.1	0.333
				25	1.94	19	0.331
				"	1.89	13	0.331
				40	1.92	17	0.297
				"	1.88	17.5	0.305
10	1.83	22.4	0.39				
"	1.78	21.5	0.37				
10	0.44	10	0.175				
"	0.45	9.5	0.166				
15	0.364	8	0.140	15	0.707	9	0.157
"	0.366	8	0.140	"	0.707	9	0.157
15	0.68	12	0.210	15	1.265	14.5	0.254
"	0.665	12.5	0.218	"	1.275	13.5	0.236
15	0.97	15	0.262	15	2.04	16.5	0.287
"	0.96	15	0.262	"	2.04	15	0.262
$t_e=20\text{ mm}$				$t_e=30\text{ mm}$			
20	0.9	8	0.140				
"	0.86	9	0.157				
20	1.26	11.5	0.201	20	1.88	13	0.227
"	1.27	11.5	0.201	"	1.82	12	0.210
20	2.2	16.5	0.287				
"	2.2	14.5	0.254				

V_P : Velocity of flyer plate

V_D : Detonation velocity of explosives

β : Dynamic bend angle

$$(V_P/V_D)=2 \sin(\beta/2)$$

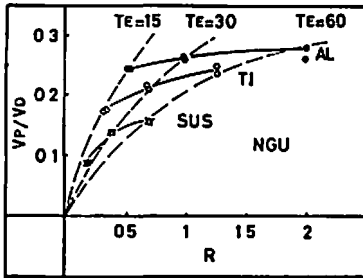


Fig. 6 The experimental results of relation between V_p/V_D and R for NGU (SUS : SUS304, 3mmt, Ti : Tp28, 3mmt, AL : A1050p, 3mmt)

Fig.6 で明らかなように、 V_p/V_D 対 R の関係は薬厚によって変化し、薬厚が厚い程、同一 R に対して低い値を示す。NGU の場合は、薬厚による爆速の変化がないので、 V_p 対 R の関係も、薬厚によって同様に変化することになる。

なお、一定の薬厚を使用した筆者等の以前の試験において、 V_p/V_D 対 R の関係は使用した飛翔板の材質に関係なく、一本の曲線で表わすことができた^{*)}。今回は三種の薬厚を用いたので、三本の曲線が得られたわけで、それぞれの曲線は、それぞれの薬厚において、飛翔板の材質に関係なく、 V_p/V_D 対 R の関係を表わすものと考えられる。

ところが、式(4)および(5)は、薬厚による変化を表わすことができないので、実際に合致しないことは明らかである。

式(3)は、薬厚 60mm における V_p の実測値から W を逆算すると、2,560m/sec となり、NGU の爆速 2,500m/sec とほぼ同等か僅かに速い。これは理論的に成立たないことであって、このため(3)式も実情に合致しない。

式(2)は、エネルギー項 E が、もともと爆薬の発生するエネルギーのうち、飛翔板を駆動するのに使用される分を表わすものであり、薬厚によって、その比率が変化すると考えれば、この比率はエネルギー効率とも考えられ、効率が薬厚との関係で求められれば、従来の関係式の中で最も妥当な式と考えることができる。

そこで、式(2)の両辺を V_D で除して式(6)を得

$$\frac{V_p}{V_D} = \frac{\sqrt{2E}}{V_D} \sqrt{\frac{0.6R}{1+0.2R+0.8/R}} \dots\dots(6)$$

るが、この式(6)に、Fig.6 の各薬厚毎の V_p/V_D 対 R の関係を代入すれば、それぞれの組合せにおける $\sqrt{2E}/V_D$ の値を定めることができる。いま、Fig.6 から、 $R=0.2, 0.6$ および 1.0 における各薬厚毎の V_p/V_D を求め、式(6)にこれらの値を代入して $\sqrt{2E}$

$/V_D$ の値を求めたところ、Table 5 に示すように、この値は薬厚によって一定の値となった。一方、 V_D は薬厚毎に定まるので、 $\sqrt{2E}$ は薬厚によって定まる一定の値を持つことになる。

先述したように、 E は、爆薬の持つ全エネルギー E_0 のうち、金属板の飛翔に使用された部分であるので、その比率、 E/E_0 は、金属板飛翔に關与する爆薬のエネルギー効率であるが、この効率は、従って、薬厚毎に定まるわけである。このようにして求めた値は Table 5 に同時に示しておいた。ただし、ここでは、式(2)や式(6)に対する適用を考慮し、エネルギー効率の平方根 $\sqrt{2E}/\sqrt{2E_0}$ と薬厚との関係で整理してある。

Table 5 Energy efficiency of explosive (E/E_0) for acceleration of flyer plate related with thickness of explosive, based on the experimental results of NGU

R	*1 F(R)	$t_e=15\text{mm}^{*3}$		$t_e=30\text{mm}$		$t_e=60\text{mm}$	
		V_p/V_D	$\sqrt{2E}/V_D$	V_p/V_D	$\sqrt{2E}/V_D$	V_p/V_D	$\sqrt{2E}/V_D$
0.2	0.154	0.10	0.65	0.08	0.52	0.06	0.39
0.6	0.383	0.26	0.68	0.20	0.523	0.145	0.375
1.0	0.547	0.365	0.67	0.28	0.511	0.205	0.375
			(0.67)		(0.518)		(0.38)
V_p (m/sec)		2,500		2,500		2,500	
$\sqrt{2E}$ (m/sec)		1,670		1,290		950	
$\sqrt{2E_0}$ (m/sec) ^{*2}		2,820		2,820		2,820	
$\sqrt{2E}/\sqrt{2E_0}$		0.59		0.46		0.34	
E/E_0		0.35		0.21		0.11	

*1. $F(R) = \sqrt{0.6R/(1+0.2R-0.8/R)}$

*2. $E_0 = 950\text{cal/g} = 4 \times 10^6\text{m}^2/\text{sec}^2$

*3. $t_e = \text{Thickness of explosive}$

このエネルギー効率の平方根 $\sqrt{2E}/\sqrt{2E_0}$ と薬厚との関係を、両対数グラフにプロットしたところ直線となり、これから $\sqrt{2E}/\sqrt{2E_0}$ 対薬厚の関係式(7)を得た。

$$\frac{\sqrt{2E}}{\sqrt{2E_0}} = \frac{1.8}{t_e^{0.4}} \dots\dots(7)$$

ただし t_e は薬厚 (mm)

この関係は、NGU におけるデータを基にして求めた関係であるが、他の薬種についても基本的には同様

に成立つものと仮定し、爆速が葉厚によって変化する一般の爆薬を使用した場合への適用を、次のように考えてみた。

爆薬が本来の完全な爆轟反応を行なったとき、その持っているすべてのエネルギーを放出して、爆速も最高の値 (V_{D_0}) を示すが、逆に、葉厚が小さくなり爆速が低い値 (V_D) を示すときは、爆轟反応も、それだけ不完全で、エネルギー放出も悪くなると考えることができるので、式(7)に対して爆速による補正を行なう必要があるわけである。

エネルギーの次元から考えて、エネルギー効率の補正は爆速の2乗の比が妥当であり、従って(7)式の補正には爆速の比を用いて(8)式をうる。

$$\frac{\sqrt{2E}}{\sqrt{2E_0}} = \frac{1.8}{t_0^{0.4}} \cdot \frac{V_D}{V_{D_0}} \dots \dots \dots (8)$$

かくして、飛翔速度の式として、(2)と(8)により、葉厚および爆速による補正項が入った式(9)を得た。

$$V_P = \frac{1.8}{t_0^{0.4}} \cdot \frac{V_D}{V_{D_0}} \cdot \sqrt{2E_0} \sqrt{\frac{0.6R}{1+0.2R+0.8/R}} \dots \dots \dots (9)$$

ところで、H. Jones によれば、 V_P 、 V_D および爆薬径 r の間には、次の関係がある⁽¹⁰⁾。

$$\left(\frac{V_P}{V_D}\right)^2 = 1 + B\left(\frac{r}{R}\right)^2 \dots \dots \dots (10)$$

ここで、 $r = X/V_D$ で、 B は定数、 X は反応帯の長さである。なお、 r は葉厚 t_0 と置きかえてもよい。

この式から $1/V_D^2$ と $1/r^2$ の間には直線関係があり、 $(1/r^2) = 0$ のとき $(1/V_D^2)$ となるから、 V_{D_0} が求められる。

今回の実験における LEP-R および三号桐ダイナマイト、Shribman らの実験における Trimonite No. 3 について、それぞれ V_{D_0} を求めたところ、2,600 m/sec、6,000 m/sec および 4,000 m/sec を得た。

これらの値を用い、式(9)により飛翔速度を計算し

て実測値と対照した結果を Fig. 7 乃至 Fig. 11 に示したが、NGU, LEP-R においては極めて良い一致を示し、三号桐ダイナマイトにおいては、飛翔板と半円柱との間の間隔を大きくとつたため、とくに葉厚が小さい場合、飛翔速度が減速しはじめたおそれもあって、計算値と実測値に差異が認められたものの、実用上は

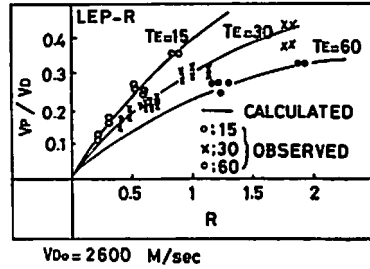


Fig. 8 The relation V_P/V_D to R , comparing the calculated curve with observed value for LEP-R

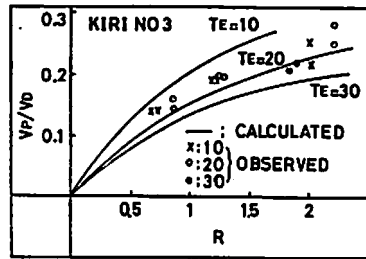


Fig. 9 The relation V_P/V_D to R , comparing the calculated curve with observed value for Kiri No. 3

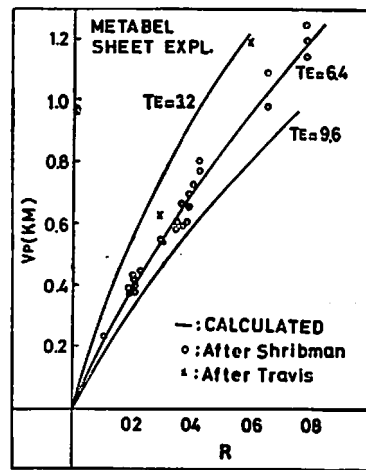


Fig. 10 The relation V_P to R comparing the calculated curve with observed value for Metabel sheet explosives (after Shribman⁽⁹⁾ and Travis⁽¹¹⁾)

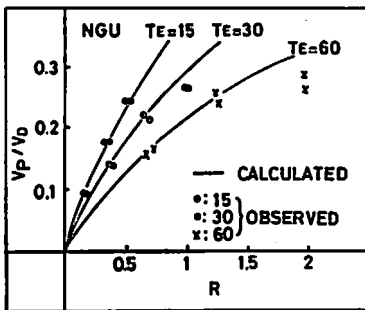


Fig. 7 The relation V_P/V_{D_0} to R , comparing the calculated curve with observed value for NGU

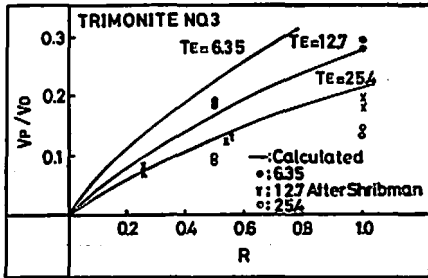


Fig. 11 The relation V_P/V_D to R , comparing the calculated curve with observed value for Trimonite No. 3 (after Shribman⁴⁾)

ほ満足できる程度と考えられる。

Metabel sheet explosive については、実測した葉厚との対応が不明であるが、その爆速測定データから、葉厚は 3.2mm, 6.4mm および 9.6mm のいずれかであることが明らかであり、実測値と計算値の対応は実用上十分と考えられる一致を見ている。

ただ、Trimonite No. 3 においては、かなりの誤差を生じ、全般的に実測値は計算値より小さい値を示している。

この原因は、Shribman らも、その考察で述べているように、彼等における V_P の測定法にあると考えられる。すなわち、彼等は、飛翔板に直径 125mmφ の円板を用い、円板の中心で起爆している。このため、起爆点から飛翔板の端迄の距離は僅かに 62.5mm しかなく、おそらく V_P の測定点は更に起爆点に近い筈である。

一般に爆薬は起爆されてから、その本来の爆轟状態に達するまで誘導期間があり、Trimonite No. 3 は、その特性値から判断して、かなりの誘導期間を持つ爆薬ではないかと考えられる。従って、 V_P の測定は、爆轟誘導期間内で行なわれた可能性が強い。

一方、爆速の測定は、十分な誘導期間を持たせて行なわれていることは彼等の報告⁴⁾ からうかがえることであり、従って、彼等が求めた V_P/V_D の値は、実際よりかなり低い値を示すことが推察される。

Metabel sheet explosive においては、その特性値から、誘導期間の少ない爆薬と考えられるので、測定法の影響はほとんどないものと思われ、その結果誤差が少なかつたものと考えられる。

以上の理由で、Trimonite No. 3 における実測値と、式(9)による計算値に差異があっても、式(9)の適応性の評価を減ずるものではないであろう。

5. 結 論

爆発圧接において、爆薬の爆発衝撃で金属板が飛翔

する速度について実験と考察を行ない、次の知見を得た。

(1) 金属板の飛翔方向は、ビスで目印をつけた飛翔板の飛翔開始前後の状態を瞬間X線で撮影した結果、曲り角 β の二等分線に対し直角方向であることが認められた。

(2) 金属板の飛翔速度は、使用した爆薬の発生するエネルギー(爆発熱)、葉厚、その葉厚における爆速と本来速し得べき最高爆速との比、および、使用爆薬量と飛翔板重量の比 (R) の関数であり、Gurney の式を補正した次の式で計算できる。

$$V_P = \frac{1.8}{t_e^2} \cdot \frac{V_D}{V_{D_0}} \sqrt{2E_0} \sqrt{\frac{0.6R}{1+0.2R+0.8/R}}$$

ここで、

V_P : 飛翔板の飛翔速度 (m/sec)

V_D : 使用した葉厚における爆速 (m/sec)

V_{D_0} : 使用した爆薬が示し得る最高爆速

(m/sec)

t_e : 使用した葉厚 (mm)

E_0 : 使用した爆薬の単位重量当りの発生エネルギー (m^2/sec^2)

R : 使用した爆薬量 (kg/m^2)/飛翔板重量 (kg/m^2)

なお、今回の実験において、瞬間X線撮影は、熊本大学工学部衝撃エネルギー実験所において、藤田助教授、河野助手、長野技官、その他大学院学生の方々の絶大なご協力をいただいて実施したが、通産省公害資源研究所吉田技官、松本技官にもご教示をいただいた。また、旭化成工業(株)あいばの工場、筑業野工場および化薬工場の方々には、今回の実験の全般にわたり、援助していただいた。ここに記して感謝の意を表する次第である。さらに、研究実施の機会を与えていただいた旭化成工業(株)堀常務理事はじめ化成品第二事業部幹部各位に厚く御礼申し上げる。

最後に、本報告をまとめるに当り、致々のご助言をいただいた東京大学工学部疋田教授および、熊本大学工学部清田学部長に深甚な謝意を表するものである。

文 献

- 1) G. R. Cowan and A. H. Holtzman; J. Appl. Phys. 34, 928 (1963)
- 2) J. F. Kowalick and D. R. Hay; 2nd Int. Conf. of C. H. E. F., Estes Park 1969
- 3) 恩沢忠男, 石井勇五郎, 滝沢雄, 伊妻猛; 工火誌, 33, 17 (1972)
- 4) V. Shribman and B. Crossland; 2nd Int. Conf. of C. H. E. F., Estes Park 1969
- 5) D. Rupp; Colloquim of I. I. W., Warsaw,

17 July, 1968

- 6) R. W. Gurnay ; Report No. 405, Ballistic Research Lab. Aberdeen Proving Ground, Maryland, Sept. 1943
- 7) G. E. Duvall and J. D. Erkmen ; S. R. I. Report No. 1 Project No. GU 2426
- 8) A. A. Deribes et al ; Combustion, Explosion and Shockwaves, 3 (1967)
- 9) M. D. Chadwick ; Proc. Select Conf. of Explosive Welding. The Welding Institute, 1968
- 10) H. Jones ; Proc. Roy. Soc. A, 189, 415 (1947)
- 11) F. W. Travis and W. Johnson ; 8th Inter. MT DR Conf. at the Univ. of Manchester 1967

**On the terminal velocity of flyer plate
accelerated by explosion of high explosives**

Yu Takizawa, Takeshi Izuma and Tadao Onzawa

When explosives layer on a metal plate is set off from the end of the layer, the metal plate is accelerated as the explosion develops, reaching a terminal velocity in a certain time.

This velocity relates to the ratio R between the mass of explosives and that of the metal plate, for which several experimental equations have been publicized.

Our experiments have shown that the relation between the terminal velocity and R varies with the thickness of explosives used. On the basis of this fact, we have evaluated past experimental equations, and by adding to the Gurney's formula certain correction factors involving the thickness of explosives and the detonation velocity, a new equation has been found through which values coinciding fairly well with actual measurements are calculated.

The new equation is

$$V_p = \frac{1.8}{t_e^{0.4}} \cdot \frac{V_D}{V_{D_0}} \sqrt{2E_0} \sqrt{\frac{0.6R}{1+0.2R+0.8/R}}$$

where

V_p : terminal velocity of flyer plate (m/sec)

V_D : detonation velocity of explosives at the thickness used (m/sec.)

V_{D_0} : detonation velocity of explosives at the infinite thickness (m/sec.)

E_0 : heat of explosion (m²/sec.²)

R : mass of explosives (kg/m²)/mass of metal plate (kg/m²)

t_e : thickness of explosives used (mm)

(Asahi Chemical Industry Co., Ltd. and Tokyo Institute of Technology)