研究論文

炭素繊維強化積層複合材と金属材の細径ピンによる接合[†]守屋 一政^{*1}, 井上 寛之^{*2}, 加藤 勝義^{*2}

(2010年5月12日受付)

A Study on CFRP Composite-to-Metal Joining by Means of Dense Arrangement of Ultra Thin Pins

Kazumasa MORIYA,^{*1} Hiroyuki INOUE^{*2} and Katsuyoshi KATO^{*2}

(Received May 12, 2010)

Abstract: The adhesive layer in adhesive bonded joints can be seen as a dense assemblage of tiny adhesive bonding elements. Each element has low load transfer capacity, but its high density arrangement works smooth stress distribution, resulting in effective load transmission and high joint efficiency. In this paper, a type of mechanical joints between CFRP laminates and metal plates consisting of closely arranged ultra-thin pins is proposed. Each pin has only low shear strength, but its dense arrangement achieves high joint strength. Sharp-pointed, small-diameter pins can be pierced through B-staged CFRP laminate without cutting reinforcing fibers and inserted into pre-drilled holes in the metal plate to be joined. Since excess resin fills the gap between the pins and pin holes, the inserted pins are fixedly secured to the inner face of the hole, once the curing process is completed. A series of tensile shear tests of the proposed joint under both quasi-static and low-cycle fatigue loading conditions was carried out to investigate the possibility and feasibility of the present method. The tested joints showed both static and fatigue strength comparable to those of the base metal.

Key words: CFRP laminate, Metal, Joint, Thin diameter pin, Insertion test

1. はじめに

燃料価格の高騰に押され、炭素繊維強化複合材(CFRP)の航空機への適用が急速に拡大している。しかし、航空機や宇宙機を複合材だけで一体成形するわけにはいかず、複合材や金属材を適材適所で使い分ける必要がある。そのためには複合材と金属材との信頼できる接合技術が不可欠である。

接合にはボルトやリベットといった締結材を用いる機械接合と接合面に接着剤を塗布する接着接合がある^{1,2)}。接着接合は穿孔による強化繊維の切断や耐荷断面

積の低減がなく、応力伝達が滑らかで、継手効率が高い。しかし、耐用期限が不明確、耐熱性や耐湿性に劣る、前処理が必須、分解が難しい等の難点を持つ。一方、機械接合は信頼性が高く、分解・再組立は可能だが、繊維強化複合材への穿孔が強化繊維の切断や層間剥離を引き起こし、接合効率が金属の半分近くに低下する³⁾。

接着接合の接着層は荷重伝達能力の低い微細な接着セルの集合体と見做すことができる。セル単体の荷重伝達能力は小さいが、密な塗布によって滑らかな荷重伝達を実現する。ちなみに代表的なエポキシ系接着剤である工業用セメダイン 1500 の引張せん断接着強さはアルミ合金に対して 6 MPa、FRP に対して 12.3 MPa にすぎない⁴⁾。一方、ボルトやリベットによる機械接合は荷重伝達能力の高い締結材を疎に配置する接合法で、荷重伝達能力が大きい反面、伝達の滑らかさに欠ける³⁾。

著者は機械接合においても微細な締結材を密に配することによって接着接合のように滑らかな荷重伝達が可能だと考える。繊維強化複合材の場合、挿入する締結

[†]平成 20 年 10 月 27 日, 第 33 回複合材料シンポジウムにて一部講演。

^{*1} 防衛大学校航空宇宙工学科 教授 (239-8686 神奈川県横浜須賀町 1-10-20)

Professor, Dept. of Aerospace Engineering, National Defense Academy

^{*2} 航空自衛隊 二等空尉

First Lieutenant, Japan Air Self-Defense Force

材が細ければ穿孔に伴う強化繊維の切断も抑制される⁵⁾。

代表的な微細締結材には精密ボルトや細径ピンがある。ボルトはせん断に対する耐荷断面積が呼び径ではなく、ねじ部の谷径から算出される。径が細くなるにしたがって谷径の呼び径に対する割合が低下し、公称断面積に対する耐荷断面積の割合が減少する。ちなみに M1 および M6 ボルトの谷径はそれぞれ 0.729 mm, 4.92 mm で、谷径断面積と公称断面積の比は M6 の 0.672 に対して M1 は 0.531 と 2 割以上少ない。更に、ボルトは頭部のほかに、ナット、座金といったネジ部よりも径の大きな締結部品やこれらを締め付けるためのスペースが必要である。これに対してピンは呼び径がそのまま有効径となり、配列密度や接合効率の観点からは、径が細くなるほどピンの有利性が増す。また、ボルトは挿入前にボルト孔を穿孔しなければならない。小径のドリル刃は切刃が強化繊維を切断するだけでなく、周速度が小さいために直下の材料が押しつぶされて層間剝離を生じ、摩擦熱で母材樹脂が劣化する⁶⁾。先の尖ったピンは強化繊維を押し分け、迂回してプリプレグ内に入る。

繊維強化積層複合材は面内に比べて厚さ方向の強度が劣るため、自由縁やボルト孔といった応力集中部に針やピンを使って細径の強化材を配し、貫層方向を補強する手法が開発されている。工業用マシンを用いて縫合糸を層間に通すスティッチング⁷⁻⁹⁾、特殊な針でプリフォームをつついて上下層の繊維を互いに絡めあう Z-anchor¹⁰⁾、直径 0.2 mm から 1 mm のピンをプリプレグに刺す Z-pin¹¹⁻¹³⁾ 等が実用されている。

複合材と金属材との接合については、真空室内で金属の接着面に電子ビームによって多数の突起を微細加工して複合材との接着を補強する Comeld joint¹⁴⁾、アルミ材を特殊な液体に浸漬して表面にナノレベルの凹凸を多数形成し、凹部に樹脂を入れ込んで射出成形する NAT と呼ばれるアルミと樹脂の一体化技術¹⁵⁾が開発されている。また、ガラス繊維強化複合材 (GFRP) に関して、Matsuzaki らが樹脂含浸前のマット材に $\phi 2$ mm のボルトを挿入後、樹脂を含浸させて金属材と一体成形して接合特性を向上させる研究を行っている⁵⁾。GFRP 材は繊維が太く、繊維密度が比較的低いため、樹脂含浸前であれば繊維束を動かしてボルトを挿入できる。しかし、CFRP 材は繊維が細い上に樹脂をあらかじめ含浸させた粘着性を持つプリプレグの状態を提供されるため、ボルトの直接挿入は難しい。

上記の先行研究を踏まえ、本報では、径の細い先の尖

Fig. 1 Schematic illustration of CFRP-to-metal joint with a dense array of thin diameter pins.

ったピンを成形前の CFRP プリプレグ積層材に刺入して、刺入深さと穿刺抵抗の関係およびピンの太さが最大穿刺抵抗やプリプレグの損傷に及ぼす影響を明らかにする。次に、穿刺抵抗や損傷の小さい径のピンを CFRP 積層材とあらかじめピン孔を穿孔したアルミ合金材に基盤目状に挿通して一体成形し、接合試験片の引張せん断試験や繰返し疲労試験を行って妥当性を検証する。

2. 細径ピンの炭素繊維強化積層複合材への刺入と接合

本報では金属板と CFRP プリプレグ積層材の接合部を重ね合わせ、Fig. 1 のように先の尖った細径ピンを挿通後に一体成形して機械接合する。金属板にはあらかじめ所定のパターンでピン孔を穿孔し、同じパターンで位置付けしたテンプレートを使ってプリプレグ上からピンを挿通する。刺入部周辺の繊維配向は変化するものの、回転する切刃による穿孔を伴わないため、強化繊維の切断は抑制される。また、プリプレグからしみ出た余剰樹脂がピンと孔壁の間で接着剤として働き、ピンが自然に抜け落ちることはない。

2.1 ピンの太さと接合強度

極細のピンを用いても通常のピンと同等の接合強度が得られることを示す。幅 b 、板厚 h 、引張強さ σ_t の被接合材どうしを外径 d_p 、せん断強さ τ_s のピンを用いてシングルラップ接合した供試体を引張せん断する場合を考える。ピンの配列は引張方向に m 本、横方向に n 本の基盤目状とし、ピンを挿入する孔の直径をピンと同径の d_p とする。リベット接合の文献^{16,17)}によれば、各ピンに均等なせん断力が働くという仮定の下でピンが同時にせん

Fig. 2 Joint failure load versus total number of pins ($\phi 6.5\text{ mm}$).

Fig. 3 Joint failure load versus total number of pins ($\phi 0.5\text{ mm}$).

断破壊する引張荷重 P_s は $P_s = \tau_s m n \pi d_p^2 / 4$ と書ける。被接合材のピン孔を除いた耐荷断面積は $(b - n d_p) h$ となるので、被接合材が破断する引張荷重 P_T は $P_T = \sigma_T h (b - n d_p)$ である。

一例として板厚 $h=2\text{ mm}$ 、幅 $b=20\text{ mm}$ で引張強さ $\sigma_T=350\text{ MPa}$ と 500 MPa の板材を、せん断強さ $\tau_s=300\text{ MPa}$ のピンを縦横同数 $m=n$ の基盤目状に配置してシングルラップ接合する。ピンが同時にせん断破壊する荷重および被接合材が引張破断する荷重とピン本数の関係を $\phi 6.5\text{ mm}$ のピンと $\phi 0.5\text{ mm}$ の細径ピンを用いる場合についてそれぞれ Fig. 2 および Fig. 3 に示す。いずれの場合も本数が増えるにつれてピンの負担可能なせん断

Fig. 4 (a) Schematics of pin-insertion test setup and (b) insert pins with a conical tip angle 10° .

Fig. 5 Typical insertion force versus insertion depth curves of small diameter pins with a conical tip angle 10° .

力が増し、せん断による破壊荷重 P_s が増加する。他方、幅方向の本数を増せばピン孔の増加によって被接合材の耐荷断面積が減少し、被接合材が引張破断する荷重 P_T が低下する。ピンのせん断破壊と被接合材の引張破断が同時に起こるピン配列が最大接合強度を与える。最大接合強度は Fig. 2 に示す $\phi 6.5\text{ mm}$ のピンが 1×1 本で 9.45 kN 、Fig. 3 の $\phi 0.5\text{ mm}$ の場合が 13×13 本で 9.45 kN となり、細径ピンを用いても通常の太さのピンと同等の接合強度が得られることがわかる。

本節では説明を簡単にするために各ピンが均等にせん断力を負担すると仮定したが、ピンに働く荷重はせん断遅れによってピン列の両端で大きく、中央に向かって減少する。 P_s や P_T 式を実際に適用する場合には、せん断遅れを考慮した解析ないし実験的な検証が必要である。

2.2 ピンの太さと穿刺抵抗

ピンが細ければプリプレグへの刺入は容易だが、一本

Fig. 6 Maximum insertion force versus pin diameter.

あたりの耐荷断面積が減少して所定の接合強度に必要な本数が増す。逆にピンが太ければ本数は減るが、穿刺抵抗が増えて刺入が難しい。また太径のピンほど孔周辺の繊維配向を乱し、強化繊維を損傷する可能性が高い。そこで、外径が0.3 mmから1.4 mmの細径ピンを成形前のCFRP プリプレグ積層材に刺入する実験を行って、刺入深さと穿刺抵抗の関係を求めるとともにピンの刺入が強化繊維や母材樹脂に与える損傷を顕微鏡観察した。

試験の概要を Fig. 4 に示す。実験に用いたピンは同図 (b) に示すように直径が0.3 mmから1.4 mmの5種類で、真直なピアノ線を旋盤加工して先端を半頂角10°の円錐状に尖らせた。比較のため、先端が平面の寸胴ピンについても刺入を試みた。試験機にはJT トーシ リトル センスター LSC-1/30 を用い、 $\phi 1$ mm 以下の場合は試験機付属のロードセルを低容量の東京測器 TKA-20A (最大容量 200 N) に換装した。ピンは毎分 30 mm の一定速度で刺入し、刺入深さはクロスヘッドの移動量から読み取った。穿刺用の供試体は三菱レイヨン PYROFIL TR352H を積層構成 $[0/90]_{2S}$ および $[(0/90)_{2S}]_S$ の2通りに積層し、形状を 20×20 mm の正方形とした。プリプレグには熱電対を貼付し、室温とプリプレグ温度を $24\text{--}25^\circ\text{C}$ の範囲に調整した。

積層構成が $[0/90]_{2S}$ の場合の刺入深さと穿刺抵抗の関係およびピンの外径と最大穿刺抵抗の関係をそれぞれ Fig. 5, Fig. 6 に示す。穿刺抵抗はピンが深く刺入されるにつれて次第に増加率を増し、テーパ部が突き抜けるところで最大となる。更に刺入を続けると急激に低下する。 $\phi 1.2$ mm のピンは $\phi 0.3$ mm や 0.6 mm のピンに比べて最大穿刺抵抗が格段に大きい。ピンの外径が1 mm

Fig. 7 Front and back side appearance of laminated prepreg after removal of inserted pins (left: $\phi 0.3$ mm, right: $\phi 1.2$ mm).

を超えると穿刺抵抗が急増し、刺入が難しくなる。実験に用いた直径の範囲では先端の尖ったピンはいずれもプリプレグに刺入できたが、先端が平面の寸胴ピンは最も細い $\phi 0.3$ mm でも刺入が難しい。プリプレグに与える損傷はピンが細いほど少なく、 $\phi 0.3$ mm のピンは Fig. 7 の左のように引抜き後に痕跡が残らない程である。 $\phi 0.6$ mm のピンでは一部の強化繊維が切断されて若干の毛羽立ちが見られた。また、外径1.2 mmのピンの刺入部は Fig. 7 の右のように強化繊維の断裂や最下層の押し出しといった損傷が確認できた。

3. 接合強度試験

CFRP 積層材とアルミ合金材を細径ピンで接合し、静的引張せん断試験と繰り返し疲労試験を行って接合法の妥当性を検証した。

3.1 供試体の作製

評価用の供試体はCFRP プリプレグ積層材 (幅 20 mm, 長さ 40 mm) を目板として2枚のアルミ合金 2024 P 材 (板厚 2 mm, 幅 20 mm, 長さ 100 mm) を突き合わせ、Fig. 8 のように細径ピンを挿通して一体成形した。ピン配列は等間隔の基盤目とし、荷重の伝達経路を単純化するために二重重ね継手形式を採用した。目板のCFRP 材には三菱レイヨン PYROFIL TR352H を積層構成 $[0/90]_{2S}$ で使用した。ピンは第2章の結果を踏まえ、繊維に与える損傷が少なく入手が容易な SUS316 製の $\phi 0.3$ mm と 0.65 mm の2種類とし、ピンとアルミ材のピン孔壁との隙間をそれぞれ 0.05 mm, 0.075 mm とした。

Fig. 8 Specimen configuration and dimensions for both static and cyclic loading tests (unit: mm).

Fig. 9 Failure load versus total number of pins per one half of each specimen in quasi-static test.

CFRP 目板とアルミ合金材を重ねてそのまま一体成形すると、プリプレグの余剰樹脂が接着剤として働き、CFRP 目板とアルミ材を接着する。余剰樹脂による接着は接着層の厚さの制御や接合強度への寄与の評価が難しい。そこで、ピンのみで荷重伝達が行われるように CFRP 目板とアルミ材の接合面に厚さ 0.05 mm のテフロンシートを離型紙として挿入した。また、比較のために離型紙を挟まない供試体も作製し、余剰樹脂による接着が接合強度や破壊特性に及ぼす影響を調べた。更にピンを使わず CFRP 目板とアルミ合金材を余剰樹脂だけで接着接合した供試体も作製した。余剰樹脂による接着では、アルミ合金材の接着面を耐水研磨紙（粒度 # 240、砥材 CC）で仕上げた。

実験に使用した CFRP 材とアルミ合金材の引張強さはサンプル試験の結果、それぞれ 1,120 MPa および 503 MPa、ピンのせん断強さは $\phi 0.3$ mm が 800 MPa、 $\phi 0.65$ mm が 640 MPa であった。

3.2 静的引張せん断試験

3.2.1 静試験の概要

静的引張せん断試験は島津製作所製サーボパルサー EHF-EM100kN-20L を用い、毎分 1 mm の引張速度で供試体の破壊後も荷重が 1 kN に低下するまで負荷を続けた。荷重や伸びのほかにアルミ材や CFRP 目板のひずみ、AE を計測した。静試験に用いた供試体のピン配列は $\phi 0.65$ mm では片側につき $3 \times 3 = 9$ 本から $9 \times 9 = 81$ 本まで縦横ともに 1 本ずつ増やし、 $\phi 0.3$ mm については $12 \times 12 = 144$ 本から $14 \times 14 = 196$ 本までとした。 $\phi 0.3$ mm の供試体はピンの集積度が高く、ひずみゲージの貼付スペースがとれないため、ひずみ計測は省略した。AE は PAC 製 AE 計測システム PCI-2、変換子に NF 製 AE901U、プリアンプに PAC1220A を使用した。プリアンプのゲインは 40 dB、しきい値は 45 dB に設定し、2 個の AE 変換子を Fig. 8 のように 100 mm の間隔で供試体に取り付けた。

3.2.2 引張せん断試験結果

最大荷重とピン総数の関係を Fig. 9 に示す。縦軸上の ▽ は余剰樹脂による接着だけの結果である。 $\phi 0.65$ mm のピンでは離型紙の有無によらず、 3×3 本から 6×6 本まで最大荷重がピンの本数に比例して増加した。 7×7 本で最大荷重の平均値が 15.9 kN となり、最も高い接合強度を示した。 7×7 本以上は本数を増やすにつれて接合強度が低下した。 $\phi 0.3$ mm の供試体では 13×13 本で最大荷重の平均値が 17.6 kN となり、接合強度が最大となった。

CFRP 目板とアルミ材との間に離型紙を挿入しない供試体は $\phi 0.65$ mm のみであるが、ピンが 4×4 本の場合、離型紙を挿入した供試体の平均最大荷重が 6.3 kN に対し、未挿入の供試体は 9.1 kN と最大荷重が約 30% 高かった。ピンの数が少ない場合は余剰樹脂による接着が

Fig. 10 Load and cumulative AE hits for 7×7 specimens with and without release film.

接合強度に大きく寄与することがわかる。ピンが8×8本以上では最大荷重に離型紙の有無による差はない。しかし、7×7本以下で離型紙を挿入しない供試体は最大荷重のばらつきが大きい。成形はホットプレスで行ったが、ピンに妨げられてピン孔周辺の加圧が十分でなかった可能性がある。

Fig. 10 に $\phi 0.65$ mm, ピン配列 7×7 本の場合の荷重履歴および AE の累積ヒット数の一例を示す。図の実線は接合部に離型紙を挿入した供試体、破線は未挿入の供試体の結果である。未挿入の場合はプリプレグ樹脂の接着層が剥がれる度に荷重や AE の発生率が急変した。

本節では 2.1 節と違って各ピンが 2 面せん断を受けるため、ピンのせん断破壊荷重 P_s は $P_s = 2\tau_s mn\pi d_p^2/4$ となる。 P_s とピン数 mn の関係を Fig. 9 に破線で示す。ピン数に比例してせん断に対する耐荷断面積が増加し、せん断破壊荷重が増す。アルミ材の接合部が引張破断する荷重 P_t は 2.1 節と同様 $\sigma_t(b - nd_p)h$ となる。 P_t とピン数の関係を Fig. 9 に一点鎖線で示す。ピン数が増すにつれてアルミ材の耐荷断面積が減少し、破断荷重が低下する。実験結果はほぼこれらの直線や曲線に乗っており、せん断遅れによる応力集中を無視して各ピンが均等に荷重を負担すると仮定した計算結果に近い。また、ピンの密集度が高い場合には P_t を上回る実験結果が得られている。

3. 2.3 接合部の破壊

ピンの総数ないし配列密度によって破壊様相が CFRP 目板の脱落とアルミ合金材の破断の 2 通りに分かれた。前者はせん断によるピンの曲げと緩みで CFRP 目板が剥がれて脱落し、後者はアルミ合金材が接合部の

Fig. 11 Micrograph of a section cut along a pin hole in specimen failed in static loading test (left: $\phi 0.3$ mm, right: $\phi 0.65$ mm).

Fig. 12 Number of AE hits with amplitude above 80 dB in static tensile shear test.

末端で横一列に引張破断した。

$\phi 0.65$ mm のピンの場合、6×6 本以下では離型紙の有無によらず全ての供試体が目板の脱落で破壊した。7×7 本では大部分がアルミ合金材の破断で破壊し、8×8 本以上では全ての供試体がアルミ合金材の破断で破壊した。 $\phi 0.3$ mm のピンでは、ピン数の最も少ない 12×12 本で、離型紙を挿入した供試体は目板が脱落して破壊し、離型紙を挿入しない供試体はアルミ材が破断した。13×13 本以上ではアルミ材がピン孔外列で横一列に破断した。目板が脱落する荷重はピンのせん断破壊荷重 P_s にほぼ一致している。アルミ合金材が引張破断した供試体のピン孔内部の顕微鏡写真を Fig. 11 に示す。右の $\phi 0.65$ mm では切断された強化繊維がピン孔内部に押し込まれている。押し込まれた繊維の長さは約 0.6 mm でピンの直径に近い。一方、左の $\phi 0.3$ mm のピン孔内部には切断された繊維が見当たらない。

強化繊維の破断に起因するとされる振幅 80 dB 以上の AE¹⁸⁾ の破壊までの累積ヒット数とピン数の関係を Fig. 12 に示す。縦軸上の▽はピンを用いず余剰樹脂によ

る接着のみの場合で、80 dB 以上の AE の破断までの累積ヒット数は 100 前後にまとまっている。 $\phi 0.3$ mm の供試体は $\phi 0.65$ mm に比べて 80 dB 以上の高振幅 AE の発生数が少なく、ピン数が 13×13 本以上で離型紙を挟まない供試体では 10 から 200 で、余剰樹脂による接着のみの場合に近い。 $\phi 0.65$ mm、 $\phi 0.3$ mm いずれも離型紙の有無によらずピン本数の増加とともに高振幅 AE の累積ヒット数が減少する。 $\phi 0.65$ mm の累積ヒット数にはばらつきがあるが、 $\phi 0.3$ mm ではばらつきもヒット数も少ない。ピンの径が細くなるにつれ、また、ピンの配列密度が増すにつれて強化繊維の破断が抑制されることが分かる。

3.3 繰返し疲労試験

3.3.1 繰返し疲労試験の概要

引張せん断試験で最も高い接合強度を示したピン配列で繰返し疲労試験を行った。 $\phi 0.65$ mm のピンは 7×7 本の配列で CFRP とアルミ合金材との間に離型紙を挟んだ供試体と挟まない供試体、 $\phi 0.3$ mm のピンについては 13×13 本で離型紙を挟んだ供試体についてそれぞれ 5 本ずつ疲労試験を実施した。

試験機には島津製作所サーボパルサー EHF-EM100kN-20L を用い、負荷は 10 Hz の正弦波、応力比 0.1 の片振りで、最大荷重を 4 kN から 14 kN まで 2 kN 刻みで変化させた。試験中は荷重や変位振幅の他に CFRP 目板のひずみ、AE を計測した。 $\phi 0.3$ mm のピンを用いた供試体は静試験の場合と同じ理由でひずみ計測を省略した。AE の計測はセンサに軽量で薄型の PAC S9220 を採用したほかは静試験と同じ設定で行った。

3.3.2 繰返し疲労試験結果

最大荷重と最終破壊までの繰返し数の関係を Fig. 13 に示す。最大荷重が最も小さい 4 kN の場合、15 本の供試体中 12 本は繰返し数が 10^6 回に達しても破壊しなかった。この時、接合部のアルミ合金材に働く最大引張応力は $\phi 0.65$ mm のピンでは 139 MPa、 $\phi 0.3$ mm のピンでは 135 MPa で、使用したアルミ合金材 2024P の疲れ強さの公称値 140 MPa に近い。

10^6 回未達で最終破壊した 3 本の供試体は $\phi 0.65$ mm で離型紙を挟んだ供試体と挟まない供試体および $\phi 0.3$ mm の供試体の各 1 本である。これらはピンを所定の位置に垂直に刺入するための位置付け用テンプレートを使い回して最後に作製した供試体である。供試体を一本作製する度にアルミ合金製テンプレートのガイド孔に付着したエポキシ樹脂を除去する作業を繰り返すため、次第にガイド孔が変形ないし拡張した。ガイド孔と被接合材

Fig. 13 Maximum load versus number of cycles to failure in cyclic loading fatigue test.

にあらかじめ穿孔してあるピン孔の位置が僅かにずれて、一部のピンが曲がって挿入され、ピンの荷重負担に偏りを生じて低荷重域における疲労特性が低下したと思われる。テンプレートの材料をアルミから鋼に変更し、新たに供試体を 3 体ずつ作り直して再実験した結果、全ての供試体が破壊することなく打ち切り繰返し数 10^6 回に達した。小径ピンの密植による機械接合は、接合する金属材料そのものの公称疲れ強さに近い接合強度を実現する。

破壊までの繰返し数に離型紙の有無による差はほとんど見られない。しかし、離型紙を挟んだ供試体は目板の脱落やピン抜けがなく、全てがピン孔末端におけるアルミ材の破断で破壊した。離型紙を挟まずに余剰樹脂による接着を許容した供試体は、一部が目板の脱落で破壊した。最大荷重が 10 kN の場合の繰返し数と変位振幅の関係を Fig. 14 に示す。離型紙を挟んだ供試体は試験開始から最終破壊まで変位振幅がほぼ一定である。離型紙を挟まない供試体は挟んだ供試体に比べて初期の変位振幅は小さいが、余剰樹脂による接着が剥がれる度に変位振幅が急増し、最終破壊に近づくにつれて振幅の差はなくなる。 $\phi 0.3$ mm については離型紙を挟んだ供試体のみであるが、変位振幅は $\phi 0.65$ mm の場合とほとんど差がない。また、Fig. 13 を見ると最大荷重が 6 kN と 14 kN で破壊までの繰返し数が $\phi 0.3$ mm の方が $\phi 0.65$ mm より僅かに大きい。他の設定荷重では両者に差は見られない。

疲労試験で破壊した $\phi 0.3$ mm の供試体の写真を Fig. 15 に示す。アルミ合金材が接合部末端で横方向に破断している。末端近くのピン配列を中央に比べて密にした

Fig. 14 Variation of displacement amplitude during cyclic loading fatigue test with maximum load 10 kN.

り、被接合材の板幅や板厚を端部に向かって漸減するなど、せん断遅れによる応力集中を考慮した継手様式の最適化によって疲労特性を更に向上させることが可能と思われる。

4. お わ り に

炭素繊維強化複合材の接着接合は穿孔による強化繊維の切断がなく、高い接合効率を得られる反面、前処理、温度特性、耐久性に難がある。接着接合の接着層は荷重伝達能力の低い微細な接着セルを密接させた集合体と見做し得る。機械接合においても微細な締結材を密に配することによって接着接合のような高い接合効率が期待できる。本報では微細なピンによるCFRP積層材とアルミ合金材との接合を試み、引張せん断試験や繰返し疲労試験を行って妥当性を検証した。径の細いピンは強化繊維を切断することなく積層したCFRPプリプレグに刺入できる。本研究で得られた知見は以下の通りである。

(1) 先端を半頂角 10° に尖らせた外径の異なる細径ピンを成形前のCFRPプリプレグ積層材に刺入し、穿孔抵抗や損傷を明らかにした。ピンが深く刺入されるにつれて穿孔抵抗が増大し、先細部が突き抜ける際に最大となる。更に刺入を続けると穿孔抵抗は急減する。ピンの外径が1 mmを超えると穿孔抵抗が急増し、刺入が難しくなる。

刺入試験で穿孔抵抗やプリプレグに与える損傷が小さい $\phi 0.3$ mm および $\phi 0.65$ mm の細径ピンを基盤目状に配列してCFRP積層材とアルミ合金材を二重継手形式で接合し、評価用の供試体とした。

Fig. 15 Joint failure after fatigue testing. Most specimens failed in the row closest to the edge (upper figure); some specimens failed in the rows closest to and next-closest to the edge (lower figure).

(2) 引張せん断試験ではピンの本数が少ない供試体はピンがせん断で曲がり、CFRP材の目板が脱落して破壊した。ピンの本数を増すと破壊荷重が本数に比例して増加した。ピン数がある値を超えると、ピン孔の増加によってアルミ材の耐荷断面積が減少し、接合部末端のピン孔に沿ってアルミ材が破断した。いずれの場合も破壊荷重の実測値は各ピンが均等に荷重を負担すると仮定した計算値に近い。ピンのせん断曲げによる破壊とアルミ材の引張破断の条件が同時に満足されるピン配列で接合強度が最大となった。

破壊荷重は使用したアルミ合金2024P材の引張破壊荷重の公称値をも上回った。また、径の細い $\phi 0.3$ mm のピンを用いた方が $\phi 0.65$ mm のピンに比べて接合強度が高かった。試験後の顕微鏡観察では $\phi 0.65$ mm のピンは強化繊維の一部を切断してピン孔内部へと押し込んでいたが、 $\phi 0.3$ mm のピンは繊維の損傷がほとんど見られなかった。接合面に離型紙を挟んでプリプレグ樹脂による接着を抑えた供試体の方が挟まない供試体に比べて破壊荷重のばらつきが少なかった。強化繊維の破断に起因するとされる80 dB以上のAEの累積ヒット数はピン本数の増加とともに減少し、ピンの配列密度を増すことによって最終破壊までの強化繊維の破断が抑制されることが分かった。

(3) $\phi 0.3$ mm および $\phi 0.65$ mm のピンについて静試験で接合強度が最大となったピン配列で繰返し疲労試験を行った。接合面に離型紙を挿入した供試体は全てア

ルミ合金材の破断で最終破壊したが、未挿入の供試体は一部がピンのせん断曲げに伴う CFRP 材目板の脱落によって破壊した。最大荷重が 4 kN の時に繰り返し数が 10^6 回に達するようになったが、この時アルミ材に働く最大引張応力は 140 MPa で、実験に用いた 2024P 材の疲労強さの公称値に概ね一致した。

ピンの位置付けが悪く、一部のピンがアルミ材に曲がって挿入された供試体では荷重負担に偏りが生じ、低荷重域での疲労特性が低下した。

本研究では炭素繊維強化積層複合材とアルミ合金材との細径ピンによる接合の技術的な可能性を示したが、(1) せん断のほかに曲げが作用する一重継手形式での検証、(2) CFRP 材が引張破断する場合の検証、(3) ピン形状の最適化による穿刺抵抗の低減、(4) せん断遅れによる応力集中を考慮したピン配置や継手形状の最適化、(5) 金属板に開けるピン孔とピンとのクリアランスの最適化、(6) ピン挿通後にピンの先端を潰してフランジ化する手法の開発、(7) 複数のピンを配したテンプレートを超音波加振することによる高精度な位置付けと刺入作業の効率化などが今後の検討課題である。

参 考 文 献

- 1) 百島祐忠, 福田 博: 複合材料の加工技術, 冬樹社 (1989), pp. 57-75.
- 2) F.L. Matthews (ed.): *Joining Fibre-Reinforced Plastics*, Elsevier, London (1987), pp. 9-64, 271-311.
- 3) L.J. Hart-Smith: *Engineered Materials Handbook* (Vol. 1), ASM International, Ohio (1987), pp. 479-495.
- 4) <http://www.cemedine.co.jp/product/industry/epoxy.html>
- 5) R. Matsuzaki, M. Shibata & A. Todoroki: *Composites Part A*, **39** (2008), 154-163.
- 6) I. Singh & N. Bhatnagar: *Int. J. Adv. Manufacturing Technology*, **27**, 9-10 (2006), 877-882.
- 7) J.W. Sawyer: *AIAA J.*, **23**, 11 (1985), 1744-1748.
- 8) K. Dransfield, C. Baillie & Y.W. Mai: *Compos. Sci. Technol.*, **50**, 3 (1994), 305-317.
- 9) A.P. Mouritz & B.N. Cox: *Composites Part A*, **31** (2000), 1-27.
- 10) 加藤哲二, 岩堀 豊, 山田 健, 石橋正康, 福岡俊康, 石川隆司, 邊 吾一: 第 46 回構造強度に関する講演会講演集 (2004), pp. 143-145.
- 11) A. Crosky, D. Kelly, R. Li, X. Legrand, N. Huong & R. Ujjin: *Compos. Struct.*, **76**, 3 (2006), 260-271.
- 12) I.K. Partridge & D.D.R. Cartie: *Composites Part A*, **36** (2005), 55-64.
- 13) A.P. Mouritz: *Composites Part A*, **38** (2007), 2383-2397.
- 14) E. Keller & F. Smith: *Joining Plastics 2006* (2006), Paper 10, 1-10.
- 15) <http://taiseiplas.typepad.jp/blog/NAT.html>
- 16) 島田静雄: 鋼構造物設計 (リベット構造), <http://www.nakanihon.co.jp/gijyutsu/Shimada/Rivet/Index.html> (2001).
- 17) G.L. Kulak, J.W. Fisher & J.H.A. Struik: *Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints* (2nd Ed.), AISC, Chicago (2001), pp. 99-147.
- 18) J. Awerbuch, M.R. Gorman & M. Madhudar: *Materials Evaluation*, **43**, 6 (1985), 754-764.