

多層爆着過程の解析

藤田昌大*, 千葉 昂*, 福田 泉**, 荻阪浩男***
馬場文章****, 真鍋敏之****

本論文は多層爆着過程を解析的な方法によって詳細に説明することを目的としている。論文の前半では、通常の爆着過程が一次元差分法によって数値解析される。解析において、爆轟ガスの様々な方向への広がり近似するために、初期の爆轟ガス内の圧力分布は飛翔板から離れるに従って低下すると仮定される。解析結果によって飛翔板への圧力作用の機構が明らかになり、ピンコンタクト法によって測定された飛翔速度の飛翔距離に対する変化の実験結果に対して解析結果は良好な近似を与えた。

この解析方法が多層爆着の過程に適用された。論文の後半では、この過程の機構が解析結果によって検討され、7層の爆着の実験結果と比較される。結果は次のように要約される。

飛翔板がすぐ下の静止板と衝突した瞬間、飛翔速度は運動量保存則に従って、若干低下するが、引続く飛翔板への圧力作用によって、次の衝突までに、殆ど衝突前の速度に回復する。さらにあらゆる層における衝突直後の飛出し速度の実験値は本解析によって算出された値と殆ど一致し、解析の妥当性が立証された。

1. 緒 言

多層爆着法は、適当な間隔を置いて多層に重ねた金属板を上部から次々と高速度で斜め方向に衝突させることによって接合させるという方法で、1回の爆発によって多層に接合された金属複合材を得ようとする加工法である。この加工法では、Fig. 1に示すように、衝突毎に衝突速度が変化するので、各層における圧着加工の条件は、衝突毎に変化する。この問題に関して Al Hassani等¹⁾は第1の飛翔板に初期に与えられた運動量が全過程を通じて保存されるとして解析を試みている。この場合には、次の板と衝突して接合すると、飛翔板の質量が増加する分だけ飛翔速度が減じる。従って爆着界面に生じる波の振幅及び波長は上層から下層に向うに従って小さくなる。このような状況は第1

の飛翔板と第2の飛翔板の間隔が十分離れていて、爆轟ガスの圧力作用が第2の飛翔板との衝突以前に殆ど消滅している場合に作り出される。彼等はそのような条件で実験を行い、境界層の波の大きさの変化から解析結果の妥当性を立証している。El-Sobky等²⁾も多層爆着の問題を取り上げているが、彼等は爆着界面の波が上層から下層へ向かって必ずしも減少するとは限らず、むしろ増加する場合もあることを彼等の実験結果によって示し、その理由として飛翔板内に生じる塑性ヒンジが衝突点に先行して生じるので、飛翔板には衝突以前に変形傾斜面が形成され、最上層より下層において衝突角度が大きくなること有り得ると説明している。著者の一人は爆着過程における飛翔板の塑性変形を、剛塑性曲げの問題として解析しているが³⁾ 塑性ヒンジは爆轟波前面よりほんの僅かしか先行せず従って爆轟波或いはこの場合における上層の板の衝突以前

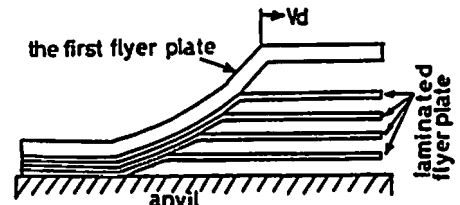


Fig. 1 Illustration of a multilayered explosive bonding process

昭和61年10月6日受理

*熊本大学工学部
〒000 熊本市黒髪 2—39—1
TEL

**八代工業高等専門学校
〒000 八代市平山新町 2627
TEL

***熊本工業大学
〒000 熊本市池田 4—22—1
TEL

****マツダ株式会社
〒000 広島市外府中町
TEL

には飛翔板の変形は無視できる程小さいという結果を得ている。Blazynsky等の実験結果については、Al Hassani等が彼等の論文の中で指摘しているように¹⁾爆轟ガス圧の作用が継続している間に、第2、第3…の飛翔板との衝突が進行したと考える方が妥当性がある。

多層爆着を行う場合、衝突毎の衝突条件の変化ができるだけ小さいことが望ましい。一般に爆着加工に用いられる爆薬は粉末状であり、充填密度は小さく薬厚は大きい。その場合には、第2、第3…と衝突が繰返された後でも、ガス圧の作用が残っていて、衝突によって減速された飛翔板が加速され、次の衝突までに飛翔速度は或る程度回復すると予想される。多層爆着における加工条件を検討するためには、この問題についての妥当な解析がどうしても必要である。

2. 研究の方法

本題においては、爆轟ガスの飛翔板への圧力作用を詳しく知ることが重要である。そのために、1枚の飛翔板がガス圧作用を受けて、どのように加速されるかを計測する実験を行った。そしてガスの内部構造の時間的変化について、差分法による数値解析法を導入し実験結果を満足に説明し得る解析法を確立した。さらに、その解析法を多層爆着の問題に適用し、各層間の衝突を含む飛翔速度の変化を求め、一方では多層爆着の場合の各層における衝突後の飛出し速度を実験的に測定して、解析結果と対照した。又同じ条件で多層爆着の実験を行い、各層間の接合状態を光学顕微鏡で観察した。

2.1 実験方法

A・1枚の飛翔板の加速状況の計測実験

爆着過程における金属飛翔板の速度の計測はピンコンタクト法によって行った。Fig. 2に示すように、ピンは飛翔板の中心軸の下方に爆轟方向に一定間隔で5本配置され、第1、第3、第5のピンと第2、第4のピンとでは2mmの高さの差を設けている。爆轟波が定常に進行している時、第1及び第3のピンへの飛翔板の接触時刻の平均時刻は第2のピンの上方2mmの位置に飛翔板が達した時刻と見なすことができる。従ってこの時刻と第2のピンへの接触時刻から飛翔速度が求められるが、この速度は第1と第2のピンの高さの間の平均速度であり、両ピンの丁度中間の高さと速度と概略的に見做すことができる。この計測が、定常な爆轟状態の下でなされるようにとの配慮から、ピンの配列位置は第1のピンが起爆点から74mmの位置となるように配置した。本実験では飛翔板の加速状況を調べるのが目的であるので、速度計測位置つまり第1と第2のピンの丁度中間の高さを飛翔板下面から2

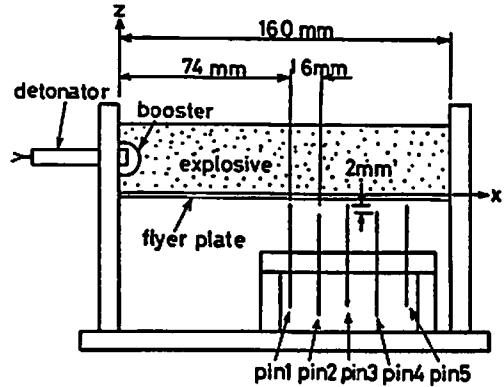


Fig. 2 Device for measurement of plate velocity in case of usual explosive bonding process

mm, 4mm, 6mm……14mmと2mmおきに7段階に変化させた。飛翔板は末端において接着剤でアクリル板の柱に接着されており、又末端部では中間部と同じ圧力作用であるとは考えられないので、爆轟波が末端に達した後は、末端部から別の塑性曲げ波が内方へ進行して来る。従って飛翔距離つまり飛翔板下面からの計測位置が大きくなると、この曲げ波の影響が含まれるようになる。Fig. 2に示す方法では(第1、第2、第3)、(第2、第3、第4)及び(第3、第4、第5)の3つの組合せでそれぞれ飛翔速度が計測されるが、曲げ波の影響は先ず第5のピンへの接触時刻の遅れとして現れ、それが内方へ次第に及んで来る。ピンが十分良好な位置決め精度で配置されていれば、曲げ波の影響の及んでいない範囲を見極めることができる。

爆薬には硝安系の粉末状爆薬を用いたが、充填密度は $\Delta=530\text{kg/m}^3$ 、爆速は $D=2,300\text{m/s}$ である。又薬厚は全実験を通じて40mmと一定にした。飛翔板には幅60mm、長さ160mmの長方形に切った鋼板を用い、爆薬はその全面積に一定厚さとなるようにした。ガス圧作用の時間的経過を知る必要から、鋼板の板厚は0.5mm, 1mm, 1.5mm, 2mm, 3mmの5通りに変化させた。

B・多層爆着における飛翔速度の計測実験

多層爆着における各層での衝突後の飛び出し速度を計測するために、Fig. 3に示すように各層間で1mmの間隔を置いて多層に重ねた最下層の飛翔板の下方に、ピン先端が飛翔板の下面から、1mmと3mmの高さとなるようにピンを配置した。この方法では、衝突によって最下層の板が飛出して2mm飛翔した後の速度を計測することになる。この実験に使用した飛翔板はいずれも0.5mm板厚の鋼板で、これを2枚、3枚……7枚と1枚ずつ増加させてそれぞれの場合の飛出し速

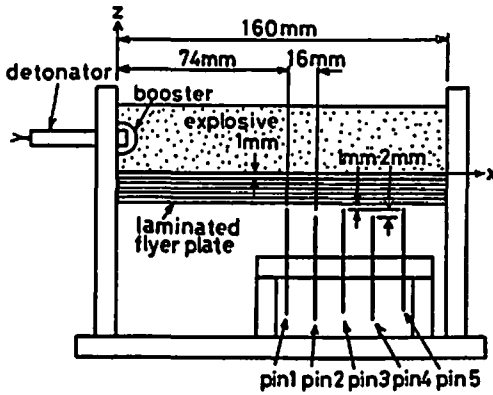


Fig. 3 Device for measurement of plate velocity in case of multilayered explosive bonding process; plate velocity is measured at flying distance of 2mm after collision

度計測を行った。

2.2 解析方法

爆着の過程においては、爆轟波が飛翔板の上面を移動し、飛翔板の要素はその上部に爆轟波が到達した瞬間から圧力作用を受け始め、下方へ運動し始める。又爆薬の上面は開放されているので、爆轟ガスの上方向への急激な膨張運動も同時に開始する。この問題の第一次近似として、Fig. 4に示すように飛翔板要素の上部の薬厚部分に爆轟圧を有する高压ガスが瞬間的に出現したとし、以後の飛翔板要素及びガスの運動は1次元の(Z方向のみ)であると見なした。実際のガスの運動は、爆轟前後方向(x方向)及び左右方向(y方向)にも若干の成分を有しているため、その影響を考慮しなければならない。その影響を考慮した修正については3.2に述べる。

爆轟ガス内部の運動は流体力学の基礎式つまり質量保存、運動量保存、エネルギー保存の3式を用いて計算されるが、通常行われているようにエネルギー保存の式の代りに、ガスの状態式を用いて計算した。状態式としてはポリトロブ関係式を用いた。数値解析の基礎式は次の3式である。

$$\rho_0 dz_0 = \rho dz \quad (\text{質量保存則}) \quad (1)$$

$$\frac{\delta w}{\delta t} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial z_0} = 0 \quad (\text{運動量保存則}) \quad (2)$$

$$P = P_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n \quad (\text{ガスの状態式}) \quad (3)$$

ここで t は現象の開始からの時刻、 z は飛翔板の初期の位置から測ったガス要素の座標、 ρ はガスの密度、 P はガスの圧力、 w はガスの粒子速度であり、添字 0 は初期の座標や状態量を表わし、添字のない記号は時刻 t における座標や状態量を表わしている。

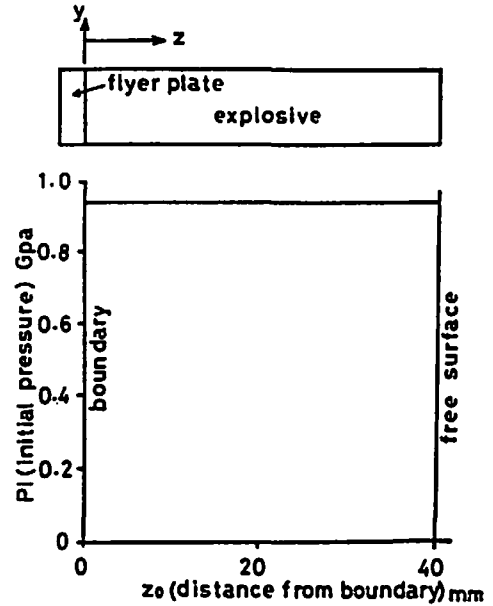


Fig. 4 Hypothetical initial pressure distribution in detonation gas for elementary analysis

(3)式において、使用爆薬に対する P_0 、 ρ_0 及び n の値を決めなければならない。日野によって示された計算式⁴⁾を用いると、爆薬の充填密度 Δ と爆速 D を与えると爆轟圧 P_0 を求めることができる。また ρ_0 と n の値は爆轟理論における各式⁵⁾及び(3)式から導かれる爆発生成ガス中の音速の式 $C = \sqrt{\delta p / \delta \rho}$ を用いて求められる。本研究の場合、 $\Delta = 530 \text{ kg/m}^3$ 、 $D = 2,300 \text{ m/s}$ である。これらの値を用いて、

$$P_0 = 0.939 \text{ GPa}, \rho_0 = 764 \text{ kg/m}^3, n = 1.98$$

を算出した。

数値解析は差分法によって行いが、要素区分は100分割従って1要素の厚さ $\Delta z_0 = 0.4 \text{ mm}$ とした。また時間区分はクラン数を考慮して、 $\Delta t = 0.1 \mu\text{s}$ とした。差分計算によるじょう乱を避けるために、(2)式の中に粒子速度の勾配の項を含む粘性項を導入した。

境界条件は飛翔板に接するガス要素の圧力と、自由表面における圧力とに与えられる。前者のの要素を添字1で後者を n で表すと、境界条件は次の通りである。

$$P_1 = -m \dot{V}_p \quad (4)$$

$$P_{n+1} = -P_n \quad (5)$$

(4)式において、 m は飛翔板の単位面積当りの質量、 \dot{V}_p は飛翔板のZ方向の速度である。(5)式における、 P_{n+1} は自由表面の外側に仮想的に要素を考え、その要素の圧力である。

初期条件は全要素に対して

$$P_1 = P_0, \rho_1 = \rho_0, w_1 = 0$$

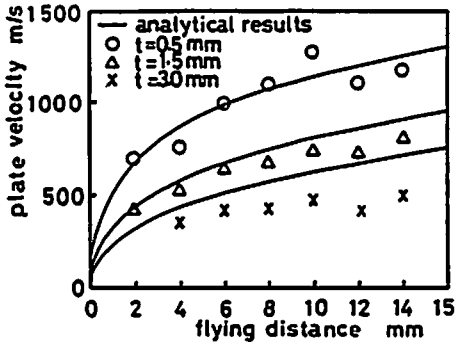


Fig. 5 Comparison between result due to elementary analysis and experimental one

であるとし、飛翔板の速度も $V_{pi}=0$ とした。但し添字 i は各物理量の $t=0$ における値であることを表わしている。爆轟ガスは当初爆轟方向に粒子速度を有しているが、 Z 方向の速度成分は有していないので、0 とした。

計算は実験を行った全ての飛翔板の場合に対して実行した。鋼板の密度は $\rho_s=8,950\text{kg/m}^3$ とした。

多層爆着の場合には、爆轟ガス圧の作用による飛翔板の加速と各層間の衝突の際の運動量保存則に従う飛翔速度の変化を組合せた問題として捕えることができる。今 $(i-1)$ 番目まで圧着された飛翔板が V_{i-1} の速度で i 番目の板に衝突して飛び出す時の速度 V_i は飛翔板の質量が全て等しいので、次式で与えられる。

$$V_i = \frac{i-1}{i} V_{i-1}$$

つまり、飛翔板は衝突の瞬間に V_{i-1} から V_i に変化すると考えた。実験では衝突2mmの飛翔距離において速度計測を行っているので、各層における衝突後の速度計算も、衝突後の飛翔距離2mmまで延長して行った。

3. 結果及び考察

3.1 第一次近似による解析結果と実験結果の比較

飛翔板の飛翔速度の飛翔距離に対する変化の数値解析結果と、飛翔距離の2mmおきに飛翔速度を計測した実験結果をFig. 5に示している。図には飛翔板の板厚が0.5mmの場合、1.5mmの場合及び3mmの場合の3例を示している。実験結果にかなりのバラつきがあるのは否めないが、板厚が薄い場合には解析結果による見積りは実験結果に近く、ほぼ満足できる。板厚が薄い場合、加速度が大きく従って板面背後のガスの膨張速度も大きい。その結果ガスの圧力作用も急激に低下する（このことは後節のFig. 8のグラフで裏付けされる）。従ってこの場合には初期の短い時間内の圧

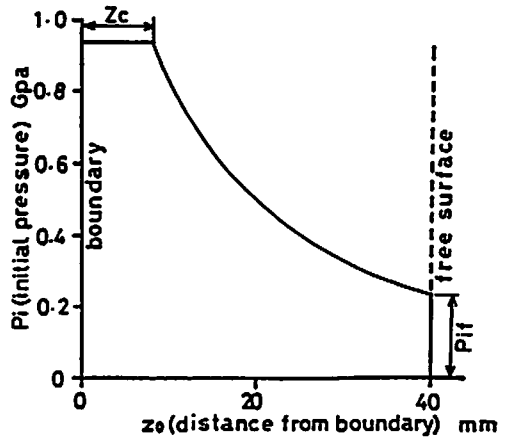


Fig. 6 Modified initial pressure distribution in detonation gas

力作用が重要で、それ以降の圧力作用の影響は比較的小さいと思われる。このことから考えて、本解析で用いた初期の圧力値は妥当な値であると見做して良い。一方でFig. 5の結果は板厚が厚くなる程、飛翔距離が大きくなる程解析結果の見積り値は実験結果に対して次第に大きくはずれの傾向を示している。板厚が厚い場合には、加速度が小さく従ってガスの膨張による圧力の低下は小さい。又、飛翔速度はそれまでの圧力履歴の時間的積分によって与えられるが、飛翔距離が大きい場合、それだけ長い経過時間の圧力履歴が関係して来る。これらの要因を考えて、上記の結果は圧力の初期値は妥当であるが、それ以降の圧力履歴の見積りが大き過ぎることを示唆している。

3.2 解析内容の修正

爆轟波が飛翔板の1要素の上面を通過する時、ガスは上下方向 (Z 方向) に運動するばかりでなく、左右方向及び爆轟波後方への流れも生じる。従って、このガスの流れが顕著でない爆轟波到達直後の短い時間内ではそうでもないが、時間が経過するにつれてガスの運動が Z 方向のみと考える場合より圧力は大きく低下するものと推測される。さて、上層部のガスの圧力エネルギーが飛翔板に影響し始めるのは、圧力波がガス層内を伝播して板面に達してからである。そこで上記のガスの流出を飛翔板上部に出現する初期の高圧ガス層の密度分布の中で考慮しようとした。つまり飛翔板近くのある厚さの範囲では、爆轟波前面のガス密度を有するが、それより上部の層においては、 Z_0 の増加と共に一定の割合でガス密度が低下するとした。このように考えた高圧ガスの密度分布を (3) 式を用いて初期の圧力分布に換算したものをFig. 6に示している。一定圧力の層の厚さ Z_c 及び自由表面におけるガスの初

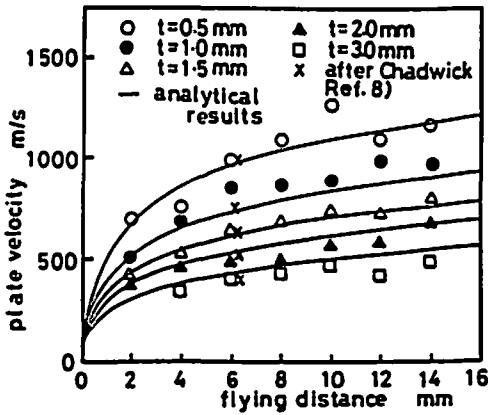


Fig. 7 Change of plate velocity with flying distance ; Comparison of modified analytical result with experimental one and one obtained by Chadwick's equation (ref.8)

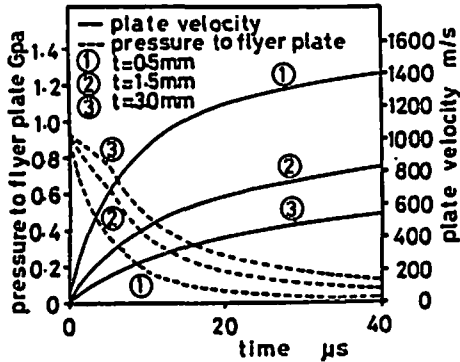


Fig. 8 Analytical results of changes of pressure applied to flyer plate and plate velocity with time

期密度 (或いは圧力 P_0) の値は飛翔板の板厚が3mmの場合の実験結果をできるだけ良く近似するようにとの観点から選んだ。

3.3 修正された解析方法による結果と実験結果の比較

Fig. 7は修正した解析方法による計算結果と実験結果を比較したものである。板厚1mmの場合に実験結果が解析結果より若干大きくなっているが、これを除けばいずれの板厚の場合に対しても、実験結果をよく説明していると見做すことができる。

爆着過程における飛翔板の到達速度については、爆薬と飛翔板の質量の比及び爆薬の特性値の関数として求める式が多く研究者によって検討されており、それらは文献(6)及び(7)などにまとめられている。爆薬の特性値としては、多くの場合化学的エネルギーの項で与えているが、Chadwick⁸⁾は爆速の項で与えており、

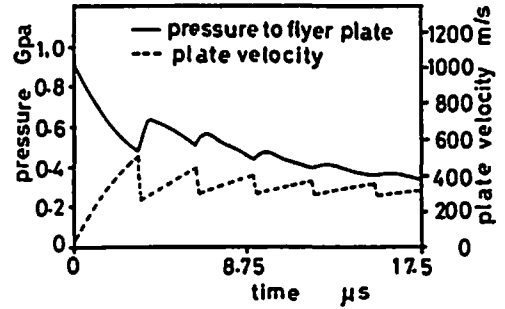


Fig. 9 Analytical results of changes of pressure applied to flyer plate and plate velocity with time in multilayered explosive bonding process

本解析結果と直接比較が可能である。Fig. 7中に×印で記入しているのはChadwickが導いた式に本実験でのデータを用いて算出した各板厚の場合の到達速度の値をプロットしているが、本解析結果における飛翔距離6mmにおける飛翔速度の値と殆ど一致している。つまり本解析結果が他の研究者による結果に十分な適合性を有していることを立証しており、一方でFig. 7における1mmの場合の実験結果は実験条件例えば爆薬の充填密度などに適正を欠く所があったのではないかと示唆している。

Fig. 8は板面への圧力、飛翔速度及び飛翔距離の時間的な変化を解析結果によって示している。図から判るように、板厚が小さい場合には初期の加速が大きく板面への圧力の減少が著しい。そして板厚が大きくなるに従って板面への圧力低下の割合が小さくなっており、ある程度、時間が経過した後でも圧力作用の影響が相対的に大きく残っていることを裏付けている。

3.4 多層爆着過程への本解析の適用及び解析結果と実験結果の比較、多層爆着の実験結果

Fig. 9は本解析方法を多層爆着の過程に適用した結果をしめしている。図には板面への圧力変化及び飛翔板の飛翔速度の変化を経過時間を横軸にしたグラフとして描いている。第1枚の飛翔板が第2枚目の板に衝突して飛翔板の飛翔速度が瞬間的に1/2に低下すると、飛翔板背面のガスは飛翔方向の運動が阻止されるために圧力が急に上昇する。その後再び飛翔板が加速されると共にガスの膨張運動が開始するので、圧力も低下し始める。このような現象は衝突毎に繰返されるが、衝突回数が増すに従って、飛翔板の質量は増加しており、従って衝突における速度低下も小さくなるので、圧力上昇も小さくなって行く。全体としては飛翔板の下方への運動のために圧力作用は次第に低下し、衝突回数が増えると質量も増加するために圧力作用によ

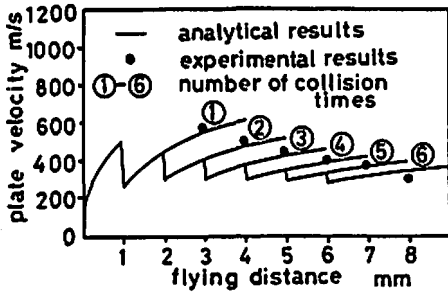


Fig. 10 Changes of plate velocity with flying distance obtained by analytical method and its comparison with experimentally measured plate velocities at flying distance of 2mm after each collision

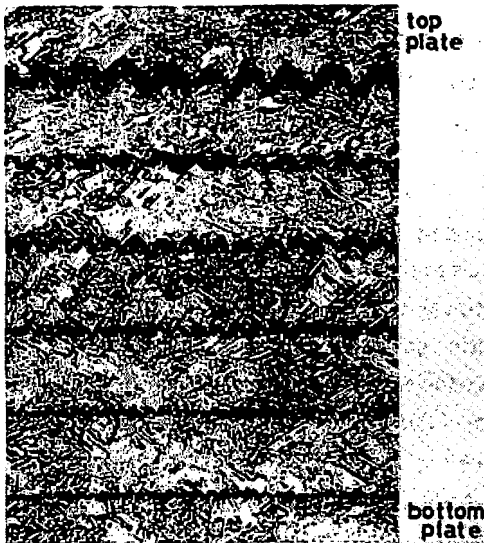


Fig. 11 Microscopic pictures of bonded boundaries ; this experimental condition is same to one for Fig. 10

る加速度も低下して行くが、それでも衝突前の速度に近い所まで回復している。

Fig. 10は飛翔板の飛翔速度の変化を飛翔距離に対して描いた解析結果のグラフを実験結果と比較した図である。計測位置の関係から各層における衝突後2mm飛翔した所まで解析を延長してグラフを描いて比較している。解析結果は実験結果と良く一致しており、多層爆着に対する本解析の妥当性を立証している。又、グラフによって衝突によって一旦低下した飛翔速度が後続の圧力作用によってかなり回復して次の衝突がなされている現象が説明されている。圧力作用がない場合には飛翔速度は第1回目の衝突によって初期速度の1/2にその後衝突を繰返す毎に1/3, 1/4……と低下する訳で、6回の衝突を通じて初期速度の1/2より

も大きい速度を保っていることは圧力作用を効果的に利用することが多層爆着の場合に極めて重要であることを物語っている。

本図の場合、第1の衝突速度は約490m/sであり、最後の衝突速度は360m/sである。Mckee等が鋼同志の場合に対して実験的に求めた良好な爆着加工条件⁹⁾を満足している。そこで、同じ加工条件の下で多層爆着の実験を試みた。実験によって得られた多層爆着材の圧着界面の顕微鏡写真をFig. 11に示す。図から判るように、いずれの層間界面においても爆着特有の波状界面が形成されており、この範囲で爆着が良好な加工条件下でなされたことを裏付けている。しかしながら、上層から下層に向うに従って波の大きさが小さくなる傾向が見られ、加工条件が次第に変化したことを示唆しているが、Fig. 10で判るように、この実験条件の場合、衝突速度が次第に低下しているの、止むを得ない結果であった。

4. 結 言

本研究では、爆着過程における飛翔板への爆轟ガスの圧力作用を一次元差分法による数値解析法によって求め、その結果を飛翔板の加速状況を計測した実験結果と比較することによって、解析結果の妥当性を確認した。さらにこの解析法を多層爆着の場合に適用し、各層での衝突(圧着)後の飛翔板のガス圧による加速状況を解析し、ガス圧の作用によって衝突後の速度回復が有効に行われ得ることを解析結果によって示すことができた。また各層での衝突後の飛出し速度の実験結果との良好な一致によって、解析結果の妥当性を立証することができた。そして同じ条件で行った多層爆着の実験においても圧着界面の波は各層において生じており、この範囲での爆着が良好であることを示した。

多層爆着を良好に行うためには、各層における衝突条件の変化をできるだけ小さくし、全過程が良好な爆着加工の条件を満足するような状態を作らなければならない。そのために爆轟ガス圧の作用を有効に利用できるように配慮しなければならない。各層での爆着はプロセスの途中でなされるので、数値解析によるしか検討の手だてではない。本研究はその第一段階として行ったものであり、多層爆着によるガス圧作用の効果を知ることができた。多層爆着の良好な加工条件を求めるには、薬厚の効果そして第一飛翔板の質量及び各層間の間隙などの因子についても検討しなければならない。これらについて現在研究を進めている。

おわりに

本研究を行うに当たって、旭化成工業株式会社より爆薬の提供を受け、熊本大学の月俣教官の実験協力を得た。ここに深甚な謝意を表する。

文 献

- 1) T. S. Al-Hassani and S. A. L. Salem ; Proc.7th Int. Conf. on High Energy Rate Fabrication, 208 (1981)
- 2) H. El-Sobky and T. Z. Blazynski ; ibid 100 (1981)
- 3) 藤田昌大, 清田堅吉 ; 塑性と加工, 24, No.272, 942 (1983)
- 4) 日野熊雄 ; 工業火薬協会誌, 17, No.4, 242 (1956)
- 5) 工業火薬協会編 ; 発破ハンドブック, 372 (1976)
- 6) 同上, 307 (1976)
- 7) B. Crossland ; Explosive Welding of Metals and its Application, Oxford University Press, 78 (1982)
- 8) M. D. Chadwick ; Proc. Select Conf. of Explosive Welding, The Welding Institute (1968)
- 9) F. A. Mckee and B. Crossland ; 5th Int. Conf. on High Energy Rate Fabrication, 4. 11. (1973)

An Analysis of Multilayered Explosive Bonding Process

by Masahiro FUJITA*, Akira CHIBA*, Izumi FUKUDA**,
Hiroo OSAKA***, Fumiaki BABA****
and Toshiyuki MANABE*****

This paper aims to establish an analytical method by which a multilayered explosive bonding process can be full explained. In the former part of this paper, a usual explosive bonding process is numerically analyzed by one dimensional finite differential method. In this analysis, an initial pressure distribution in detonation gas was assumed as to decrease with the distance from the flyer plate in order to simulate the expansion of the gas in several directions. The analytical result clarified the mechanism of the pressure action applied to the flyer plate and the validity of this analysis was confirmed by the result that this analysis gave a good approximation for the experimental result of the change of plate velocity with flying distance measured by pin contact method.

Further this analytical method was applied to the multilayered explosive bonding process. In the latter part of this paper, the mechanism of this process is discussed in detail according to the analytical result and the result is compared with the experimental one in which the number of the layers was seven. The results are summarized as follows :

At the instant a flyer plate collides with a stationary one just below, there produces some drop in plate velocity according to the law of momentum conservation, but successive pressure action of the gas to the plate makes the velocity recover close to the value just before the collision by the next collision. Further the experimental results of the plate velocities just after collision at every layer coincided very well with the values obtained by the analytical method, and showed that the collision conditions between every adjacent layers were controlled within the limits for good bonding.

(*Kumamoto University, 2—39—1 Kurokami, Kumamoto

**Yatsushiro College of Technorogy, 2627 Hirayamashinmachi, Yatsushiro

***Kumamoto Institute of Tchnology, 4—22—1 Ikeda, Kumamoto

****Matsuda Co. Ltd., Sotofuchumachi, Hiroshima)