研究論文

一方向強化 CFRP 材の引張試験法の検討

植村 益次*, 井山 向史*, 山口 芳子*

(1975年9月17日受付)

Discussion on Tensile Testing Method of Unidirectional Carbon-fiber Reinforced Plastic Materials

M. UEMURA,* H. IYAMA* and Y. YAMAGUCHI*

(Received September 17, 1975)

Because of extremely large anisotropy of unidirectional carbon-fiber reinforced plastics, it is very difficult to obtain its ultimate tensile strength in the fiber direction by use of the usual specimen shapes which have been used. Accordingly, (1) the stress distributions in the orthotropic specimens with circular cutouts widthwise or thicknesswise were analysed by use of finite element method in order to discuss which shape was more feasible, (2) as the result of static and fatigue tensile tests with various kinds of specimen dimensions, it was found that the fracture behaviors reasonably coincided with the theoretical consideration, and (3) consequently, a specimen that has larger circular radius of curvature cut out in the thickness, larger reduction ratio from ends to central crosssections and longer ductile tabs attached to both fixing ends and other related procedures were proposed for a standard testing method of unidirectional carbon-fiber reinforced plastics.

I. は し が き

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) 材においてとくに各種複合材の基本となる一方向強化材の異方性はきわめて大きい、最も重要な繊維方向の引張強さを実験的にも確認する必要がある。しかし従来の等方性材料の場合に用いられるダンベル型や JIS 規定の試験片形状によると、繊維方向の引張強さ F_L にくらべて、繊維と直角方向の引張強さ F_T や繊維に沿う剪断強さ F_{LT} がきわめて小さいので、純粋な引張破壊を得ることがむずかしい。そこで (1) F_L による破壊を得るにはいかなる試験片形状が望ましいかを、有限要素法による応力解析によって理論的に検討するとともに、(2) 静的および動的疲労引張試験を行なって理論解析と比較検討し、(3) 標準試験

法として望ましい試験片形状を提案する一助とする。

II. 応力分布の理論計算

通常の試験片形状では両端固定部での破壊や引張破壊以外での破壊がおこるので、試験片中央部での引張破壊が得られるように、緩やかな円弧切欠をつける場合を考える。Fig. 1 に示すように円弧切欠を (i) 板厚方向につけた試験片と (ii) 板幅方向につけた試験片の 2 種類が考えられ、(i) は平面歪問題、(ii) は平面応力問題として有限要素法で解析する。両端部の半幅 $b (=B/2)$ 、板厚 t を基準にし、円弧部の断面減少率 a/b 、曲率度 R/t あるいは R_b/B をパラメータにして数値計算を行なう。

1. 要素分割法

応力分布を想定して、Fig. 2 に示すように要素分割する。円弧部の x 方向半分長さを $l_1 (=Nl_0)$ とし、 a 、 R の大きさに応じて軸方向の分割数 N を $2\sqrt{R}/a$ (mm 単位) に近い整数とした。幅方向は 4 分割で、中心線近くは幅広く、周縁近くは狭くして、6:5:4:3 の比率で分割する。

* 東京大学宇宙航空研究所 (153 東京都目黒区駒場 4-6-1)

Inst. of Space and Aeronaut. Sci., Univ. of Tokyo, 4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153, Japan

Fig. 1 Tensile specimens with circular cutouts (radius of curvature: R).

2. 異方性弾性係数

剛性マトリックス中の弾性係数としては、後述の一方強化 CFRP 供試体の実験値として次の値を用いた。

$$E_x = 12,000 \text{ kg/mm}^2, E_y = 600 \text{ kg/mm}^2$$

$$\nu_x = 0.40, \nu_y = 0.02, G_{xy} = 300 \text{ kg/mm}^2$$

3. 数値計算結果

Fig.1 の (i), (ii) 形の試験片を対象に、それぞれ R/t , R_b/B をパラメータにし、 a/b 値に対して応力値を示すが、応力値は梯形要素を構成する2個の三角要素の平均値である。

1) 軸引張（繊維）方向応力 σ_x

Fig. 2 Mesh subdivisions used in finite element analysis (the case of $a=2.5 \text{ mm}$ and $R=125 \text{ mm}$).

Fig. 3 Relationship between $\sigma_{x,\max}/\sigma_0$ and b/a .

σ_x の y 方向分布は Fig. 3 中に図示したように、円弧底近傍では応力集中により周縁部で最大 ($\sigma_{x,\max}$) であり、両端近くになると応力流れ密度により中心線上的のほうが大きくなる。いま円弧底での最大応力 $\sigma_{x,\max}$ を取り上げて Fig. 3 に示す。曲率半径 R が小さい程応力集中度が増して $\sigma_{x,\max}$ が増加し、 b/a に略比例して $\sigma_{x,\max}/\sigma_0$ (σ_0 : 負荷平均引張応力) が増加するのは当然である。しかし Fig. 4 に示すように、切欠き底断面での平均応力を σ_{mean} として、 $\sigma_{x,\max}/\sigma_{\text{mean}}$ をプロットすると、 b/a が大きくなると1に近くなり、応力集中効果が無視でき、 R/t の大きいほどその傾向があるので (i) 形の試験片のほうが望ましいことがわかる。

2) 繊維に沿う剪断応力 τ_{xy}

τ_{xy} は円弧底は対称面なので0であるが、円弧に沿って離れると発生する。 τ_{xy} の y 方向の分布は、Fig.5 中に図示するように円弧途中では周縁部では最大であるが、両端部に近くなると周縁より少し内側で最大となる。しかし最大剪断応力 $\tau_{xy,\max}$ は円弧底より少し離れた円弧部周縁で起こるので、周縁部剪断応力 $\tau_{xy,e}/\sigma_0$ をと

Fig. 4 Relationship between $\sigma_{x,\max}/\sigma_{\text{mean}}$ and b/a .

Fig. 5 Variations of $\tau_{xy, \epsilon}/\sigma_0$ in a circular cutout. Fig. 6 Relationship between $\tau_{xy, mm}/\sigma_0$ and b/a . Fig. 7 Relationship between $\tau_{xy, mm}/\sigma_{x, max}$ and b/a . Fig. 8 Relationship between $\sigma_{y, max}/\sigma_0$ and b/a . Fig. 9 Relationship between $\sigma_{y, max}/\sigma_{x, max}$ and b/a .

Table 1. Tensile specimens and fracture behaviors.
(thickness $t=3$ mm and width $B=10$ mm)

Specimen configuration	Radius of circular cutout R (mm)	Dimensions in minimum cross section		Fracture behavior	
		Width $2b$ (mm)	Thickness $2a$ (mm)	Static test	Fatigue test
(i) Specimens with curvatures thicknesswise	$R_t=75$	($B=10$)	1.2	A	A'
		(")	1.4	A	
		(")	1.8	A	B
		(")	2.4	B	B
	$R_t=125$	(")	1.2	A	A'
		(")	1.8	—	A'×2
		(")	2.4	—	A', B
	$R_t=200$	(")	1.0	A×2	A'×5
		(")	1.2	—	A'
		(")	2.4	—	B
(ii) Specimens with curvatures widthwise	$R_b=100$	6	($t=3$.C)	B	—
		8	(")	—	B
(iii) Specimens with curvatures both thicknesswise and widthwise	$R_b=100$	8	1.8	—	A', B
	$R_t=125$	8	2.4	A'	A'
	$R_b=R_t=200$	8	1.0	—	A'×7, B×3

り、円弧底よりの距離に対して Fig. 5 に示す。曲率半径 R が小さいほど円弧底近くで最大値 ($\tau_{xy, \text{mm}}$) を示し、 R が大きいほど円弧底より離れた位置で発生する。Fig. 5 より、平面歪の場合のほうが平面応力の場合より $\tau_{xy, \text{mm}}$ が小さく、 R/t が大きいほど最大剪断応力が小さいので、(i) 形の試験片のほうが望ましい。

Fig. 6 に $\tau_{xy, \text{mm}}$ を断面減少率 b/a に対して示すが、 b/a や曲率半径が小さくなるほど $\tau_{xy, \text{mm}}$ が増大することがわかる。

次に剪断破壊と引張破壊の原因となる $\tau_{xy, \text{mm}}$ と $\sigma_{x, \text{max}}$ の比をとり、Fig. 7 に b/a に対して示す。これから通常よく用いられる試験片形状として $b/a=2$ 程度では $\tau_{xy, \text{mm}}/\sigma_{x, \text{max}}$ 値が大きいのでまずく、繊維に沿う剪断破壊をさせないで引張破壊を起こさせるには、断面減少率を極端に大きくするか、あるいはないほうが望ましいことがわかる。

3) 繊維と垂直方向の引張応力 σ_y

繊維と垂直方向の引張強さ F_r も F_L にくらべてきわめて小さいので、わずかの σ_y の発生も問題となる。 σ_y の y 方向分布を Fig. 8 中に図示するが、円弧底近くでは中心線 (x 軸) 上で最大で、周縁では 0 であるが、

両端部に近くなると傾斜している円弧周縁で最大となる。断面減少率 b/a が小さいときには前者の σ_y が大きく、 b/a が大きいときは後者の σ_y のほうが大きく、最大値 $\sigma_{y, \text{max}}$ を Fig. 8 に b/a に対して示す。曲率 ($1/R$) と断面減少率 (b/a) が大きいと、 $\sigma_{y, \text{max}}/\sigma_0$ は大きくなるが、 b/a が大きいときの $\sigma_{y, \text{max}}$ の発生位置も繊維に沿う剪断応力 $\tau_{xy, \text{mm}}$ と同様に円弧底から離れた周縁部である。繊維方向の引張破壊を起こさせる可能性を検討するため、 $\sigma_{y, \text{max}}/\sigma_{x, \text{max}}$ を Fig. 9 に示す。Fig. 7 における $\tau_{xy, \text{mm}}/\sigma_{x, \text{max}}$ に対する考察と同様に、引張破壊をさせるには曲率半径 R と断面減少率 b/a が大きいほうが望ましいことがわかる。

4) 数値計算結果に基づく試験片形状の検討

上述の応力計算結果から、 $\tau_{xy, \text{mm}}$ や $\sigma_{y, \text{max}}$ により繊維に沿う剪断 (F_{LT}) や繊維と直角方向の引張 (F_r) が原因となる破壊を起こさせないで、円弧底平均引張応力 σ_{mean} に近い値の最大引張応力 $\sigma_{x, \text{max}}$ により、繊維方向引張 (F_L) が原因となる引張破壊を起こさせるには、次のようにすると望ましいといえる。

- ① 薄い板厚方向に曲率をつける。
- ② 曲率半径 R を大きく、緩かな曲率とする。

Table 2. Classification of fracture behaviors.

Classification	Fracture behavior	
A	中央最小断面部における繊維の引張破壊によるもの（わずかに円弧部途中からクラックがはいっている）
A'	中央最小断面部で最終的には繊維が引張破壊するが、それ以前に円弧途中から繊維に沿う剪断クラックが板厚、板幅方向で進行し、バラバラになって破壊する
B	中央最小断面部の円弧途中から板厚方向あるいは板幅方向に剪断クラックが進行し、チャック部にはいり、つかみ部で応力集中のため破断する

③ 両端固定部と円弧底部の厚さ比，すなわち断面減少率を大きくする。

Ⅲ. 一方向強化 CFRP 材の静的引張試験と動的片振引張疲労試験

上述の有限要素法による応力計算結果を確認し，きわめて実現しがたい一方向強化 CFRP 材の引張破壊を起こさせるための試験法について有益な資料を得るために静的引張試験と繰返し負荷による片振引張疲労試験を行った。

1. 試験片

1) 素材および成形条件

カーボン繊維：東レトレカシート P-301

（プレプレグ，使用繊維 T-300A）

樹脂：エポコート 828

硬化促進剤：BF₃-MEA

硬化条件：予備加熱 160～170℃，15分

一次成形 170℃×1時間，圧力 4 kg/cm²

二次成形 170℃×2時間，圧力 1 kg/cm²

積層数：14層（板厚約 3 mm）

CFRP 素材寸法：300×160×3 t

繊維容積含有率：V_f=56～57 %

2) 試験片形状

Fig. 1 に示すように

(i) 板厚方向にのみ円弧切欠 (R_i) を持つもの

(ii) 板幅 " (R_b) "

のほかに

(iii) 板厚・板幅両方向に円弧切欠 //

の3種類を製作し，Table 1 に示すように曲率半径 R，板幅，円弧底厚さを種々変えた。

3) 試験片固定部の Al 端板接着

CFRP 材がきわめて硬く，試験機チャックとの迂りを防止するとともに，層間剪断強さ F_{LT} が低いので試験片中央部に円滑に荷重を伝達させるために，Fig. 1 に示すようにつかみ部の両面に長さ 110 mm，厚さ 1.5 mm の軟かい Al 板タブを接着した。接着に際しては剪断はく離を防止するために CFRP 表面に多数の溝，くぼみをつけ，アララナイト接着剤で接着した。

2. 繰返し負荷・測定要領

1) 繰返し片振引張負荷

静的引張強さ σ_B を基準にし，その 60～90 % の全応力振幅レベルの片振引張を，島津製サーボバルサー (EHF-10) 疲労試験機を用い負荷速度 30 Hz で負荷した。

2) 剛性低下測定

繰返し疲労に伴うクラック発生により見かけ上の引張剛性変化を測定するため，円弧部を挟み，標点距離 50 mm の差動変圧器式変位計を取りつけた。

3. 試験結果の検討

1) 破壊様相

破壊様相を分類すれば Table 2 に示すように3種類となる。静的引張試験では曲率半径をかなり大きくして

Fig. 10 S-N diagrams in tensile fatigue tests.

△ Type (i), ○ Type (iii).

Fig. 11 Reduction of apparent rigidity during tensile fatigue tests.

おけば、円弧底中央最小断面部での引張破壊 (Table 2, A型) が得られる。しかし繰返し疲労試験では、繊維に沿う剪断応力や繊維と垂直方向の応力によって繊維と樹脂との界面強さが弱化し、 $\tau_{\max, \text{mm}}$, $\sigma_{y, \max}$ の発生する円弧途中から繊維に沿ってクラックがはいり、これが成長したり、数を増してゆく。そして最終的には最小断面部につながる中心線に近い部分のみが耐荷するようになり、その結果円弧底でのみ引張破壊するか (A'型)、あるいはクラックがチャック部まで進行し、最小断面部がチャック部で引き抜けるか (B型) のいずれかを呈する。

(i) の板厚方向にのみ曲率を有する場合には、 b/a が大きく、 R が大きいと、解析計算結果も示すように A'型の破壊を呈する。しかし (ii) の板幅方向に曲率を有する場合には、静的負荷でも B型で破壊し、(iii) の板厚・板幅両方向に曲率を有する場合には、最小断面部での引張応力は大きく、B型の破壊を呈するものも見られた。

いずれにしても疲労試験では円弧途中からの繊維に沿うクラック発生は、 $R=200 \text{ mm}$ 程度でも避けられなかった。要約すると、静的試験のほうが目標の A型破壊様相を呈しやすく、 R と b/a を大きくしたほうが望ましいことがわかる。

2) S-N 線図

最小断面部の板厚 1 mm の場合で、(i) 型 $R_t=200 \text{ mm}$, (iii) $R_t=R_b=200 \text{ mm}$ の 2 種類の試験片について繰返し片振引張疲労の S-N 線図を Fig. 10 に示す。

疲労破壊の常として、応力の低下とともに破壊までの繰返し数 N は増加するが、一方向強化 CFRP 材の引張疲労では、破壊過程の複雑さのためバラツキが大きい。

3) 疲労による剛性低下

(i) 型の板厚方向にのみ曲率を持つ試験片について、疲労の進行に伴う引張方向のみかけ上の剛性の低下を円弧部の変位計によって測定し Fig. 11 に示す。繊維方向

剛性の初期値を E_0 とし、 N 回繰返し後の値を E_N とし、 $E_N/E_0 \sim N$ 線図が示されているが、繊維方向引張破壊の前に繊維に沿うクラック発生とともに円弧底を含むゲージ長 50 mm についての見かけ上のヤング率は著しく低下することがわかる。これはクラック進行とともに円弧部表面層がはく離していることに因るものである。

4) 試験結果と計算結果との比較検討

一方向強化 CFRP 材の基本となる静的破壊強さは、繊維容積含有率 V_f とか樹脂・成形条件などによってももちろん異なるが、試験結果によると $F_L = 141 \text{ kg/mm}^2$, $F_{LT} = 6 \sim 7 \text{ kg/mm}^2$, $F_T = 2 \sim 3 \text{ kg/mm}^2$ 程度と推定される。したがって $F_{LT}/F_L = 0.043 \sim 0.050$, $F_T/F_L = 0.014 \sim 0.021$ 程度となる。繰返し負荷をうける場合の破壊強さがさらに低下することはもちろんである。

そこで Fig. 7 の $\tau_{xy, \text{mm}}/\sigma_{x, \text{max}}$ と比較すると、(ii)の板幅方向に曲率を付した場合には、 $R_0/B = 100/10 = 10$ 程度なので $\tau_{xy, \text{mm}}/\sigma_{x, \text{max}} \approx 0.055$ ($\sigma_{y, \text{max}}/\sigma_{x, \text{max}} \approx 0.008$) となり、B型の破壊の可能性がきわめて強いことがわかる。しかし(i)の板厚方向にのみ曲率を付した場合には $R_t/t = 75 \sim 200/3 = 25 \sim 66.7$ となり、 $\tau_{xy, \text{mm}}/\sigma_{x, \text{max}} \approx 0.04 \sim 0.03$ なので、Table 1 からわかるように $R_t = 75 \text{ mm}$ で円弧底厚さ $2a$ を大きくしない限り、あまり剪断破壊の心配はないように思われる。しかし繰返し負荷を受けると静的試験で得られた F_{LT} , F_T はとくに低下すると思われ、応力の再配分を伴いつつ A' 型の破壊を起こすものと思われる。

次に Fig. 9 の $\sigma_{y, \text{max}}/\sigma_{x, \text{max}}$ を比較すると、上述の試験片形状の場合 $0.007 \sim 0.008$ 程度なので F_T 単独による引張破壊が原因とは思われないが、 $\tau_{xy, \text{mm}}$ に重畳してクラック発生を促進する影響はあるように思われる。

静的試験と疲労試験とを比較すると、疲労試験のほうが純粋な引張破壊を起こしにくいので、試験片形状についてより慎重な配慮が要望される。

IV. 引張試験片形状と試験法に対する提案

以上の解析計算と試験結果を参照して、異方性のきわめて著しい一方向強化 CFRP 材の引張試験に際しては、とくに V_f が大きいと F_{LT}/F_L や F_T/F_L が小さいの

で、次のような配慮が必要である。

1) 円弧切欠きを入れる方向

実験によっても確認されたが、本解析計算結果の示すように、円弧切欠きは平板の板厚方向に入れるほうが、曲率半径/板厚比が大きくなり、応力集中効果を緩和し、問題となる繊維に沿う剪断応力 τ_{xy} や繊維に垂直方向の引張応力が小さくなるので望ましい。

2) 曲率半径

曲率半径/板厚比 (R_t/t) が $40 \sim 70$ 程度に大きいほうが望ましいのは当然である。しかし R_t が大きすぎると切削が容易でなく精度も問題になるし、 t を小さくしすぎるとこれも精度上よくない。

3) 断面減少率

両端固定部と円弧底での断面積比が大きすぎると、応力集中が問題になるように直観的に考えられるが、曲率半径 R_t さえ十分大きい場合には $b/a = 3 \sim 5$ 程度に大きいほうが、むしろ①応力集中効果を減じ、② F_{LT} , F_T による破壊より F_L による引張破壊を起こさせやすいので望ましい。

4) 両端固定部

試験機チャック部から試験片に剪断作用を通じて円滑に引張応力が作用するように、両端平行部に比較的長い Al 板などのタブを両面に接着するとよい。

以上の考察から標準試験片としては当面 $R_t = 200 \text{ mm}$, $2a = 1.0 \text{ mm}$, $t = 3 \text{ mm}$ 程度のものが実現可能な試験片寸法として提案したい。アメリカではクーボン形試験片の両端部両面にタブのみをつけたものを提案しているが¹⁾、試験片板厚が薄い場合を除き、タブ端の境界部で壊れやすく、またタブがはく離しやすいので問題があるようである。また JIS, ASTM などでは平行部をもったダンベル状試験片が用いられているが、CFRP のように極端な異方性をもつ場合には、本文の解析・実験結果から明らかなように、平行部から両端部にわたる変断面部で繊維に沿ってクラックがはいりやすく望ましくないと思われる。

参 考 文 献

- 1) Aerospace Material Specification AMS, 3894, Nov. (1972).