



ISSN 1349-1121
JAXA-RM-11-002

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

平織CFRP積層板に加工されたネジ穴の引張り強さ

小笠原 俊夫, 吉村 彰記, 紙田 徹

2011年6月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

平織 CFRP 積層板に加工されたネジ穴の引張り強さ*

小笠原 俊夫*¹, 吉村 彰記*¹, 紙田 徹*²

Tensile strength of a threaded screw hole in plain woven carbon fiber/ epoxy composite laminates (CFRP)*

Toshio OGASAWARA*¹, Akinori YOSHIMURA*¹ and Tohru KAMITA*²

Abstract

The objective of this study is to obtain the design data of a through-thickness-threaded-hole in a plain-woven carbon fiber/ epoxy composite laminate (CFRP). Tensile tests of bolted joint specimens with stainless steel bolts were carried out at room temperature. The screw size was M6×1, M8×1.25, and M10×1.5, and the screw depth was in range of 6-12 mm. Both a directly threaded hole and a coil thread insert hole were evaluated. As results, the tensile strength of threaded hole was almost identical to the estimated values using the out-of-plane shear strength of the CFRP. The joint separation load was calculated using a conventional bolted joint theory, and the best fit coefficient of friction was 0.19. No residual deformation was observed under tension-tension cyclic load when the maximum load was lower than the separation load. This result suggests that the joint may be applicable under the loading condition.

Key words: Bolted joint, Tensile strength, Threaded screw hole, carbon fiber composites

概要

平織 CFRP 積層板に加工されたネジ穴 (メネジ) の引張り強度データを取得することを目的として、CFRP ネジ穴とステンレス製ボルトから構成される締結体に対する引張り試験を行った。ネジのサイズは、M6×1, M8×1.25, M10×1.5 の 3 種類、ネジ深さは 6~12 mm である。CFRP に直接ネジ穴加工したものに加え、いわゆるインサート材を挿入したものについても評価を行った。その結果、メネジの破壊は CFRP の面外せん断破壊が支配的であることがわかった。また、ネジの破壊強度から推定された CFRP の面外せん断強度は、イオシペスク面外せん断試験によって得られた値とほぼ一致した。締め付けトルクと軸力の関係を見積もったところ、ボルト座面における摩擦係数として 0.19 という値が得られた。また、繰返し引張り負荷を行った結果、締結体遊離荷重以下であればネジの緩みなどが生じないことが確認された。以上のことから、CFRP ネジ穴を用いた継ぎ手様式は、適切な締め付けトルクで管理された締結体遊離荷重以下で使用する限り、少なくとも引張り荷重下では大きな問題がないことがわかった。

* 平成 23 年 4 月 25 日受付 (Received 25 April 2011)

*1 研究開発本部 複合材グループ

(Advanced Composite Group, Aerospace Research and Development Directorate)

*2 宇宙輸送ミッション本部 宇宙輸送系要素技術研究開発センター

(Space Transportation Subsystem Research and Development Center ,
Space Transportation Mission Directorate)

1. 緒言

炭素繊維強化プラスチック（CFRP）の適用拡大に伴い、CFRP 部品の継ぎ手構造も多様となっている。航空機やロケットのように高い信頼性が要求される構造では、接着継ぎ手もしくはファスナー継ぎ手が一般的であり、これらの継ぎ手構造に関しては既に多くの技術的知見がある[1-4]。一方、CFRP に直接ネジ穴加工（メネジ加工）を施し、ボルト（雄ネジ）を用いて他部品と結合する様式の継ぎ手構造については、自動車やモータサイクル、人工衛星などの二次構造、医療部品など、継ぎ手の荷重が比較的小さい構造部品では適用事例があるものの、信頼性が要求される航空機やロケットの構造にはほとんど適用されていない[5, 6]。

ところで、著者らは、CFRP を適用したロケット用極低温推進剤タンクの研究開発を継続して実施している。極低温複合材タンクの技術課題としては、（1）マトリクスき裂をパスとする気体漏洩、（2）アルミ合金製口金（ボス）と CFRP との接着部における熱応力による剥離、が特に重要である。図 1(a)に、一般的な複合剤タンクの構造様式を示す。接着時の温度（室温～150℃程度）から、液化天然ガス／液体酸素／液体水素を貯蔵する極低温（-150～-270℃）に温度が下がると、ボス（もしくはライナー）材料と CFRP の熱膨張差により大きな熱応力が発生し、接着部において主に開口型の剥離が発生することがある[7, 8]。これは主としてボス材料（アルミ合金や樹脂材料）と CFRP の熱膨張係数（CTE）差に起因することから、CFRP の熱膨張係数に近い低熱膨張の材料をボスに適用することで、問題の解決が図れる可能性がある。ひとつの候補はチタン合金である。しかしながら、チタン合金は液体酸素と組み合わせた場合の安全面での適合性が懸念されており、NASA 等で作成された安全基準の観点から適用は容易ではない。もうひとつの候補が CFRP である。ボスを CFRP とすることで、ボスと CFRP タンク接着部での熱応力を大きく低減できることが計算上では確認されている。このような背景から、著者らは極低温複合材タンクに対する CFRP ボスの適用に関する基礎的な検討を進めており、これまでに構造解析や CFRP ボスの製造性確認試験などを行ってきた。図 1(b)は製造性確認および構造設計の妥当性評価を目的として試作した CFRP ボスのスケールモデルである。平織の CFRP プリプレグを用いてオートクレーブ成形されたものであり、製造上の大きな問題はないことを確認している。

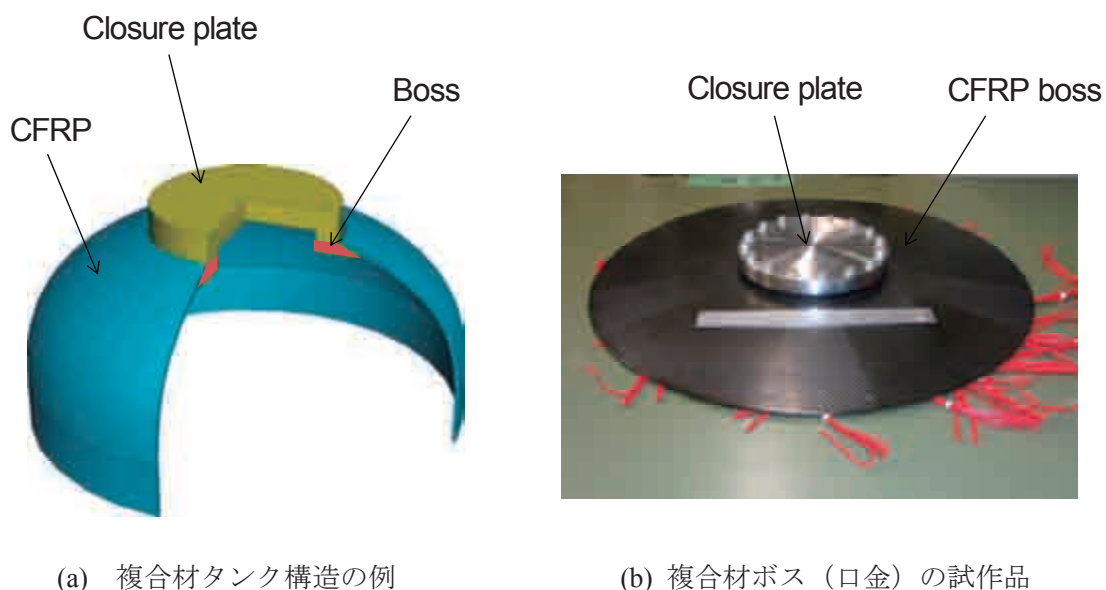


図 1 極低温推進剤用複合材タンク構造の例

ところで、CFRP 製のボスを適用する場合、密閉蓋（クロージャー）との結合が必要となる。従来のアルミ合金製ボスの形状を踏襲することを考えると、図 1 (b)に示すように CFRP に直接ネジ（メネジ）を加工し、ボルトにてクロージャーを取り付ける様式が基本となる。この場合、CFRP の面外引張り強度とともに、CFRP に加工されたネジ穴（メネジ）の強度評価が必要となる。しかしながら CFRP のネジ穴継ぎ手に関して公開されているデータは著者らの調べた範囲では皆無であった。

そこで本研究では、CFRP ネジ穴継ぎ手の設計基礎データの取得を目的として、CFRP ネジ穴／ステンレスボルトからなる継ぎ手試験片の引張り試験を実施した。得られた結果は必ずしも学術的ではないが、CFRP の実用的な構造設計において有用であると考えられたので、その概要について報告する。

2. 実験方法

実験に用いた CFRP は、平織の炭素繊維エポキシ複合材料（IMS60/133, 東邦テナックス）である。積層構成は 32 層（ $[(45/0)]_{8S}$ ）および 48 層（ $[(45/0)]_{12S}$ ）、厚さはそれぞれ 9 mm および 12 mm となっている。試験片の形状および寸法を図 2(a)に、試験片の一覧を表 1 に示す。試験片としては、CFRP にネジ穴を直接加工してネジとしたもの（図 3(a)）に加えて、CFRP にステンレス製のコイルネジインサート（coil thread insert）を挿入してネジとしたもの（図 3(b)）についても準備した。ネジは積層方向に垂直な通しメネジ（並目）とし、寸法は M6×1、M8×1.25、M10×1.5 の 3 種類である。今回の実験で使用したインサートは日本スプリュー（株）の SPREW であり、メーカー推奨の作業手順書に準じ、専用工具を用いて CFRP に挿入した。コイルネジインサートの形状を図 2(b)に示す。インサートを用いていない場合の有効ネジ長さは板厚と一致するが、インサートを用いた場合の有効ネジ深さはインサート材の長さに依存する。ネジおよびインサートの寸法諸元を表 2 にまとめて示す。

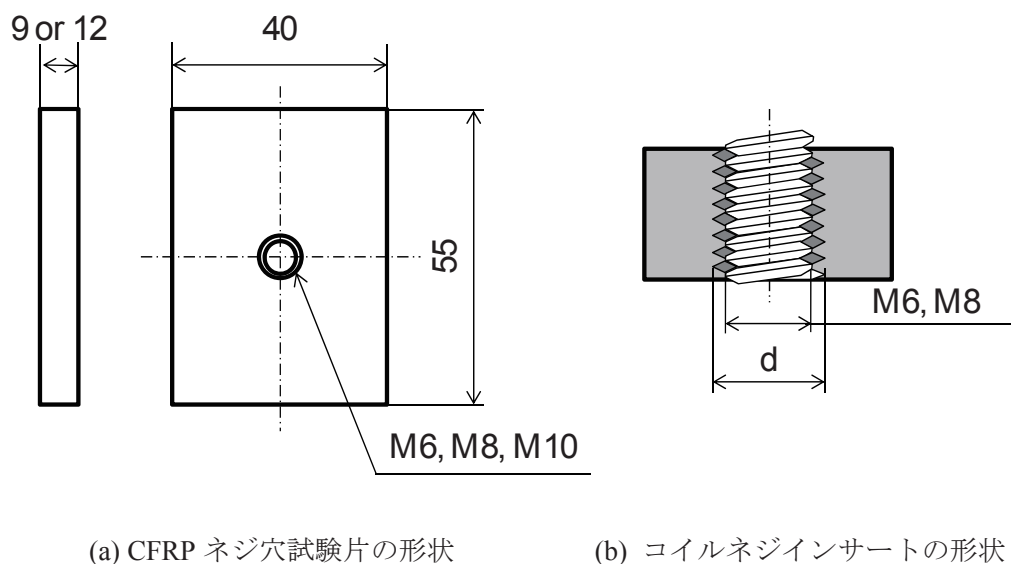


図 2 CFRP ネジ穴強度試験片およびコイルネジインサート
(詳細寸法は表 2 参照)



(a) ネジ穴（直接加工）

(b) コイルネジインサート

図3 試験片ネジ穴部の写真

表1 CRP ネジ穴強度試験片の仕様（寸法、締め付けトルク、試験片厚さ）

ネジ穴形状 (ISO metric thread, mm)	締め付けトルク (Nm)	ネジ穴長さ (mm)	積層板厚さ (mm)	積層構成
M6×1 (直接加工)	4, 6, 8, 10, 12, 15	9	9	[(45/0)]8s
M8×1.25(直接加工)	6, 8, 10, 12, 15	9	9	[(45/0)]8s
M10×1.5(直接加工)	8, 10, 12, 15	9	9	[(45/0)]8s
M6×1 (インサート有)	4, 6, 8, 10, 12	6	9	[(45/0)]8s
M8×1.25 (インサート有)	6, 8, 10, 12	9	9	[(45/0)]8s
M10×1.5 (インサート有)	8, 10, 12, 15	8	9	[(45/0)]8s
M8×1.25 (インサート有)	15	12	12	[(45/0)]12s

表2 ネジ穴およびコイルネジインサート(SprewTM)の寸法諸元

	Unit	ネジ穴			インサート (Sprew)	
		M10×1.5	M8×1.25	M6×1	M8×1.25	M6×1
ネジ直径, d	mm	10	8	6	9.624	7.3
ネジピッチ, P	mm	1.5	1.25	1.0	1.25	1.0
ネジ有効直径, d ₂	mm	9.026	7.19	5.35	8.8	6.65
谷底直径, d ₃	mm	8.16	6.47	4.77	8	6
座面直径, d _w	mm	16	12.3	12.3	12.3	12.3
リード角, β	deg	3.03	3.17	3.40	2.59	2.74
ネジ山半角, α	deg	30	30	30	30	30
有効断面積	mm ²	58.0	36.6	20.1	55.4	31.4

本研究では、図1(b)に示すような CFRP 製ボスにボルトで締結したフランジ（クロージャー）に対して、タンク内圧が負荷されるという負荷モードを想定している。そこで、ボルト継ぎ手に対する引張り試験を実施した。試験治具のセットアップ写真を図4に示す。厚さ12mmの2枚の鋼製治具（SCM440H調質材）を、図2(a)に示すメネジを加工したCFRP供試体と、ステンレス（SUS316）製の六角穴付きボルト（長さ35mm）によって締結する構造となっている。ボルトの締め付けにはプリセット型のトルクレンチを使用し、表1に

示す締め付けトルクでボルトを固定した。治具の穴径は、CFRP 側が $\phi 10.5$ 、ボルト側が $\phi 6.5$ (M6), $\phi 8.5$ (M8), $\phi 10.5$ (M10)である。ワッシャーおよびスプリングワッシャーは意図的に使用していない。

引張り試験には油圧サーボ型の材料試験機 (インストロン 8802 型) を使用した。油圧チャックにより試験治具を試験片に固定した後、荷重およびアクチュエータ変位を測定しながら一定の変位速度 1 mm/min で荷重を負荷した。

また、ネジ穴の疲労特性を評価するため、引張り／引張り荷重下での繰返し負荷試験を実施した。材料は上記と同じ平織 CFRP であるが、積層構成は $[(45/0)]_{12s}$ の 48 層、厚さ 12 mm であり、 $M8 \times 1.25$ 、長さ 12 mm のコイルネジインサートが挿入されている。繰返し負荷条件は、周波数 1 Hz 、正弦波、応力比 $R=0.1$ (片振り) とした。試験中は所定の繰返し数 ($10, 100, 1000, 10000 \dots$) 毎に、荷重およびアクチュエータ変位を計測した。

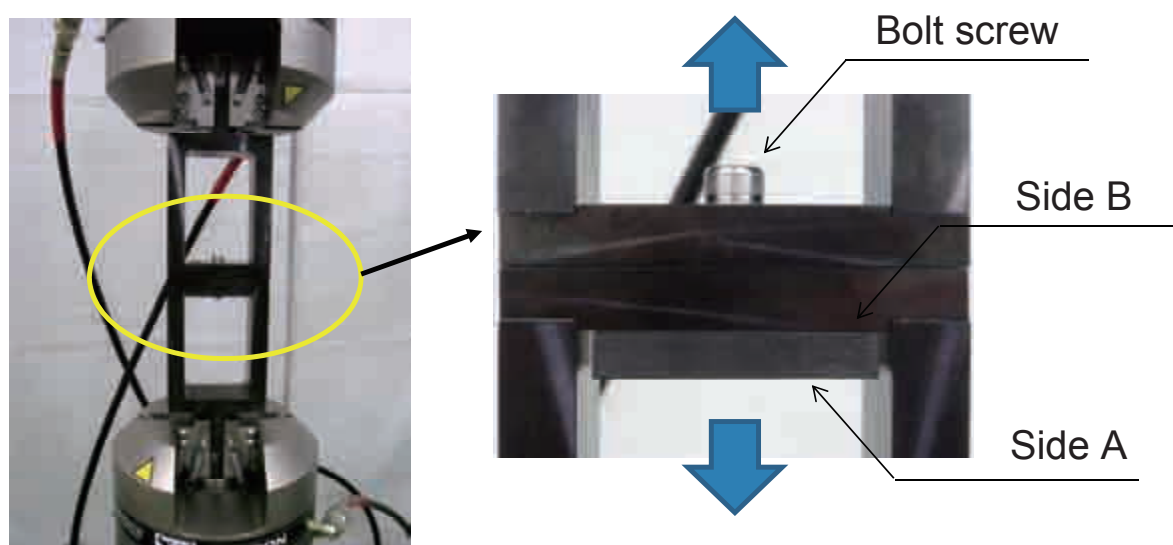


図4 CFRP ネジ穴／ステンレスボルト継ぎ手試験片の引張り試験

3. 締結体遊離限界荷重およびネジ穴引張り強度の事前検討

3.1 締結体遊離限界荷重

メネジの強度試験に先立って、ネジの基礎モデルによる予備検討を行った。ボルト継ぎ手の基本形状およびネジ噛み合わせ部の拡大図を図 5 に示す。ここで、 d_0 はボルト座面外径、 d_h はボルト穴内径、 d_2 はボルトの有効径、 d_w は座面の等価摩擦直径、 β はボルトのリード角、 P はネジピッチ、 α はネジ山の半角である。ネジ面摩擦係数を μ_s 、座面摩擦係数を μ_w とすると、ボルトの締め付けトルク T とネジの軸力 F との関係は次式によって表すことができる[9, 10]。

$$F = \frac{2T}{\mu_s d_2 / \cos \alpha + P / \pi + d_w \mu_w} \quad (1)$$

一般に、鋼／鋼の摩擦係数としては $0.1 < \mu < 0.25$ 程度の値が用いられるが、CFRP/鋼における摩擦係数に関する報告例はなく、実験によって求める必要がある。締結体に作用する外力 F_w とボルト軸力 F_B との関係は、ボルトの初期軸力を F_0 、ボルトのバネ定数を K_B 、被締

結体のバネ定数を K_c とすると次式で表される。

$$F_B = F_0 + \phi F_w \quad \phi = K_B / (K_B + K_c) \quad (2)$$

すなわち、ボルトの軸力は外力 F_w の ϕ 倍だけ増加する。 $(\phi$ は内力係数と呼ばれる) ボルトのバネ定数は、近似的にはボルトの断面積 \times ヤング率 / 長さで与えられることから、

$$K_B = \frac{\pi d^2}{4L_c} E_B \quad (3)$$

平板状の被締結体のバネ定数は実際には少々複雑ではあるが、以下に示す近似式がしばしば用いられる[9]。

$$K_c = \frac{\pi E_c}{4L_c} \left\{ (d_0 + L_c / 10)^2 - d_h^2 \right\} \quad (4)$$

締結された物体を遊離させるのに必要な外力(締結体遊離限界荷重)は、被締結体の圧縮力がゼロになる点であることから、次式によって求めることができる。

$$F_{sep} = F_0 / (1 - \phi) \quad (5)$$

ここで ϕ の具体的な値を示しておく。M6 \times 1 の鋼製ボルトによって $L_c = 24$ の鋼板を締結することを考えると、 $d = 6, d_0 = 10, d_h = 6.5$ であるから(2)~(4)式より、 $\phi = 0.256$ となる。同様に、M8 \times 1.25 および M10 \times 1.5 の場合は、それぞれ $\phi = 0.291, 0.315$ となる。また、締結体の遊離限界荷重は、締め付けトルクによる初期軸力に対して、1.34 倍(M6 \times 1), 1.41 倍(M8 \times 1.25), 1.46 倍 (M10 \times 1.5)となる。

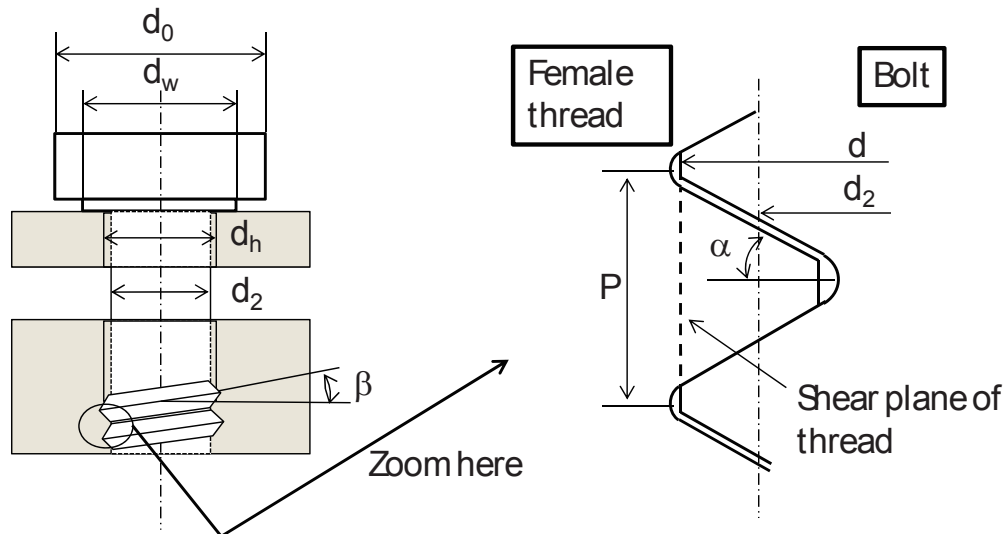


図5 ネジ継ぎ手の詳細形状

3.2 ネジ山せん断破壊荷重

一般に CFRP の面外せん断強度はボルト鋼の引張り/せん断強度よりも著しく小さいため、CFRP メネジ/ボルトの引張り試験では CFRP メネジのネジ山せん断破壊が支配的な破壊モードとなることが予想される。そこで、簡単な仮定によりネジ山せん断破壊強度の見積を行う。図5に示すようなメネジのせん断破壊面の長さ L_{AB} は次式で表される。

$$L_{AB} = P/2 + (d - d_2) \tan \alpha \quad (6)$$

ボルトとメネジの有効はめ合い長さを L_{eng} とすると、せん断破壊面の面積 A_{AB} は、

$$A_{AB} = \pi d L_{AB} L_{eng} / P \quad (7)$$

メネジ材料のせん断強度を τ とすると、ネジ山がせん断破壊するときの荷重 F_{shear} は、

$$F_{shear} = \tau A_{AB} \quad (8)$$

以上より、ネジの諸元と材料のせん断強度がわかれば、メネジの破壊荷重を見積もることができる。

4. 実験結果と考察

代表的な荷重変位線図と引張り試験中の供試体の写真を図 6 に示す。ネジ M8×1.25、締め付けトルク 10Nm の試験結果である。荷重変位線図には 2 つの変曲点が現れる。はじめに現れる変曲点は締結体の遊離に伴うものであり、ボルト諸元および初期締め付け軸力に依存する。次に現れる変曲点はメネジのせん断破壊に伴うものであり、ネジ諸元および材料強度に依存する。ネジ山のせん断破壊開始後、荷重は緩やかに上昇し、せん断破壊発生荷重の 4~5 倍程度の荷重に達するまでは荷重の低下や破断の発生は確認されなかった。

図 7 および図 8 は試験後（破壊後）の供試体写真である。これらの観察から、インサートなしのメネジでは、低荷重域では個々のネジ山でのせん断破壊、荷重が高くなるとネジ山せん断破壊に加えて被締結体の穴まわりでのマクロなせん断破壊も発生することがわかった。また、インサートありの場合は、低荷重域ではインサートと CFRP の締結部（すなわち CFRP メネジ部）でのネジ山せん断破壊が、高荷重域ではこれに加えて上記と同様の穴周りでのせん断破壊が発生していることがわかった。

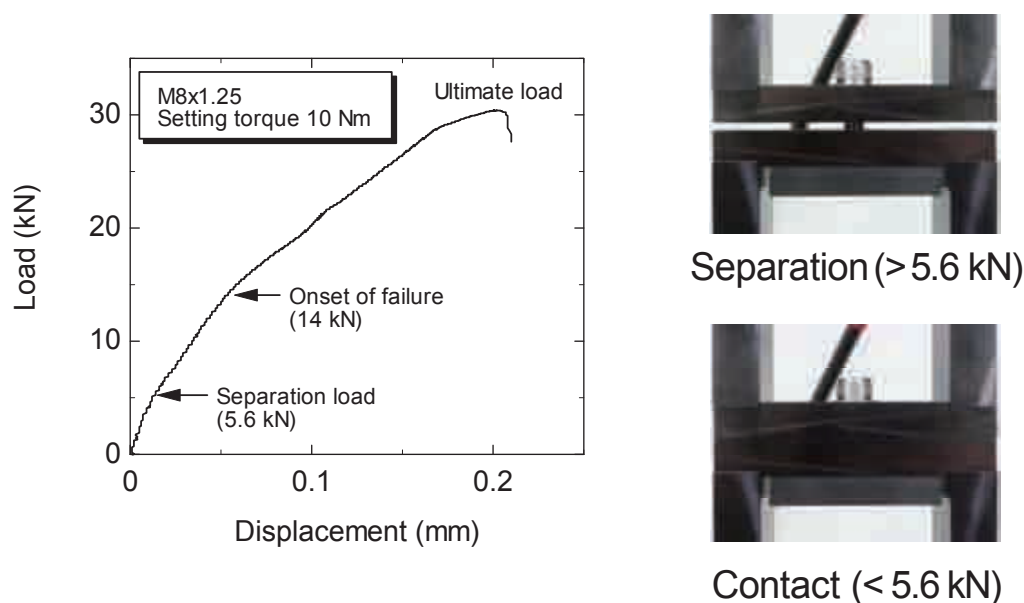


図 6 CFRP ネジ穴/ステンレスボルト継ぎ手の引張り試験における代表的な荷重-変位線図 (M8X1.25, 直接ネジ加工, トルク 10 Nm)



(1) Side A



(2) Side B (hole diameter φ10.5)

図7 引張り試験後のネジ穴部 (M8×1.25、インサートなし、最大荷重 30.3 kN)



(1) Side A



(2) Side B (hole diameter φ10.5)

図8 引張り試験後のネジ穴部 (M8×1.25、インサート有り、最大荷重 31.3 kN)

図9は、ボルトの締め付けトルクと締結体遊離荷重との関係を示した結果である。なお、変曲点は厳密な方法で決定した訳ではなく、非線形の現れる立ち上がり荷重を目視で決定しているため若干の誤差を含んでいることにはご容赦頂きたい。ここで、図中の直線は、摩擦係数を0.19として(1)~(5)式によって締結体遊離荷重を計算した結果である。インサートの有無に関わらず実験結果と計算結果は良い対応を示している。

この関係は実用上便利なので、関係式を以下に示しておく。

$$F_{sep} = \kappa_{sep} T \quad (9)$$

ここで、 T および F_{sep} の単位はNmおよびN、比例定数 κ_{sep} は、M6×1、M8×1.25、M10×1.5に対して、それぞれ731、588、531 (m^{-1})である。

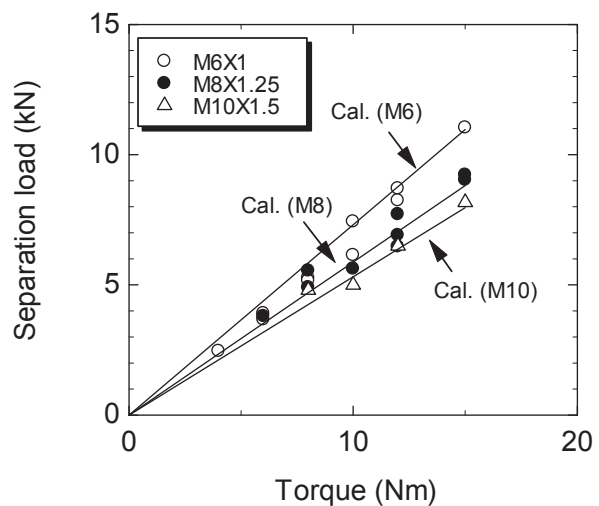


図9 締め付けトルクと締結体遊離荷重の関係 (実線は、摩擦係数を0.19として、(1)~(5)式によって計算された値)

図 10 はメネジの破壊開始荷重と、(7)式で求めたせん断破壊面の面積(A_{AB})との関係をプロットした結果である。ネジ寸法やインサートの有無に関わらず、せん断破壊荷重と破断面面積(A_{AB})との間に線形関係が認められ、直線の傾きから推定された CFRP のせん断強度は 61.5 MPa となった。今回使用した平織材ではないが、おなじ CFRP 材料 (IMS60/133) の疑似等方積層板に対する面外方向イオシペスク試験の結果を図 11 に示す。明瞭な破壊が生じた時のせん断強度は約 60MPa であり、上記で推定された CFRP のせん断強度と良い対応を示している。なお、イオシペスク試験によって得られた 0.2%オフセット面外せん断強度は約 48MPa であることから、実際にはこの強度を超えない範囲で設計をすることが望ましい。実用上便利なので、メネジのせん断破壊荷重 $F_{shear}(N)$ 、ボルトの有効はめ合い長さ $L_{eng}(mm)$ 、CFRP せん断強度 $S_s(MPa)$ の関係を以下に示しておく。

$$F_{shear} = S_s A_0 L_{eng} \quad (10)$$

ここで、 A_0 は単位長さ(mm)あたりのせん断破壊面の面積(mm^2)であり、M6×1、M8×1.25、M10×1.5 に対して、それぞれ 20.1、26.6、27.5 (mm^2/mm)である。

また、CFRP ネジ穴でのせん断破壊を防ぐために、ネジの締め付けトルク $T(Nm)$ は以下の値以下とする必要がある。

$$T = k_{TS} S_s L_{eng} \quad (11)$$

ここで、比例定数 k_{TS} は、M6×1、M8×1.25、M10×1.5 に対して、それぞれ 0.0316、0.0475、0.0756 である。

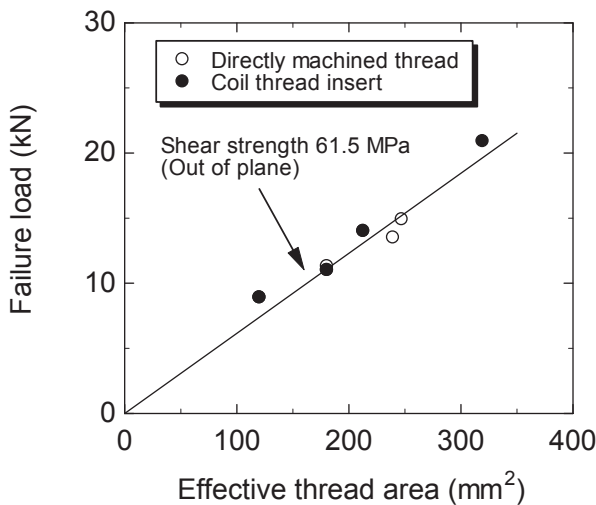


図 10 有効ネジ面積と破壊開始荷重との関係 (実線は、CFRP の面外せん断強度を 61.5MPa として、(6)~(8)式によって計算された値)

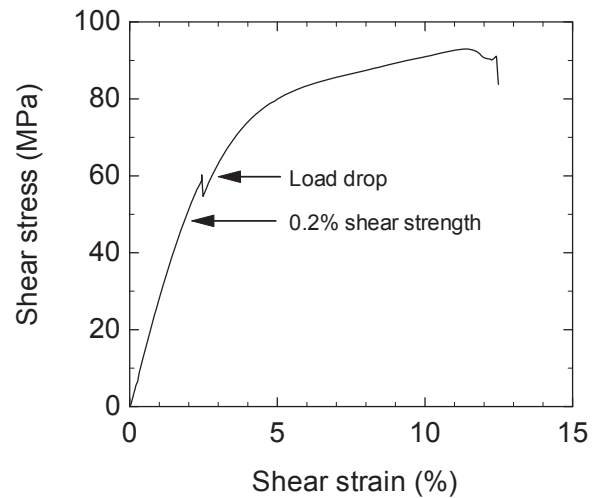


図 11 CFRP 積層板 (IMS60/133 疑似等方積層板) の面外せん断応力-せん断ひずみ線図 (イオシペスク法による測定結果)

インサートを用いた M8×1.25 ネジに対して、繰り返し負荷試験を行った。ネジ長さは 12 mm、締め付けトルクは、15 Nm である。最大引張り荷重は 8kN、10kN、12kN の 3 条件、応力比 $R=0.1$ 、周波数 1Hz、打ちきり回数 10^5 回とした。静的試験における本供試体の遊離荷重は約 8.5 kN、破断開始荷重は約 21 kN である。

いずれの供試体も、 10^5 回繰り返し荷重負荷後の外観には特に変化は認められなかった。また遊離荷重以下である 8kN では繰り返し数 10^5 回までの間で、荷重変位線図における変化は

認められなかった。

一方、最大荷重 10kN および 12kN では、図 12 に示すように繰り返し数に伴って変位がシフトする傾向が認められた。図 13 は、各最大荷重での疲労試験における 10, 100, 1000, 10000, 100000 回後の残留変位量（変位シフト量）をプロットしたものである。8kN では 10^5 回まで変位量の変化は認められないが、10kN および 12kN では 100~1000 回を超えたあたりから変位シフト量（残留変位）の増大が確認される。これは、ねじの緩みの可能性を示唆している。ただし、実際には締結体遊離荷重よりも遙かに小さい荷重で使用されることから、引張り方向の繰返し負荷による影響はほとんどないものと考えられる。

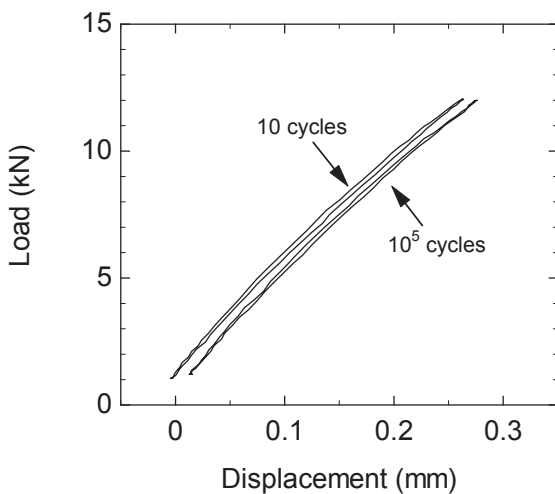


図 12 引張り／引張り繰返し試験における荷重－変位線図の例（繰返し数 10 回および 100000 回、最大荷重 12kN、応力比 $R=0.1$ 、周波数 1Hz）

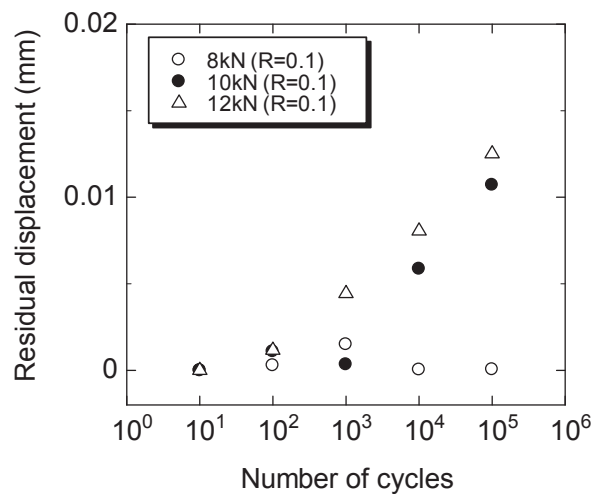


図 13 繰返し数と変位シフト量（残留変位）との関係

5. まとめ

CFRP 積層方向に対して垂直に加工されたメネジの強度データを取得することを目的として、CFRP ネジ穴とステンレス製ボルトから構成される締結体に対する室温での引張り試験を行った。メネジの破壊は CFRP の面外せん断破壊が支配的であり、ネジの破壊強度から推定された CFRP の面外せん断強度は、イオシペスク面外せん断試験によって得られた値と良く一致した。締め付けトルクと軸力を見積もったところ、ボルト座面における摩擦係数として 0.19 という値が得られた。また、繰返し引張り負荷を行った結果、締結体遊離荷重以下であればネジの緩みなどが生じないことを確認した。以上のことから、CFRP ネジ穴を用いた継ぎ手様式は、適切な締め付けトルクで管理された締結体遊離荷重以下で使用する限り、少なくとも引張り荷重下では大きな問題がないことがわかった。

今後は試験データの蓄積と試験結果の統計的な整理に基づいた安全係数を設定が必要である。また、引張り荷重のみならず、せん断荷重が負荷される場合についての実験的な検証についても実施する必要がある。

謝 辞

本研究に関わる各種の試験を担当して頂きました(株) IHI ジェットサービス 山崎隆氏、青木淳子氏、市川雅章氏、原栄一氏に深甚の謝意を表します。また良質の供試体を製作して頂いた(株) ジーエイチクラフト 知沢俊行氏をはじめとする関係諸氏に深く感謝申し上げます。

参考資料

1. Structural behavior of joints, pp 6.1-6.71, MIL-HDBK-17-3F, Volume 3, Chapter 6, ASTM International 2002.
2. Cole RT, Bateh EJ, Potter J, Fasteners for composite structures, Composites 1982; 13 [3], 233-240.
3. Godwin EW, Matthews FL, A review of the strength of joints in fibre-reinforced plastics: Part 1. Mechanically fastened joints, Composites (1980), 11 [3], 155-160
4. Matthews FL, Kilty PF, Godwin EW, A review of the strength of joints in fibre-reinforced plastics. Part 2. Adhesively bonded joints, Composites 1982; 13 [1], 29-37.
5. Cluley AP and Scoular RP, Jointing of components moulded in carbon fibre-reinforced thermoplastics, Composites (1983); 14 [1] 1983, Pages 19-26.
6. Espinosa PS, Groepler DR, Tilt-rotor research aircraft composite blade repairs – Lessons learned, Composites Engineering (1992), 2 [5-7], 477-495.
7. 竹内伸介、佐藤英一、小野田淳次郎、荒川陽司、宮原啓、複合材タンク口元部接着構造におけるエネルギー解放率低減化手法の考察、日本航空宇宙学会論文集 (2010), 58(681), 302-307.
8. 末益博志、前田雄介、並木文春、稲木秀介、ライナーの不均一厚さによる極低温複合材料タンクのライナーと FW 層間の剥離発生と進展に関する一考察、日本複合材料学会誌(2006), 32 [6], 237-243.
9. 酒井智次、ネジ締結概論 (増補版)、養賢堂、2005
10. 山本 晃、ネジ 締結の原理と設計、養賢堂、1996