

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

複合材せん断機械継手の力学挙動および初期損傷モニタリング

佐藤 裕, 宇都宮 登雄, 高戸谷 健, 薄 一平

2008年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

複合材せん断機械継手の力学挙動および 初期損傷モニタリング

佐藤 裕*¹, 宇都宮 登雄*², 高戸谷 健*¹, 薄 一平*¹

Monitoring of Mechanical Behaviors and Early Stage Damage on Composite Shear Fastener Joint

Yutaka SATO*¹, Takao UTSUNOMIYA*², Takeshi TAKATOYA*¹ and Ippei SUSUKI*¹

Abstract

In a structural material of the aircraft, the proportion of composite materials keeps rising more and more because of their excellent properties on specific strength and rigidity. The part where a metallic material is connected to the composite material increases by such circumstances, and how a structural integrity in such a place is secured becomes an important problem. From the point of view, a principle of a method to monitor the mechanical and damage behaviors using axial strain in fastener bolt was proposed. In this paper, we actually made the fastener with an optical fiber sensor embedded in the shank of a titanium bolt, and applied it to the composite/titanium mechanical shear joint specimens to prove the function of it through the tensile tests. The results are summarized as follows; (1) proposed monitoring method is well available to monitor the load transfer mode around the fastener hole, (2) we can detect the damage by the change of inclination in the relationship between load and axial strain measured by the fastener bolt, and (3) it was shown that the early stage of damage of composites around the fastener hole can be detected by using the fastener bolt.

概 要

重量の軽減が厳しく求められる航空機の構造材料として、比強度と比剛性に優れた複合材の適用率がますます増加している。それに伴って、複合材と金属の接合部も増加してきており、このような複合材/金属の接合部の健全性の確保をいかに行うかが重要な課題となっている。このような背景のもと、著者らは、先に複合材/金属せん断機械継手の力学挙動モニタリング手法として、ファスナボルト内部のひずみを用いる方法を提案した。本研究では、光ファイバセンサを埋め込んだボルトを実際に作製し、金属/チタン合金せん断機械継手の引張り破壊試験に使用して、この力学挙動のモニタリング方法の有効性を実験的な面からの検証する。得られた結果は、以下の通りである。(1) 提案した方法は、ファスナ孔周りの荷重伝達機構などをモニタリングする方法として有効である。(2) 光ファイバセンサ埋め込みボルトの出力と荷重の関係に現れる折れ曲がりによって、ボルト孔周りの複合材の初期損傷を検出することが可能である。(3) 光ファイバセンサ埋め込みボルトによって検出した損傷は、複合材表面に貼付したひずみゲージの出力では検出できない初期段階のものである。

* 1 総合技術研究本部 構造技術開発センター (Structure Technology Center, Institute of Aerospace Technology)

* 2 芝浦工業大学 (Shibaura Institute of Technology)

1. 緒 言

航空機は構造重量の軽減を厳しく求められることから、構造材料として比強度と比剛性に優れた複合材の適用率が年々増加の一途をたどっている⁽¹⁾。これに伴い、従来の金属同士の接合に加え、複合材と金属の適切な接合構造様式のありかたや、その健全性の確保をいかに行うかが重要な課題となっている。複合材と金属の接合には、可換性、保守性の面で有利なファスナ結合が採用されることも多いが、長年の研究と経験を有する金属継手と比較して経験が浅く⁽²⁾⁽³⁾、その強度評価の手法を確立するためには、力学挙動や損傷特性を十分に解明することが必要と考えられる。

このような背景のもと、著者らは、先に複合材と金属をボルト締結した重ね合わせ機械継手を対象として、ボルトの締め付けによる面外方向の拘束力の影響も考慮した力学挙動モニタリングの手法として、ボルト内部のひずみを用いる方法を提案した。そして、この複合材/金属の機械継手の力学モデルと有限要素シミュレーションを通して、ボルト内部の適当な位置におけるひずみをひずみセンサ等で計測することによって、ファスナ部における摩擦力やボルト軸部が受ける面圧が直接測定できることを主に原理的な面から示した⁽⁴⁾。

本研究では、センサを埋め込んだボルトを実際に作製し、その基本特性の評価を行った後、これを複合材と金属の機械継手供試体に適用した引張り試験を行う。そして、継手に加わる負荷とセンサの出力の関係をもとに、提案した力学挙動のモニタリング方法の有効性を実験的な面からの検証する。さらに、金属/複合材せん断機械継手の引張り破壊試験を行い、複合材に起こる面圧破壊を対象として、スマートボルトの軸方向ひずみと引張り荷重の関係から、ボルト孔周りの初期損傷を検出できることを示す。また、このスマートボルトを用いた本方法は、ボルト周辺の複合材表面に貼付したひずみゲージの出力の変化による方法よりも初期段階の損傷を検出できることも示す。

2. 光ファイバひずみセンサ埋込み型ボルト

本章では、はじめに本研究で用いる光ファイバひずみセンサについて述べ、さらにセンサ埋め込みボルトの作製法および基本特性について説明する。

2.1 光ファイバひずみセンサ

図1に、本研究で使用した光ファイバひずみセンサであるファブリー・ペロー干渉計型光ファイバ (Extrinsic Fabry-Perot Interferomet, FISO 社) の基本構成を示す⁽⁵⁾。

このセンサは、一本のマルチモード光ファイバの中間に半透鏡を挟んだ形に構成されたもので、この半透鏡と鏡になったファイバの端面との間がセンサ部になっている。半透鏡で反射された光と、端面から出た残りの光の光路差により、それらが重ると干渉を起こす。このとき、センサから干渉によって生じた干渉縞に相当する出力が得られ、この縞の数あるいは位相からひずみを決定することができる。ファブリー・ペロー干渉計型光ファイバひずみセンサは、センサに垂直な方向の変形の影響を受けにくく、センサ軸方向のひずみを正確に評価することが期待できる⁽⁶⁾。またセンサの出力は、センサ軸方向とせん断ひずみを同時に受けても、せん断ひずみの影響を受けにくく、電気抵抗ひずみゲージで測定した (センサ軸方向の) 値とほぼ同じ結果を得ている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

2.2 センサ埋め込み位置の検討

ボルトへの光ファイバセンサ埋め込み深さを決定するために、ボルトで締結した複合材とチタン合金の重ね合わせ機械継手 (具体的な継手の形状は後に示す図7等を参照) の引張り試験に対する有限要素シミュレーションを行い、ボルトの軸方向のひずみ分布を調べた。この解析では、継手形状および負荷荷重の対称性を考慮して実際の継手の1/8を対象とした。図2に、解析モデルを示す。継手に使用するボルトは、チタン合金製NAS 6405-13とした。解析に使用した要素は6面体8接点要素であり、総接点数は1974、総要素数は1308である。

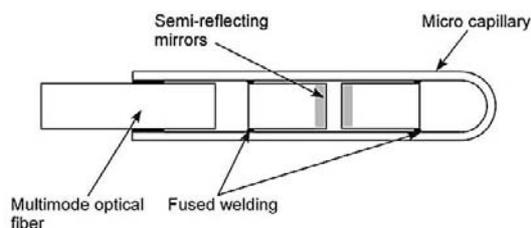


図1 ファブリー・ペロー干渉計型光ファイバひずみセンサ概略

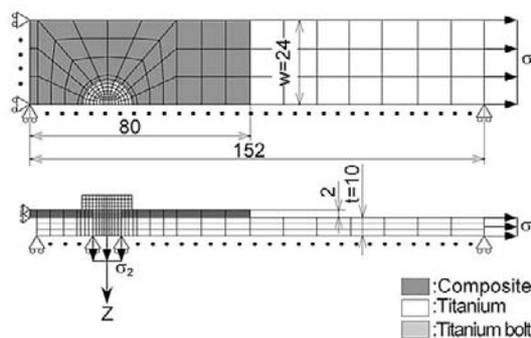


図2 複合材/チタン合金機械継手の有限要素解析モデル

チタン合金の材料定数としてヤング率 $E = 110 \text{ GPa}$, ボアソン比 $\nu = 0.3$ を用い, 複合材は等方性の線形材料と仮定して, その材料定数は $E = 60 \text{ GPa}$, $\nu = 0.3$ とした. ボルトの締付けトルクは 9 Nm で一定とし, このときボルトにかかる引張り荷重は, ボルトの締付けトルク T と引張り荷重 Q の関係式⁽⁹⁾ である次式を用いて求め, 5 kN とした.

$$Q = \frac{2T}{\frac{\mu_s}{\cos \alpha} d_2 + \frac{p}{\pi} + d_3 \mu_w} \quad (1)$$

ここで, $p, d_2, d_3, \mu_s, \mu_w$ および α は, それぞれボルトのピッチ, ボルトの有効径, ボルト座面の径, ねじ面摩擦係数, ボルト座面の摩擦係数およびねじ山半角であり, $\alpha = 30^\circ$, $\mu_s = \mu_w = 0.16$ とした. ボルトにかかる引張り荷重 (5 kN) を模擬して, ボルト断面の引張り応力 σ_2 は 100 MPa と一定とした. また, 継手の引張り荷重は $0, 10, 20, 30 \text{ kN}$ の4種類変化させ, チタン合金の板厚部分に $\sigma_1 = P / (w \cdot t)$ の応力が加わるようにした. チタン合金板, チタン合金ボルトと複合材間で生じる摩擦係数については, 実際の摩擦係数を測定することは困難であったため, 摩擦係数 μ を 0.3 とし解析を行った. 解析は, 解析汎用コード ABAQUS 6.3 を用いて, 3次元接触問題として行った.

図3に, 解析結果の例として, ボルト中心軸上のひずみとボルト頭部からの深さ Z の関係を示す. 光ファイバセンサは, ボルトの中心軸上に埋め込まれるためボルトの中心軸上のひずみを用いている. この図より, 深さが $5 \sim 8 \text{ mm}$ (複合材とチタン合金板の境界部付近) の範囲で, 継手の引張り荷重の変化に対するひずみ出力の差が顕著に現れていることがわかる. したがって, 今回のセンサボルトを継手に使用し, 複合材の厚みが 2 mm の場合, ボルト頭部からほぼ 7 mm 程度の位置に光ファイバセンサのセンサ部があれば, 継手に加わる引張り荷重に対してセンサボルトの軸方向の出力変化に敏感に検出すること可能と考えられる. また, ボルト軸方向のひずみ値の差は, 深さが $5 \sim 8 \text{ mm}$ 以外の領域では急激に小さくなっており, 光ファイバひずみセンサをボルトに埋め込む際にはセンサ部を正確な位置に埋め込む必要があることに注意したい.

2.3 センサ埋め込み型ボルトの作製

前項で検討した光ファイバひずみセンサの埋め込み位置を参考に, 実際にセンサ埋め込みボルトを作製した. 図4 (a), (b) に, それぞれ, 作製したセンサ埋め込みボルトのボルト部概観, ボルト形状および寸法を示す. ボルトはチタン合金製 NAS 6405-13 であり, 作製方法は以下の通りである. すなわち, 旋盤加工により, はじめに

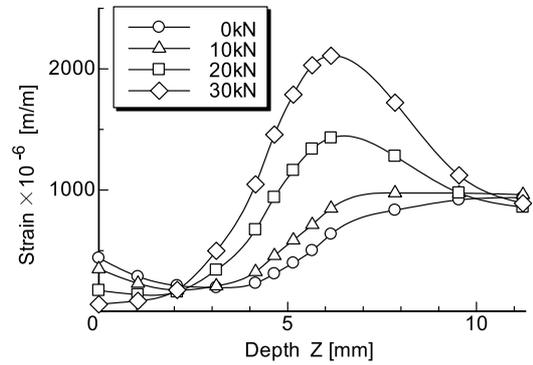
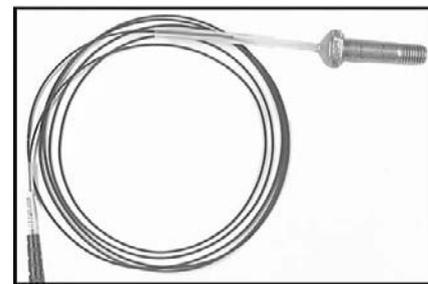
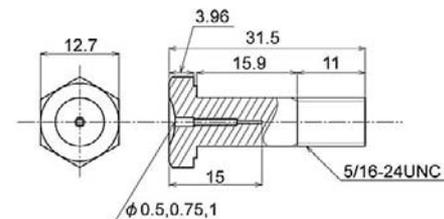


図3 ボルト中心軸上のひずみ分布



(a) ボルト部外観



(b) ファイバセンサ埋め込み用の穴加工を施したボルト
図4 スマートボルト

ボルトの中心軸に径が 1.0 mm でボルト頭部からの深さ約 3 mm の穴を, その後, 径が 0.75 mm の穴を深さ約 10 mm の位置まで, 径が 0.5 mm の穴を深さ約 15 mm の位置まで開けた. 続いて, 継手に使用するチタン合金板と耐熱複合材との境界にあたるボルト頭部から 7.5 mm の位置に光ファイバセンサのセンサ部がくるように挿入し, エポキシ系熱硬化性樹脂 A-2 (東京測器) を充填した. その後, 140°C で4時間キュアリングして光ファイバを埋め込んだ. センサ埋め込みボルトは2本 (以後 bolt 1, bolt 2 と記す) 作製した. また, この光ファイバひずみセンサを埋め込んだ, センサ機能を有するボルトを以後スマートボルト (Smart bolt) と呼ぶものとする.

2.4 スマートボルトの引張り特性

スマートボルト内部の光ファイバひずみセンサの出力を確認するため, ボルトに発生するボルト軸方向の引張り荷重を模擬した引張り試験を行った. 図5に, 試験状況を示す. この試験では, 先にボルトの締め付けトルクから求めた引張り荷重である 5 kN までボルトに負荷し, ボルト内部の光ファイバセンサの出力を確認した. 試験

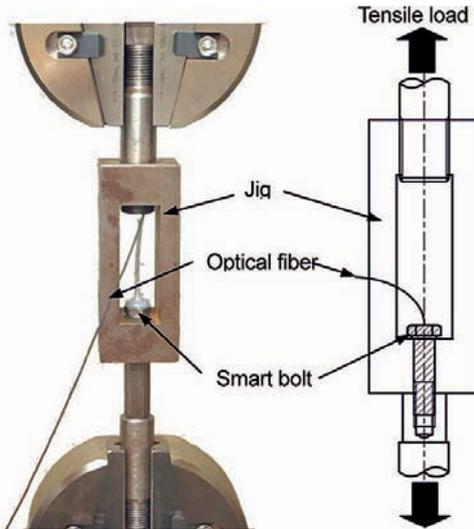


図5 ボルト軸方向の引張り試験状況

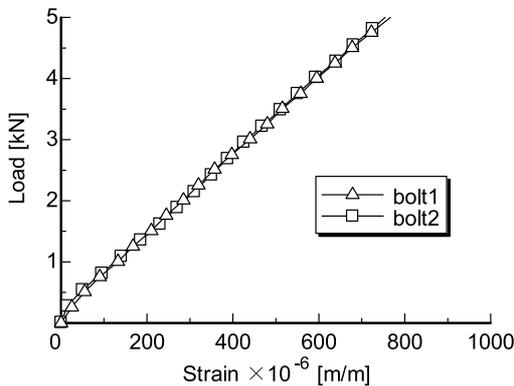


図6 引張り荷重とスマートボルト出力の関係

には、負荷容量9.8 kNのインストロン型引張り試験を用い、クロスヘッド相対速度1 mm/minで静的に引張り荷重を負荷した。

図6に、bolt 1, bolt 2に対して得られた負荷荷重とスマートボルトの出力（ひずみ）の関係を示す。この図より、2本のスマートボルトの荷重とひずみの関係に線形性が表れており、それら傾きはほぼ一致していることがわかる。傾きが同じであることは、2本のボルトのセンサ部埋め込み深さがほぼ同じであることを示している。また、荷重とひずみの関係が線形性を現していることから、ボルト、樹脂、センサは完全に接着していると考えられる。

3. スマートボルトを用いた力学挙動・損傷モニタリング法

本章では、スマートボルトを図7に示すような金属/複合材の継手試験片に用い、この継手試験片に引張り荷重を加えた場合に起こるボルトの力学挙動および複合材のボルト孔周りの損傷を検出する機構について解説する。なお、この継手試験片では、スマートボルトはチタン合

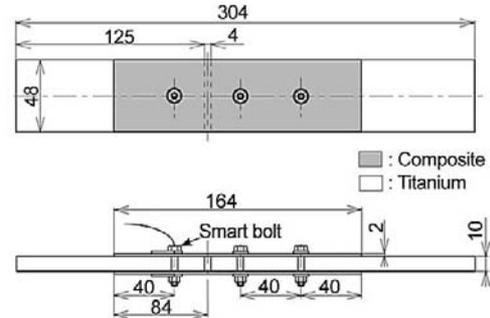


図7 2点1点複合材/チタン合金機械継手試験片

金と複合材を1本で締結している側のボルトとして用いている。図8は、図7の継手試験片に引張り荷重を加えた場合に予想される、荷重とスマートボルト内部の光ファイバセンサで測定したボルト軸方向ひずみとの関係を模式的に示したものである。スマートボルトは、継手試験片に取り付けられる際には、図9に示すような締め付けトルクによる初期ひずみが発生する。この初期ひずみは、図8にInitial strainで示したボルト軸方向の一樣なひずみに対応する。その後、継手試験片に引張り荷重を負荷すると、負荷後のスマートボルトの出力は、図8のように3つの領域（Region I, II, III）にわけることができる⁽⁴⁾。

領域Iは、図10に示すように、引張り荷重はボルトの締め付けにより生じた金属と複合材間に発生する摩擦力によって支えられ、ボルトには変形はほとんど現れず、締め付けトルクによる初期ひずみのみがスマートボルトの出力となる領域である。したがって、引張り荷重は増加するが、ひずみがほとんど変化しない。領域IIでは、摩擦力による金属と複合材の固着が解け、金属と複合材間にすべりが生じ、ボルト軸部が金属と複合材に接触するようになる。したがって、図11に示すように、ボルトにせん断力がかかるようになり、ボルトの金属と複合材の接触部近傍で局所的に伸びが生じ、ボルト軸方向ひずみが徐々に増加し始める。さらに、領域IIIでは、完全に荷重の伝達機構が、ボルトと金属、ボルトと複合材のせん断荷重によるものに完全に遷移し、ボルト内部の軸方向ひずみが負荷の増加に比例して増加するようになる。

そして、さらに負荷が増加すると、締結ボルトにより複合材に加わる面圧によって面圧破壊を起こすことが知られている。図12に示すように、この面圧破壊にともなって複合材は面外方向の変形を引き起こし、ボルトの軸方向の伸びがさらに顕著に増加すると考えられる。そのため、図8に破線で示したように、継手試験片の引張り荷重に対してボルト内部の軸方向のひずみが急激に増加すると考えられ、この引張り荷重とボルト軸方向ひずみの傾きの変化によって複合材の損傷発生の有無が検出できるものと考えられる。したがって、継手試験片にかか

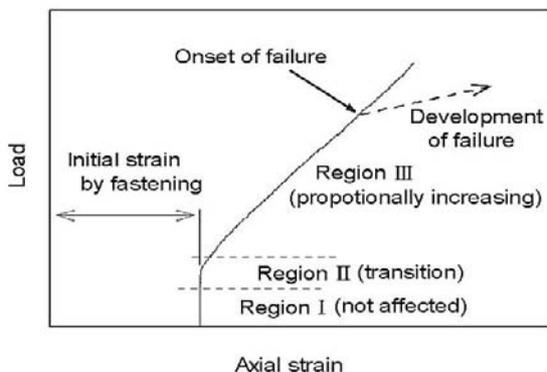


図8 継手の引張り荷重とスマートボルト出力の関係の概念図

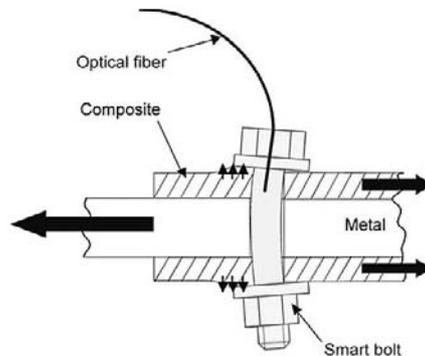


図12 複合材の面厚破壊

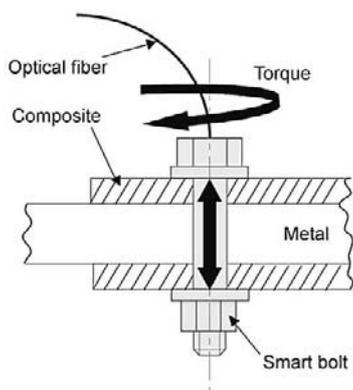


図9 締め付けトルクによる一様な初期ひずみ

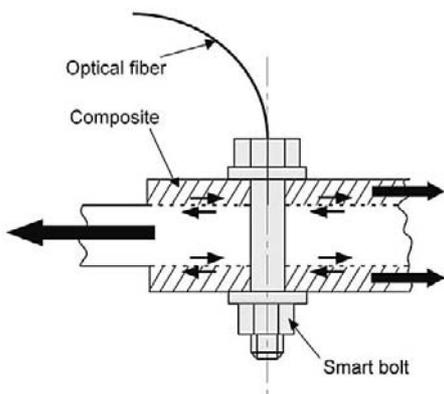


図10 金属と複合材間に作用するせん断摩擦力

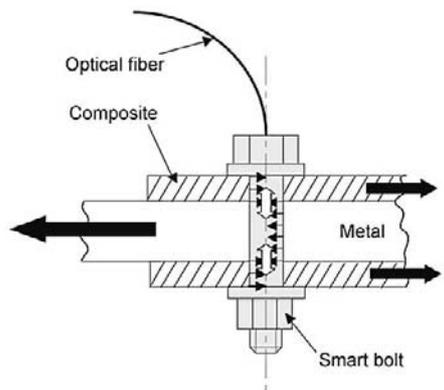


図11 せん断力とボルトに発生する局所ひずみ

る引張り荷重と、スマートボルトで測定される軸方向のひずみを同時に測定すれば、ボルト継手部の荷重伝達機構などの力学的挙動とともに、その後に起こる複合材の面圧破壊による初期損傷の検出が可能と考えられる。

4. 2点1点複合材/金属機械継手での荷重伝達機構のモニタリング

本章では、作製したスマートボルトを用いて、複合材と金属を2本と1本のボルトで締結した機械継手の引張り試験を実際に行い、荷重伝達機構の遷移といった力学挙動をモニタリングできることを検証する。

4.1 継手試験片および試験方法

本試験では、図7に示すように、チタン合金と複合材を一方は2本のチタン合金ボルトで、もう一方を1本のスマートボルトで結合した機械継手試験片を用いた。複合材は3次元織物プリフォームを用いたカーボン/ビスマレイミド系樹脂であり、樹脂はCYTEC-5250-4-RTM、炭素繊維は三菱レイヨンMR 50-4.5 kf、Z糸は東レT-900-3 kf、同Z糸は東レT-900-2 kf⁽¹⁰⁾を用いている。また、面内の繊維配向は $[45/0/-45/90]_{4s}$ の面内4軸である。板厚方向のZ糸ピッチは $3 \times 3 \text{ mm}$ であり、全体として5軸3次元の構成となっている。

2本のチタン合金ボルトは、締め付けトルク9 Nmで締め付けた。引張り試験は、はじめにスマートボルトを回転させることができるよう、締め付けトルクを加えずピン結合に近い状態で行った。続いて、スマートボルトを4.5 Nmのトルクで締め付けて行った。試験には負荷容量98 kNのインストロン型引張り試験機を用い、継手には負荷速度2.5 kN/minで、はじめに5 kNの引張り荷重を加え、その除荷後7.5, 10 kNの順に負荷-除荷を繰り返した。

4.2 試験結果および考察

図13に、継手試験片にかけた引張り荷重とスマートボルトの出力の関係を示す。図中の実線および破線は、そ

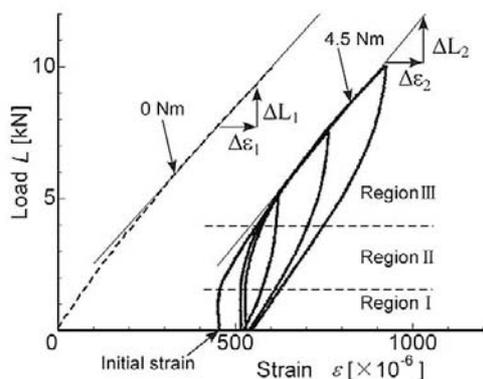


図13 継手の引張り荷重とスマートボルト出力の関係 (ボルトの締め付けトルク 0, 4.5 Nm)

それぞれ締め付けトルクを加えた場合、締め付けトルクを加えない場合の結果である。この図より、スマートボルトの出力と引張り荷重の関係には、前章で示した複合材/金属機械継手の荷重伝達機構の遷移によるそれら⁽⁴⁾と同じ関係が現れていることがわかる。すなわち、スマートボルトの出力は、はじめに継手試験片に取り付けられる際に、図13に示すように締め付けトルクによるボルト軸方向の様な Initial strain が発生する。その後、引張り荷重を金属/複合材間のせん断摩擦力が支え、金属と複合材が固着した領域 I (図10参照)、金属/複合材間の固着が解け、ボルト軸部が金属と複合材に接触するようになる領域 II (図11参照)、完全に引張り荷重の伝達機構がせん断荷重によるものに完全に遷移する領域 III が現れていることがわかる。ここで、図13の締め付けトルクが無い場合の線形領域の傾き $\Delta L_1 / \Delta \epsilon_1$ と、締め付けトルクを加えた場合の $\Delta L_2 / \Delta \epsilon_2$ はほぼ一致していることがわかる。これは締め付けトルクの有無に関わらず、金属と複合材の間に一様なすべりが生じた後はスマートボルトの出力を用いてボルトに加わるせん断荷重増分を測定できることを示している。

以上のことから、前報で示された複合材/金属機械継手における荷重伝達機構の遷移といった力学挙動を、スマートボルトを用いてモニタリングできることを実験的にも検証できたものと考えられる。

5. スマートボルトを用いた金属/複合材せん断機械継手の損傷試験

本章では、スマートボルトを用いて、前章と同様の2点1点複合材/金属機械継手試験片の引張り試験を複合材が損傷するまで行う。そして、スマートボルト出力と複合材の損傷状況の関係を調べ、初期損傷の検出可能性に関する検討を行う。

5.1 試験片形状および試験方法

試験には、図7に示した、チタン合金と複合材を、一方は2本のチタンボルトで、もう一方を1本のスマートボルトで結合した機械継手試験片を用いた。図7は、複合材の板厚は2 mm のものを示しているが、試験には板厚が2 mm と4 mm の二種類の複合材を用いた。複合材の板厚が4 mm の場合も、板厚以外の各部寸法は同じである。複合材は前章と同じ3次元織物プリフォームを用いたカーボン/ビスマレイミド系樹脂であり、樹脂はCYTEC-5250-4-RTM、炭素繊維は三菱レイヨンMR 50-4.5 kf、Z糸は東レT-900-3 kf、同止糸は東レT-900-2 kf⁽¹⁰⁾、板厚方向のZ糸ピッチは3×3 mm で、複合材全体として5軸3次元構成となっている。面内維配向は、板厚が2 mm の場合 $[45/0/-45/90]_{4s}$ 、板厚が4 mm の場合 $[45/0/-45/90]_{8s}$ である。ボルトの締め付けトルクは、全て9 Nm とした。引張り試験には負荷容量98 kN のインストロン型引張り試験機を用い、引張り荷重は負荷速度2.5 kN/min で静的に負荷した。複合材の板厚2, 4 mm の両方の試験とも、一旦複合材が明確に破損するまで行い、その後スマートボルト出力と引張り荷重の関係から、複合材が初期損傷すると予想される引張り荷重で試験を中断し、実際の複合材の損傷状態を調べた。

さらに板厚2 mm の試験では、図14に示すような変位計(東京測器研究所)を作製し、図15のように、スマー

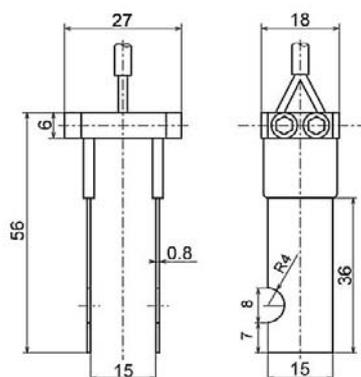


図14 面厚破壊検出用変位計

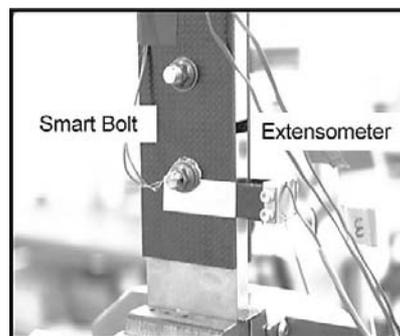


図15 変位計を取り付けた試験片

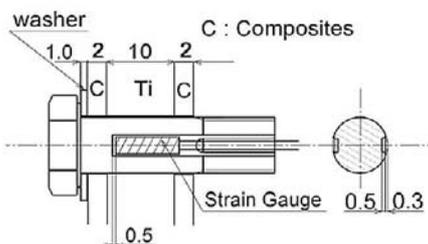


図 16 ボルトに貼付したひずみゲージ

トボルト孔周りで面圧破壊が起こると予想される側の、表裏の複合材を挟み込むようにボルトに接して取り付け、複合材の面外せん断変形を直接測定することを試みた⁽¹¹⁾。また試験に用いたスマートボルトは、図 16 のようにボルトねじ部の円周方向に 180° 離れた側面 2ヶ所を削り、そこにひずみゲージを貼付して、ひずみゲージによってもボルト軸方向ひずみを計測するようにした。なお、このボルトを継手に用いる際は、ひずみゲージを貼付した位置が引張り荷重方向と垂直となるようにした。一方、板厚 4 mm の試験では、図 17 に示すようにスマートボルト近傍にひずみゲージを貼付し、複合材の損傷にともなう出力変化を求めた。

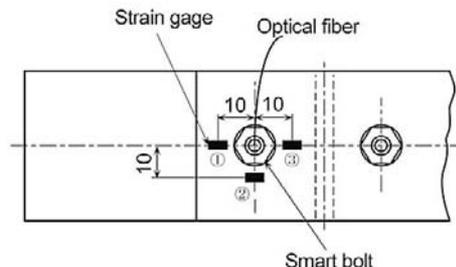


図 17 複合材表面でのひずみ測定位置

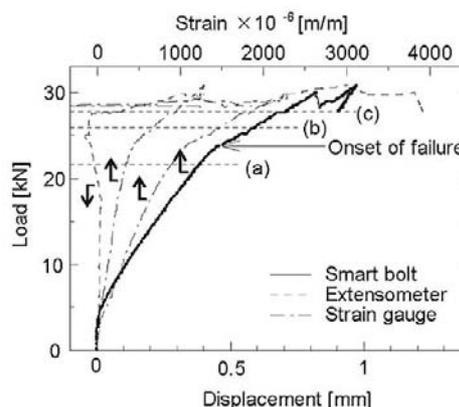


図 18 スマートボルト出力、ボルト側面のひずみゲージ出力および変位計出力と引張り荷重の関係

5.2 板厚 2mm の試験結果および考察

5.2.1 スマートボルト出力と引張り荷重の関係

図 18 に、試験で得られた、スマートボルト出力、ボルト側面に貼付した 2 枚のひずみゲージの出力および変位計の出力と引張り荷重の関係を示す。この図より、スマートボルト、ひずみゲージの出力と引張り荷重の関係は、24 kN 付近（図中に Onset of Failure と示した地点）から引張り荷重の増加に対する出力の増加の割合が大きくなっていることがわかる。24 kN 以上の荷重では、ボルトにかかるせん断荷重によるボルト軸方向ひずみに加え、ボルト孔周りの複合材の初期的な面圧破壊により生じた面外方向変形によるボルト軸方向ひずみがさらに加わっていると考えられる。前章で説明した初期損傷モニタリング法によると、24 kN 付近で複合材内部に面圧破壊が起こり始めたかと予想できる。なお、ボルト側面に貼付した 2 枚のひずみゲージの出力には大きな差が出ているが、これは以下のことが主な原因と考えられる。すなわち、ひずみゲージの貼付位置がボルト軸方向に若干ずれていたこと、またボルト締め付けた際、ひずみゲージを貼付した位置が引張り荷重と完全に垂直になっていなかったことが考えられる。一方、変位計の出力は、引張り荷重が 18 kN 付近でわずかな減少が現れた後、28 kN 付近で急激に増加することがわかる。変位計の出力が減少するのは、今回用いた変位計はボルト近傍から離れた位置の変形も合わせて計測することになるため、継手に加わる引張り

荷重によるポアソン効果により板厚が減少する部分の測定値が強く現れたためと考えられる。これに対し、変位計の出力が大きく増加するのは、面圧破壊により複合材が面外方向に変形したことによるものと考えられる。

以上のことから、スマートボルトの出力が大きく増加し始める引張り荷重の値は変位計のそれよりも小さく、このことは、スマートボルトは変位計よりも初期段階の複合材の損傷を検出できる可能性のあることを示している。

5.2.2 複合材断面における損傷観察

前項で示したように、スマートボルトの出力と荷重の関係には 24 kN 付近で折れ曲がり（傾きの変化）が現れた。そこで、継手試験片に加える引張り荷重が 22, 26, 28 kN の各荷重（それぞれ、図 18 中に (a), (b), (c) で示した荷重）での継手の引張り試験を止めて複合材の断面観察を行い、実際にボルト孔周りの複合材に損傷が現れているか否かを観察した。図 19 (a), (b), (c) に、それぞれ複合材の切断位置および観察面を示しているが、観察面は複合材の板幅方向中心位置の板厚断面であり、観察はボルトが複合材にくい込む側を中心に行った。観察には、光学顕微鏡を用いた。

図 20 (a) ~ (c) に、それぞれ、22, 26, 28 kN の各負荷時における複合材の断面状況を示している。図 20 (a) より、22 kN の負荷では損傷は確認できないことがわかった。26 kN の負荷では、図 20 (b) のように、0° 層において織

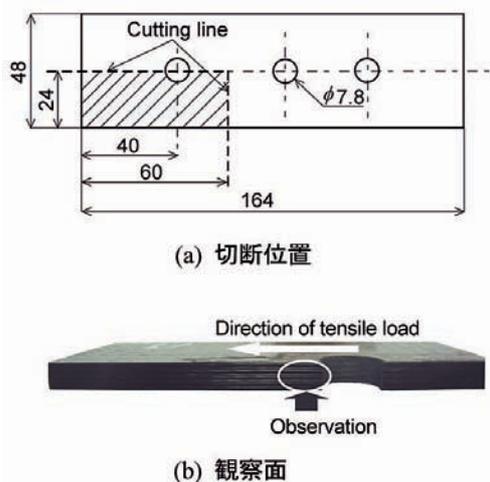
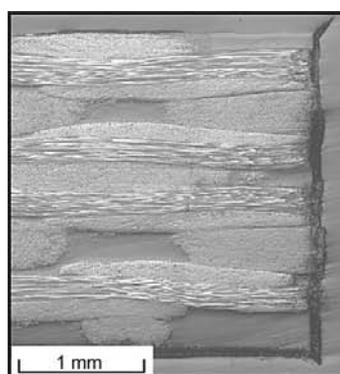
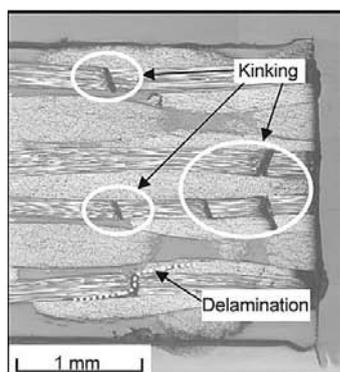


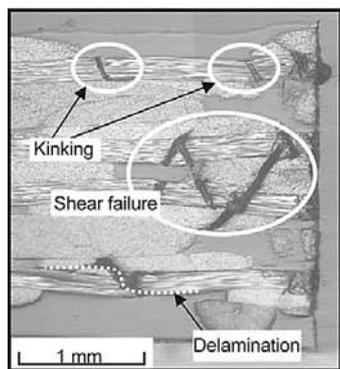
図19 複合材の切断位置および観察面



(a) 22 kN



(b) 26 kN



(c) 28 kN

図20 断面の損傷状態 (2 mm)

維のキンクバンドの発生と、これと隣接している45°層で層間剥離が発生しているのが確認できた。28 kNの負荷では、図20(c)のようにキンクバンドや層間剥離に加え、板厚方向のせん断破壊⁽¹²⁾が確認された。なお、26, 28 kNの負荷では、損傷は確認された領域はワッシャーによる拘束領域内におさまっていた。以上の観察結果と図18の結果より、複合材のボルト孔周りでの初期損傷は、スマートボルトの出力と引張り荷重の関係に折れ曲がりが見られる前後で発生していることが確認でき、この折れ曲がり点で複合材の初期損傷の有無を判断できる可能性のあることがわかる。また、図18より、スマートボルトの出力は変位計による板厚の直接計測よりも早い時点で折れ曲がりが見られており、このことからスマートボルトは変位計よりも複合材の初期の損傷を検出できることがわかる。また、ボルト側に貼付したひずみゲージの出力と引張り荷重の関係の折れ曲がり点はスマートボルトによるそれとほぼ同じであり、同程度の初期損傷を検出することが可能と考えられる。しかしながら、ボルトのねじ部を削ってひずみゲージを貼付するため、ボルト強度を低下させる可能性があるが、スマートボルトでは光ファイバひずみセンサの埋め込みに必要な穴は小さく、ボルト強度にほとんど影響はないと考えられる。

5.3 板厚4mmの試験結果および考察

図21に、複合材の厚みが4mmの場合のスマートボルト出力と引張り荷重の関係を示す。また図22には、スマートボルト近傍に貼付したひずみゲージ①、②、③(貼付位置は図17参照)の出力と引張り荷重の関係を示している。図21より、引張り荷重が約40 kNより大きい領域で、荷重に対するスマートボルト出力の増加の割合が大きくなっている(折れ曲がりが見れる)ことがわかる。したがって、前節の板厚2mmの結果で示したように、このスマートボルトの出力によると、約40 kNで複合材にボルトの面圧による初期損傷が発生していることが推測される。この予想した荷重(約40 kN)で、実際にボルト孔

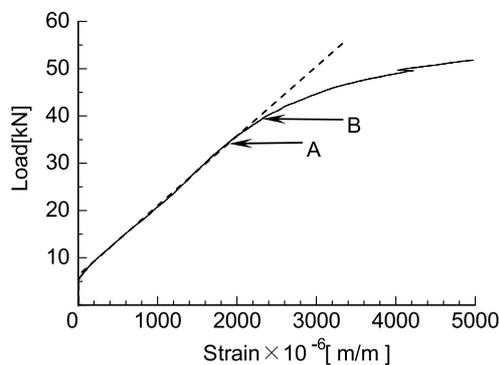


図21 引張り荷重とスマートボルト出力の関係 (板厚4mm)

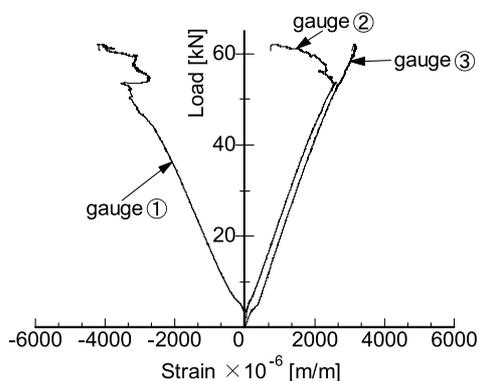


図 22 引張り荷重と複合材表面に貼付したひずみゲージの出力の関係

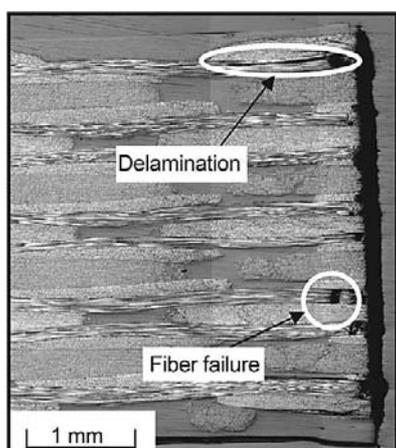


図 23 断面の損傷状態 (4 mm, 40 kN)

周りの複合材に損傷が現れているか否か検証するため、折れ曲がりが見れる前の 35 kN (図 21 の A 点) と、40 kN (図 21 の B 点) 負荷時の複合材のボルトがくい込む側の、板幅方向中心位置の板厚断面を板厚 2 mm の試験と同様の方法で観察を行った。図 23 には、観察結果の例として、40 kN 負荷時の複合材の断面写真を示している。35 kN 負荷時は、写真は省略したが、損傷は確認できなかった。しかしながら、40 kN 負荷時では、図 23 に矢印で示したようにボルトの面圧による層間剥離や繊維破断を確認できた。したがって、ボルト孔周りの複合材は 40 kN 付近から顕著な損傷を受けていることがわかった。この損傷を受け始める荷重 (約 40 kN) は図 22 のスマートボルトの出力に折れ曲がりが見れ始める点とほぼ一致している。したがって、板厚 4 mm の場合もスマートボルトの出力に折れ曲がりが見れ始める点で、ボルト孔周りの複合材の面圧破壊による初期損傷の有無を判断できることがわかる。一方、図 22 のひずみゲージの出力と荷重の関係では、約 50 kN 付近でひずみゲージ①および②の出力に顕著な変化が確認できる。しかしながら、この荷重ではボルト孔周りの複合材の面圧破壊は大きく進行していることがわかる。

以上のことより、スマートボルトの出力と引張り荷重の傾きに変化 (折れ曲がり) が現れる点で、ボルト孔周

りの複合材の面圧破壊による初期損傷の有無を判断できることがわかる。また、スマートボルトの出力によるこの検出の精度はボルト孔近傍に貼付したひずみゲージによる検出精度よりも高く、ひずみゲージでは捉えることのできない程度の初期段階のものと考えられる。

6. 結 言

本研究では、スマートボルトを作製し、スマートボルトを用いた複合材/金属せん断機械継手の引張り試験を行い、継手における荷重伝達機構の遷移およびボルトにかかるせん断荷重の定量的把握などの力学挙動モニタリングに対する、スマートボルトを用いた方法の有効性に関する検討を行った。さらに、複合材/チタン合金機械継手の引張り破壊試験を実施し、複合材に起こる面圧破壊を対象として、スマートボルトによる初期損傷の検出可能性に関する検討を行った。得られた結果をまとめると、以下ようになる。

- (1) 光ファイバセンサを埋め込んだセンサボルト (スマートボルト) を実際に作製し、その基本特性を調べた。
- (2) スマートボルトを用いる方法は、継手における力学挙動をモニタリングする方法として有効であることを、実験的側面から明らかにした。
- (3) スマートボルトの出力と荷重の関係に現れる折れ曲がりによって、ボルト孔周りの複合材の初期損傷を検出することが可能である。
- (4) スマートボルトによって、複合材表面に貼付したひずみゲージの出力や変位計による板厚変化の直接測定では検出できない初期段階の損傷を検出することができる。

参 考 文 献

- (1) 例えば、森本, プラスティック系先端複合材料, 新高分子文庫 (1998)。
- (2) Barrett, R. T., Fastener Design Manual, NASA Reference Publication 1228 (1990), 1.
- (3) Miller, R. J., Jarmon, D. C. and Moree, J. C., AIAA Proceedings 98-1998 (1998), 2444.
- (4) 佐藤・薄, 日本機械学会論文集 (A 編), Vol. 70, No. 699, (2004), 24.
- (5) TECHIKAL NOTE, FIBER-OPTIC STRAIN GAGES, FISO Technologies, Co. Ltd.
- (6) 武田・岡部, 日本機械学会論文集 (A 編), Vol. 67, No. 655, (2001), 24.
- (7) Valis, T., Hogg, D. and Measures, R. M., SPIE Vol. 1370, Fiber Optic Smart Structures and Skins III, (1990), 154.
- (8) Measures, R. M., OPTICAL ENGINEERING, Vol. 31, No.

- 1, (1992), 34.
- (9) 坂井, ねじ締結概論, 養賢堂 (2000).
- (10) Takatoya, T. and Susuki, I., Jour. of Composite Materials, Vol. 39, (2005), 543.
- (11) Xiao, Y. and Ishikawa, T., Proceedings of the 27th symposium on Composite Materials (2002), 161.
- (12) 肖・石川, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 51, No. 594, (2003), 331.

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-07-010

発行 平成 20 年 2 月 29 日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1

URL : <http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 (株) 東京プレス

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

TEL : 029-868-2079 FAX : 029-868-2956

© 2008 宇宙航空研究開発機構

※ 本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等加工することを禁じます。



本書は再生紙を使用しております。