爆発接合法による高張力鋼繊維強化金属基複合材料の 作製とその引張特性*

西田 稔**, 水口 勝志**, 安藤 和博***, 荒木 孝雄**, 兵頭 健次****

Processing of High strength Steel Fiber Reinforced Metal Matrix Composite by Explosive Bonding Method and Its Tensile Properties*

by Minoru Nishida**, Katsushi Minakuchi**, Kazuhiro Andoh***,
Takao Araki** and Kenji Hyodou****

Metal fiber reinforced metal matrix composites (FRM) which consist of the high strength ductile steel wire and aluminium or titanium foil were produced by a explosive bonding method. Strength property was evaluated by a tensile test. An optimum explosive loading (explosive mass/driver plate mass) increased with the volume fraction of fiber. For aluminium matrix composites, micrographs showed good bonding between the adjoining foils and non-bonding between the foil and the steel wire. The tensile strength of aluminium matrix composites were 80% of the value predicted by the law of mixture. For titanium matrix composites, micrographs showed both bonded and unbonded area between the adjoining foils or between the foil and the steel wire. The tensile strength of titanium matrix composites were in agreement with the value predicted by the law of mixture.

Key Words: Composite material, Explosive bonding, Explosive loading, Tensile strength, Cup and cone, Shear type fracture

1. 結 言

爆発接合法は瞬時に接合が可能であり、アルミニウムと鋼およびチタンと鋼などのように溶融接合が困難な組み合わせも可能であるため、従来よりクラッド鋼の製造によく用いられていた。この爆発接合法を応用して、金属繊維強化金属基複合材料 (FRM) の作製が一部の研究者ら^{1,2)}によって行われているが、作製における最適条件および作製法は十分に明確にされていない。そこで、本研究は、爆発接合法を用いて強さと延性を有する超高張力繊維とアルミニウムおよびチタン箔の接合を瞬時にを行い、反応生成物層の幅が極力少ない FRM の作製を試みた。本報は複合材料の作製における最適爆発接合条件を実験にて調べ、作製した複合材料の箔/箔と繊維/箔の接合状態および引張破断特性を検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材料

供試材料は、強化繊維として厚さ $0.2\mu\text{m}$ の黄銅コーティングを施した直径 $200\mu\text{m}$ 、引張強さ約 3.2GPa のスチールワイヤを、マトリックス金属として厚さ $310\mu\text{m}$ の工業用 Ti および厚さ $190\mu\text{m}$ の工業用 Al 箔を用いた。

2.2 複合材料の作製方法

複合材料の作製に際して、まず、各マトリックス金属箔とスチールワイヤを交互に積層した。その後、積層上部にドライバープレートの衝突による積層試験片の損傷

を避けるために板厚 1mm の軟鋼製緩衝材を配し、高張力鋼アンビルに固定した。繊維間隔は $400\mu\text{m}$ と $600\mu\text{m}$ とし、繊維積層数は、1, 3 および 5 とした。

爆発接合は、Fig. 1 に示すように配置した試験片を真空耐圧容器内に設置し、容器内を 1.3kPa 以下に排気した後、電気雷管の爆発により爆薬を起爆させ、ドライバープレートを積層試験片全体にほぼ平面的に高速度衝突させ、箔同士および繊維と箔の接合を瞬時に行った。なお、ドライバープレートをセットする際の初期傾斜角は、 9° とし、使用爆発は3号桐ダイナマイト、電気雷管は6号電気雷管を用いた。

ドライバープレートの飛翔速度 (衝突速度) は、ドライバープレートの単位面積当たりの爆発の質量によって表せることが知られているので、本実験での爆発接合は使用した爆薬の質量をドライバープレートの質量で除した値 (爆薬荷重と記す) R を変化させて行い、最適爆発接合条件を求めた。

2.3 引張試験方法

複合材料の引張強さは、平行部距離 30mm 、幅 5mm

Fig. 1 Inclined arrangement by inverse detonation.

*原稿受付 平成5年10月18日 平成5年度春季全国大会で発表

**正 員 愛媛大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Ehime University

***学 生 員 愛媛大学工学部 Student member, Faculty of Engineering, Ehime University

****非 会 員 トクセン工業㈱ Non-member, Tokusen Kogyo Co., LTD.

の寸法で、試験片の長手方向と繊維方向が平行になるように採取した試験片により測定した。

2.4 複合材料のミクロ観察および破面観察

複合材料のミクロ観察は光学顕微鏡を用いて行った。繊維/マトリックス界面は光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡を用いて観察を行い、引張試験後の破面観察は走査型電子顕微鏡を用いて行った。

3. 実験結果および考察

3.1 爆発接合後の外観と最適爆発接合条件

Al 基複合材料(繊維1層、繊維間隔 $400\mu\text{m}$)の代表的な外観写真を Fig. 2 に示す。爆発荷重 R が大きい場合 (Fig. 2 (a)), 即ち衝撃圧力を過大に与えると、矢印で示す箇所には繊維の長手方向の割れやそれと直角方向の箔に

Fig. 2 Photographs of Al matrix composite.

Fig. 3 Relation between explosive loading (R) and the number of stack.

損傷が認められた。爆薬荷重を適切に調整すると、Fig. 2 (b)に示すようにその外観が良好かつ平滑で、割れや損傷のない複合材料を得ることができた。本報では Fig. 2 (b)に示したような外観形状の複合材料が得られた爆薬荷重を最適爆薬荷重とした。

Fig. 3 は、最適爆薬荷重と繊維積層数の関係を示す。いずれの箔を使用しても、最適爆薬荷重は繊維積層数が増すにしたい増加した。これは、各箔と繊維にドライバープレートの運動エネルギーが消費されるためと考えられる。箔厚や密度が大きい Ti を箔に使用した複合材料の最適爆薬荷重は、Al を箔として使用した複合材料より大きい値であった。

3.2 複合材料の断面観察

Al 基複合材料の場合、Fig. 4 (a)および(b)に示すように互いに隣接する箔/箔の界面は、爆発接合特有の波状接合と平滑接合からなる、良好な接合界面であった。繊維/箔

Fig. 4 Microphotographs of cross-section in Al matrix composite.

Fig. 5 Microphotographs of cross-section in Ti matrix composite.

間の接合は、顕微鏡観察 (Fig. 4 (c), (d)) から判明できなかった。

Ti 基複合材料の場合、Fig. 5 (a)(b) に示すようにお互いに隣接する箔/箔の界面は、3～5 μm の溶融層をともなった接合界面であった。しかし、Fig. 5 (a) の矢印の位置では Fig. 5 (c) に示すように非接合部が認められた。非接合部の生成は、複合材料裏面部での高い圧縮波の反射によるものと考えられる。箔/箔間の界面を高倍率で観察すると、Fig. 5 (b) に示すように波状接合がみられた。繊維/箔の界面は、Fig. 5 (d) の矢印で示す箇所、すなわち上部の箔が繊維に衝突し、その衝突角が接合を満たす範囲内で接合が生じていた。繊維の形状は、Al 基複合材料とは異なり、爆発接合表面側では繊維が上下方向に圧縮された変形状であった。これは、衝突圧力の大きさが Al 基複合材料に比べ大きいことによると考えられる。

3.3 引張試験結果

Fig. 6 は、複合材料の繊維体積含有率 (以下、含有率と記す) と引張強さの関係を示す。図中の実線および破線

Fig. 6 Effect of volume fraction of fiber on tensile strength of composite.

Fig. 7 Fracture surfaces of composite after tensile test.

は、複合則より推定した値であり、右肩の★印は、繊維の引き抜けにより破断した試験片を示す。Al 基複合材料では、引張強さは含有率が増加すると増加する傾向があったが、複合則より推定した値より低い値であった。繊維/箔の接合は十分でないことが推察された。一方、Ti 基複合材料では、その引張強さは複合則より推察される値とほぼ一致しており、繊維/箔の接合状態が良好であり、箔と繊維間の応力伝達が行われているようであった。

3.4 破断面の観察結果

Fig. 7 は、代表的な引張試験後の試験片の外観と破断面を示す。まず、引張試験前の複合材料は、Fig. 7 (a) の X 線透過写真に示すように繊維破断は認められなかった。本実験では複合材料は、爆発接合法を採用し、製作したが、本法はスチール繊維を破断させず、また、繊維の分布も均一な複合材料を製作し得ることが分かった。Al 基複合材料では、その破断様式は 2 つに分類することができた。1 つは Fig. 7 (b) に示すように、破断が荷重方向にほぼ垂直に起こり、繊維の引き抜けが少ない場合である。また、破断面観察では、繊維は Fig. 7 (e) に示すように Cup-cone 形状で破断しており、箔/箔間は剝離を伴っていなかった。この場合、複合材料の引張強さは高く、複合則を満足していた。他の破断様式は、Fig. 7 (c) に示すように繊維の引き抜けが生じる形態であった。この場合、複合材料の引張強さが繊維と箔の摩擦に関係し、複合則から推察される値より顕著に低い値であった。

Ti 基複合材料では、Fig. 7 (d) に示すように繊維の引き抜け現象は認められず、荷重方向と約 45° の角度で、繊維と箔が同一破面上で破断していた。破面形態は、Fig. 7 (f) に示すように繊維の Cup-cone 形状とせん断形状が混在し、箔/箔間は溶融層で剝離が生じていた。

3.5 繊維の引き抜き試験結果

繊維/箔間の接合力を調べるため、繊維埋め込み長さを変化させた繊維 1 層積層試験片を最適爆薬荷重にて作製し、引き抜き試験を行った。Fig. 8 は、繊維引き抜き応力とアスペクト比 (繊維直径に対する埋め込み繊維長さの比) の関係を示す。Al 基複合材料の場合、Fig. 8 (a) に示すようにアスペクト比を大きくすると、引き抜き応力は大きくなる傾向を示し、アスペクト比が約 250 (繊維直径が 200 μm であるので、埋め込み長さは 50 mm) 以上になると、繊維破断を示した。アスペクト比が 250 以下で繊維の引き抜きを伴うが、その繊維表面を観察すると、比較的高い引き抜き応力で抜けた繊維表面は、その一部に繊維/箔界面の接合箇所が随所に認められた。Ti 基複合材料の場合、Fig. 8 (b) に示すように Al 基複合材料に比べ低いアスペクト比 (アスペクト比: 40, 埋め込み長さ: 8 mm) で繊維破断が生じた。この結果は、繊維/箔界面の接合が良好であったと判定され、引張試験結果にて複合則に従っていた事象と一致するものと考えられる。

3.6 複合材料の接合に及ぼす爆発条件の影響

本研究での繊維強化複合材料の接合過程は次のように考えられる。爆薬の爆発によって加速された Al のドライバプレートが緩衝材の軟鋼板に衝突すると Al 板と軟鋼板が一体化し飛び出し、順次下部にある箔および繊維に衝突する。この時の飛び出し速度は運動量保存則にしたがって低下する。以下、爆発接合の重要な因子である衝突速度と衝突圧力³⁾の観点から 1 考察を試みた。

まず、本実験で使用した爆薬の爆轟速度と爆薬厚さの関係を Fig. 9 に示す。爆轟速度は爆薬の厚さが 3 mm から 15 mm の間では厚さの増加にしたがって急速に増加

Fig. 8 Effect of aspect ratio on pull-out stress.

Fig. 9 Effect of explosive thickness on detonation velocity.

するが、15 mm 以上になると緩やかに増加し、25 mm 以上では爆薬の完爆状態である5500 m/s になる。本実験では、R 値を1 (爆薬厚さ: 3.8 mm) から4 (爆薬厚さ: 15.2 mm) まで広く変化させているので、その爆轟速度範囲も2260 m/s から4500 m/s まで広範囲に渡っている。

このような速度で爆轟する場合、Al 板の飛翔速度 (軟鋼板への衝突速度) V_p は、次式によって算出した⁴⁾。

$$V_p = 1.2V_D \left\{ \frac{(1+32R/27)^{1/2} - 1}{(1+32R/27)^{1/2} + 1} \right\} \quad (1)$$

ここで、 V_D は爆薬の爆轟速度、 R は爆薬荷重である。

Fig. 10 は(1)式にしたがって算出した R 値と衝突速度

Fig. 10 Effect of explosive loading on velocity of Al driver plate.

V_p の関係を示す。衝突速度は R 値1 から4 に増加すると500 m/s から2200 m/s まで直線的に増加した。もし、緩衝材の軟鋼がない場合には、2000 m/s の速度で Al 板が箔に衝突することになり、箔の損傷は激しくなるものと考えられる。したがって、本実験のように高速度爆薬を使用する場合には軟鋼の緩衝材によって、衝突速度を減じることが重要な役割となる。

爆薬の爆発により1番目の板で単位面積当たり質量 m_1 のドライバプレートが速度 V_{p1} で飛翔する場合、この駆動板が2番目の板に衝突するときの衝突圧力は次式で与えられる。

$$P_2 = \rho V_{s1} V_{p1} / 2 \quad (2)$$

ここで、 ρ は密度、 V_{s1} は1番目の板中の音速である。

また、一体化した1番目の板と2番目の板の飛翔速度は、運動量保存則より次式で表される。

$$V_{p2} = m_1 V_{p1} / (m_1 + m_2) \quad (3)$$

以下、 n 番目の板に衝突した時の飛翔速度と衝突圧力は、箔および繊維の板厚を t とすれば次式になる^{5,6)}。

$$P_{n-1} = (m_1 + m_2 + \dots + m_{n-1}) (V_{s1} t_1 + V_{s2} t_2 + \dots + V_{s(n-1)} t_{n-1}) V_{p(n-1)} / 2 (t_1 + t_2 + \dots + t_{n-1})^2 \quad (4)$$

$$V_{pn} = m_1 V_{p1} / (m_1 + m_2 + \dots + m_{n-1}) \quad (5)$$

なお、金属繊維は円柱の平均厚さの平板として取り扱った。Fig. 11 および 12 は、複合材中での衝突速度および衝突圧力の変化をそれぞれ示す。なお、これらの図は、繊維間隔400 μ m で外観上最適条件と思われた R 値について計算したものである。Fig. 11 に示した飛翔速度は、軟鋼板の板厚が1 mm であってもその密度が Al に比べて3倍程度大きいため、軟鋼板に衝突することによって Al 板の飛翔速度の35%まで大きく減速する。さらに、箔、繊維と順次衝突するにしたがって、その飛翔速度は緩やかに減速する。その減衰は板厚および密度とも大きい Ti 箔を使用した方が大きい。Ti/Ti を爆発接合する場合、板厚によってその値は異なるが、その衝突速度は200~400 m/s の範囲にあり、Ti/鋼では最小200 m/s であることが知られている⁷⁾。したがって、本研究の衝突速度はいずれの R 値においても500 m/s 以上であり、適性値より大きいようである。しかし、Ti と繊維の接合には適切な衝突速度であると考えられる。

Al 基複合材料の場合、箔/箔の接合は5層複合材料を除きほぼ適性衝突速度で生じていた。しかし、3層および1層積層材では衝突速度は低く、このため箔/繊維間の接合は不十分となり、繊維の引き抜けが起こったものと

Fig. 11 Analytical change of plate velocity.

Fig. 12 Analytical change of impact pressure.

考えられる。

衝突圧力は、Fig. 12 に示すように軟鋼によって大きく減衰した。しかし、積層試験片内では、衝突圧力は Ti 基複合材料では 5 GPa 以上、Al 基複合材料では 2.5 GPa 以上あり、Ti および Al の耐力の 10 倍以上であった。そのため、箔間の接合は十分に生じたものと考えられる。箔と繊維間の接合に関しては、Ti 基複合材料において一部分で生じていた。これは、5 GPa 以上の圧力と接合に必要な衝突角が得られたためと考えられる。Al 基複合材料においても 5 層積層材料の引張強さは複合則をほぼ満足する値が得られたが、5 層積層材料内での衝突圧力は Ti 基複合材料の 1 層積層材料とほぼ同じ値であり、Al 箔と繊維の接合がある程度生じていたものと考えられる。

4. 結 言

本研究により、以下の結果が得られた。

(1) 外観から判定した最適爆薬荷重は、Al 基複合材料の場合、箔/箔間に一部波状接合を含み、適正であったが、箔/繊維間では推定した衝突圧力からも接合には不十分であった。Ti 基複合材料の場合、箔/箔間で溶融接合を伴っていた。これは、衝突エネルギーが過剰であったためである。しかし、その爆薬荷重は箔/繊維間の接合では適正であり、接合に必要な衝突角が得られた領域では良好な接合が得られた。

(2) 複合材料の引張強さは、Al 基複合材料では、複合則から推定した値より低く、箔/繊維間の部分的な接合による応力伝達と非接合部での摩擦力も関与していた。Ti 基複合材料では、引張強さは複合則から推定される値とほぼ一致し、箔/繊維間の応力伝達が行われていた。

(3) 複合材料の引張試験後の破面形態は、Al 複合材料の場合、繊維が Cup-cone 形態であった。また、引張強さが低い複合材料は繊維の引き抜け現象がみられた。Ti 基複合材料の場合、繊維は Cup-cone 形態とせん断破面が混在していた。

参 考 文 献

- 1) A.R. Bhalla and J.D. Williams: Production of Stainless Steel Wire-Reinforced Aluminium Composite Steels by Explosive Compaction. *Journal of Materials Science*, 12 (1977), 522-530.
- 2) 千葉, 藤田, 領田, 外本: 爆発圧接法による SUS304 鋼金網/AL 系繊維複合材料の組織の熱的安定と機械的性質, *日本金属学会誌*, 52 (1988), 826-833.
- 3) B. Crossland: *Explosive Welding of Metals and Its Application*, Oxford University Press (1982), 84.
- 4) Edited by Blazynski: *Explosive Welding, Forming and Compaction*, Applied Publishers (1983), 199.
- 5) 外本, 山森, 千葉, 藤田: 多層爆着材の接合界面形状に及ぼす実験諸因子の影響, *金属学会誌*, 54 (1990), 809-814.
- 6) 伊斐, 外本, 藤田, 青柳: SUS304 鋼中間材を用いた難接合性 A508/SUS304 鋼クラッドの同時爆接, *溶接学会論文集*, 10 (1992), 101-105.
- 7) Edited by Blazynski: *Explosive Welding, Forming and Compaction*, Applied Publishers (1983), 238.