

Application News

ASTM D5528に準拠したCFRPのDCB試験

亀井 由樹

ユーザーベネフィット

- ◆ CFRPの設計に必要な層間強度を測定することができます。
- ◆ 亀裂進展の様子をTRViewXで録画することにより、試験後でも亀裂長さの観察が可能です。

■はじめに

強度や耐久性が要求される航空機材料等を中心に、従来材料よりも比強度・比剛性が高く、錆びることのない炭素繊維強化プラスチック（CFRP）の適用が検討されています。しかし、CFRP積層材において優れた力学特性を示すのは、強化された方向（繊維方向）に限り、強化されていない方向（層間方向等）の強度は著しく低いことが知られています。また、CFRP積層材は衝撃に弱く、衝撃荷を受けると材料内部に層間剥離等の損傷を生じます。そのため、設計や製品開発において、材料内部の損傷が強度に及ぼす影響を考慮する損傷許容設計が取り入れられています。損傷許容設計を行うためには、層間の亀裂伝播の抵抗を明らかにする必要があり、破壊じん性試験が行われています。

均質等方性材料では、一般的に破壊じん性試験としてモードⅠ（開口型）のみを行っていますが、樹脂マトリクスと繊維から成る複合材料は異方性を示すため、モードⅠだけでなくモードⅡ（面内せん断型）、モードⅢ（面外せん断型）のように様々なモードでの評価も重要となってきます（図1参照）。DCB試験（Double Cantilever beam Test）は純粋なモードⅠの特性を評価する試験です。均質等方性材料ではじん性の評価として、応力拡大係数Kを用いることが多いですが、異方性材料である複合材料においての層間破壊では応力拡大係数Kの2乗に比例したひずみエネルギー解放率Gで評価することが一般的です。

本稿ではASTM D5528に準拠したDCB試験を行い、モードⅠの層間破壊靱性 G_{Ic} を求めました。

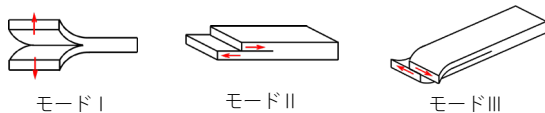


図1 モードの模式図

■モードⅠ層間破壊靱性 G_{Ic}

モードⅠ層間破壊靱性 G_{Ic} の解析に用いる試験力 P の定め方を図2に示します。それぞれ(1)NL(2)5%/max(3)VISの3つで、以下の通りです。

- (1)NL : 非線形挙動の開始点
- (2)5%/Max : 5%オフセット点または最大試験力点
- (3)VIS : 目視による亀裂発生点

以上の3つの方法でモードⅠ層間破壊靱性 G_{Ic} を求めることができます。

また G_{Ic} の算出方法は①補正無し ②MBT ③CC ④MCCと4つの算出方法があります。ASTM D5528では「MBT、CC、MCCの補正法については3.1%以下の違いしかなく、どの手法が優れているということはない。しかし、MBTによる算出方法は最も保守的な数値を得ることができる」と書かれており、MBTによる補正手法を推奨されています。（ G_{Ic} の算出方法は4ページの補足を参照）

■測定システム

図3に今回使用した試験片の写真を示します。ASTM D5528では試験片の両側面に亀裂進展長さ5mmまでは1mmごと、5mm~25mmでは5mmごと目盛りを書くことが規定されていますが、今回は試験片の側面に亀裂の進展を確認するための目盛りを書き、もう一方にはクラックゲージを貼り付け亀裂長さを確認しました。さらに試験片にモードⅠ方向の負荷を加えるためタブを接着しています。また、試験片作製時に薄いフィルムを層間に入れて作製することにより、試験片に初期亀裂を加えています。

今回、亀裂進展の様子を予亀裂先端から50mmの長さまで確認しました。ビデオ式非接触伸び幅計（以降、TRViewXと表記）に接写リングを取り付け、高倍率で目盛りの撮影を行い、カメラで亀裂進展長さを確認しています。TRViewXを用い動画を保存することで、試験後に結果と同期した動画を観察しながら、計算処理を行うことができます。

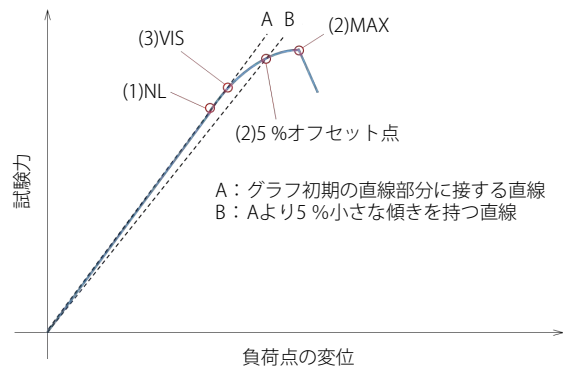


図2 モードⅠ層間破壊靱性 G_{Ic} を求める試験力の位置



図3 試験片の写真（左：目盛り側、右：クラックゲージ側）

■ 試験

図4に試験の様子を示します。精密測定のために高倍率としたTRViewXの視野では、試験片の亀裂進展を最後まで追うことができないため、亀裂進展方向に動くスライドレールを取り付け、試験中は亀裂先端が視野内となるように手で位置を調整しました。表1に装置構成と試験条件、表2に試験片の情報をそれぞれ示します。

試験では最初に亀裂長さが、3-5 mmになるよう負荷し、試験片の両側面の亀裂長さを確認します。その際、両側面の亀裂長さの差が2 mm以上の差があればその試験を中止します。今回はTRViewXの亀裂長さとクラックゲージの亀裂長さを比較し、2 mm以上の差が無いことを確認し試験を行いました。亀裂長さ確認後、再度一定速度で試験を行い、各亀裂長さの時のモードI層間破壊靭性 G_{Ic} を算出しました。

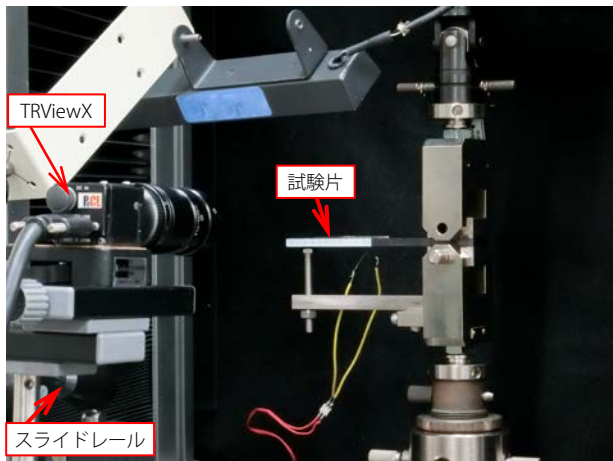


図4 試験の様子

表1 装置構成と試験条件

試験機	: 精密万能試験機AGX™-1 kNV
ロードセル	: 1 kN
測定治具	: 層間破壊靭性評価治具
ソフトウェア	: TRAPEZIUMX™-V (コントロール)
亀裂長さ観察	: ビデオ式非接触式伸び幅計TRViewX 55S + 接写リング
試験速度	: 1 mm/min (亀裂長さ4 mmまで) →除荷速度25 mm/min (試験力5 Nまで) →1 mm/min (破断まで)

表2 試験片情報

プリプレグ	: T800S
積層方法	: [0]n
試験片厚さ	: 5 mm
試験片幅	: 25 mm
試験片長さ	: 137 mm
初期亀裂長さ	: 約50 mm

■ 試験結果

図5に試験の結果の一例を示します。今回試験した試験片では最初に不安定な亀裂進展が発生し、A部で一気に力が下がりました。その後、安定して亀裂が進展しましたが、亀裂長さ45-50 mmで破壊しました。

表3に試験結果、図6に G_{Ic} と亀裂長さの関係を示します。初期の破壊靭性は0.3-0.4 kJ/m²に対し、亀裂長さが大きくなると0.5-0.6 kJ/m²と大きくなりました。これは繊維架橋等によるものです。

図7に試験結果とTRViewXの画像をリンクさせたときの各点の画像を示します。今回用いたカメラとレンズの組み合わせでは最大20 mmの視野しかありませんが、スライドレールを使用することで最後まで亀裂進展の様子を確認することができました。

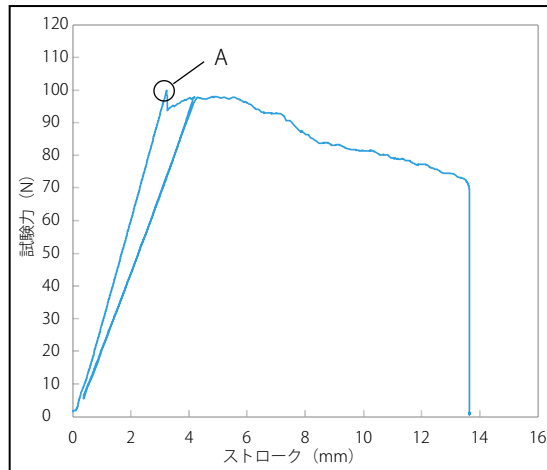


図5 試験結果

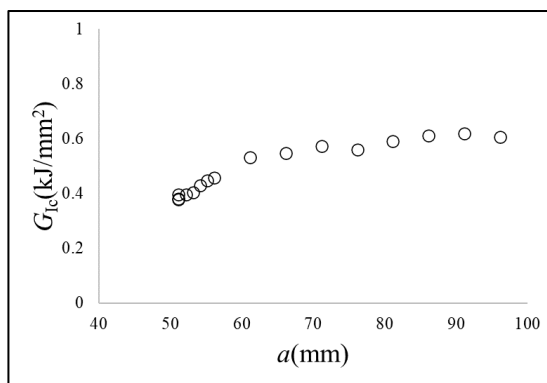


図6 亀裂長さ a と G_{Ic} の関係

表3 試験結果

a (mm)	δ (mm)	P (N)	δ/a	G_{Ic} (kJ/m ²)			
				式(1) 補正無し	式(2) MBT	式(3) CC	式(4) MCC
51.17 (NL)	3.23	99.6	0.063	0.38	0.32	0.34	0.33
51.17 (VIS)	3.55	95.3	0.069	0.40	0.34	0.35	0.33
51.17 (5%/MAX)	3.25	99.9	0.064	0.38	0.33	0.34	0.33
52.17	3.60	95.9	0.069	0.40	0.34	0.35	0.34
53.17	3.73	96.3	0.070	0.40	0.35	0.36	0.35
54.17	3.99	97.4	0.073	0.43	0.37	0.38	0.37
55.17	4.20	97.8	0.076	0.45	0.39	0.40	0.39
56.17	4.39	97.5	0.078	0.46	0.40	0.41	0.40
61.17	5.55	97.9	0.090	0.53	0.47	0.47	0.47
66.17	6.44	93.7	0.097	0.55	0.48	0.49	0.49
71.17	7.63	89.1	0.107	0.57	0.51	0.51	0.51
76.17	8.50	83.7	0.112	0.56	0.50	0.50	0.50
81.17	9.80	81.5	0.121	0.59	0.53	0.52	0.53
86.17	11.1	79.0	0.129	0.61	0.56	0.54	0.56
91.17	12.4	75.9	0.136	0.62	0.57	0.55	0.57
96.17	13.6	71.4	0.141	0.61	0.55	0.54	0.56

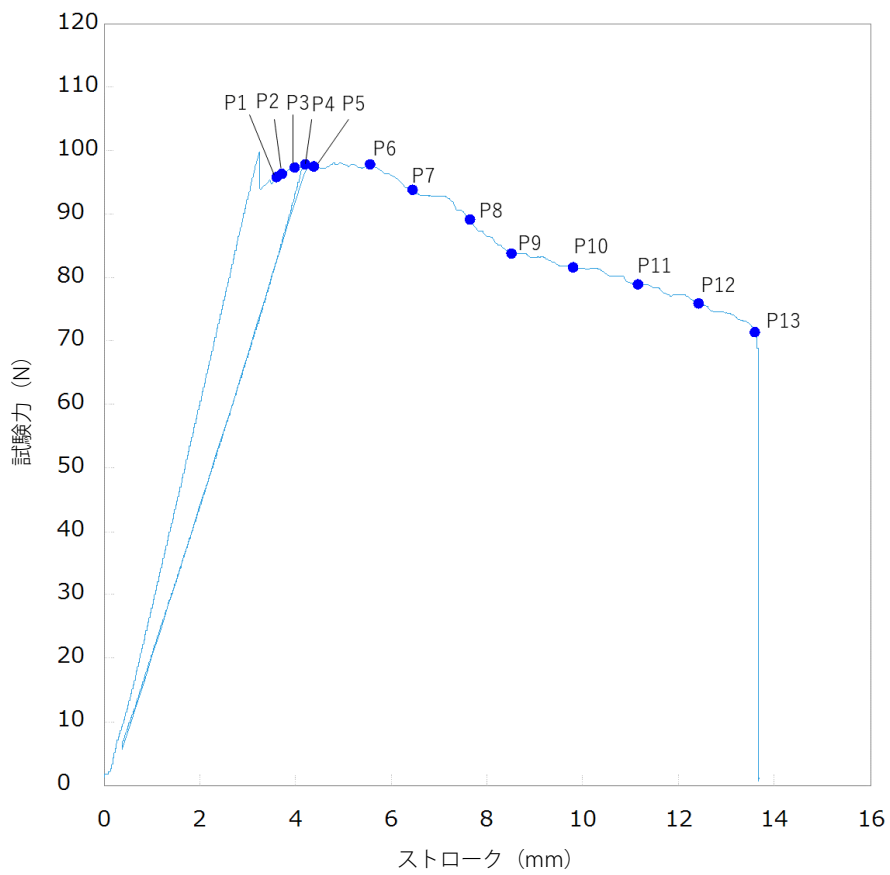
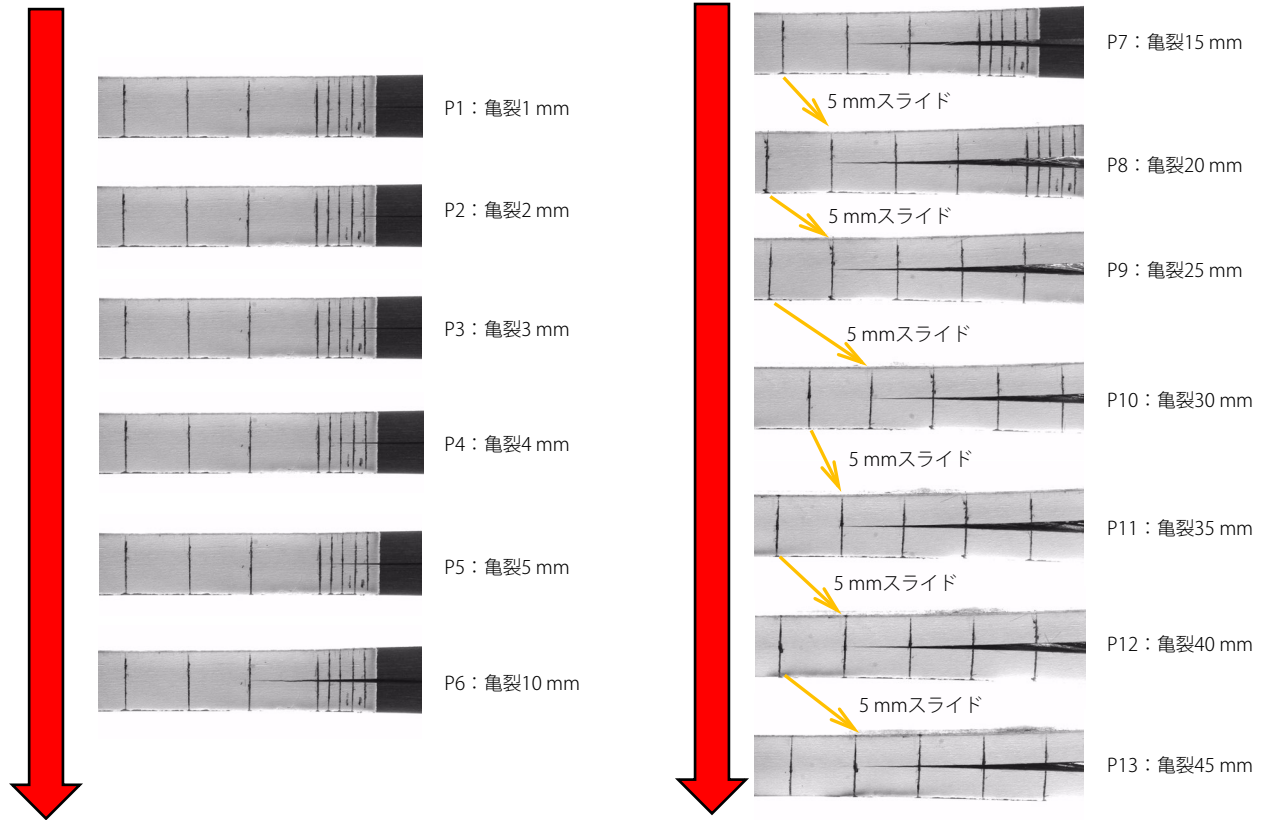


図7 試験結果（下部グラフ）とリンクしたTRViewXの画像（上部写真）

■まとめ

ASTM D5528に準拠した試験を行い、モードI層間破壊靱性 G_{Ic} を求めました。ASTM D5528では亀裂長さ50 mmまでのモードI層間破壊靱性 G_{Ic} の変化を求めるとの記述がありますが、今回はクラックゲージ、TRViewXを用いて、試験後でも解析を行うことができるよう試験を行いました。さらに、スライドレールを使用することで、TRViewXでも50 mmまでの亀裂観察を行うことが容易に可能です。

補足 (G_{Ic} の算出方法)

・補正無し

$$G_{Ic} = \frac{3P\delta}{2ba} \quad \dots \text{式(1)}$$

P : 試験力
 δ : 負荷点の変位
 b : 試験片の幅
 a : 亀裂長さ

・MBT (Modified Beam Theory)

補正無しの数式で a の値に Δ の補正値を加える補正手法。

$$G_{Ic} = \frac{3P\delta}{2b(a+\Delta)} \quad \dots \text{式(2)}$$

但し、 Δ は図8で示す $C^{1/3} - a$ 線図の横軸切片の値。
 C はコンプライアンスの値で δ/P の値。

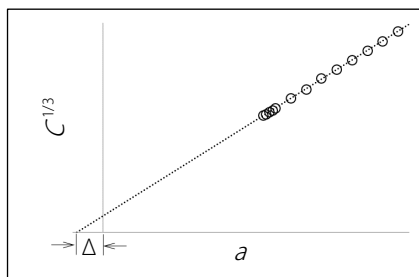


図8 Δ の求め方

・MCC (Modified Compliance Calibration)

A_1 を用いて補正を行う補正手法

$$G_{Ic} = \frac{3P^2 C^{2/3}}{2A_1 b h} \quad \dots \text{式(4)}$$

h : 試験片の厚さ
 a/h : 亀裂長さを試験片の厚さで規格化した値

但し、 A_1 は図10に示す $a/h - C^{1/3}$ の傾きの値。

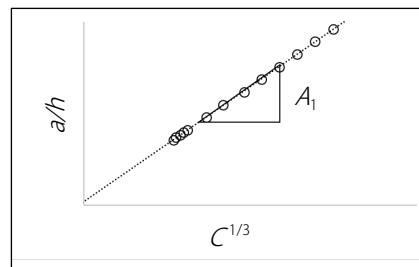


図10 A_1 の求め方

・CC (Compliance Calibration)

補正無しの数式で3の代わりに n を用いる補正方式。

$$G_{Ic} = \frac{nP\delta}{2ba} \quad \dots \text{式(3)}$$

但し、 n は図9で示す $\log C - \log a$ 線図の傾きの値。

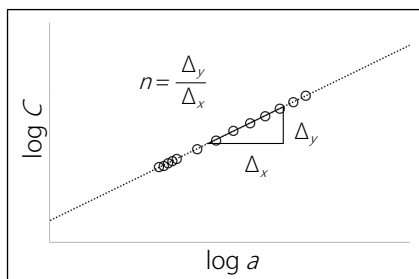


図9 n の求め方

AGX、TRAPEZIUMXは、株式会社島津製作所またはその関係会社の日本およびその他の国における商標です。

株式会社 島津製作所 分析計測事業部
 グローバルアプリケーション開発センター

01-00195-JP 初版発行：2022年1月

島津コールセンター ☎ 0120-131691

本文中に記載されている会社名および製品名は、各社の商標および登録商標です。
 本文中では「TM」、「®」を明記していない場合があります。

本資料は発行時の情報に基づいて作成されており、予告なく改訂することがあります。

最新版は、島津製作所>分析計測機器の以下のサイトより閲覧できます。
<https://www.an.shimadzu.co.jp/apl/index.htm>
 会員制情報サービス Shim-Solutions Club にご登録いただきますと、毎月の最新情報をメールでご案内します。
 新規登録は、<https://solutions.shimadzu.co.jp/> よりお願いします。

© Shimadzu Corporation, 2022