

8 変形時の特性を考慮した 新しい FRP の強度評価・設計技術

松尾 剛*

Method for designing and evaluating strength of FRP based on damage and deformation mechanism

by

MATSUO Tsuyoshi

Abstract

Fiber reinforced plastic (FRP) composite materials have shown potential for applications in various structural vehicles including ships, airplanes and automobiles because they have efficiency and flexibility for designing structures as well as high mechanical and lightweight properties. However, it is difficult to evaluate the intrinsic strength and predict the fracturing process of structural products made from FRP. This paper introduces two examples about design and evaluation techniques for FRP structures. The first technique is for a FRP double-walled fuel tank with a cylindrical sandwich structure that consists of inner and outer walls. The pure tensile strength of a piece of curved wall in the circumferential direction is difficult to obtain due to its curvature. For the design and quality control of the cylindrical structure, we propose a method for evaluating strength which takes into account the initial flexural moment when the curved specimen is gripped by the upper and lower rigid grips of a tensile testing machine. The failure stress at a cross section was calculated as the combination of tensile and flexural stresses. The proposed calculation method could be used to evaluate a pure tensile strength of double-walled structure. The second technique is for a hollow crash tube manufactured from randomly-oriented thermoplastic composites. To clarify the effect of the inter-layer damage function on the energy absorption (EA) of the material, we propose a simulation technique for a finite element model that assigns cohesive zone elements between the random composite layers. A simulation for a drop-weight impact experiment was carried out, and the result showed that the fracture energy performance could be predicted precisely.

* 構造安全評価系

原稿受付 令和 3 年 5 月 3 1 日

審査日 令和 3 年 6 月 1 4 日

1. はじめに

近年、ハイテンやアルミニウム合金に替わる軽量素材として、繊維強化プラスチック (FRP) が注目されている。FRP は適用される構造物の機能や目的に応じて、様々な製造方法や強化構造が開発されており、海洋・船舶分野でも船用プロペラや液化水素タンクの内槽支持構造に適用例が挙げられるように、幅広い用途に貢献している。本報では、無駄のない異方性構造設計が可能なフィラメント・ワインディング (FW) 工法で製作される燃料タンクと、量産性に優れ、衝撃吸収部材として注目されるランダム配向型熱可塑性 FRP に注目して、信頼性設計に資する技術動向について解説する。

まず、FRP 大型構造に有用な FW 工法は、特に燃料貯蔵用タンクを製造する上で活用される。ここでは、図-1 に示す FF 二重殻タンクを取り上げる¹⁾。これは、内殻・外殻ともにガラス繊維強化プラスチック (FRP) 製であり、従来の鉄鋼製あるいは鉄鋼と FRP の SF 二重殻タンクよりも大幅な軽量化を実現でき、運搬や設置・組み立て等の作業性に優れる。加えて、鉄鋼製で必ず生じる腐食や電食による劣化の心配が無い。さらに、内殻と外殻の隙間に用途に応じた機能を備えることができる。例えば、ガソリンタンクの場合は、ガラス繊維三次元織物から成る検知層を導入し、織物立体構造が両殻の距離を十分に隔てて支え、内殻あるいは外殻に損傷が生じた場合、検知層に満たした検知液によって破損を知らせ、タンク外に燃料が漏れることを未然に防ぐ。この破損検知機能の信頼性の高さから、運用時メンテナンス費用を下げることで、ライフサイクルコストの低減を訴求している。

FRP 製タンクの胴体部 (円筒殻) の生産効率を高める製造方法として、フィラメントワインディング (FW) だけでなく、チョップド繊維の吹き付けによるスプレーアップ、繊維マットの巻き付け、といった工程も含め、それらが連続的に積層構造を成形していく生産技術が開発されている。

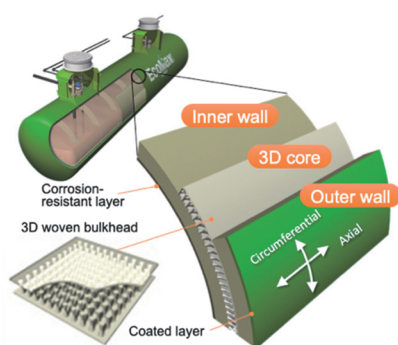


図-1 FRP 製二重殻タンク¹⁾

次に、ランダム配向型熱可塑性 FRP シートは高速圧縮成形が可能であり、軽量部材の量産化が期待される²⁾。このシートは、図-2 に素材から部材への製造工程を示すとおり、一方向に引き揃った炭素繊維束に熱可塑性樹脂を含浸させたプリプレグテープを、一定の長さにカットしランダムに配向させて敷き詰めた中間基材であり、樹脂を溶融させた状態で型

内圧縮成形すると、テープ間で滑りを生じて流動成形させることができる。これにより、複雑形状や変断面を有する構造部材をワン・プロセスで製作できる。図-2 には一様中空断面フレーム (Crash Box) の製作例を示している。

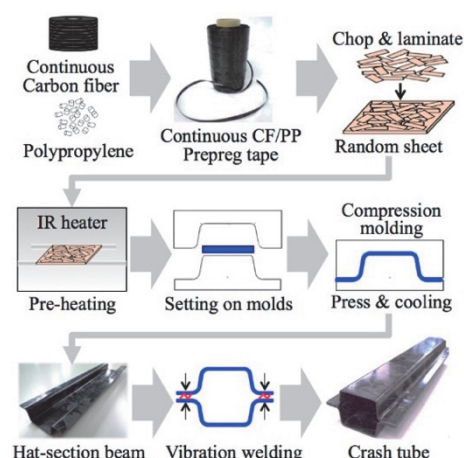


図-2 高成形加工性 CFRP を用いた部材製造工程²⁾

この FRP 製中空フレームは、軸圧潰時に壁面が層間剥離を伴う逐次的な破壊を生じるために、金属製と比べて重量比衝撃エネルギー吸収 (EA) に優れる。一方、要求 EA を満たす断面形状を適切に設計するためには、逐次破壊が生じるメカニズムを数値解析シミュレーション (有限要素法: FEM) によって再現することが肝要である。最近の FEM による破壊シミュレーション技術では、積層間を結合要素で連結し、面垂直強度と面せん断強度による破壊則によって破壊面を生成させるモデルが開発されている。しかし、破壊則において定義すべき破壊応力が実験的あるいは理論的に裏付けされていないため、一義的に現象を再現できていない問題がある。

これを解決するため、結合要素の面せん断と面垂直の強度・剛性・破断ひずみを、新しく提案された試験法によって取得する試みが行われてきた²⁾。面外せん断特性は、目違い切り欠き圧縮試験により、面垂直特性は L 字型四点曲げ試験によって、応力ひずみ曲線を取得できる。得られた特性値を用い、軸圧潰の数値シミュレーションを行って、実験結果と比較した結果から、衝撃吸収プロセスにおけるランダム配向 FRP の層間特性の影響を考察できるようになった。

本報では、FRP 構造による単なる軽量化だけでなく、付加価値の重要性を踏まえ、FW 製タンクの製造品そのものの簡易強度評価手法¹⁾、および衝撃吸収に優れるランダム配向 FRP のシミュレーションによる設計技術²⁾について解説する。

2. FW 製タンクの強度評価法¹⁾

2. 1 試験方法

FW 工法で製造したタンクの材料試験をする際には、図-3 に比較して示すように、ほぼ平坦形状である軸方向試験片は通常の引張試験法で問題ないが、湾曲した周方向試験片の引張試験においては、グリップ時に上下グリップ部に曲げモーメ

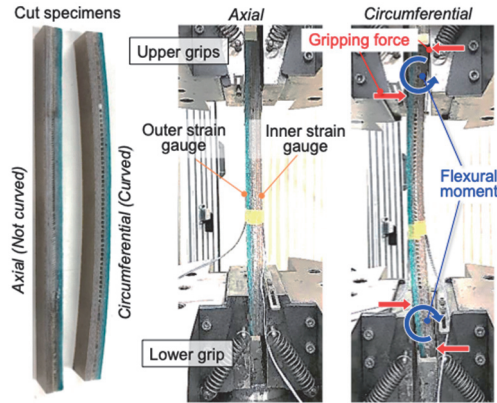


図-3 FRP タンクから切出した湾曲構造試験片の引張強度試験

ントが働く。このため、試験片長手方向中心の両側表面に一軸ひずみゲージを接着して、グリップ直後に、引張軸方向が無負荷状態の際に、試験片に発生する内側（内殻）の引張ひずみ ε_{i0} 、および外側（外殻）の圧縮ひずみ ε_{o0} をそれぞれ計測した。試験開始後もひずみを計測し続け、引張荷重を有効断面積で除した引張応力 σ_i を計算して、それぞれの応力ひずみ関係曲線を求めた。

2. 2 強度算出方法と結果

試験時の引張負荷応力 σ_i と内殻・外殻それぞれのひずみゲージによるひずみ量 $\varepsilon_i \cdot \varepsilon_o$ の関係を求める。説明用の例を図-4に示す。これより、負荷開始初期の傾きから内殻・外殻の見掛けの弾性係数 $E_i \cdot E_o$ が求まる。これと前述の内殻側初期引張ひずみ ε_{i0} を掛けて、グリップ時の曲げ応力 σ_{bf} が推測される。したがって、湾曲試験片の引張試験では常時曲げと単純引張の複合応力が働いている。初期段階ですでに引張応力が働いている内殻が外殻より先に破損しやすい。破損時、引張荷重によって断面に一樣に働く引張応力を σ_{tf} 、グリップによる初期曲げ応力、すなわち、断面に対して応力勾配を有する際の表層における最大応力を σ_{bf} （試験中は常に一定と仮定）とすると、以下の二つのケースをそれぞれ上限・下限とする等価強度 σ_{eq-f} を推定できる。ただし便宜上、引張側と圧縮側の純粋な破損強度は等しいとする。

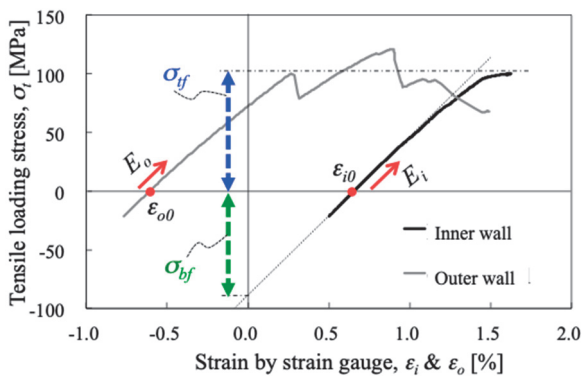


図-4 湾曲構造引張試験法における応力ひずみ線図

ケース 1：断面内の表層における最大応力が等価強度 σ_{eq-f} に達した際に表層に亀裂が発生し、一気に全断面に亀裂が伝播して破損する。

ケース 2：断面内の応力のつり合いが確実に維持できない状態で崩壊する。これは、全断面の応力が等価強度 σ_{eq-f} と等しい場合に発生すると仮定する。

ケース 1 の場合は、単純に引張応力と曲げ応力の足し算で次式(1)により求められる。

$$\sigma_{eq-f} = \sigma_{tf} + \sigma_{bf} = \sigma_{tf} + E_i \cdot \varepsilon_{i0} \quad (1)$$

一方、ケース 2 は金属が完全塑性性として全断面降伏を想定した応力状態と同様の考え方であり、次の関係式(2)で知られている。

$$\frac{\sigma_{bf}}{\sigma_{eq-f}} = \frac{3}{2} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{\sigma_{tf}}{\sigma_{eq-f}} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

これを等価強度 σ_{eq-f} について解くと、次式を得る。

$$\sigma_{eq-f} = \frac{\sigma_{bf} + \sqrt{\sigma_{bf}^2 + 9 \cdot \sigma_{tf}^2}}{3} \quad (3)$$

周方向試験片（内径 2400mm, 2100mm, 1600mm の 3 種類）の破損時の曲げ応力および引張応力の関係を、上述の算出方法に準じてプロットして図-5に示す。内径の小さい ID1600 の試験片はグリップ時の曲げ応力が高いことが分かる。また図中、平板単体殻の引張強度（平均）を等価強度 σ_{eq-f} であると仮定して、式(1)と(3)それぞれに従って各ケースにおける破損時の曲げ応力・引張応力の関係を計算すると、実線（赤）および破線（青）として示される。これより、実験で得られた等価強度が内径の大きさに依らず、全てケース 1 およびケース 2 の範囲内に存在することが分かる。実験結果から等価強度を求める場合、ケース 1 を想定すると過大評価である。一方、ケース 2 に対して実験結果は過小評価であり、より安全側の評価となる。内径に依存しない評価ができるという点でも、より実用的で汎用性の高い評価方法であると言える。

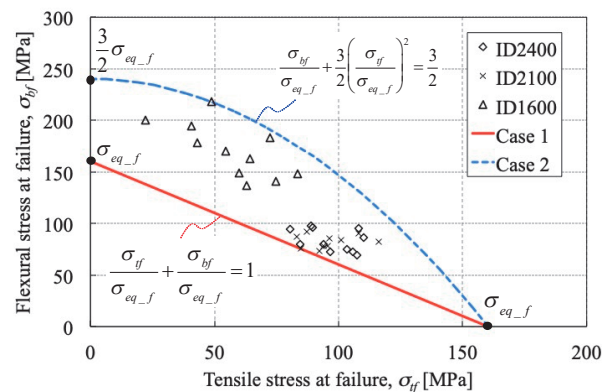


図-5 引張と曲げの組み合わせ破壊関係図

3. 層間損傷を考慮した衝撃吸収シミュレーション²⁾

3.1 材料モデル

FRP 中空フレームの軸圧潰シミュレーションは、陽解法有限要素コードである RADIOSS13.0 により実施した。三次元 CAD を図-6 のように作成し、六面体 HEPH ソリッド要素を適用した。試験体は層構造とし、本体メイン層と層間の結合力要素を個々に割り当て板厚を分割し、個別に材料則を定義した。

メイン層の材料則には、最大ひずみ説を定義可能な Law28 (HONEYCOMB) を適用して、引張と圧縮を区別し、各方向の弾性係数および塑性ひずみに対する応力変化、破断ひずみを個々に設定した。

一方、面外損傷条件は、メイン層の間に割り当てた結合力要素で定義し、材料則 Law59 (CONNECT) を適用して、面せん断方向と面垂直方向に弾性係数、降伏後の非線形応力ひずみ関係、破断ひずみを、それぞれ提案試験法で測定した結果を基に個々に設定した。この要素の積分点が次式(4)で定義するいずれかの条件を満たす時、要素が削除されるとした。

$$\begin{aligned}\varepsilon_T &> \varepsilon_{\max_T} \\ \varepsilon_N &> \varepsilon_{\max_N}\end{aligned}\quad (4)$$

式中 ε_T , ε_N はそれぞれ面せん断方向、面垂直方向のひずみ、 $\varepsilon_{\max_T}$, $\varepsilon_{\max_N}$ はそれぞれの方向の破断ひずみを表す。

3.2 数値解析結果

落錘試験で用いた実寸法を用いて治具類の CAD 図を作成し、試験体である中空フレームを配置させた有限要素モデルを図-6 に示す。台座、固定用金属プレートは鉄鋼材として線形特性のみ設定した。また、錘は剛体板として定義し、試験体下端と固定用金属プレートは剛体結合させた。

試験体の板厚は一律 2mm とし、層構造を構築するために図 6 に拡大図を示す三層はメイン層として一層の厚みを 0.6mm、層間の二層は厚み 0.1mm の結合力要素としてメッシュ分割を行った。また、二つのハットフレームのフランジ接合部にも厚さ 0.1mm の結合力要素を挿入して定義した。それらメイン層および結合力要素には、前節でそれぞれ定義した材料則を適用した。面内方向のメッシュサイズは 2mm に設定した。解析では、錘である剛体板が試験体上部に当たる瞬間を時刻 0 かつ原点とし、一定速度を与えて数値計算させた。

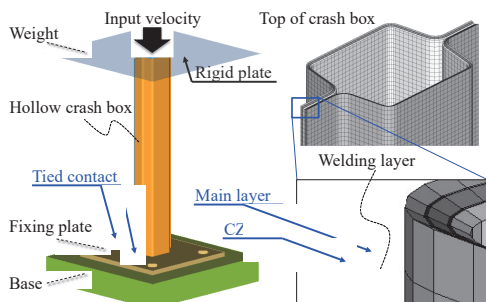


図-6 中空フレームの軸圧潰衝撃解析モデル

図-7 軸圧潰衝撃挙動 - (左) 落錘試験 (右) 数値解析

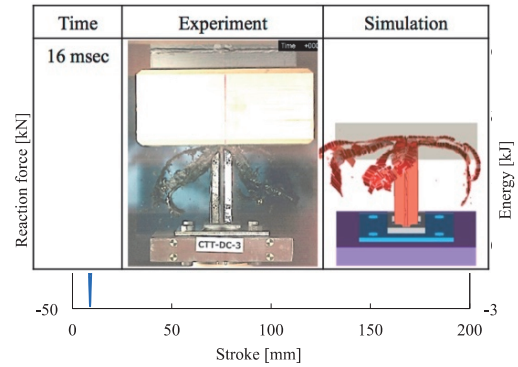


図-8 時速 50km での荷重と衝撃破壊エネルギーの関係

図-7 に、実験および数値シミュレーションにおける、落下速度 50km/h 時の 16 ミリ秒後の破壊モードの様子を、それぞれ左右に並べて示す。また、図-8 には、試験体の圧潰長さ（錘の原点からの移動距離と等価）と反力の関係、および、圧潰長さと反力の積分による EA 量を比較して示す。これらより、ランダム配向シートにより製作した中空フレームは、衝突側から逐次的に層間破壊が進むことが実験的に明らかとなり、かつ、その間、高い反力を維持することから EA 性能に優れた特徴を持つことが分かる。同時に、有限要素モデルによるシミュレーションが、破壊モードだけでなく、破壊中の反力、つまり、EA 量まで精度良く再現できていることから、面外特性に着目して結合力要素を導入した材料モデルが正しく機能していること、そして層間損傷特性が EA 性能に大きく影響を与えることが確認できた。

4. まとめ

昨今の FRP 製構造体の新しい強度評価法、シミュレーション設計手法について技術動向の一端を紹介した。今後、海洋・海上を含め、FRP 適用技術の発展と実装化に寄与すべく、材料および構造の設計・評価の信頼性を向上させていく。

References

- 1) T. Matsuo, et al: Strength Evaluation of Curved Sandwich Structure of FRP Double-Walled Fuel Tank, Proc. The 10th JCCM, Tokyo, Japan (2019), 2D-03.
- 2) T. Matsuo, M. Kan, K. Furukawa, T. Sumiyama, H. Enomoto and K. Sakaguchi: Numerical modeling and analysis for axial compressive crushing of randomly oriented thermoplastic composite tubes based on the out-of-plane damage mechanism, Composite Structures, Vol.181(2017), pp.368-378.