

破壊を自己診断する構造材料

武 藤 範 雄・柳 田 博 明

東京大学先端科学技術研究センター 〒153 東京都目黒区駒場 4-6-1

(1991年12月10日受理)

Self-Diagnosis of Fracture in Structural Materials

Norio MUTO and Hiroaki YANAGIDA

Research Center for Advanced Science and
Technology, University of Tokyo

(Received December 10, 1991)

構造材料の致命的破壊の防止方法として、過去に受けた歪を知ることは有力な方法である。CFGFRP (炭素繊維/ガラス繊維強化プラスチック) 複合材料の L (Load: 荷重) - S (Strain: 歪) - R (Resistance: 抵抗) 曲線を測定した場合、荷重は炭素繊維破断まで大体直線関係を示すが、抵抗は歪に比例して増加し、過去に受けた歪より大きくなったときに非直線の増加のヒステリシス特性を示し、除荷後でも残留抵抗を示した。これは CFGFRP 複合材料が過去に受けた最大歪を記憶する特性を有しており、前もって破壊までの歪と抵抗の情報が得られる場合は抵抗変化から破壊を予知でき、致命的破壊が防止できることを示している。本方法は湾曲部分の複雑な構造や、試験体の大きさに制限がなく、簡単に測定できる方法である。材料表面に貼り付ければ一般の構造材料にも使用できるので、CFGFRP 複合材料は破壊を自己診断する破壊センサーとして十分に期待できる。

1. はじめに

土木・建築および交通機器などの発達で構造材料の重要性が増加しているが、その際構造材料の破壊問題が大きな課題である。致命的破壊は過去に日航機事故 (1985年) のような人的物的大惨事をもたらしてきた。ひとつの対策として、安全率を高めるために、構造材料の厚さや大きさを必要以上に大きくとってきたが、これは本質的解決策ではない。この方法は限られた地球資源とエネルギーのむだ使いを生じ、発展途上国の資源を浪費することになる。不要になったときは粗大ゴミを生じる。特にプラスチックは簡単に腐らないので不要の際に始末に困る。プラスチックも再利用の方法はあるが、安価な製造費よりもコスト高になるので再利用の実現性は少ない。高地価の大都会では構造材料の小型化・軽減は経済的理由で重要な課題である。したがって、技術者・研究者にとって構造材料の致命的破壊防止は大きな課題である。本稿では、従来の発想を転換した新しい方法で構造材料の致命的破壊を自己診断する構造材料を紹介す

る。

2. 構造材料の小型化・軽減対策

構造材料の小型化・軽減対策として多くの材料開発がなされてきた。構造材料の軽減は限られた燃料で飛ぶ航空機やロケットの場合は特に重要であり、1 kg の軽減にたいへんな努力をしている。軽減対策として、FRP (繊維強化プラスチック) 複合材料が実用化されて社会に貢献してきた。FRP 複合材料は軽くて強いので、建築・土木など多くの分野に使われ、年間数 10 万トンの産業に発展した。しかし、複合材料は他の実用材料に比べて開発歴史が浅く、複合構造ゆえに破壊に対する多くの因子があって、新分野の使用拡大には安全性の改善が必要である。FRP の安全率は強化プラスチック協会が基準を確立している¹⁾が、現場での適用判断は単一材料に比べて複雑である。しかし、FRP 複合材料は構造材料として魅力的な Tailored Material (注文材料) であり、時代のニーズにマッチした材料としてさらに発展して欲しい材料のひとつである。本稿では FRP 複合

材料を中心とした構造材料の小型化・軽減と使用拡大のためにも破壊予知と致命的破壊防止の新しい方法を見つけようとするものである。

2.1 ハイブリッド複合材料

ハイブリッド野菜、…と頭にハイブリッドを付ける言葉が流行しているが、近代的な使用の元祖は複合材料に由来する。ハイブリッド複合材料は複数の繊維を用いたもので、ボーイング 767 型機にアラミド繊維/炭素繊維が使用されて注目を浴びた時代もあったが、今では建築・土木材料などにも広く使われており、珍しくない。欠点を補って、より良い材料を作ろうとするから、ロマンを与える材料である。本稿の破壊検知材料としては、CFGFRP 複合材料を使用している。ガラス繊維はたわみすぎるからたわみ難い炭素繊維で補強するか、強いが伸び難くて脆い炭素繊維を伸びやすくして粘っこいガラス繊維で補強するものである。ここでは後者であり、目的次第で表現方法が異なるからおもしろい。道路や橋などが突然真二つになったら大惨事になるが、CFGFRP 複合材料では炭素繊維が壊れてしまった後でも伸びが大きなガラス繊維で何とか大惨事を防ごうという魂胆である。また炭素繊維より 1 けた以上安価なガラス繊維を用いて間に合えばこれほど便利なことはないので低コストも大きな理由である。人間だって硬派と軟派がいるが、性格は簡単に変わらないので、1 人でうまくいかなくて 2 人でうまくいけばハイブリッド効果がでたということと同じである。

2.2 研究のきっかけと独創性

清水建設(株)の関係者が柳田のインテリジェント材料の講演を聞いたことが共同研究のきっかけである。さっそく担当部長が柳田教授室を訪ねて、会社で使用中の CFGFRP 複合材料 (NEFMAC) のインテリジェントの利用を要望したことが研究のスタートになった。

特性からいえば、炭素繊維とガラス繊維は対照的である。片方がはいといえば、片方がいやという性格(特性)の違いがある。導電特性ではガラス繊維が頑固(絶縁体)であるのに、炭素繊維ははいはいタイプ(良導電体)である。電波にたいしては、ガラス繊維は通すのに炭素繊維はまったをかけて通さない。X線やガンマ線は炭素繊維は通してくれるが、ガラス繊維がまったをする。したがって、これらの特性を使うとおもしろい応用が可能になる。腕白坊や連をおだててうまく使おうということである。本研究の破壊検知は導電特性の違いをうまく使ったわけであり、非常に簡単な原理と方法を有する独創的研究である。いわれてみると、コロンプスの卵になるが、これが難しく、ここに独創的研究の魅力がある。同じような例として、柳田研究室で繊維を用いて数

年前に開発した赤外線センサの研究を紹介する。繊維の微小な熱容量と熱に対する電気抵抗変化をうまく利用した独創的研究であるが、繊維材料は 1 ms の迅速応答性と、静止・移動両物体の検知能力を有する新しい赤外線センサー材料になることを見つけた²⁾。事業化に取り組んでいるが、成功した研究であり、従来の繊維の補強材料的イメージを機能材料的に発想転換した例である。このことは、多機能的な材料特性の利用に独創的研究の可能性があり、材料の優れた特性について気付かないだけであることを示している。ここにわれわれの研究意欲と生きがいが生まれる。

2.3 繊維と FRP 複合材料

研究に用いたガラス繊維と炭素繊維および FRP 複合材料を紹介する。ガラス繊維束は溶解炉からの溶融ガラスを入れた紡糸炉から多数のノズルを通して高速で引っ張ったガラス糸に集束剤をつけて巻取り、束にする。単繊維を集めた束をストランドといい、ヤーンやトウともいう。単繊維はフィラメントであり、いくつかのストランドをまとめたものはロービングといい、本研究ではロービング繊維を用いている。炭素繊維は原料によって特性が異なるので、一般に原料を明記する。ここでは PAN (ポリアクリロニトリル) とピッチを用いている。紡糸後、炭化処理や黒鉛化処理を行うが、黒鉛化処理を行った炭素繊維は弾性率が高く、配向性も良好で、高弾性炭素繊維という。炭化処理で高強度にしたものは高強度炭素繊維であり、熱処理を制御して高強度高弾性の炭素繊維も製造されている。炭素繊維の強度や伸びの機械的特性を制御できるから、FRP 複合材料に歪を加えた場合、炭素繊維の種類によって異なった歪で抵抗変化が得られる。ここでは PAN-HSCF (PAN 系高強度炭素繊維)、PAN-HMCF (PAN 系高弾性炭素繊維) およびピッチ-HPCF (ピッチ系高品質炭素繊維) を用いた。CFGFRP 複合材料は、炭素繊維とガラス繊維の界面が



図 1 CFGFRP 複合材料の使用例 (土盛り)

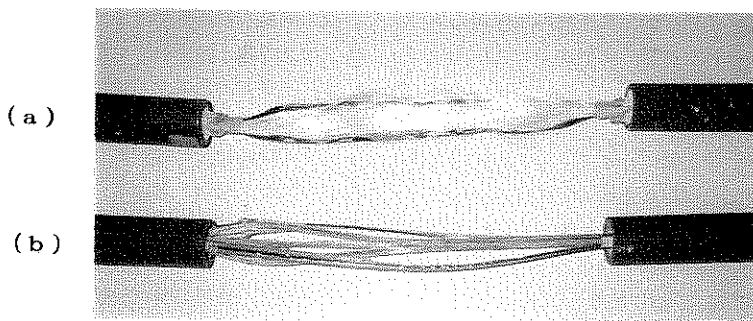


図 2 (a) プラスチックを除いた炭素繊維/ガラス繊維, (b) CFGFRP 複合材料の破断写真

成形時の両繊維層の剛性や成形収縮の相違による熱応力や界面応力の発生によって剝離しやすい傾向をもっている。したがって、CFGFRP 複合材料の歪と電気抵抗の関係において繊維数の違いを調べるために、1, 3, 6 および 12 束のストランドと 3000, 6000 および 12000 本のフィラメントを用いて L - S - R の関係を求めた。プラスチックは耐食性に優れたビニルエステル樹脂を用いており、耐環境性に優れた複合材料である。これらは 2・3 次元的に組合せてトンネルなどに実用化されている³⁾。土盛りへの使用例³⁾を図 1 に示す。CFGFRP 複合材料のプラスチックを除いた繊維状態および CFGFRP 複合材料の破断写真を図 2 に示す。黒い繊維が炭素繊維で、白い繊維がガラス繊維であり、破断写真では FRP 複合材料に特有の破断がみられる。

3. 実験方法と結果

試験体は実用化材料³⁾を用いた。CFGFRP 複合材料の大きさは断面積 8 mm 四方、全長 700 mm、試験長 450 mm であり、両端に抵抗測定用の U 型銅板電極を接着した。図 3 に抵抗および歪用のリード線付きの試験体を示す。本方法は両端からリード線を取り出して抵抗を測定するだけの非常に簡単な方法であることを特徴とす

る。 L - S - R 曲線はインストロン型引っ張り試験機を用いて測定した。歪は 6 mm 長の歪ゲージで測定し、抵抗変化は二端子法を用いて $I=1$ mA の一定通電で電圧変化として求めた。図 4 に 1 ストランド、6000 フィラメント、初期抵抗値 $R_0: 77 \Omega$ の CFGFRP 複合材料に対して繰返し引っ張りをした場合の歪を関数として抵抗変化、相対抵抗変化および炭素繊維が破断するまでの荷重変化を示す。荷重は炭素繊維が破断するまで大体直線的な関係であり、その後はガラス繊維の存在による非直線関係になって、ハイブリッド複合材料に特有の関係を示した。しかし、歪と電気抵抗の関係は比較的初期歪の段階から非直線の関係を示した。抵抗の測定は炭素繊維が破断するまでであり、破断後はガラス繊維のために無限大になる。曲線の特徴は、歪の増加と共に電気抵抗は増加し、過去の受けた歪の大きさを越えたときに非直線的に抵抗が増加するヒステリシス特性を示した。また、除荷後も残留抵抗を示した。繊維数が多過ぎる場合は再現性が得られず、残留抵抗を示さない場合があった。これは、除荷中の繊維同士や繊維と界面の関係が抵抗のヒステリシスカーブに影響してくるので、CFGFRP 複合材料を破壊検知センサとして使う場合には良好な抵抗変化が得られる最適の構造設計を考える必要があること

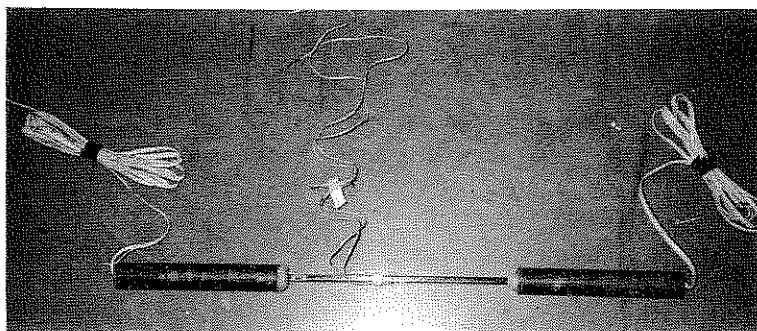


図 3 CFGFRP 複合材料の抵抗測定試験体

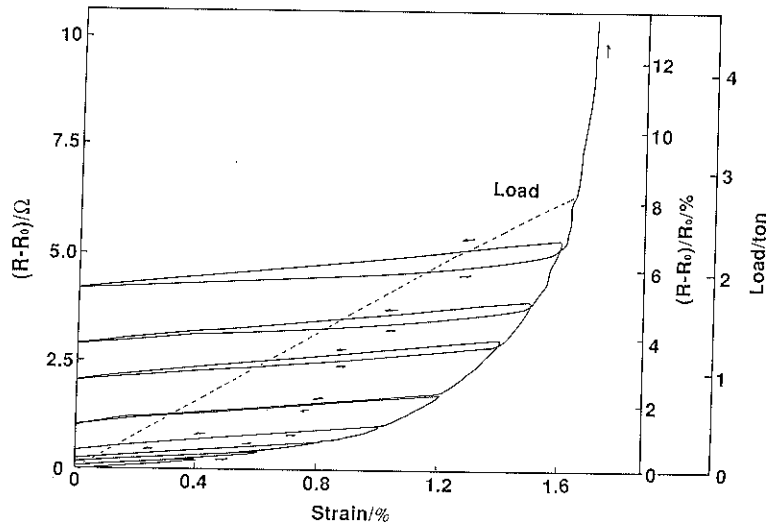


図4 CFGFRP 複合材料の L - S - R 曲線 (1 ストランド, 6,000 フィラメント, 初期抵抗値 R_0 : 77 Ω)

を示している。

4. 破壊を自己診断する構造材料

図4の結果はCFGFRP複合材料が過去に受けた最大歪を記憶できる特性を有していることを示す。このことは、前もって破壊までの歪と抵抗の情報が有り、歪によって破壊する場合には抵抗変化から破壊を予知して、致命的な破壊が防止できることを示している。しかも図4のように、抵抗変化が数 Ω のレベルであれば、通常のテストでも十分に測定できる大きさである。以上から、今まで機械的な特性を引き出すために使用してきたCFGFRP複合材料は破壊進行を抵抗変化として自己診断する構造材料であることが判明した。

4.1 破壊予知センサーとして

構造材料の致命的破壊を防止する方法として、過去に受けた歪を知ることは有力な方法のひとつである⁴⁻⁶⁾。従来ゲージ法が使われてきたが、この方法は歪を除去した後の過去に受けた歪を知ることができない。ゲージが小さいので試験体の大きさが限定され、また破壊場所に設置しないと歪変化を十分に追跡することができない。したがって、新しい歪測定法の開発が求められていたが、図4の結果はこれらの要求に応えられることを示している。今までは過去の受けた歪を測定できる手段がなかったが、本方法によって破壊の進行状況を知ることができ、修理や交換の判定が可能になった。このことは今までのように必要以上に安全率を大きく取って材料を厚くする必要がなく、また大惨事を防止できる。チェックは定期点検でもかまわないし、ある力がかかった直後で

もよい。両端を利用するから、湾曲部分の複雑な構造でも、長い状態でも使用可能である。試験体の大きさに制限がなく、ノッチなどの方法によって破壊位置を指定させる工夫も不要なので非常に実用的な方法である。だれでも簡単に測定できる方法であるので社会的にも大きな貢献となる。今後、歪による抵抗変化の関係を多くのケースで確定すれば新しい破壊センサーとして十分に期待できることが明らかになった。

4.2 機械的变化を電気的变化に拡大した

本方法は歪や応力によるCFGFRP複合材料の機械的变化を抵抗変化という電気的变化で拡大したものである。抵抗変化は主に繊維破断であり、そのほかに繊維の構造変化および除荷中の繊維同士の再接触によるが、複雑な機械的特性の変化を簡単に電気的特性変化に拡大してテストで判断できるから、非常に実用的である。抵抗変化の追跡から破壊の進行状況がわかり、破壊寸前にまったをかけられる。柳田は以前から複雑すぎる電気回路の使用は材料本来の利用を引き出す場合に弊害になるので、賢いインテリジェント材料と簡単な方法の発見を主張しているが、今回の例はこのことを実証した例である。

5. 実用化を目指して

本研究は東大先端研柳田研究室(柳田博明教授, 宮山勝助教授, 武藤範雄助手)と清水建設株式会社(杉田稔部長, 中辻照幸課長, 大塚靖研究員)の共同研究として行っているものである。今までの結果から本方法は歪によって破壊する場合には十分に期待できることがわかっ

たので、清水建設株式会社で開発使用中の CFGFRP 複合材料 (NEFMAC) を用いて実用化を進めている。特に本方法は人の手が入りにくい土の中や海中あるいは危険物を扱っている場所の使用で威力を発揮してくれると期待している。ただし、プラスチックは水中劣化をしやすいのでその点の対策が必要であるが、これらについては技術的な課題であり、解決可能である。温度による抵抗変化は低比抵抗でサーミスタ定数が小さいためにほとんど影響がない。また、本方法は CFGFRP と CFRP の複合材料だけに限定されるものではなく、一般の構造材料の表面に歪センサーとして開発した CFGFRP 複合材料を張り付けることによって使用することも期待できる。以上から、構造材料全般に対して安価で実用的な破壊検知センサーとしての展開を進めている。

文 献

- 1) 強化プラスチック協会編：“FRP 構造強度計算の実際” (1984)。
- 2) 武藤範雄, 宮山 勝, 柳田博明, 森 憲寿, 梶原貞次郎, 今井義一, 浦野 章, 市川 宏：日本セラミックス学会誌 **99** (7), 608 (1991)。
- 3) ネフコム株式会社カタログ '90, 04-2。
- 4) 武藤範雄, 柳田博明, 宮山 勝, 中辻照幸, 杉田稔, 大塚 靖：日本複合材料学会誌受理。
- 5) N. Muto, H. Yanagida, M. Miyayama, T. Nakatsuji, M. Sugita and Y. Ohtsuka：日本セラミックス学会誌 **100** (4), 585 (1992)。
- 6) N. Muto, H. Yanagida, T. Nakatsuji, M. Sugita and Y. Ohtsuka：J. Mat. Sci. in contributing.

会 合 通 知 の 掲 載 申 込 み に つ い て

- 原 稿 “会告”の学術的会合情報欄に掲載ご希望の場合、開催期日、名称（開催地）、主催・問い合わせ先をご送付下さい。
 ・国際会議は、主催機関と同時に国内連絡先を必ず明記し、さらに会合のアナウンスメント（コピー可）を添えてご送付下さい。
 ・後付けに“はさみ込み”をとじ込む場合も、前もって上記項目をお知らせ下さい。
 ・掲載は1回のみですので最終原稿をご送付下さい。

締切り

掲 載 号	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	7 号	8 号	9 号	10 号
発行予定	2月1日	3月10日	4月20日	6月1日	7月10日	8月10日	9月10日	10月10日	11月10日	12月10日
締切り日	12月1日	1月10日	2月20日	4月1日	5月10日	6月10日	7月10日	8月10日	9月10日	10月10日

送付先 〒113 東京都文京区本郷 2-40-13 本郷コーポレイション 402 日本表面科学会
 Tel. 03-3812-0266 Fax. 03-3812-2897