# 繰り返し引張力を受ける CFRP プレートのひずみと電気抵抗との関係性

日

心怡	張	学生会員	早稲田大学
靖彦	佐藤	正会員	早稲田大学
晶洋	立石	正会員	鉄ケミカル&マテリアル株式会社

#### 1. 研究背景·目的

炭素繊維補強樹脂(以下は CFRP 材料と称する)は高強度、高弾性、軽量、優れた耐久性などの特長があり, 1990 年代から航空機、自動車、建設などの産業に広く使われてきた.また、炭素繊維の導電性により、構造物 の損傷を観測できるインテリギント材料として期待されている.しかし、炭素繊維のネット構造<sup>11</sup>による電気 抵抗の変化が複雑化、炭素繊維素線の統計学的な強度分布<sup>21</sup>による繊維破壊のランダム化および樹脂との付 着作用<sup>31</sup>により応力の再分配と軸応力の回復による繊維のフラグメンテーションなどが原因で、CFRP 材料の 損傷機構はまだ解明されていない.従って、導電性から CFRP 材料の損傷を評価する事はまだ実現していない. なお、炭素繊維と樹脂との付着作用による繊維における軸応力の回復とフラグメンテーション現象は図1に 示す.本研究の目的は繰り返し引張力を受ける一方向炭素繊維補強樹脂の損傷機構を解明し、さらに複合材料 として CFRP 電気抵抗の変化と歪みとの関係を定量的に評価する事である.

K.Schulte ら<sup>[1]</sup>は CFRP プレートに配置される炭素繊維はネット構造 を持つことにより, 軸垂直方向に導電性を持つため材料全体の導電性 が複雑になることを提示した.また,田川ら<sup>[2]</sup>は炭素繊維素線の強度は ワイブル分布に従い, 載荷を受ける際に繊維破断はランダムに起こる 特徴が明らかにした.さらに,繊維が破断する際に複合材料における 炭素繊維は樹脂との付着作用が働き,破断繊維から周囲の繊維への応 力の再分配および破断繊維における軸応力の回復によるフラグメンテ ーションが生じる.従って、炭素の長繊維は短繊維の集合体になるまで



図1 付着作用による繊維の応力回復及 びフラグメンテーション

把持部

繊維の再破断が何度も生じることは Curtin,W.A<sup>[3]</sup>の研究から判明した.本山ら<sup>[4]</sup>は,炭素繊維複合材撚り線に 実施する載荷方式によらず,履歴最大荷重と残留抵抗との関係が一定になっていることがわかった.

### 2. 実験概要

本研究では、CFRP プレートの試験片における両端の把持部を 通じて一軸方向繰り返し引張力を載荷させ、測定区間の電気抵抗 およびひずみの変化をそれぞれ計測した.試験片の様子は図2に 示す、測定区間は合計2区間があり、それぞれのひずみと電気抵

 40
 20
 90(区間1)
 90(区間2)
 20
 40

 図 2 CFRP プレート試験体

抗について計測した.本研 究は図3の示す3つの繰り 返しの負荷~除荷試験 (A1,A2,A3)を行った.なお, 電気抵抗の測定は4電極法 にした.



キーワード CFRP, 電気抵抗, 繰り返し引張試験 連絡先 〒169-0072 東京都新宿区大久保 3-4-1 TEL 03-5286-3852

### 3.実験結果と考察

## 3.1 繰り返し引張試験の結果

ここでは提示していないが, 試験片 A1, A2, A3 は繰り返し引張力を受けてい るに拘らず,荷重~歪み関係は直線関係 にあり、弾性挙動を示していた. すなわ ち、力学的な性能が低下しなかったとも 言える. それは CFRP 複合材料における炭 素繊維と樹脂の付着作用による破断繊維 の応力回復によるものと考える. 図4か ら図6までにはそれぞれ試験片A1~A3に おける電気抵抗変化率~ひずみ関係を示 す. 図4の示すように, 試験体 A1 の包絡 線を黒い実線で表す. また図 6,7 により, 試験体 A1 の包絡線を試験片 A3, A4 と比 べた結果、載荷パータンが異なるに関わ らず, 包絡線はほぼ一致した. 既往研究 における本山ら<sup>[4]</sup>は炭素繊維複合材より 線ケーブルを対象とした実験にて同じ現 象が観察できたが原因は未明である.本 研究では統計学的な視点により、炭素繊



維の集合体である CFRP 材料における炭素繊維は大数の法則に従い, 強度は常にあるワイブル分布に支配されると考える. 測定区間長と試験片の寸法効果の影響を除き, 電気抵抗~歪みの関係は常に同じと考えられる.

### 3.2 電気抵抗変化率

本研究は無次元化量の電気抵抗変化率  $\Delta R/R_0$ を用いて試験結果を解析する. それは次元計算の視点により, 電気抵抗変化率  $\Delta R/R_0$ , 歪み  $\varepsilon$ , 繊維累積破断率 P, 炭素繊維のポワソン比 v は式 1 の提示する関係にある可 能性が高いことを提示する. また大数の法則により, 炭素繊維累積破断率 P はあるワイブル分布に支配され, すなわち,  $P(\varepsilon)$ に書き換える. 従って, 電気抵抗変化率  $\Delta R/R_0$  は歪み  $\varepsilon$  とポワソン比 v のみに支配されると 考える. 電気抵抗計算の理論式 $R = l\rho/A$ に基づき, 電気抵抗変化率は式 2 で表せる. ①炭素繊維の弾性変形 と②炭素繊維の破断を示した式になる. 図 7 の示すように, 炭素繊維の弾性変形による電気抵抗の変化率~ ひずみ関係はほぼ線形にあり, 電気抵抗変化率の非線形性に貢献するのは炭素繊維の破断である. 除荷によ り, 炭素繊維の弾性変形による電気抵抗変化率は回復し, 残留電気抵抗が残る. ここで, 残留電気抵抗は炭 素繊維の破断によるものと考えられる.

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \int (\varepsilon, P(\varepsilon), \nu) = g(\varepsilon, \nu) \quad (1) \qquad \frac{\Delta R}{R_0} = \frac{(1+\varepsilon)}{(1-P)(1-\nu\varepsilon)^2} - 1 \quad (2)$$

### 参考文献

[1] K.Schulte; Ch.Baron : Load and Failure Analyses of CFRP Laminates by Means of Electrical Resistivity Measurements, Composite Science and Technology, 36, 63, 1989.

[2]田川哲哉,谷口正典,宮田隆司 : 炭素繊維の引張強度の確率 分布,(J. Soc. Mat. Sci., Japan),Vol.42.No.479,pp.955-961,Aug.1993 [3] Curtin,W.A : Theory of Mechanical Properties of Ceramic-Matrix Composite, J. Am. Ceram. Soc., Vol.74(11), pp.2837-45, 1991 [4] 本山泰之, 守屋一政, 香月智, 太田俊昭 : 炭素繊維複 合材撚り線ケーブルの引張負荷・除荷実験と履歴荷重モニタ リング, 土木学会 応用力学論文集 Vol.5, pp.317-327, 2002 [5] Koichi Goda; S.Leigh Phoenix : Reliability Approach to The Tensile Strength of Unidirectional CFRP Composites by Monte-Carlo Sumulation in a Shear-lag Model, Composites Science and Technology, 50, pp.457-468, 1994.