

## 応力集中の影響を抑制する連続型タブを用いたCFRTP の一方向積層板の引張試験方法

松原, 監壯  
九州大学応用力学研究所

<https://hdl.handle.net/2324/1929678>

---

出版情報：九州大学応用力学研究所技術職員技術レポート. 18, pp.7-12, 2017-10. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン：

権利関係：

# 応力集中の影響を抑制する連続型タブを用いた CFRTP の一方向積層板の引張試験方法

松原 監壯

## 要旨

本技術レポートは平成 28 年度科学研究費助成事業（科学研究費補助金）で実施された奨励研究の実験技術について述べている。日本や EU そして北米などの自動車工業先進国の需要から、つい最近になって研究され始めた熱可塑性樹脂が母材の炭素繊維強化複合材料いわゆる CFRTP の強度特性を調べるために、ASTM や ISO そして JIS に規定されていない全く新しいタイプの長穴付き連続タブを作成し一方向積層板の縦方向引張試験を行っている。その結果からは連続タブの形状に応力集中の影響を抑制する効果が認められ、従来の JIS タブ試験片では困難とされていた理想的な破壊を生じさせることが可能になったと報告されている。

## キーワード

炭素繊維強化複合材料・一方向積層板・引張試験・応力集中

## 1. 緒言

炭素繊維強化樹脂複合材料(CFRP)は鋼の1/4の重さで強さは5-10倍にもなる。軽量・省エネルギーの構造材料として、航空宇宙・自動車・風力発電の分野で需要が拡大している。強化用の炭素繊維はポリアクリルニトリル(PAN)やピッチ等を原料とし、炭化および黒鉛化などの熱処理条件によって高強度系、高弾性率系、高伸度系に分類される。これら炭素繊維の製造技術は東レ、三菱レイヨン、帝人などの日本企業の地道な努力により花開いたもので世界中に販売されている。特に近年はコストダウンとリサイクルに優れた熱可塑性樹脂が母材である炭素繊維強化複合材料(CFRTP)が自動車業界で注目されはじめた。炭素繊維の種類、母材樹脂の種類、繊維含有率、積層構成などの組み合わせによって、必要な特性値を有するCFRTPを成形することができるが、積層の損傷過程が十分に解明されているわけではなく、どのような状態を破壊と定義するかによって強度に差が出てくるので注意が必要である[1][2]。一方向積層板の縦方向引張の場合、試験片に理想的な破壊を生じさせるのは難しく、タブに生じる応力集中の影響により殆どが最大荷重に至る前にタブ近傍から破壊してしまい、みかけの応力値が低く計測されるという欠点がある[1][2]。九州大学応用化学研究所新エネルギー材料工学分野は試験片つかみ部の応力集中の影響を抑制できる長穴付き連続タブを新しく考案した。この連続タブの最適な形状、寸法、剛性を明らかにするのが本研究の主な目的である。

## 2. 実験方法

今回の試験片の区分を表1に示す。素材のプリプレグシートは日本と米国のもを使用した。いずれの試験片も母材樹脂は熱可塑性のナイロンPA6で1方向の炭素繊維プリプレグシートを8層積層しホットプレスで成形した板から、引張方向が0°になるようにダイヤモンド刃で切断したCFRTP[0]<sub>8</sub>の短冊である。短冊の表と裏にアルミ合金(A2024)の長穴付き連続型タブを重ね、試験機でつかむ部分をナイロンが接着可能なひずみゲージ用接着剤で接着した。評価部はCFRTPと連続タブが接着しないよう長さが150mmと80mmの非接着性カプトンフィルムをはさんだ。JISに準拠した普通のタブ接着試験片も作成した。それら試験片の中央表面のCFRTPと連続タブ(A2024)にKFG-5mmの汎用箔ひずみゲージを貼り付けた。

引張試験には最大荷重10トン(100kN)のMTS試験機 (810-Material Test System)を使用した。図2(a)がシステムの全体写真で、図2(b)は試験片を油圧式ウエッジグリップでつかんだ写真である。引張速度が0.5mm/min、データ取り込みは5Hzである。試験の経過時間、強度、ひずみ、ビデオ画像などのデータから破壊応力とひずみの関係を調べ、長穴付き連続型タブの応力集中抑制効果について検討を重ねた。

表 1 CFRTP 試験片の区分

試験片	プリプレグシート	積層	タブ	接着部の長さ (mm)	試験数 (本)
a-1	国産	[0]8	JIS タブ	50	4
a-2	外国産	”	”	”	”
b-1	”	”	長穴付き連続タブ	”	”
b-2	国産	”	”	”	”
C	”	”	”	85	”

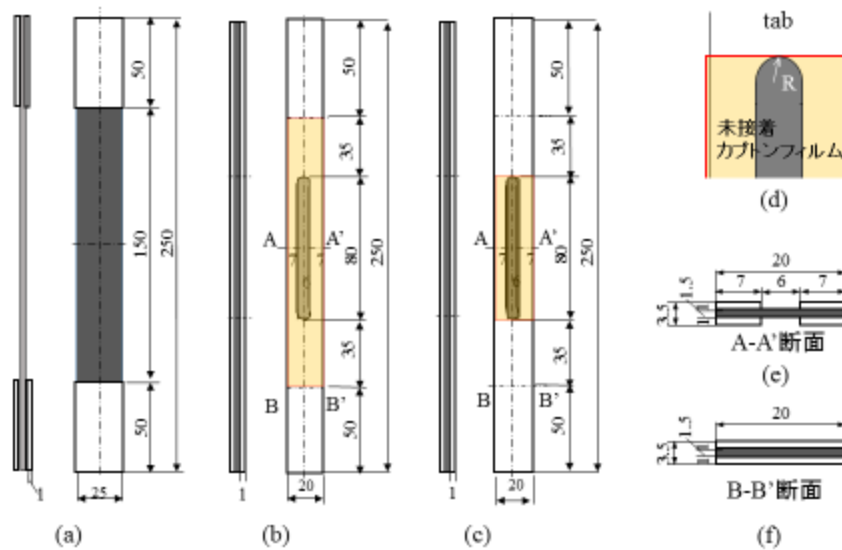


図 1 引張試験片の模式図 (a)両端が JIS タブの試験片、(b)長穴付き連続タブ試験片 非接着長さ 150mm、(c)長穴付き連続タブ試験片 非接着長さ 80mm、(d)長穴の端部、(e)A-A'断面の拡大図、(f)B-B'断面の拡大図

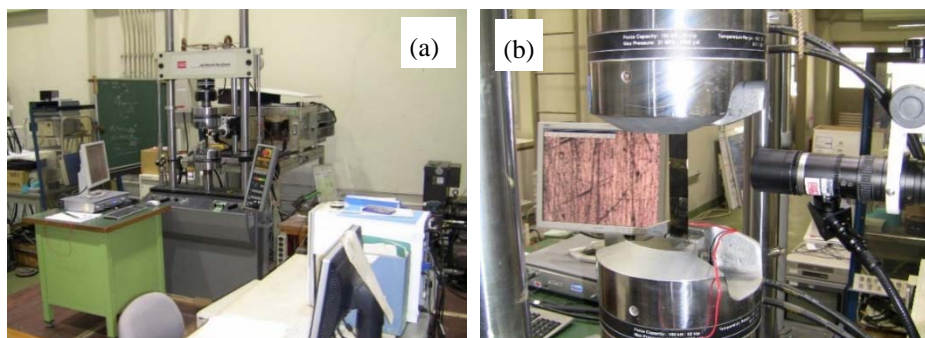


図 2 MTS 試験機(810-Material Test System) (a)全体写真、(b)試験片を油圧式ウェッジグリップでつかんだところ

### 3. 実験結果および考察

図 3 の連続写真は JIS タブを使用した CFRTP[0]試験片 a-2 の引張りによる破壊である。過去に行なった試験の経験からは熱硬化性樹脂が母材の CFRP [0] は一瞬にしてバラバラに壊れてしまうが、それと比べると熱可塑製樹脂が母材の CFRTP[0]は左右両側から徐々に破壊していくのが分かった。剛性と強度は低い、破壊の時間が長く変形も大きな熱可塑性樹脂の特徴が表れている。破壊した部分は引張力を全く受け持たない状態である。フレーム①からフレーム⑩までの引張応力の実験値を上段に、破壊前  $D_0$  と破壊後  $D$  の面積割合  $D/D_0$  値を中段に、そして  $D/D_0$  値を用いて解析した値を下段に示す。











				
0 MPa	1177 MPa $D/D_0=1.0$ 1177 MPa	1076 MPa $D/D_0=0.92$ 1170 MPa	1185 MPa $D/D_0=0.92$ 1290 MPa	1103 MPa $D/D_0=0.81$ 1360 MPa
				
1170 MPa $D/D_0=0.81$ 1440 MPa	1128 MPa $D/D_0=0.77$ 1460 MPa	1202 MPa $D/D_0=0.77$ 1560 MPa	1100 MPa $D/D_0=0.70$ 1570 MPa	333 MPa

図 3 JIS タブを接着した CFRTP [0] 試験片の引張による破壊の連続写真

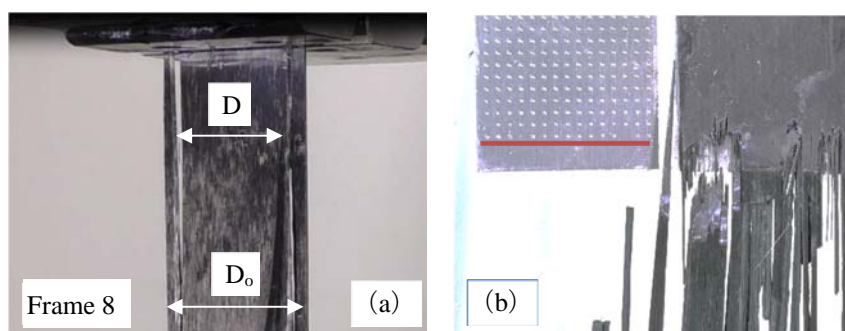


図 4 JIS タブを接着した CFRTP [0] 試験片の破壊写真

図 4 は JIS タブを接着した CFRTP[0]試験片の破壊写真である。図 4(a)は図 3 の第 8 フレームの拡大写真で、破壊前の試験片幅  $D_0$  と破壊した後の幅  $D$  から引張力を受け持つ面積割合  $D/D_0=0.77$  の測定方法を示している。図 4(b)は試験終了後の CFRTP [0]の JIS タブ近傍の破壊である。試験機のウェッジグリップでつかんだ部分とフリーな部分の境界(赤い線)に応力が集中し易いために優先的に損傷が生じ繊維束が抜け落ちている。この部位が破壊の起点になっているのは明らかである。

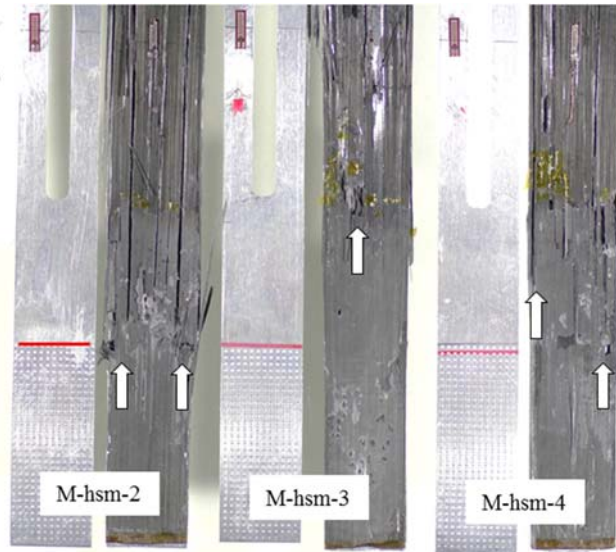


図 5 長穴付き連続タブを接着した CFRTP[0] 試験片の破壊写真 (接着長さ 85mm)

図 5 は長穴付き連続タブの接着長さ 85mm 試験片が破壊した後の写真である。番号 M-hsm-2, 3, 4 の夫々の CFRTP[0]表面に観察される破壊の起点を白い矢印で示す。破壊の起点は、最も応力が集中し易いつかみ部とフリーの境界 (赤い線) からその次に応力が集中し易い長穴の端の間に分散しているのが分かる。何れも JIS タブに比べ損傷が小さく明瞭ではない。夫々の破壊写真からは長穴付き連続タブにより応力集中の影響が抑制されている様子が見てとれる。

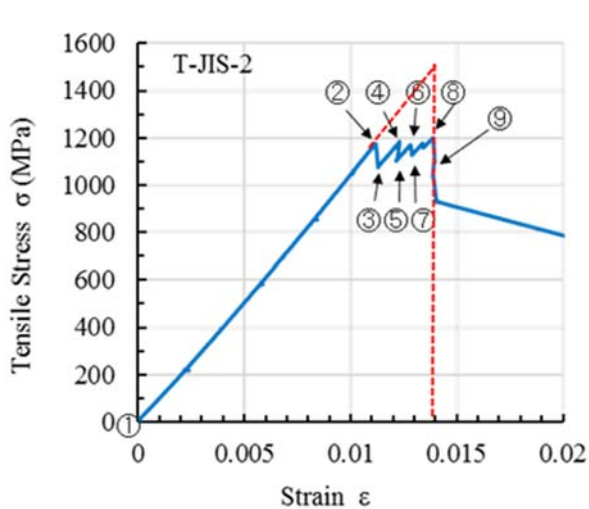


図 6 JIS タブを接着した CFRTP[0]試験片の応力-ひずみ線図

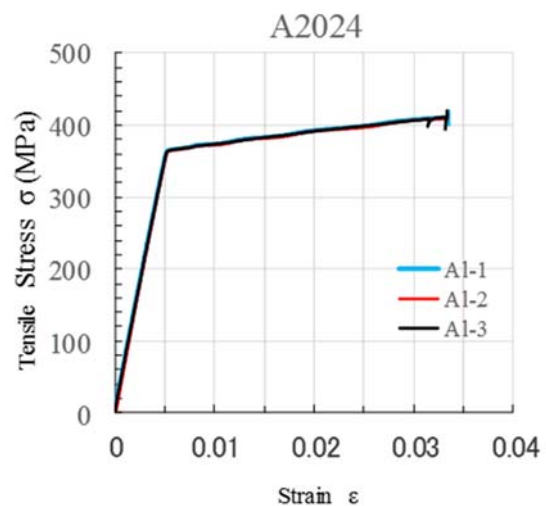


図 7 A2024 の応力-ひずみ線図

図 6 は海外の企業がプレス成形した板から切り出した CFRTP[0]の JIS タブ試験片の応力-ひずみ線図である。図中の①から⑨の番号は図 3 の引張破壊の連続写真の①から⑨のフレームに相当する。図 6 の左下①か

らスタートした線図はひずみが 0.011 で応力が 1170MPa のポイント②で最初の破壊を生じ、その瞬間に③へ応力値を下げています。それから徐々に値を回復してひずみが 0.012 で応力が 1185MPa の④で次の破壊を生じ、その瞬間に⑤へ応力値を下げています。この様な上がり下がり を数回繰り返して最終破壊⑨を経て破断した。最終破壊のひずみは 0.014 である。試験片 4 本の最終ひずみは 0.013 から 0.014 で平均値 0.0135 であった。図 6 の線図に外挿した赤色破線は、図 3 の破壊の連続写真の D/D<sub>0</sub> を用いて求めた破壊応力の解析値に丁度合致するものも分かった。

図 7 はタブに使用したアルミ合金 A2024 の応力-ひずみ線図である。弾性変形と塑性変形の境界の応力とひずみの値は約 365MPa と 0.005 で、塑性変形した後は線図の傾きがなだらかになり 0.02 前後ひずんだ時に約 400MPa の値を示す。

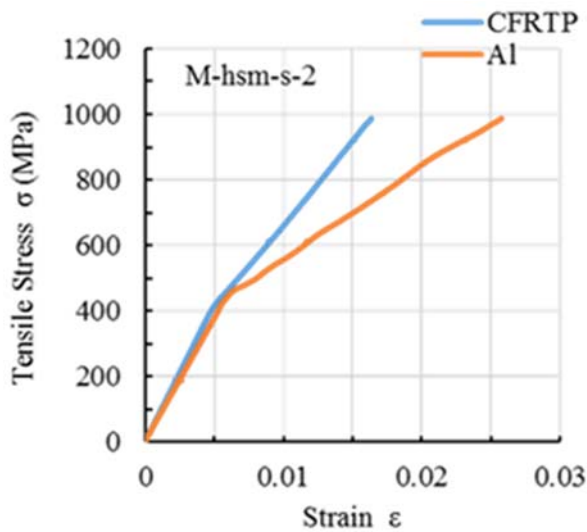


図 8 長穴付き連続タブ 50mm 接着試験片の 応力-ひずみ線図

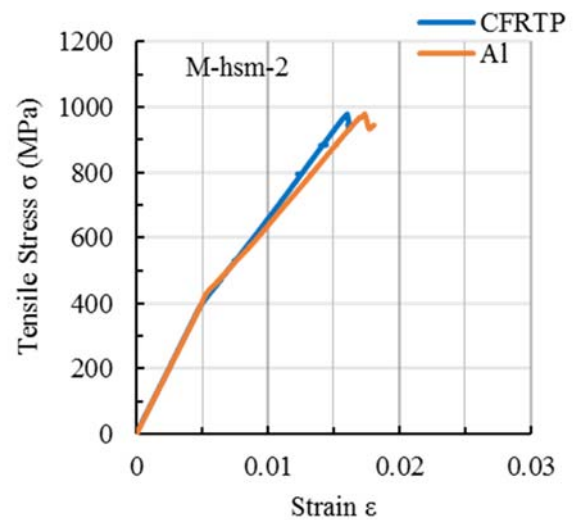


図 9 長穴付き連続タブ 85mm 接着試験片の 応力-ひずみ線図

図 8 と図 9 は日本国内の企業がプレス成形した板から切り出した CFRTP[0]の長穴付き連続タブ試験片の 応力-ひずみ線図である。図 8 は評定部の非接着長さが 150mm で、図 9 が非接着長さ 80mm である。いずれ の試験片も約 1000MPa の引張応力で破壊した。CFRTP[0]の破壊ひずみは約 0.016 である。A2024 のひずみは 約 0.026 と約 0.018 であった。A2024 の線図には評定部の非接着長さの影響が表れている。図は省略するが事 前に行なった JIS タブ使用の引張試験の結果からは、CFRTP[0]の引張破壊応力が約 1300MPa で、破壊ひずみ は約 0.0145 という値が得られている。

以下に複合材料の物性値が近似的に予測できる複合則を用いて長穴付き連続タブ試験片の CFRTP[0]の破 壊応力を予測してみる。

$$\sigma_c = \sigma_{CFRTP} V_{CFRTP} + \sigma_{Al} V_{Al} \text{ -----(1)}$$

$$\sigma_{CFRTP} = (\sigma_c - \sigma_{Al} V_{Al}) / V_{CFRTP} \text{ -----(2)}$$

$\sigma_c$  : 試験片の応力、 $\sigma_{CFRTP}$ ,  $\sigma_{Al}$  : CFRTP、Al の応力、 $V_{CFRTP}$ ,  $V_{Al}$  : CFRTP、Al の面積割合

図 8 と図 9 の破壊応力は約 1000MPa であるが、この試験片の応力は荷重を図 1(e) A-A'断面積で除した値 である。塑性変形後の A2024 の応力が約 400MPa なので、式(2)から予測される CFRTP[0]の破壊応力は約 1560MPa である。



#### 4. 結言

長穴付き連続型タブを接着した試験片の CFRTP 破壊ひずみは JIS タブ試験片に比べ約 10%大きくなるのが分かった。その実験値を JIS タブ試験片の荷重-ひずみ線図に外挿してみると CFRTP の破壊応力の推定値もやはり約 10%大きくなるのが分かった。

複合則から予測される CFRTP[0]の破壊応力は約 1560MPa である。破面の観察からも応力集中がかなり緩和されているのは明らかで、繊維強化複合材料 FRP の一方向積層板の縦方向引張で、試験片に理想的な破壊を生じさせるのは難しいとされていたが、本研究により長穴付き連続タブの応力集中抑制効果を実証することができた。

#### 参考文献

- [1] 野口義男「直交積層 CFRP の引張特性試験方法に関する評価」航空宇宙技術研究所資料 TM-736.1999 年 1 月.
- [2] 日本工業規格 JIS K7165:2008 「プラスチック-引張特性の求め方-第 5 部一方向繊維強化プラスチック複合材料の試験条件」 2008 年.
- [3] 例えば「複合材料の事典 総説 3.2 金属基複合材料 (a)複合則」 p.p.35-36.朝倉書店 1991 年 3 月.

#### 謝辞

本技術レポートは独立行政法人日本学術振興会 JSPS の平成 28 年度科学研究費助成事業の奨励研究「課題番号 16H00343・応力集中の影響を抑制する連続型タブを用いた CFRP の 1 方向積層板の引張試験方法」の一環である。

実験に使用した複合材料の主なものは日本発条株式会社ならびに丸八株式会社から提供されたものです。改めて感謝申し上げます。

応用力学研究所新エネルギー材料工学分野の汪文学准教授には貴重な共同利用実験設備を使用する許可さからに励ましのお言葉を頂きました。ここに改めて感謝の意を表したいと思います。