

外本 和幸*, 藤田 昌大*, 千葉 昂**
 阮 立群***, 浦上 進***

1. 緒言

本研究で用いた多層爆着法は、Fig. 1に模式的に示したように、適当な間隔を置いて多層に重ねた金属板（積層板；multilayered metal plates）の上部に駆動板（driver plate）を配置し、さらにその上に装填した爆薬を爆轟させることによって駆動板及び積層板を上部から次々と高速度で斜め方向に衝突させ接合する方法であり、1回の爆発によって多層に接合されたクラッド材が得られる利点がある。

昭和63年 6 月 6 日受理

*熊本大学工学部機械工学科

〒860 熊本市黒髪 2-39-1

TEL 096-344-2111 内線 3740

****熊本大学工学部材料開発工学科**

***熊本大学大学院

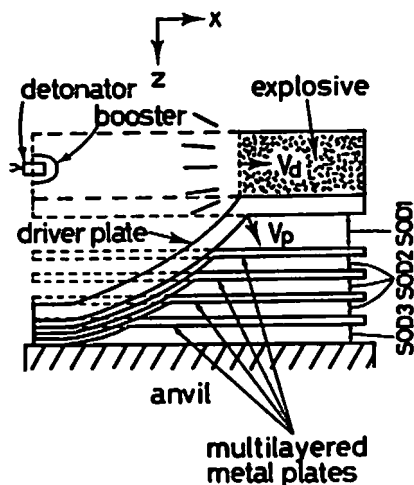


Fig. 1 Schematic illustration of multilayered explosive bonding.

回報した差分法を用いた数値解析⁹⁾によって得られた爆接条件と、接合界面の波状組織の関係について調べたので報告する。

本解析は爆薬の爆轟ガス圧の作用により、金属板がどのような運動を行うかを調べたものであり、多層爆着時には、駆動板からさほど離れていない位置に積層板があるので、爆轟ガス圧力の影響が非常に大きい領域で接合が行われる。従ってガス圧による金属板の加速と、衝突に伴う減速を適当に制御することにより、均一な接合条件が得られることが予測される。

2. 實驗方法

多層爆着実験は、駆動板上に40mm厚さの粉末状の爆薬(爆速2,300 m/s、密度約630 kg/m³)をセットし、駆

Table 1 Experimental details

Test No.	driver plate (thickness/mm)	multilayered plate (thickness/mm)	number of multilayered metal plates	SOD1 /mm	SOD2 /mm	SOD3 /mm
1	Cu(0.5)	Cu(0.5)	6	1	1	1
2	Cu(2)	Cu(0.5)	6	1	1	1
3	Cu(3)	Cu(0.5)	6	1	1	1
4	Cu(2)	Brass(0.5) Cu(0.5)	3 2	15	2	2
5	Cu(5)	Brass(0.3) Cu(0.3)	3 3	1 1	1 1	1 1
6	Cu(3)	Cu(0.3) Cu(0.3)	3 3	2	2	0

V_d (detonation velocity of explosive) ≈ 2300 m/s

SOD ; stand off distance thickness of explosive = 40mm

動板と積層板の間、各積層板の間、および積層板とアンビルの間には適当な間隙を設けた (Fig. 1 参照)。実験条件の詳細は Table 1 に示す。模式図中の booster は可塑性の爆速 7,000 m/s 級の爆薬で、爆薬の爆轟波が安定に伝わることを目的として用いた。

駆動板および積層板は全長 160mm、幅 60mm の銅および黄銅を用いた。試験片の採取は爆轟が定常状態で行われたと考えられる雷管位置から水平方向に 100mm の位置で爆轟方向に平行に切り出し、切断面を光学顕微鏡観察した。

解析方法に関しては既に報告済み⁴⁾であるので、本報告では省略する。

3. 実験結果及び考察

3.1 多層爆着条件と界面の波状組織

Fig. 2 に解析結果および実際に得られた多層爆着材の組織の一例を示す。この場合、駆動板、積層板 (6 層) とともに 0.5mm 厚さの銅板、各金属板の間隙はすべて 1mm とした (実験 No. 1)。図中の実線は金属板の飛翔速度、点線は爆轟ガス圧力の変化を示している。

この結果は既に前報⁴⁾でも報告しているが、Fig. 2 を用いて多層爆着過程を解説する。

飛翔距離の増加と共に駆動板が次第に加速され、同時に爆轟ガス圧はガスの膨張によって減少する。積層板との衝突に伴い金属板の速度は運動量保存則に従って急激に減少する。この時金属板の z 方向 (鉛直下向き方向) への運動が阻害されるので、爆轟ガス圧力は一時的に増加する。この金属板後方からのガス圧力により金属板は再び加速され、次の衝突までにある程度速度を回復する。多層爆着過程はこの様な衝突に伴う速度の減少と、ガス圧力による加速を繰り返しながら進行する。

図中の各点はピンコンタクト法による金属板の飛翔

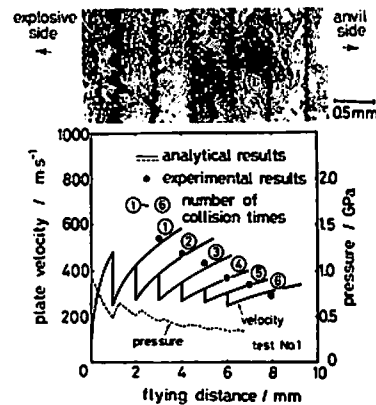


Fig. 2 Example of analytical results and microstructure of multilaminate made by multilayered explosive bonding (test No. 1).

速度の測定結果である。速度の計測は積層板の直下で行うことは困難なので、各駆動板から 2mm の位置での飛翔速度を測定している。飛翔速度の測定結果は解析結果のグラフの延長線上によく一致しており、このことは本解析の妥当性を示している。

本実験条件 (実験 No. 1) では爆薬側からアンビル側へ向かって衝突速度は次第に減少する。これに対応して、実際に得られた多層材の接合界面の波長は爆薬側からアンビル側へ向かって次第に減少している。このことは各接合界面における爆接条件の変化に対応しているものと考えらるが、これについては次節で詳述する。

3.2 接合界面の波長に及ぼす駆動板厚さの影響

Fig. 3 は積層板の厚さを 0.5mm、各金属板の間隙をすべて 1mm と一定とし、駆動板の厚さを 0.5mm (実験

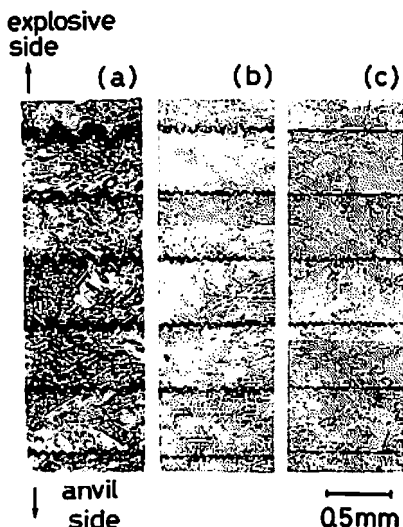


Fig. 3 Variation of wave length with the change of driver plate thickness ((a); test No. 1, (b); test No. 2, and (c); test No. 3).

No. 1; 図中(a)), 2 mm (No. 2; (b)), 3 mm (No. 3; (c))としたときの界面の光顕組織を示す。光顕組織から明らかのように、駆動板の板厚を厚くすることによって、波長は全体に小さくなるものの、爆薬側からアンビル側まですべての界面で均一な波状組織が得られることが解る。

Fig. 4は、Fig. 3に示した3つの場合の解析結果と波長を合わせて示す。Fig. 4から明らかのように駆動板の厚さが薄ければ衝突に伴う速度の減少が著しく、逆に駆動板が厚い場合衝突速度をほぼ均一化できることが解る。本解析によると、駆動板厚さが2 mm以上であれば衝突条件をかなり一様にする事ができる。

爆着界面の波長は、衝突に伴う運動エネルギー損失に比例することが知られている。これは衝突に伴って消費されたエネルギーのある一定割合が、波を形成する塑性仕事に使われたとする考え方に基いている。両者の比例関係の理論的根拠に関しては、Al-Hassaniら⁵⁾が詳しく報告しているので参照されたい。

この考え方をもとに、界面波の波長に及ぼす駆動板の板厚の影響を考察する。

運動エネルギー損失量(ΔKE)は次式で表される。

$$\Delta KE = \frac{1}{2} (m_{i-1} v_{i-1}^2 - m_i v_i^2) \quad (1)$$

$$= \frac{1}{2} \frac{m_{i-1} v_{i-1}^2}{m_i} \Delta m_i \quad (1')$$

ここで $i-1$ は衝突前、 i は衝突後の状態を示す。 m は単位面積当りの金属板の総質量、 v は飛翔速度、また Δm_i は衝突される金属板の単位面積当りの質量のことで、 $\Delta m_i = m_i - m_{i-1}$ である。式(1')は運動量保存則を用いて式(1)を書き換えたものである。式(1')によると、もし衝突される板の質量(Δm_i)が相対的に小さければ、 ΔKE すなわち波長も小さくなる。駆動板の質量が十分に大きければ ($m_{i-1} \approx m_i$) 波長は Δm_i に比例する。また、金属板の飛翔速度の相対的な変化も小さくなる。従って、駆動板の厚さを厚くすることによって、波状界面の波長が均一化できるものと考えられる。Fig. 4中の△印は運動エネルギー損失量を示しているが、駆動板厚さの増加に伴って、ほぼ一定の値になることが解る。

3.3 爆轟ガス圧の残存しない領域での多層爆着

Fig. 5は駆動板と第1層目の積層板との間隙を15mmとし、爆轟ガス圧の作用がほとんど無い領域で接合を行ったときの結果を示す(実験No. 4)。本実験(実験

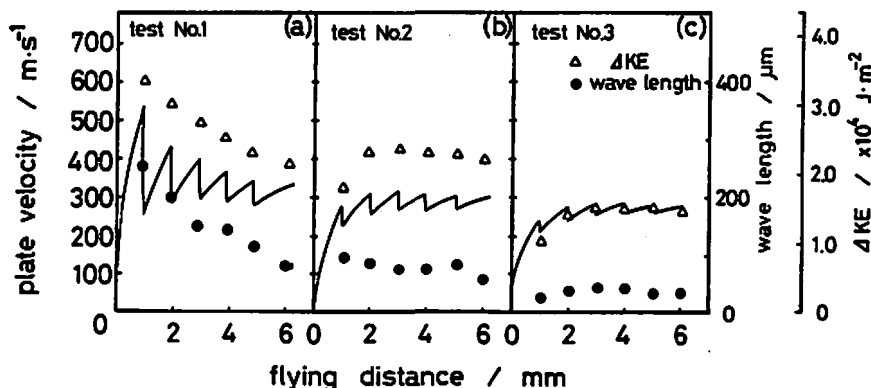


Fig. 4 Effect of driver plate thickness on the change of analytical plate velocity and kinetic energy lost in collision.

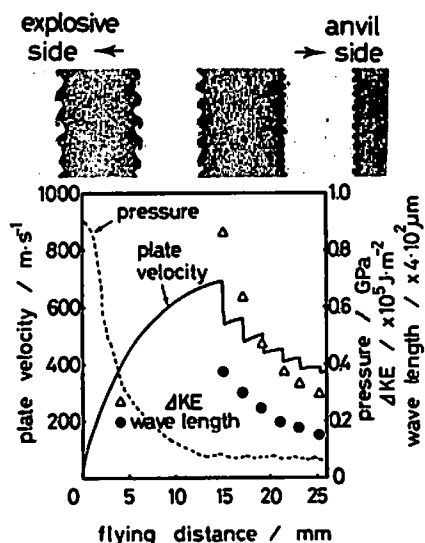


Fig. 5 Analytical results and microstructure in test No. 4.

No. 4) と次の実験(実験 No. 5) では積層板として銅と黄銅を交互に積層しているが、銅のみを用いた積層材の時と実験結果は同じであることを確認している。

この条件では、衝突後のガス圧による速度の回復はほとんど期待できず、衝突にともなう速度は急激に低下する。同様に ΔKE も減少傾向を示し、実際に得られる波長も爆薬側からアンビル側へ向かって次第に減少する。

Al-Hassani ら²⁾ はこれと類似の条件で実験を行っており、彼らの実験結果も本実験と同じように波長は爆薬側からアンビル側へ向かって減少したものと推察される。彼らの実験では、爆薬の装薬厚さは 10~15mm と本実験の 40mm と比べてかなり小さい。この場合爆轟ガス圧力の作用時間は短くなると考えられるので、本実験で明かとなったような金属板の加速の影響は現れ難かったのであろう。本実験では充填密度の低い粉末状の爆薬を用いているために、装薬厚さを大きくすることが必要であった。しかし逆にこのことは、爆轟ガス圧力の作用時間を長くすることができるという利点を有している。

3.4 爆轟ガス圧力の影響の大きい領域での多層爆着

駆動板厚さを 5 mm、各積層板の厚さを 0.3mm (5 層)、各積層板の間隙はすべて 1 mm とし、駆動板の加速の影響の大きい領域で各金属板を接合した時の結果(実験 No. 5) を Fig. 6 に示す。本実験においては駆動板と積層板の間は接合しなかったが、それより下の界面では接合が生じている。

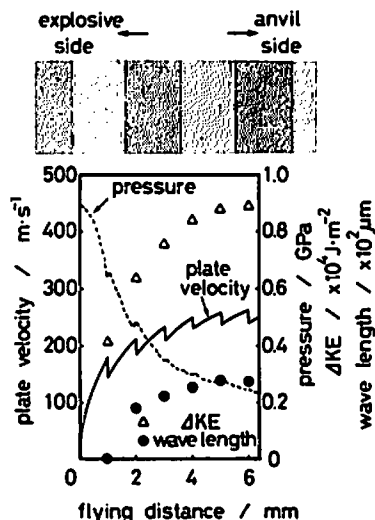


Fig. 6 Analytical results and microstructure in test No. 5.

解析結果によると、本実験条件では爆轟ガス圧力の影響が非常に大きいことを示しており、衝突速度、運動エネルギー損失ともにアンビル側へ向かって次第に増加する傾向を示す。これに伴って接合された界面の波長は、下層に行くに従って次第に大きくなる傾向を示す。

El-Sobky ら³⁾ もこれと同様の実験結果を示しているが、彼らは駆動板内に生じる塑性ヒンジが衝突点に先行して生じるため、駆動板および積層板の衝突以前に変形傾斜面が形成され、最上層より最下層で衝突角度が大きくなる可能性があることを示している。しかし著者らの一人は爆着過程における駆動板の変形を剛塑性曲げ問題として解析しており⁶⁾、塑性ヒンジは爆轟波前面からはほんの少ししか先行しないことは前報告⁴⁾した通りである。すなわち本実験結果が示すように、金属板が爆轟ガス圧力によって加速されている影響が彼らの実験においても現れたものと考えられる。彼らは多重のパイプの外側に爆薬を配置して実験を行っている。この方法では中心部に向かって圧力が収束するため、加速の効果が著しく、このために波長が次第に増大するような結果を示したのと考えられる。

3.5 積層板の板厚が異なる場合の多層爆着

Fig. 7 に駆動板厚さを 2 mm とし、0.3mm と 1 mm の厚さの積層板を交互に 1 mm の間隙で積層したときの光学顕微鏡組織を示す(実験 No. 6)。このときの接合界面には交互に大、小の波が認められる。本実験条件の解析結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8 は、衝突に伴う速度の減少が、飛翔している金属板が 0.3mm 厚の金属板に衝

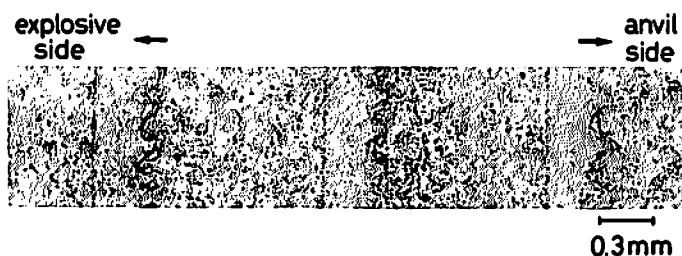


Fig. 7 Alternative wavy interfaces produced in multilayered metal plates by changing thickness of each plate (test No. 6).

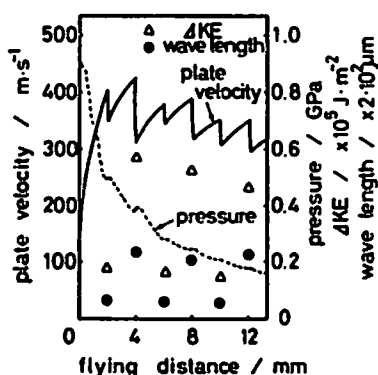


Fig. 8 Analytical results and experimental wave length in test No. 6.

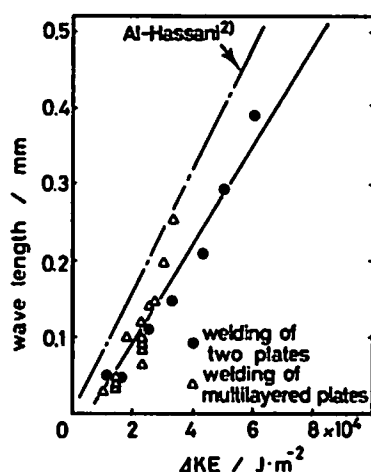


Fig. 9 Relation between kinetic energy lost in collision (ΔKE) and wave length.

突する場合に小さく、1mm厚の金属板に衝突する場合に大きく低下することを示している。本実験における衝突速度は350~440 m/sと大きな違いはないが、得られた界面の波長は飛翔している金属板が0.3mm厚のものに衝突するときと1mm厚のものに衝突するときでは約3倍ほど大きさが異なる。これは既に3.3で述べたように、波長が ΔKE に比例するという考え方を適用すると旨く説明される。すなわち駆動板の質量が十分に重ければ、 ΔKE は衝突される金属板の単位面積当りの質量に比例する((1')式)。従ってこの場合、0.3mmと1mmの金属板に衝突する場合で約3倍波長が異なることになる。

3.6 運動エネルギー損失と界面波の波長の関係

本実験における衝突に伴う運動エネルギー損失(ΔKE)と波長の関係をFig. 9にまとめて示す。図中の一点鎖線はAl-Hassaniら²¹⁾の結果で、本研究結果は彼らの結果と比較して、同一の ΔKE に対して多少小さい波長を示している。

図中の黒丸は2枚板の爆着の結果を示したものであり、図中△印で示した多層爆着材の結果とはほぼ一致する値を示している。

Fig. 9からAl-Hassaniら²¹⁾の報告と同様に ΔKE と

波長がほぼ比例関係にあることが確かめられる。この関係から、衝突に伴う運動エネルギー損失に対して波の形成に消費された塑性仕事の割合も計算が可能である(文献(5)を参照されたい)。しかしこの方法による見積りでは、波の形成に消費されたエネルギーは ΔKE の3%以下に過ぎなかった。本研究ではその理由を明らかにできなかったが、このことに関しては今後、詳細な検討が必要であると考えている。

我々は異種材料からなる積層複合材の作製も試みているが⁷⁾、得られる波状組織と衝突条件の関係については別報で報告する。

4. 結 言

多層爆着法によって得られた接合界面の波状組織の波長は爆着条件と相関があることが示され、全ての界面での衝突速度を一定にするためには、爆轟ガス圧力の作用領域で接合を行うことが重要であった。さらに均一な波状組織を得るためには、駆動板の厚さを積層板の厚さに対して十分に厚くし、積層板の単位面積当りの質量を一定にすることが重要であることが解った。

多層爆着材の接合界面に生じる波の波長は、衝突に伴う運動エネルギー損失量(ΔKE)に比例するという考え方で旨く説明された。衝突速度がほぼ一定で、積層板重量が十分に大きい場合であっても、積層板の単位面積当りの質量が異なる時には ΔKE の値が異なるので、均一な波状界面が得られない場合が認められた。しかし我々は、この様な場合でも、各積層板の間隙を調節し、衝突速度を制御することによって、波長はある程度一定に保つことが可能であると考えており、今後詳細な検討を試みたいと考えている。

最後に本研究を遂行するに当たり、熊本大学衝撃エネルギー実験所 月俣 昇氏の実験協力を得た。また旭化成工業(株)より爆薬の提供を受けた。ここに深甚な謝意を表し、お礼申し上げる次第です。

文 献

- 1) 藤田昌大, 千葉 昂, 立川逸郎; 日本金属学会会報, 20-5, 358(1982).
- 2) S. T. S. Al-Hassani and S. A. L. Salem; Proc. 7th Int. Conf. on High Energy Rate Fabrication, 208(1981).
- 3) H. El-Sobky and T. Z. Blazynsky; ibid, 100.
- 4) 藤田昌大, 千葉 昂, 福田 泉, 苅阪浩男, 馬場文章, 真鍋敏之; 工業火薬, 48-3, 176(1987).
- 5) S. A. L. Salem, L. G. Lazari and S. T. S. Al-Hassani; Int. J. Impact Engng., 2-1, 85(1984).
- 6) 藤田昌大, 清田堅吉; 塑性と加工, 24-272, 942 (1983).
- 7) 千葉 昂, 藤田昌大, 領田英機, 外本和幸; 日本複合材料学会誌, 9-3, 108(1983).

Regulation of the Wavy Interface Structure in Multilayered Explosive Bonding

by Kazuyuki HOKAMOTO*, Masahiro FUJITA*, Akira CHIBA**
RUAN Li-Qun*** and Susumu URAGAMI***

We analyzed the multilayered explosive bonding parameters by using finite differential method, and indicated the effect of the bonding parameters on the wave length in bonded interfaces.

Uniform wave structures from explosive to anvil side are obtained by regulating the following experimental conditions. (1) Place the multilayered metal plates at the region which the effect of acceleration from detonating gas pressure is appropriately large. (2) Use thick driver plate relative to the multilayered plates. (3) Keep mass of the multilayered plates per unit area constant.

It is confirmed that the wave length in bonded interfaces are proportional to the kinetic energy lost at each collision. In the case of the thickness of the multilayered plates are different, uniform wave structures are not obtained because of the amount of kinetic energy lost are not constant.

(*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kumamoto University, 2-39-1, Kurokami, Kumamoto, Japan

**Department of Materials Science and Resource Engineering, Faculty of Engineering, Kumamoto University, Kumamoto, Japan

***Graduate Student, Kumamoto University, Kumamoto, Japan)