

ヘルスマニタリング技術の建設構造および地下埋設構造物への 応用開発に関する研究グループ

炭素繊維複合材料 (CFRP) の損傷検出への電磁誘導非破壊試験に関する研究

小山 潔 (日大生産工・教授)

星川 洋 (日大生産工・教授)

横田 理 (日大工・教授)

上田 政人 (日大理工・助手)

西川 康博 (千葉県産業技術支援研究所・研究員)

大滝 政博 (テクニカルリンク (株)・取締役社長)

1. はじめに

ヘルスマニタリング技術の建設構造物および地下埋設構造物への応用開発に関する研究の一環として、本年度は炭素繊維複合材料 (CFRP) の損傷検出への電磁誘導非破壊試験の応用開発について報告する。

CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) は、比剛性と比強度の力学特性が優れていることから、建設構造物の耐震化技術の1つとしてコンクリート管体をCFRPで補強する方法がある。また、金属に比べて軽量で耐食性にも優れていることから航空機や宇宙機構造物などに多用され、その使用用途は拡大の状況にある。

CFRPは、薄い炭素繊維シートを積層して作られている。外部から衝撃を受けると積層間で剥離などを生じ、力学強度が低下することが問題であり、非破壊検査が行われている。CFRPに対する非破壊検査法としては、超音波探傷試験が適用され^{1)~3)}、その他にも赤外線を利用したサーモグラフィ試験^{4)~5)}などが報告されている。

電磁誘導を利用した非破壊検査法である渦電流探傷試験は、試験コイルによって導電性の試験体に渦電流を誘導して、欠陥などによる渦電流の変化を試験コイルで検出して探傷を行う。原理的に非接触で試験を行えるので、CFRPの検査に適用すれば他の試験法にはないメリットを持ち、渦電流探傷試験をCFRPの検査に適用した報告がされている^{6)~11)}。

本報告では、地域連携研究プロジェクトとして千葉県産業支援技術研究所より提供を頂いた試験体と宇宙航空研究開発機構より提供を頂いた試験体の模擬剥離及び人工衝撃損傷の検出について、従来から平板の検査に多用されている上置プローブよりもSN比高くきざ検出性能の高い渦電流探傷 Θ プローブ¹²⁾ (以下、 Θ プローブ) による検出実験結果について報告する。

2. CFRPに対する渦電流非破壊試験

電磁誘導を利用した非破壊検査法である渦電流探傷試験は、交流電流を流した励磁コイルによって導電性を有する試験体に渦電流を誘導する。導電性の試験体に割れや欠陥などがあると、誘導された渦電流の流れが変化し、渦電流が作る磁束が変化する。この磁束の変化を励磁コイル近傍に配置した検出コイルの起電力変化として検出して導電性の試験体の欠陥などを検出するものである。

CFRPは、炭素を含有することから金属に比較して $10^4 \sim 10^5$ 程低い導電性を有する。この導電性を利用して渦電流探傷試験を適用できると考える。しかし、渦電流探傷試験が一般に適用されている金属に比べ導電率が低いことに加え、導電性の異方性が強いことから、従来の渦電流探傷試験の適用が困難である。筆者は、渦電流探傷試験をCFRPの検査に適用するためには、CFRPの欠陥検出に適した渦電流探傷プローブと得られた

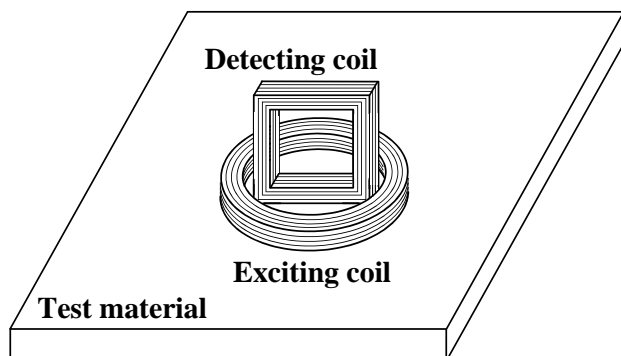


図1. 渦電流 Θ プローブの構造

検出信号に対する適切な信号処理が必要であると考えている。現在では、きず検出性能の高い様々な渦電流探傷プローブの開発がされている。今回は、従来から平板の試験体に多用されている上置プローブよりきず検出性能の高い Θ プローブを用いて CFRP の欠陥検出を試みた。CFRP には、構造物の使用部位により、織物状に編んだ炭素繊維シートを積層したクロス CFRP や、一方向の炭素繊維シートを $0,90^\circ$ に交互に積層した一方向 CFRP、 $-45, 0, 45, 90^\circ$ に交互に積層した疑似等方 CFRP など種々の物がある。

ここでは、クロス CFRP に対する渦電流探傷原理について述べる。CFRP に対する渦電流探傷試験に用いた Θ プローブを図1に示す。 Θ プローブは、円形の励磁コイルと矩形縦置ききの検出コイル

から構成される。クロス CFRP の場合には、織物状に編まれているので炭素繊維シート面の xy 方向に導電性を有する。従って、シート面内では金属程ではないが導電性は等方性にあると考え、円形の励磁コイルによってクロス CFRP に誘導される渦電流は、ほぼ円形に流れると近似的に考える。試験体に欠陥などが無い場合には、渦電流は励磁コイル巻線に沿って流れ励磁コイル中心に位置する検出コイルに鎖交する磁束の総和は零であり検出コイルには起電力を発生しない。即ち、欠陥などが無い場合には、 Θ プローブは信号を発生しない。一方、図2に示すように積層間に亘る剥離などの欠陥が有る場合には、渦電流の流れが欠陥によって妨げられ流れが変化し、検出コイルに信号が発生する。図に示すように検出コイルが欠陥の上側と下側に位置するときで検出コイル巻線方向に流れる渦電流の向きが逆となるので、検出される信号の極性は逆となる。検出コイルが欠陥の中央に位置する場合には検出コイル巻線方向に流れる渦電流の大きさが等しく逆向きであるので、信号は発生しない。 Θ プローブを走査すると正負の差動信号波形を得る。探傷原理からクロス CFRP の場合には、剥離などの欠陥を雑音小さく検出するものと期待できる。一方、一方向 CFRP や疑似等方 CFRP の場合には導電性が繊維方向の一方向に強いので渦電流探傷原理が少々異なると考えている。

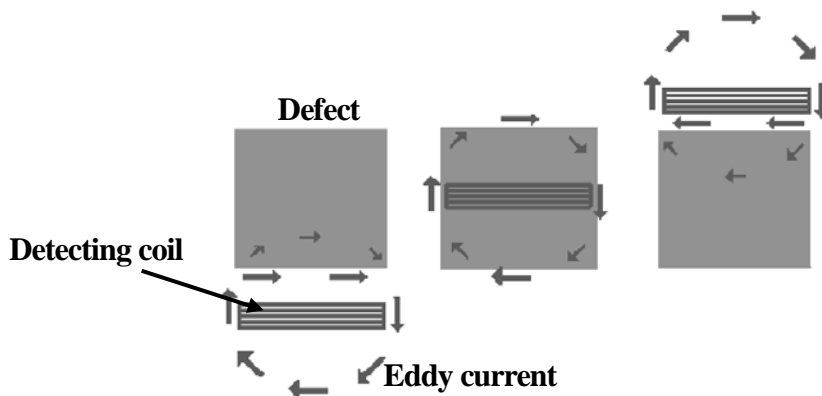


図2. 渦電流非破壊試験による CFRP の損傷検出

3. 実験方法

2種類の試験体をCFRPの損傷検出実験に用いた。試験体①には、厚さ0.19mmの炭素繊維クロスプリプレグを10枚積層した厚さ1.9mm、119mm×159mmのクロスCFRP板(千葉県産業支援技術研究所より提供)を用いた。試験体①には、図3に示すように1辺が20mm角で厚みが0.4mmの

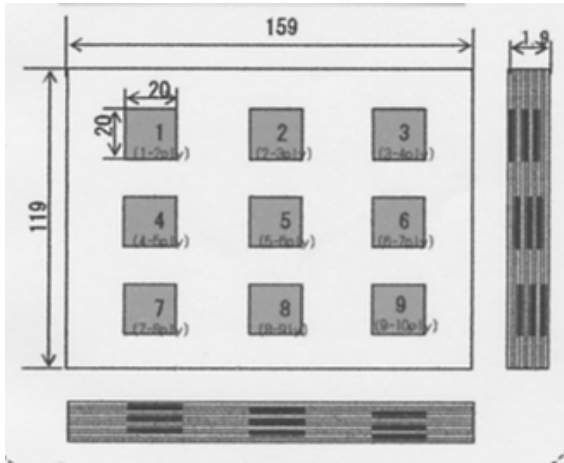
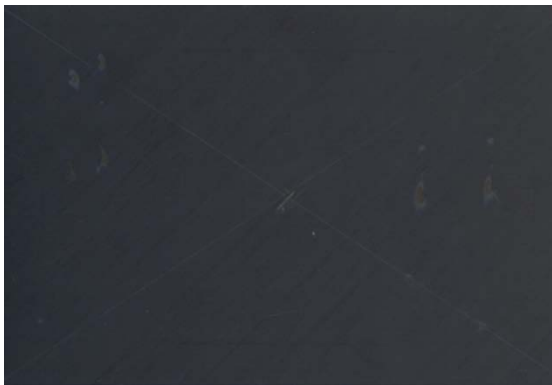
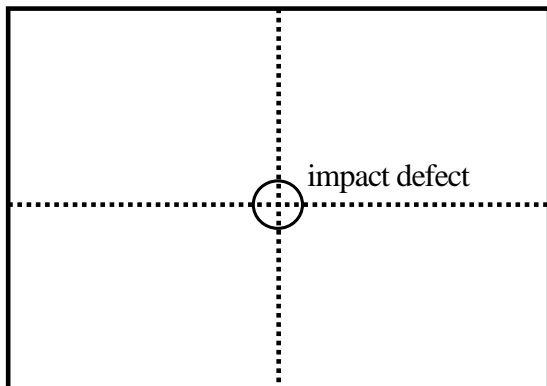


図3. 実験に用いたクロスCFRP試験体



(a) 試験体②の写真



(b) 損傷部位の位置

図4. 実験に用いた疑似等方CFRP試験体

アルミニウムテープを1,2層の間~9,10層の間と各層間に9箇所挟み込み模擬剥離とした。模擬剥離は、積層間で電氣的に絶縁されている。

試験体②には、厚さ0.125mmの一方向プリプレグを32枚積層した厚さ3.88mmの疑似等方 $[-45, 0, 45, 90]_{4, \text{sym}}$ CFRP板(宇宙航空研究開発機構より提供)を用いた。試験体②には、図4に示すように直径約10mm程の人工衝撃損傷を有する。衝撃エネルギーは、約0.7Jと聞いている。試験体表面から裏面に亘って人工衝撃損傷が観測される。

実験に用いた Θ プローブの励磁コイルの寸法は、外径9mm巻線断面積 $1 \times 1 \text{mm}^2$ であり、検出コイルの寸法は幅7mm高さ7mm巻線断面積 $1 \times 1 \text{mm}^2$ である。

CFRP板の導電率は、繊維方向に $7.7 \times 10^3 \text{S/m}$ 程であり、積層方向に $4.8 \times 10^1 \text{S/m}$ 程と聞いている。黄銅(真鍮)板の導電率が約 $1.3 \times 10^7 \text{S/m}$ であるから、 $10^4 \sim 10^5$ 程度導電率が小さい。電磁誘導により導電性の試験体に誘導される渦電流は、試験体の電磁気特性(導電率と透磁率)と試験周波数の積でその大きさが決まる。渦電流探傷試験をCFRPに適用する場合には、CFRPの導電率が低いので誘導される渦電流を強くすることを考え、試験周波数を2MHzとした。

プローブをCFRP板表面上を2次元に走査間隔0.5mmで走査した。

4. 解析及び実験結果

4.1 CFRPに誘導される渦電流分布

Θ プローブによるクロスCFRPに誘導される渦電流分布について、導電性の異方性を考慮した有限要素法による電磁界解析を行い求めた。

図5には、クロスCFRPをモデリングした試験体に誘導される渦電流分布を示す。クロスCFRPのモデリングでは、xy方向には導電率 $7.7 \times 10^3 \text{S/m}$ とし、z方向(積層方向)には導電率 $4.8 \times 10^1 \text{S/m}$ とした。図より円形の励磁コイル巻線に沿って渦電流が誘導されることがわかる。この様にクロスCFRPの場合には、織物状の炭素繊維シートを積層しているの、励磁コイル巻線に沿っ

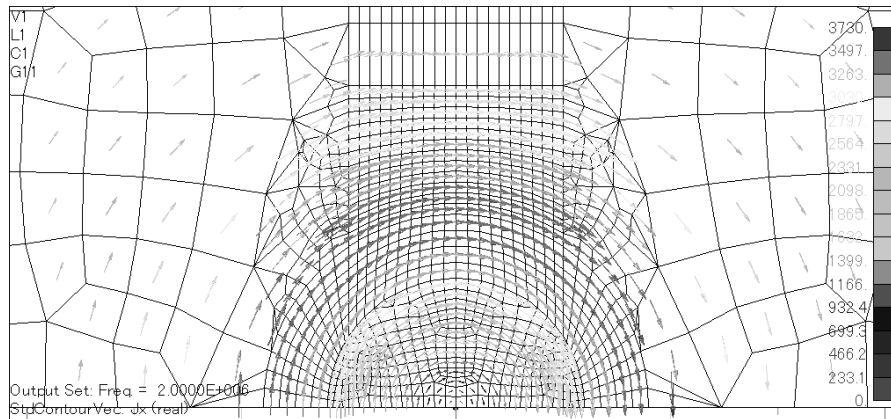


図 5. 渦電流分布 (クロスCFRP をモデリング)

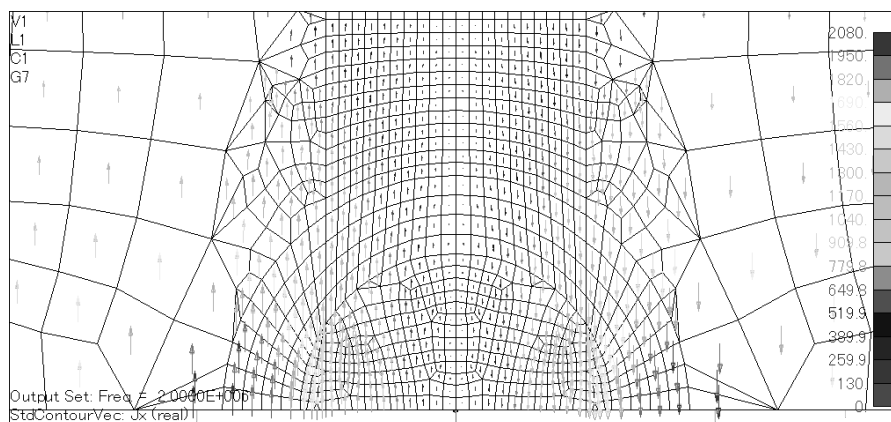


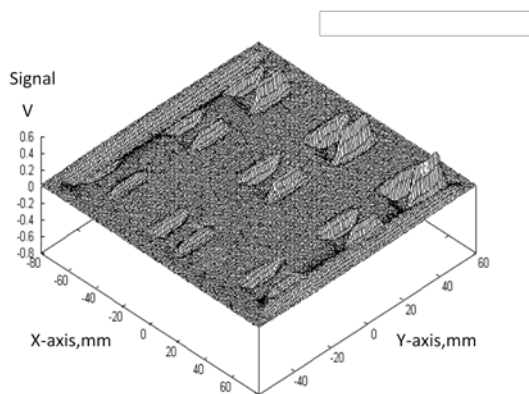
図 6. 渦電流分布 (一方向CFRP をモデリング)

た方向に渦電流が誘導されるものと予想される。従って、クロスCFRPの場合には、 Θ プローブの探傷原理上からSN比高く欠陥を検出できると期待できる。

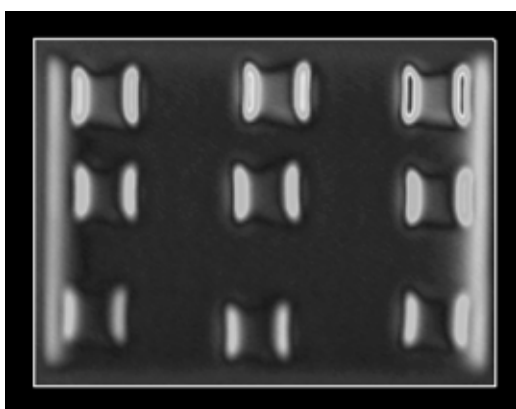
図6には、一方向CFRPをモデリングした試験体に誘導される渦電流分布を示す。一方向CFRPのモデリングにおいて、奇数層ではx方向には導電率 $7.7 \times 10^3 \text{S/m}$ とし y,z 方向に導電率 $4.8 \times 10^1 \text{S/m}$ とした。また、偶数層ではy方向には導電率 $7.7 \times 10^3 \text{S/m}$ とし x,z 方向に導電率 $4.8 \times 10^1 \text{S/m}$ とした。図よりx或いはy方向にのみ渦電流が誘導されていることがわかる。図5と図6の渦電流の大きさを比較すると、クロスCFRPの渦電流の大きさは一方向CFRPの渦電流の約1.8倍強い事がわかる。

4.2 模擬剥離の検出実験結果

図7には、模擬剥離(アルミニウムテープ)の検出信号を示す。渦電流探傷試験での検出信号は、励磁電流と同相の In-phase component と 90° 進相の Quadrature component との複素信号で得られる。図(a)には In-phase component の信号、図(b)には信号振幅の画像表示を示す。アルミニウムテープの端部で信号を発生し、SN比高く検出できていることがわかる。また、プローブの走査面である表面からのアルミニウムテープの深さ位置に応じて信号振幅が小さくなり、深さ位置に応じて検出信号が変化することがわかる。



(a) In-phase component



(b) 信号振幅の画像表示

図7. 模擬剥離の検出信号

4.3 人工衝撃損傷の検出実験結果

図8には、人工衝撃損傷の検出信号振幅の画像表示を示す。試験体中央部にある損傷部位に信号を得られている。また、クロスCFRPに比べ雑音が大きいたことがわかる。これは、疑似等方CFRPでは一方向プリプレグを $-45, 0, 45, 90^\circ$ と交互に積層しているので、導電性は繊維方向の一方向に大きく、励磁コイルで誘導される渦電流の電流経路(図6)が複雑となることや、1枚のプリプレグシート内で繊維の導電性が不均一であると検出コイルの巻線方向を軸として左右の渦電流の大きさが異なり雑音が発生することによると考えられる。

5. まとめ

ヘルスマニタリング技術の建設構造物および

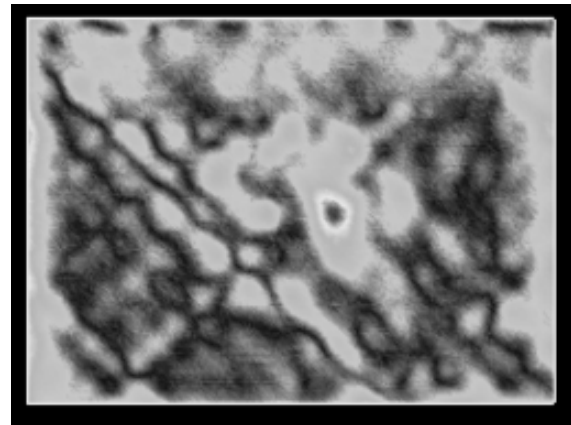


図8. 人工衝撃損傷の検出信号振幅の画像表示

地下埋設構造物への応用開発に関する研究の一環として、電磁誘導非破壊試験による炭素繊維複合材料(CFRP)の欠陥検出について検討を行った。有限要素法による電磁界解析により、クロスCFRPと一方向CFRPをモデリングした導電率の異方性を考慮した試験体に誘導される渦電流分布を求めた。クロスCFRPの場合には、励磁コイル巻線に沿った方向に渦電流が誘導されることを確認し、渦電流探傷 Θ プローブの探傷原理上から雑音小さく欠陥検出の可能性を裏付けた。一方、一方向CFRPの場合には、誘導される渦電流の電流経路が複雑であり、繊維の導電性が不均一であると、雑音の要因となることが予想された。

地域連携プロジェクトとして千葉県産業支援技術研究所提供の疑似欠陥入り試験体の探傷実験より、 Θ プローブによればクロスCFRPの疑似欠陥を明瞭に検出できることを明らかとした。また、宇宙航空研究開発機構提供の人工衝撃損傷を付加した試験体の探傷実験より、衝撃損傷を検出できることを示した。しかし、疑似等方CFRPの場合には繊維の導電性の不均一性による雑音が

発生し、クラス CFRP に比べて SN 比が低い事がわかった。

今後は、各種の CFRP の渦電流探傷に適した更なるプローブの開発と検出信号に対する適切な信号処理の適用を行って、電磁誘導非破壊試験法による炭素繊維複合材料の損傷検出の検出性能を高める必要がある。

参考文献

- 1) 松島正道：CFRP の超音波探傷評価、第 9 回新素材及びその製品の非破壊評価シンポジウム論文集、pp.23-26, (2007)
- 2) 川嶋紘一郎、安藤之人、高橋雅和、星野秀和、小倉幸夫：水浸超音波画像と空気伝搬超音波法による複合材の非破壊評価、第 9 回新素材及びその製品の非破壊評価シンポジウム論文集、pp.27-30, (2007)
- 3) 長瀬尚樹、西川康博、福島清：超音波による CFRP の欠陥評価、第 10 回新素材及びその製品の非破壊評価シンポジウム論文集、pp.1-4, (2007)
- 4) 西川康博：赤外線応力画像法を用いた平織炭素繊維強化複合材料の疲労損傷の検出、第 9 回新素材及びその製品の非破壊評価シンポジウム論文集、pp.19-22, (2007)
- 5) 青木卓哉、岡洋平、松島正道、杉本直、八田博志：パルスサーモグラフィ法による C/C 複合材料の非破壊検査、第 9 回新素材及びその製品の非破壊評価シンポジウム論文集、pp.57-60, (2007)
- 6) A.R Valleau : Eddy current nondestructive testing of graphite composite material, *Materials Evaluation*, 48-2, p.230- (1990)
- 7) M. Gvishi, A.H.Kahn and M.L.Master : Eddy current testing of carbon-carbon composite, *Review of Progress in QNDE*, Plenum Press, 11, P.289- (1992)
- 8) M.P.DE Goeje and K.E.D. Wapenaar : Non-destructive inspection of carbon fiber-reinforced plastics using eddy current methods, *COMPOSITES*, 23-3, pp.147-157 (1992)
- 9) Kei Urabe, Akira Saeki and Masanobu Kawakami : Eddy Current Inspection of Fiber Fracture in CFRP, *Proc. 3rd Japan International SAMPE Symposium*, pp.2147-2152 (1993)
- 10) R.Lange and G.Mook : Structural analysis of CFRP using eddy current methods, *NDT&E International*, 27-5, p.241- (1994)
- 11) X.E.Gros and W.Lowden : Electromagnetic testing of composite materials, *INSIGHT*, 37-4, pp.290-293 (1995)
- 12) H.Hoshikawa and K.Koyama : A New Eddy Current Probe with Minimal Liftoff Noise and Phase Information on Discontinuity Depth, *Materials Evaluation*, 61-3, pp.423-427 (2003)