



## 繊維強化プラスチックの非破壊試験

水谷 義弘

繊維強化プラスチックの非破壊試験について、機械分野の視点から紹介した。繊維強化プラスチックは金属材料と比較して複雑な損傷モードを示し、また、非破壊試験で見つけるべき損傷モードとその規模が、材料の破壊強度則と結びつけられていないと述べた。繊維強化プラスチックは繊維で強化されたプラスチックであるが、鉄筋で強化されたコンクリートである鉄筋コンクリートと非破壊試験、構造健全性の考え方に類似点がある可能性があることを指摘した。

キーワード：繊維強化プラスチック、非破壊試験、超音波探傷試験、渦電流探傷試験、鉄筋コンクリート

### 1. はじめに

本特集号は約2年ぶりのコンクリート特集とうかがっている。その貴重な特集号の「交流のひろば」にコンクリートとは別材料である繊維強化プラスチック(Fiber Reinforced Plastic: FRP)をとりあげて頂いたことに感謝する。

繊維強化プラスチックとは、読んで字のごとく繊維で強化されたプラスチックであるが、一般に強化繊維として炭素繊維もしくはガラス繊維が用いられている。強化繊維には長繊維が用いられる場合と、短繊維が用いられる場合があるが、本稿では長繊維で強化されたプラスチックの非破壊試験についてとりあげる。先ほど、コンクリートと繊維強化プラスチックは別材料と述べたが、例えば鉄筋コンクリートは鉄筋で強化されたコンクリートであり、繊維で強化されたプラスチックと健全性評価の考え方、非破壊試験の考え方において、共通事項もあると考えている。最近では、繊維強化プラスチックがコンクリート構造の補強に使用される場合もあり、繊維強化プラスチックについて詳しい読者もいると思うが、筆者はコンクリートについて門外漢のため、本稿では主に機械の分野で使用されている繊維強化プラスチックの非破壊試験について取り上げる。しかし前述したとおり、両材料には共通点があると考えられ、本記事が機械分野の繊維強化プラスチックに関連する技術者とインフラ分野のコンクリートを扱っている技術者が交流をはじめのきっかけとなれば幸いである。

### 2. 非破壊試験の観点からみた繊維強化プラスチック

#### (1) 金属材料との比較

繊維強化プラスチックは当初、宇宙機や航空機の分野においてアルミ合金等の金属材料の代替材料として使用されはじめた。このような背景のために、繊維強化プラスチックは、金属材料と比較して議論されることが多い。本章では繊維強化プラスチックの機械的/電気的異方性と複雑な破壊モードが非破壊試験に及ぼす影響を金属材料と比較しながら議論してみる。

#### (2) 材料の異方性

繊維強化プラスチックは繊維の方向と直交方向とで強度と弾性率が、大きく異なる材料である。また、強化繊維として炭素繊維が用いられる場合には、炭素が導電性材料であることから、電気的にも異方性を持った材料となる。一方、金属材料は数10～数100 $\mu\text{m}$ の結晶粒で構成された材料であり、それぞれの結晶粒は方向性を持っている。しかしながら、この結晶粒の大きさに対し、検出すべき欠陥は数mm～数十mmの大きさになることが多い。非破壊試験では検査に使用する超音波(弾性波)、渦電流の条件は、検出すべき欠陥寸法にあわせて調整するが、その条件では金属材料は機械的、電気的に等方性として扱える場合がほとんどである。繊維強化プラスチックの場合には、材料の異方性が検査に影響するケースが多く、例えば超音波探傷試験では異方性の影響を受け難い方向から超音波を送受信することが多い。炭素繊維強化プラスチック

クの渦電流探傷では、電流経路が炭素繊維の方向によって大きく変化するため、金属材料に使用されている渦電流探傷試験装置をそのまま適用できる場合は少なく、研究段階のものが多い。

鉄筋コンクリートは炭素繊維強化プラスチックと同じように、非導電性材料であるコンクリートと導電性材料である鉄筋からなる複合材料である。機械的・電氣的異方性を有する材料であることから、繊維強化プラスチックと同様の課題があると考えている。

### (3) 破壊モードと破損強度則<sup>1)</sup>

金属材料製の機械や構造で見つけるべき欠陥のサイズは材料力学や破壊力学と関連づけられて決定されることが多い。材料力学では応力基準で破壊が議論される。材料に作用している力を、欠陥部分を除いた実断面積で除いた実断面応力が基準強度を超えると材料が破壊すると考える。実断面応力は欠陥寸法の関数となるため、非破壊検査で見つけるべき欠陥寸法と関連付けられる。一方、破壊力学では、応力拡大係数が材料の破壊靱性を超えると破壊すると考える。応力拡大係数  $K$  は応力  $\sigma$  のとき裂寸法  $a$  の平方根の積の関数となっており、このき裂寸法  $a$  が検査で見つけるべき欠陥寸法と結びついている。

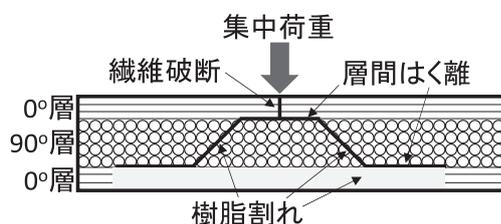


図1 集中荷重によりクロスプライ炭素繊維強化プラスチックに発生する損傷の例

一方、繊維強化プラスチックの破壊は金属材料と比較するとかなり複雑である。例えば図1はクロスプライ炭素繊維強化プラスチックが集中荷重により損傷する例である。クロスプライとは積層構成を現しており、繊維の方向が直交(クロス)するように積層(プライ)した材料であり、図の例では表裏面の繊維と中央の繊維の方向が直交している。集中荷重の作用点では強化繊維が破断し、積層方向が変化する層間では層間にはく離が生じる。また、繊維を切断しない方向には樹脂割れが生じる。繊維強化プラスチックは金属材料とは異なり、様々な破壊モードがあることがわかる。繊維強化プラスチック製の構造の破壊を考える場合、これらの破壊モードを考慮する必要があり、例えば、Tsai-Wu 則、Hashin 則などの破損強度則があるが、

金属材料のように非破壊検査で検出すべき欠陥寸法と直接的には結び付けられていない。ただし、層間にはく離については、はく離の大きさと圧縮強度、曲げ強度の低下量を関係づけるデータが蓄積されていることがあり、検査で検出すべきはく離の大きさを決定する際に参考にされている。

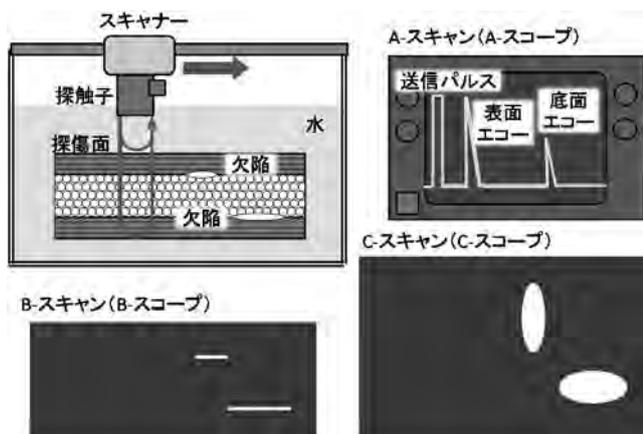
一方、繊維強化プラスチックの破壊強度にもっとも影響すると考えられる繊維破断については確立した非破壊検査法がないのが現状である。今後は繊維強化プラスチックで発生する破壊の損傷モードと破壊則が、非破壊検査で検出すべき損傷モードとその寸法とを直接的に関連づける考え方とそれをベースとした非破壊試験の方法の確立が必要だと考えている。

鉄筋コンクリートのも維強化プラスチックと同様、複雑な損傷モードを有し、構造の破壊則も単純ではないと考える。例えば、コンクリート構造に複数のひびが入ったからといってすぐに構造の強度が低下するわけではない(雨水等が浸入して鉄筋が腐食するという問題は除く)。構造の健全性と非破壊試験をどのように結びつけるのかについて、機会があればコンクリート構造の技術者と一緒に議論してみたいと考えている。

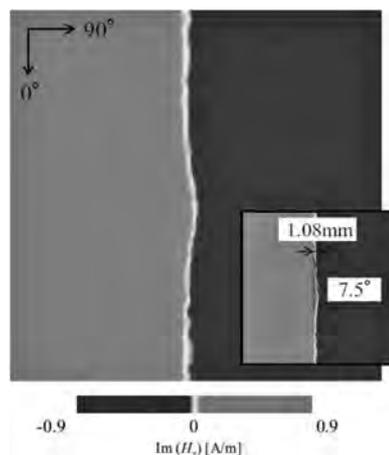
## 3. 非破壊試験の例

### (1) 超音波探傷試験 (UT)<sup>2)</sup>

超音波は指向性が強く、材料に入射するとほとんど拡がらずに直進するが、欠陥が存在すると反射する。水浸式の超音波探傷試験で先に述べた層間にはく離を検出するには、図2(左上)のように探傷面上に設置した超音波探触子で板厚方向に超音波を発信し、底面もしくははく離から反射してきた超音波を受信する(パルスエコー法)。図(右上)に示したAスコープ画像ではく離で反射して戻ってきたエコー(きずエコー)の有無を観察することによって欠陥を検出し、また、きずエコーの到達時刻から欠陥深さを推定する。探傷の際には超音波探触子を探傷面上で走査するが、その際に探触子の位置を記録しながら探傷することで、Cスキャン画像(図右下)、Bスキャン画像(図左下)を構築することもできる。Cスキャン画像は試験片を上から透視した画像で、放射線透過試験の画像と似ている。Bスキャン画像は、試験片断面の情報を表しており、欠陥の試験片厚さ方向の情報を得ることができる。この方法でははく離を検出できるが、その他の損傷モード(例えば繊維破断)を検出することは難しい。

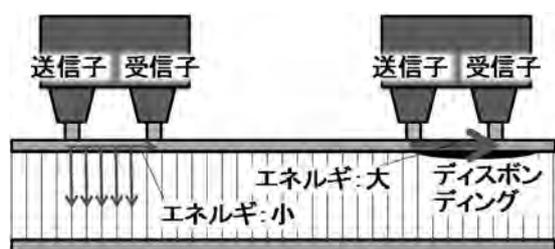


図一 2 超音波探傷試験の原理



図一 4 面内繊維うねりの可視化例<sup>3)</sup>

図一 3 に示すような繊維強化プラスチック板（スキン材）の間にハニカムコアを挟んだハニカム構造におけるスキン材とコア材のはく離（ディボンディング）の検査には、ボンドテスターが用いられている。図に示したとおり、送信子から送信した音波の伝播経路はコア材とスキン材の接着状態により変わり、受信子で受信する音波のエネルギーも接着状態により変化することから、これを利用して検査する。



図一 3 ボンドテスターの原理

(2) 渦電流探傷試験<sup>3), 4)</sup>

炭素繊維強化プラスチックは導電性材料であり、渦電流探傷法の適用が試みられている。炭素繊維強化プラスチックは電氣的異方性を有し、探傷の際にはこれを考慮する必要がある。層間はく離の検出の他、図一 4 に示すように繊維うねりの検出に関する研究が行われており、一部商品化されているものもある。これは炭素繊維の導電性をうまく利用した試験法となっている。

4. おわりに

繊維強化プラスチックの非破壊試験について紹介した。繊維強化プラスチックは金属材料と比較して複雑な損傷モードを示し、また、非破壊試験で見つけるべき損傷モードとその規模が、材料の破壊強度則と結びつけられていないところがあると述べた。鉄筋コンクリートは繊維強化プラスチックと類似していることが多いと考えられるため、機会があれば一緒に議論ができる交流の場が設けられればと考えている。

JICMA

《参考文献》

- 1) 轟章, 水谷義弘, 他 11 名, 強化プラスチック協会編, 基礎からわかる FRP, コロナ社 (2016)
- 2) 松嶋正道, 山口康弘, 高橋雅和 他, 特集 複合材料の各種非破壊評価法, 非破壊検査, Vol.60, No.9, (2011), pp.513-545.
- 3) K. Mizukami, Y. Mizutani, K. Kimura, A. Sato, A. Todoroki, Y. Suzuki and Y. Nakamura, Visualization and Size Estimation of Fiber Waviness in Multidirectional CFRP Laminates Using Eddy Current Imaging, Composites: Part A, Vol. 90, (2016), pp.261-270.
- 4) H. Heuer, M. H. Schulze and N. Meyendorf, Eddy current techniques, Non-Destructive Evaluation of Polymer Matrix Composites, Woodhead publishing, (2013), pp. 33-55.

【筆者紹介】

水谷 義弘 (みずたに よしひろ)  
東京工業大学  
工学院機械系

