

Table 1 Properties of explosives used.

| Explosives | Loading Density (g/cc) | Heat of Explosion (Kcal/kg) | Specific Volume (l/kg) | Force of Explosives (kgm/kg) | Ratio of Specific Heats | Available Energy of Explosives [*] ($\times 10^4$) | Detonation Velocity (m/sec) | Manufacturer |
|-------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------------|-------------------------|---|-----------------------------|-----------------------------|
| NGU | 0.28 | 710 | 1,070 | 91,000 | 1.39 | 233.3 | 2,500 | Fujikaseiyaku CO. LTD |
| LEP-R | 0.5 | 1,100 | 930 | 94,000 | 1.35 | 268.6 | 2,100 ~ 2,740 | Asahi Chemical Ind. Co. LTD |
| AKATSU KI | 0.73 | 1,180 | 928 | 119,100 | 1.35 | 340.6 | 3,200 ~ 4,000 | " |
| KIRI- No. 3 | 1.3 | 1,220 | 903 | 105,900 | 1.35 | 302.6 | 4,800 ~ 6,000 | " |
| ELDV | 0.68 | 1,700 | 86 | 23,300 | 1.33 | 70.6 | 1,300 ~ 1,470 | R. Ito & CO. |

note * Available Energy=Force of explosives/(Ratio of specific heats-1)

の材質も前々報と同じなので説明を省略する。

使用した爆薬は、前々報で使用したニトログアニジン (以後 NGU と略記)、低比重爆薬 LEP-R、三号桐ダイナマイトの他に、あかつき硝安爆薬および極低爆速爆薬 (以後 ELDV と略記) の計 5 種類を使用した。これら爆薬の爆速は、ドートリッシュ法で、前々報と同様にして薬厚ごとに測定した。

Table 1 に、これら爆薬の特性値および製造会社名を示した。

2.2 実験結果

半円柱法で求めた金属板の曲り角と、(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、および、装薬量 (kg/m^2) と金属板重量 (kg/m^2) の比 R も、Table 2 に示した。

各爆薬の薬厚と爆速の関係は、Eyring³⁾ の関係式において、薬径の代りに薬厚を用いた式 (2) の関係を使用して測定値を整理し、Fig. 2 に示した。この図によって、それぞれの爆薬の理想爆速を求めることができる。

$$V_D = V_{D0} (1 - a/t_e) \quad (2)$$

ここに、 t_e : 薬厚、 V_D : 薬厚 t_e のときの爆速、 V_{D0} : 理想爆速、 a : 定数、である。

この爆速測定結果において、三桐の測定値のばらつきが極めて大きい。三桐は膠質ダイナマイトであって、他はすべて粉状爆薬であることに、ばらつきの原因があると考えられるが明確ではない。

2.3 NGU による飛翔速度式

薬厚によって爆速の変化の無い NGU の測定データによって、前々報同様に Gurney 式 (3) のエネルギー E を検討してみた。

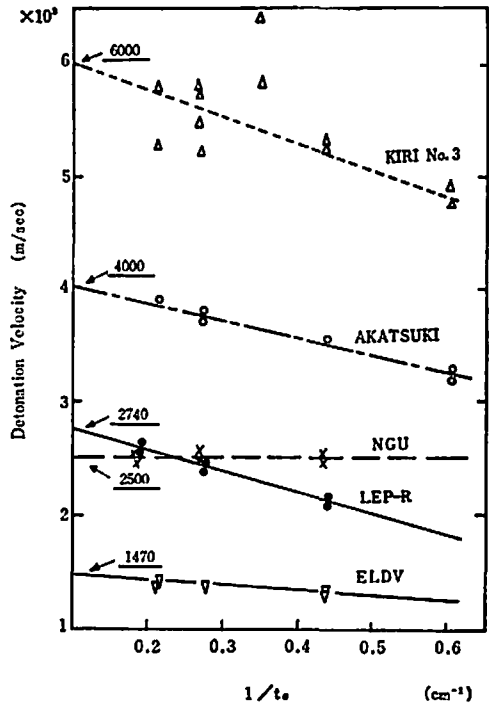


Fig. 2 Relation between charge thickness and detonation velocity.

ただ、今回の場合は、爆薬が発生する全エネルギーとして、爆発生成ガスの有効エネルギー F_{G0} を用いることにした。これは、爆発熱を使用すると、ELDV のように発生熱量が大きくても、発生ガス量が極めてわずかで、外界になす仕事量が小さい爆薬では、エネルギー効率が極端に悪くなることが予想されたため

Table 2 Dynamic bend angle measured by semi-cylinder method.

| Explosives | Flyer plate | Dimensions of flyer plate (mm) | $t_e=15\text{mm}^{\ast}$ | | | | | $t_e=30\text{mm}$ | | | | | $t_e=60\text{mm}$ | | | | |
|--------------|-------------|--------------------------------|--------------------------|------------|------|---------------|-----------|-------------------|------------|-------|---------------|-----------|-------------------|------------|-------|---------------|-----------|
| | | | l (mm) | S/O (mm) | R | β (deg) | V_P/V_D | l (mm) | S/O (mm) | R | β (deg) | V_P/V_D | l (mm) | S/O (mm) | R | β (deg) | V_P/V_D |
| NGU | SUS 304 | 3×100×500 | 350 | 20 | 0.18 | 5.9 | 0.103 | 350 | 20 | 0.355 | 8.6 | 0.151 | 350 | 20 | 0.715 | 11.8 | 0.206 |
| | TP28 | 3×100×500 | 350 | 20 | 0.31 | 9.6 | 0.167 | 350 | 20 | 0.619 | 13.8 | 0.239 | 350 | 20 | 1.212 | 16.2 | 0.281 |
| | A1050 | 2×100×500 | 350 | 20 | 0.77 | 19.4 | 0.337 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | 3×100×500 | 350 | 20 | 0.51 | 14.5 | 0.252 | 350 | 20 | 0.98 | 18.3 | 0.318 | 350 | 20 | 2.04 | 21.4 | 0.371 |
| LEP-R | SUS304 | 3×100×350 | — | — | — | — | — | 200 | 20 | 0.65 | 14.2 | 0.247 | 200 | 15 | 1.3 | 16.2 | 0.282 |
| | | 3×100×500 | — | — | — | — | — | 350 | 20 | 0.66 | 14.2 | 0.247 | 350 | 20 | 1.36 | 16.5 | 0.287 |
| | TP28 | 3×100×500 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 200 | 20 | 2.02 | 18.5 | 0.321 |
| | | 3×100×500 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 350 | 20 | 1.92 | 20.5 | 0.356 |
| | A1050 | 3×100×350 | 200 | 20 | 0.93 | 22.3 | 0.387 | 200 | 20 | 1.84 | 25 | 0.433 | — | — | — | — | — |
| | | 3×100×500 | 350 | 20 | 0.95 | 22.8 | 0.395 | 350 | 20 | 1.88 | 26.8 | 0.463 | — | — | — | — | — |
| AKATS UKI | SUS304 | 3×100×500 | — | — | — | — | — | 350 | 20 | 0.93 | 14.5 | 0.252 | — | — | — | — | — |
| | A1050 | 3×100×500 | 350 | 20 | 0.90 | 18.4 | 0.32 | 350 | 20 | 2.6 | 22.3 | 0.387 | — | — | — | — | — |
| KIRI- No3 | SUS304 | 3×100×350 | — | — | — | — | — | 200 | 20 | 1.63 | 17.9 | 0.311 | — | — | — | — | — |
| | | 3×100×500 | — | — | — | — | — | 350 | 20 | 1.73 | 20.1 | 0.349 | — | — | — | — | — |
| | A1050 | 3×100×350 | 200 | 20 | 1.64 | 17.9 | 0.311 | 200 | 20 | 4.75 | 21.8 | 0.378 | — | — | — | — | — |
| | | 3×100×500 | 350 | 20 | 1.56 | 16.2 | 0.282 | 350 | 20 | 4.68 | 21.9 | 0.38 | — | — | — | — | — |
| ELDV | SUS304 | 3×100×500 | 350 | 20 | 0.42 | 13.8 | 0.239 | — | — | — | — | — | 350 | 20 | 1.74 | 18.8 | 0.326 |
| | A1050 | 3×100×350 | 200 | 15 | 1.27 | 29.5 | 0.509 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | 3×100×500 | 350 | 20 | 1.18 | 31 | 0.534 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

note t_e : Thickness of explosives. S/O : Standoff between flyer plate and semi-cylinder.
 R : mass ratio of explosives charge to flyer plate. \ast : For KIRI No3, $t_e=10\text{mm}$

で、もともと、金属板を飛翔させるエネルギーは、爆薬が外界になし得るエネルギー、すなわち、有効エネルギーの一部であることに着目したためである。

まず、Table 2 から NGU のデータを取り Fig. 3 に示した。図で点線は同一材質、同一厚さの金属板で、装薬比を変化させた場合であり、実線は同一薬厚の点をなめらかに結んだ線である。

今回も明らかに薬厚によって、 V_p/V_D 対 R の関係が異なる。

そこで、式(3)の両辺を V_D で除した式(4)に Fig. 3 のデータを入れて計算し、前々報と同様に、Gurney 式におけるエネルギーと、爆薬の有効エネルギーの比 E/F_a をエネルギー効率として求め、この結果を Table 3 に示した。

$$V_p = \sqrt{2E} \sqrt{0.6R / (1 + 0.2R + 0.8/R)} \quad (3)$$

$$V_p/V_D = (\sqrt{2E}/V_D) \sqrt{0.6R / (1 + 0.2R + 0.8/R)} \quad (4)$$

このエネルギー効率の平方根 $\sqrt{2E}/\sqrt{2F_a}$ と薬厚 t_e の関係を両対数グラフにプロットしたところ直線関係が見られ、これから式(5)が得られた。

$$\frac{\sqrt{2E}}{\sqrt{2F_a}} = \frac{2.23}{t_e^{0.35}} \quad (5)$$

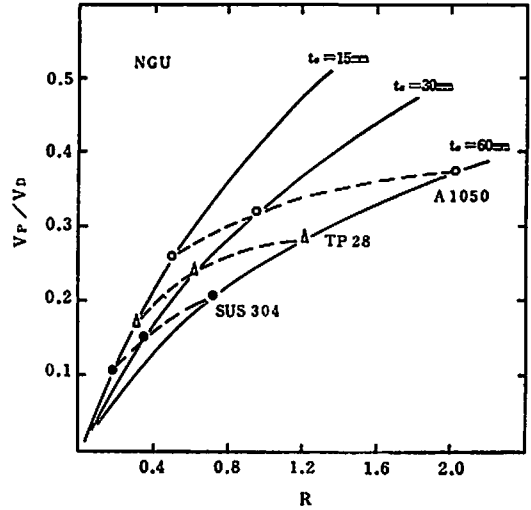


Fig. 3 Relation between R and V_p/V_D for NGU.

Table 3 Energy efficiency of explosives for acceleration of flyer plate related with thickness of explosives, based on the experimental results of NGU

| R | F(R) | $t_e=15\text{mm}$ | | $t_e=30\text{mm}$ | | $t_e=60\text{mm}$ | |
|-------------------------|-------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | | V_p/V_D | $\sqrt{2E}/V_D$ | V_p/V_D | $\sqrt{2E}/V_D$ | V_p/V_D | $\sqrt{2E}/V_D$ |
| 0.4 | 0.28 | 0.212 | 0.757 | 0.167 | 0.596 | 0.13 | 0.464 |
| 0.8 | 0.47 | 0.354 | 0.754 | 0.285 | 0.606 | 0.22 | 0.468 |
| 1.2 | 0.615 | 0.468 | 0.761 | 0.365 | 0.593 | 0.282 | 0.458 |
| (平均) | | | 0.757 | | 0.598 | | 0.463 |
| V_D (m/sec) | | 2,500 | | 2,500 | | 2,500 | |
| $\sqrt{2E}$ (m/sec) | | 1,890 | | 1,495 | | 1,155 | |
| $\sqrt{2F_a}$ (m/sec) | | 2,155 | | 2,155 | | 2,155 | |
| $\sqrt{2E}/\sqrt{2F_a}$ | | 0.877 | | 0.698 | | 0.536 | |
| E/F_a | | 0.77 | | 0.482 | | 0.282 | |

note $F(R) = \sqrt{\frac{0.6R}{1 + 0.2R + 0.8/R}}$

この式は、前々報の対応する式と比較すると、定数が少し大きくなっているが、薬厚の指数は少し小さくなっている。

薬厚によって爆速が変化する一般の爆薬のエネルギー効率は、前々報同様の考え方がそのまま適用できるので、式(6)が得られる。

$$\frac{\sqrt{2E}}{\sqrt{2F_a}} = \frac{2.23 V_D}{t_e^{0.33} V_{D0}} \quad (6)$$

式(6)と式(3)から、薬厚がパラメーターとして入った飛翔速度の式(7)を得る。

$$V_p = \frac{2.23 V_D}{t_e^{0.33} V_{D0}} \sqrt{2F_a} \sqrt{\frac{0.6R}{1+0.2R+0.8/R}} \quad (7)$$

この式が、十分な爆轟誘導期間を過ぎた後、定常状態になったときの金属板の到達する最高速度を示す。

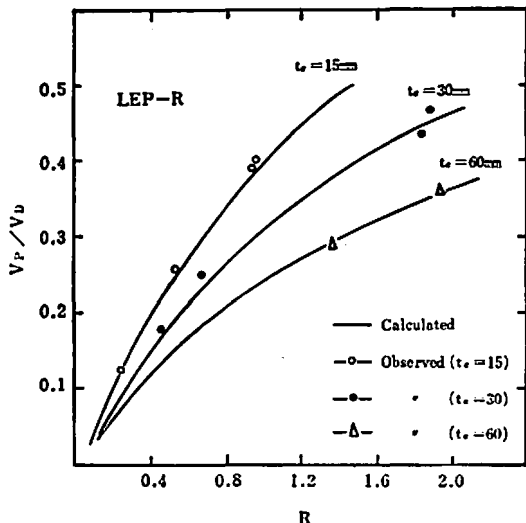


Fig. 4 (a) Relation between R and V_p/V_D comparing the calculated values with observed ones. (Explosive = LEP-R)

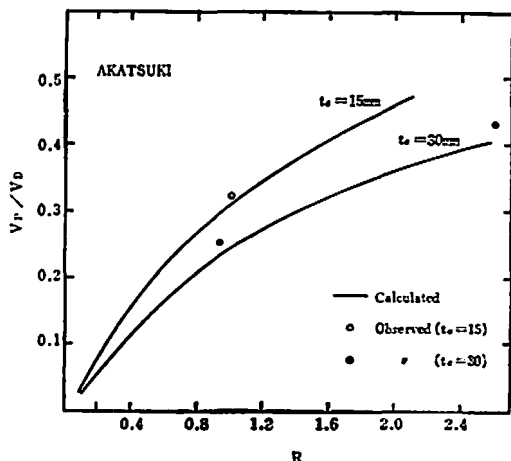


Fig. 4 (b) Relation between R and V_p/V_D , comparing the calculated value with observed ones. (Explosive = Akatsuki)

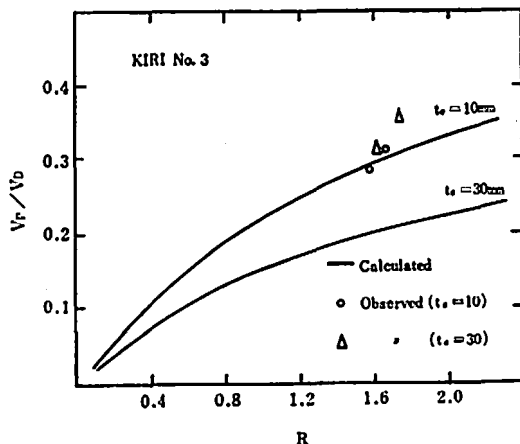


Fig. 4(c) Relation between R and V_p/V_D , comparing the calculated values with observed ones. (Explosive = KIRI. No. 3)

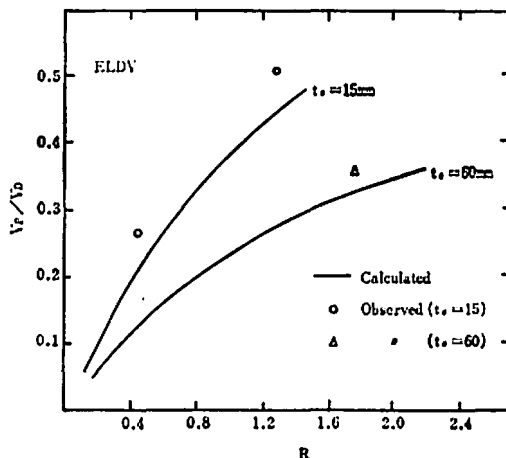


Fig. 4(d) Relation between R and V_p/V_D , Comparing the calculated values with observed ones. (Explosive = ELDV)

2.4 速度式の吟味

式(7)の両辺を V_D で除して無次元化し、Table. 1 に示した爆薬について、それぞれ $V_p/V_D \sim R$ の関係を計算して Fig. 4 (a) ないし (d) に示した。また Table. 2 の定常状態の値も、対応する図に記入して示した。これらの結果をみると、三柄の場合を除いて、ほぼ満足すべき結果を得ている。

三柄の場合は、爆速の測定値もかなり分散していることもあり、気泡の含有量やその状態などの違いが強く影響するといわれる膠質ダイナイト独特の特性によるものと思われる⁹⁾ が明らかではない。

3. 爆発圧接条件設定への飛翔関係式の応用

3.1 条件設定のための基本的考え方

爆発圧接は、通常 Fig. 5 に示す配置で行なう。すなわち、飛翔板が合せ材であって、接合する相手の母材に衝突しつつ、冶金的に結合してゆく。衝突する時の合せ材と母材のなす角は、Fig. 5 の配置においては、曲り角に等しい。

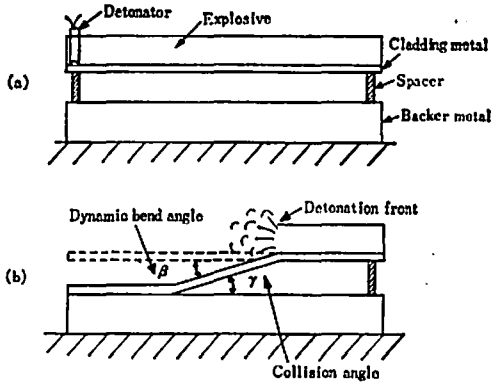


Fig. 5 (a) Typical explosion bonding arrangement before shooting.
(b) In progress of bonding.

爆発圧接においては、合せ材、母材の同一組合せにおいても、それぞれの厚さは千差万別の製品が要求される。

そこで、いま、ある合せ材厚さ t_{p1} において、薬種、装薬比、 S/O を決定したとき、これから同一材質の他の合せ材厚さの爆発圧接条件が導き出せると好都合である。

合せ材厚さが種々変化したとき、爆発圧接条件と接合状態との関連を研究した例として、Wylie らの研究⁹⁾がある。彼らは、合せ材厚さが変化したときの接合状態を、合せ材が母材に衝突したとき、母材中に発生する圧力（衝突圧力）および、衝突で費やされるエネルギー（衝突エネルギー）と関連させて研究し、接合には、ある値以上の衝突圧力が必要であるが、圧力がその値を越えて大となっても、衝突エネルギーが一定であれば、接合状態はほぼ一定であることを示した。すなわち、同一材質組合せの爆発圧接クラッド鋼で、合せ材厚さが変化したとき、衝突エネルギーを一定に制御すれば、ほぼ一定の接合品質を確保できるわけで、このことから、合せ材厚さの変化に応じた爆発圧接条件を定めることができる。そこで、前報で見出した加速距離を求める式(8)と、今回求めた速度式(7)を用いて、厚さの異なる合せ材についての爆発圧接条件を計算で定め、実験結果と対比してみることにした。

$$\beta = 1.085 y^{1.036} \quad (8)$$

ここで y は、合せ材が最高速度に達するまでの飛翔距離である。

Wylie らは、衝突圧力は式 (9)、衝突エネルギーは式(10)を用いて算出した。

$$P_i = (1/2) \rho_b V_p V_s \quad (9)$$

$$E_p = (1/2) \rho_p t_p V_p^2 \quad (10)$$

ここで P_i は衝突圧力、 ρ_b は母材金属の密度、 V_s は母材金属中の縦波の速度、 E_p は衝突エネルギー、 ρ_p は合せ材の密度、 t_p は合せ材厚さ、 V_p は合せ材の飛翔速度である。

衝突エネルギーは、正しくは運動量保存則から式 (11) とすべきであるが、土台が強固であれば、衝突後の速度は零と考えられるので、式 (10) でもよい。更に、今回は式 (12) のように、合せ材厚さと母材厚さの比を常に一定としたので、合せ材厚さ t_{p1} のときの飛翔速度 V_{p1} と、合せ材厚さ t_{p2} のときの飛翔速度 V_{p2} の関連式 (13) は、式 (10) から導いても、式 (11) から導いても変わらない。

$$E_p = \frac{1}{2} \frac{\rho_b t_b \cdot \rho_p t_p}{\rho_b t_b + \rho_p t_p} V_p^2 \quad (11)$$

$$E_p = \text{Const.}$$

$$\frac{1}{2} \frac{\rho_b t_b \cdot \rho_p t_{p1}}{\rho_b t_b + \rho_p t_{p1}} V_{p1}^2 = \frac{1}{2} \frac{\rho_b t_b \cdot \rho_p t_{p2}}{\rho_b t_b + \rho_p t_{p2}} V_{p2}^2$$

$$V_{p2}^2 \frac{t_{b1} \cdot t_{p1}}{t_{b2} \cdot t_{p2}} = \frac{\rho_b t_b + \rho_p t_{p2}}{\rho_b t_b + \rho_p t_{p1}} \cdot V_{p1}^2$$

$$\frac{t_{b1}}{t_{p1}} = \frac{t_{b2}}{t_{p2}} = \text{const} \quad (12)$$

$$V_{p2} = \sqrt{\frac{t_{p1}}{t_{p2}}} V_{p1} \quad (13)$$

よって筆者も衝突エネルギー計算式としては式(10)を用いることにした。

式 (13) により V_{p2} が求めれば、これに対応する装薬比 R と薬厚 t_e を式 (7) によって求めるのであるが、薬厚によって $V_p \sim R$ の関係が異なるので、Fig. 4 によって図上計算で求めるのが便利である。

薬厚が定まれば、これに対応する爆速が Fig. 2 から求まるので、 V_p/V_D の値が計算でき、この装薬条件のとき、合せ材が最高速度に達する飛翔距離 y が、合せ材と母材との間におくべき間隔 (= S/O) として、式 (1) と式 (8) から導いた式 (14) より求まる。

$$V_p = 2V_D \sin(\beta/2) \quad (1)$$

$$\beta = 1.085 y^{1.036} \quad (8)$$

$$\therefore y = [1.84 \sin^{-1}(V_p/2V_D)]^{0.955} \quad (14)$$

3.2 計算例

厚さ 3 mm の鋼板 ($\rho_p = 8.9$) を厚さ 12 mm の軟鋼板 ($\rho_b = 7.8$) に爆発圧接する最適条件として、薬種 L

EP-R, 装薬比 (R)=0.25, 薬厚 (t_e)=13.5mm, $S/O=8$ mmが定められたとき, 銅板の厚さが, 5mm, 8mmおよび12mm, 母材の厚さがそれぞれ20mm, 32mmおよび48mmになったときの装薬比, 薬厚および S/O を定めてみる。

まず, 初期条件, 薬厚13.5mm, $R=0.25$ における飛翔速度が, 式(7)によって, 300m/secと求まる。

ついで, 式(13)によって, 合せ材厚さ5, 8および12mmに対抗する飛翔速度が, それぞれ232, 184および150m/secと求まる。

これらの速度に対応する装薬比と薬厚は, 式(7)によって $V_p \sim R$ 図を書いて, この図より求める。

合せ材厚さが5mmのとき, $V_m=232$ m/secであるから, この図より, $V_m=232$ になる $t_e \sim R$ の組合せとして, たとえば次の二組をとる。

1. $t_e=15$ $R=0.19$

ロ. $t_e=30$ $R=0.22$

爆薬の比重を ρ_e とすれば, $R=\rho_e t_e / \rho_p t_p$ である。いま, $\rho_e=0.5$, $\rho_p=8.9$ だから, 1. ロの組合せにおける, それぞれの t_p を計算すると,

イの場合, $t_p=(0.5 \times 15 / 8.9 \times 0.19)=4.4$ (mm)

ロの場合, $t_p=(0.5 \times 30 / 8.9 \times 0.22)=7.7$ (mm)

これらの値を用いて $t_e \sim t_p$ 図および $R \sim t_p$ 図を画くと, $t_p=5$ に対応する薬厚 $t_e=17.5$ (mm), 装薬比 $R=0.195$ を求めることができる。

次に, Fig.2 から, 薬厚175mmに対応する爆速 $V_D=2170$ (m/sec) を求めれば, 式(14)によって S/O が計算できる。式(7)から求めた V_p/V_D の値から, S/O を計算してもよい。計算の結果, $S/O=5.3$ (mm) が得られた。

また, 爆薬に ELDV を使用した場合についても, 薬厚と S/O を計算して求めた。

このようにして求めた爆発圧接条件をTable. 4にまとめて示したが, 式(9)および(10)で計算した衝突圧力および衝突エネルギーも一緒に示しておいた。

これらの条件以外はすべて一定とし, Fig. 6 に示した合せ材と母材の配置で実際に爆発圧接を行なって, 接合状況を超音波探傷試験したところ, すべて, スペーサを置いた位置附近だけが接合せず, 他の部分は完全接合をしていた。また, 得られたクラッド鋼の中央部から顕微鏡試験片を切出し, 爆轟進行方向断面を観察して, 銅と軟鋼の接合境界に生じた波の波長を測定した。これらの結果を Table. 5 に示し, 顕微鏡写真を Photo. 1 に示した。

Table 4 The calculated explosion bonding conditions for copper/mild steel, using the equations (7) and(8). (Impact energy=120J/cm²)

| Explosives | t_p (mm) | t_b (mm) | V_p (m/sec) | R | t_e (mm) | V_D (m/sec) | β (deg) | S/O (mm) | P_t (kbor) |
|------------|---------------|---------------|------------------|-------|---------------|------------------|------------------|---------------|-----------------|
| LEP-R | 3 | 12 | 300 | 0.25 | 13.5 | 2050 | 8.4 | 7.2 | 70 |
| | 5 | 20 | 232 | 0.194 | 17.5 | 2210 | 6 | 5.2 | 54 |
| | 8 | 32 | 184 | 0.161 | 23 | 2330 | 4.5 | 4 | 43 |
| | 12 | 48 | 150 | 0.135 | 30 | 2430 | 3.7 | 3.1 | 35 |
| ELD V | 3 | 12 | 300 | 0.555 | 22.5 | 1370 | 12.6 | 10.6 | 70 |
| | 12 | 48 | 150 | 0.318 | 50.5 | 1420 | 5.8 | 5.1 | 35 |

3.3 実験結果の検討

接合境界部の状況は, Photo. 1 に見られるように, 爆発圧接によって生じる特有の波状境界をしていて, この波長は, 合せ材厚さが厚くなるにしたがい小さくなる傾向を示しているが, 銅と鋼との溶融相は, 波の頂部近傍に局部的に存在しているだけで, すべて, 銅と鋼は直接結合している。このような結合状態は, 石井ら⁹⁾や, Wylie¹⁰⁾ らが述べているように, 爆発圧接のクラッド鋼として望ましい状態である。

ところで, 合せ材が厚くなるほど, 波長が小さくなった現象について考察してみたい。

これは, 衝突エネルギー一定の条件があるため, 合せ材が厚くなるほど合せ材の飛翔速度を小さくする必要があるのに, 使用する爆薬層は厚くなって爆速が大となったことから, 合せ材と母材が衝突するときの衝突角が小さくなったためと考えられる。

接合境界に生じる波の波長や波高が, 衝突角に応じて変化することは, Bahrani⁹⁾ らによって定性的に求められたが, その後, Cowan¹⁰⁾ らや恩沢¹¹⁾ らによって定量的に説明されている。そして Reid¹²⁾ は, これら研究者が見出した波長と衝突角の関係は, 結局, 式(15)で表わされるとした。

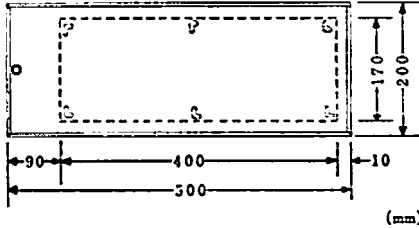
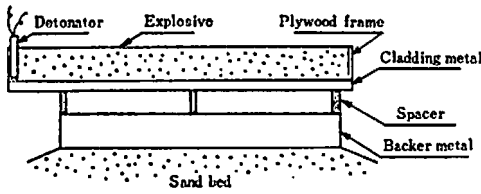


Fig. 6 The arrangement of explosion bonding.

$$\lambda \cos \beta \gamma^2 \quad (15)$$

ここで、 λ は波長、 t_p は合せ材厚さ、 γ は衝突角である。爆発圧接を Fig. 6 のような配置で行なった場合は、合せ材の曲り角 β が衝突角 γ と等しくなる。

そこで、今回の実験で基準として選んだ合せ材厚さ 3 mm、曲り角すなわち衝突角が 8.4 度の条件と、 λ の実測値 221 μ を式 (15) に代入して比例定数を定

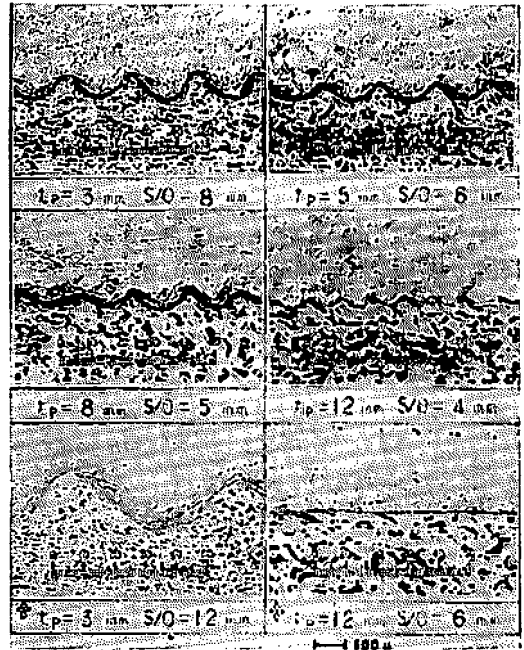


Photo. 1 Influence of the cladding metal thickness on the wave length of bonded interface. (※: bonded by ELDV, the other was bonded by LEP-R)

Table. 5 Results of explosion bonding

| Explosives | t_p (mm) | β (deg) | P_t (kbar) | E_p (J/cm ²) | S/O (mm) | Results of explosion bonding | |
|------------|------------|---------------|--------------|----------------------------|------------|------------------------------|------------------|
| | | | | | | λ (μ) | Results of U. T. |
| LEP-R | 3 | 8.4 | 70 | 120 | 8 | 221 | good |
| | 5 | 6 | 54 | " | 6 | 185 | " |
| | 8 | 4.5 | 43 | " | 5 | 170 | " |
| | 12 | 3.7 | 35 | " | 4 | 105 | " |
| ELD V | 3 | 12.6 | 70 | " | 12 | 607 | " |
| | 12 | 5.8 | 35 | " | 6 | Straight | " |

note : U. T. = Ultra sonic testing.

め、式 (16) を得た。

$$\lambda = 1.04 t_p \gamma^2 \times 10^{-3} \text{ (mm)} \quad (16)$$

恩沢ら¹¹⁾は、衝突角と波長の関係式として式 (17) を提出しているが、比例定数 A/C の値は合せ材の厚さで変化し、合せ材が薄い場合に大きく、厚い場合に小さくなることを認め、その関係を図に示しているので、この図から、合せ材厚さ 3 mm の場合の A/C の

値は 14 と求まり、この場合の恩沢の式は、式 (18) となる。

$$\lambda = \frac{A}{2C} t_p (1 - \cos \gamma) \quad (17)$$

$$\lambda = 7 t_p (1 - \cos \gamma) \text{ (mm)} \quad (18)$$

これらの式を用いて、Table 4 に示した合せ材厚さ

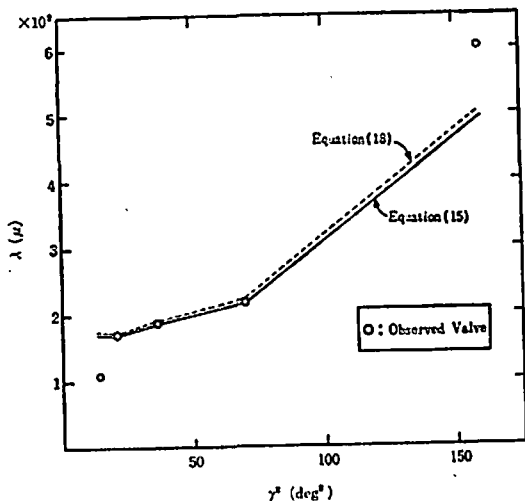


Fig. 7 Relation between collision angle and bond zone wave amplitude.

と曲り角に対応した λ を計算し、Fig. 7に示したが、式(16)と式(18)とは、ほぼ完全に一致していることがわかる。

また、Table 5に示した実験結果をFig. 7にプロットしてみたところ、角度の小さい所(合せ材厚さ12mmにおける値)と角度の大きい所(合せ材厚さ3mmで、ELD.Vを用いたときの値)で計算値とのずれがあるが、他の位置では極めてよく一致している。

角度の大きい所で実験値が上方にずれる傾向は、恩沢やCowanらの実験でも認められていることで、共通の現象と考えられるが、このほかに、Fig. 4(d)において実測値と計算値の間に見られた一割ほどの差に関連があると思われる。

角度が小さい位置で実験値が下方にずれたことは、恩沢の式におけるA/Cの値を合せ材厚さ3mmに対応させていたため、もし、12mm厚さに対応した値を用いて計算すれば、計算値はかなりの実測値に近づくものと思われる。

今回の実験は、衝突エネルギー一定の条件で、合せ材厚さ変化に応じた爆発圧接条件を設定したので、接合境界にできた波の波長は、全条件で一定にならなかったわけである。

もし、境界波長を等しくすることを目的とするならば、式(17)を用いて、各合せ材厚さごとの衝突角を求め、この衝突角になる爆発圧接条件を設定すればよい。ただし、この場合は、厚さが厚い所での衝突エネルギーが過大となり、Wylie⁶⁾が示したような不良接合状態になるおそれがある。

つぎに、ELD.Vを用いたときに、合せ材厚さ12mm

mの接合境界に波ができず、直線状であった現象を考察してみる。

Cowan¹⁰⁾らによれば、直線状境界から波状境界に移行する衝突点進行速度(V_T)は、式(19)で示される。

$$V_T = \sqrt{\frac{2(H_p + H_b)}{\rho_p + \rho_b}} R_T \quad (19)$$

ここで、 H_p と H_b は、合せ材と母材のダイヤモンドピラミッド硬さをdyne/cm²で表わしたものであり、 $0.981 \times (D_{ph}) \times 10^{10}$ で計算する。 ρ_p と ρ_b は、合せ材と母材の密度で、単位はg/cm³である。 R_T は、直線状境界から波状境界に移行するときの衝突点進行速度に対応するレイノルズ数で、 10.6 ± 1.89 の値が与えられている。

いま、銅と鋼の硬さを、彼らの論文から引用すると、それぞれ 64.3×10^{10} dyne/cm²および、 116×10^{10} dyne/cm²であり、密度はそれぞれ8.9g/cm³および7.86g/cm³である。これらの値を式(19)に代入して計算すると

$$V_T = 1,500 \pm 130 \text{ m/sec}$$

が得られた。

ELD.Vの爆速は、1,370~1,420m/secであり、ほぼ、この V_T と等しい。Cowanらはまた、 V_T 近くの衝突速度では、衝突角度が大きくないと波は発生しないとしている。このことは、今回の実験で、衝突角の大きな場合(合せ材厚さ3mmの場合)は波ができて、衝突角が小さい場合(合せ材厚さ3mm以外の場合)に波ができなかった現象と一致する。

厚い合せ材の場合、衝突エネルギーを一定に保とうとすると衝突速度が小さくなるので、同じ爆速の爆薬では衝突角が小さくなる。それで、爆速の遅い爆薬を使って衝突角を大きく保とうとすれば、今回の結果のように、接合境界の様子が変わってしまうおそれがある。このような現象があることは、爆発圧接において接合できる合せ材の厚さに限度があることを予想させる。

4. 結論

爆発圧接において、爆薬の爆発衝撃による金属板の飛翔状態は、爆薬の進展と共に、装薬条件によって定まる定常状態に到達する。爆薬が起爆されてから、この定常状態に達するまでの距離は、装薬条件によって異なるが、いままで考えられていた距離よりかなり長いことを前報で報告した。そこで、今回は、十分な長さの金属板を用いて、前々報に報告した飛翔速度式を再検討し、更に、前報で得た加速距離の式と組合せて、これらの式を実際の爆発圧接に適用することを試み、次の知見を得た。

(1) 爆薬で駆動された金属板が、定常飛翔状態で到達する最高速度は、次の式で計算できる。

$$V_p = \frac{2.33}{t_e^{0.35}} \cdot \frac{V_D}{V_{D0}} \sqrt{2F_a} \sqrt{\frac{0.6R}{1+0.2R+0.8/R}}$$

ここで、

V_p : 金属板の飛翔速度 (m/sec)

V_D : 使用した薬厚における爆速 (m/sec)

V_{D0} : 使用した爆薬が示し得る最高爆速 (m/sec)

t_e : 使用した薬厚 (mm)

F_a : 使用した爆薬 1 kg が発生する爆発ガスの有効エネルギー (m^2/sec^2)

R : 使用した爆薬量(kg/m^2)/金属板重量(kg/m^2)

(2) ある合せ材厚さについて、爆発圧接条件が求められたとき、同一材質の他の合せ材厚さの爆発圧接条件を計算で求め、実際に爆発圧接を行なって、その接合状態をしらべた結果、接合境界に生じた波の波長は、理論的に計算された値と良い一致を示した。このことから、今回得られた速度式と、前報で報告した加速距離と曲り角の関係式を利用してほぼ希望する接合状態のクラッド鋼が得られると考えられる。

なお、今回の実験は、旭化成工業(株)あいばの工場において、馬場工場長ほか従業員の方々の絶大なご協力をいただいて実施したものであり、とくに亀山竜一郎君と矢通良洋君には、実験の遂行と結果の整理にあたっていただいた。また、低爆速爆薬について、興亜化工(株)取締役研究部長清水武夫氏にご指導をいただいた。ここに記して感謝の意を表する次第である。

さらに、本報告をまとめるに当たり、数々のご助言をいただいた東京大学工学部教授正田強先生、八代工業高等専門学校校長清田堅吉先生、東京工業大学生産機

械工学科恩沢忠男先生に厚く御礼申し上げる。

文 献

- 1) 滝沢雄, 伊藤猛志, 恩沢忠男: 工火誌, 35, 184 (1974)
- 2) 滝沢雄, 藤田昌大: 工火誌, 36 (1975)
- 3) Eyring, H., Powell, R. E., Duffey, G. H., and Parlin, R. B., Chem. Rev. 45, 69 (1949)
- 4) 山本祐徳「一般火薬学」一橋書房, p169 (1960)
- 5) J. Taylor, 「Detonation in Condensed Explosives」Oxford at the Clarendon Press, p 159-167 (1952)
- 6) H. K. Wylie, P. E. G. William, B. Crossland; Symposium Explosive Cladding, Merianske Lazne (1970)
- 7) H. K. Wylie, P. E. G. William, B. Crossland: Proc. 3rd. Int. Conf. C. H. E. F., Colorad (1971)
- 8) 石井勇五郎, 恩沢忠男, 生沼利亮: 溶接界, 19, 224 (1967)
- 9) A. S. Bahrani, B. Crossland, Proc. Inst. Mech Engrs., 179, 264 (1964-65)
- 10) G. R. Cowan, O. R. Bergmann, and A. H. Holtzman; Metallurgical Transactions, 2, 3145 (1971)
- 11) 恩沢忠男, 石井勇五郎: 溶接学会誌, 41, 102 (1972)
- 12) S. R. Reid; Int. J. Mech, Sci Pergamon Press., 16, 399 (1974)

On the highest terminal velocity of the flyer plate driven by explosive and its application to explosion bonding

Yu Takizawa

A metal plate driven by the force of an explosive reaches to the highest terminal velocity within a certain distance.

The terminal velocity relates to the thickness of the explosive, the ratio of the mass of the explosive to that of the metal plate, the energy of the explosion and the ratio of the detonation velocity at the thickness used to that at the infinite thickness.

However, the real highest terminal velocity will not be obtained, if the length of a metal plate is too short.

Using a sufficiently long metal plate, the highest terminal velocity was reexamined and the equation of flyer plate velocity was revised.

The new equation is

$$V_p = \frac{2.23}{t_e^{0.33}} \frac{V_D}{V_{D0}} \sqrt{2F_a} \sqrt{\frac{0.6R}{1+0.2R+0.8/R}}$$

Where

V_p ; highest terminal velocity of flyer plate (m/sec.)

V_D ; detonation velocity of explosive at the thickness used (m/sec.)

V_{D0} ; detonation velocity of explosive at the infinite thickness (m/sec.)

F_a ; available energy of explosion ($m^2/sec.^2$)
