

静電容量の変化を用いた GFRP の引張疲労損傷モニタリングに関する基礎実験

京都大学大学院 正会員 ○佐藤 顕彦

京都大学大学院 正会員 北根 安雄

京都大学大学院 正会員 杉浦 邦征

1. はじめに

GFRP は国内外において土木構造物の主構造部材として採用されているが、今後より活荷重の大きな構造物へと適用した際に、疲労損傷が懸念される。著者らは先行研究において GFRP の引張疲労試験を実施し、疲労損傷として樹脂内き裂や層間剝離が発生し、同時に材料剛性が低下することを報告した¹⁾。しかしながら、構造物内の局所的な材料剛性の低下は探知が困難であるため、材料自身にモニタリング機能を付加し、疲労損傷を評価することが有効であると考えられる。そこで、本研究では静電容量に着目した疲労損傷モニタリング手法について検討した。

2. 静電容量の変化を用いた疲労損傷モニタリング概要

本研究で検討する疲労損傷モニタリング手法の概念図を図-1 に示す。本研究では、絶縁体である GFRP の両面にアルミ電極板を接着することで平行板コンデンサを形成し、その静電容量の変化により疲労損傷を評価する。平行板コンデンサの静電容量 C は次式で表される。

$$C = \frac{\varepsilon S}{D} \quad (1)$$

ここで、 ε ：誘電率、 S ：電極面積、 D ：電極間距離である。本研究では、静電容量の変化を用いて疲労損傷（樹脂内き裂・層間剝離）に伴う空隙を感知し、残存剛性との関連性を評価する。

3. 実験概要

本研究では[45/0/45/0]_sの GFRP 積層板を供試体として用いた。GFRP の強化繊維にはロービングガラスクロス、樹脂には不飽和ポリエステルを使用した。試験体は積層板から 250 mm×25 mm の大きさに切り出し、両面に 100 mm×25 mm×0.5 mm のアルミ電極を接着して作製した。接着にはエポキシ樹脂系の接着剤を用いた。

実験状況を図-2 に示す。実験ではサーボパルス（島津製作所、最大荷重 50kN）を用いて引張の繰り返し载荷を実施した。本研究では試験体 2 体の载荷を行い、载荷最大応力は試験体 No.1 が 130 MPa、No. 2 が 80 MPa とした。2 体とも応力比は $R=0.1$ 、载荷周波数は 10 Hz である。各試験体とも疲労载荷前に 1 mm/min 以下の静的载荷を载荷最大応力まで実施し、その後 SINE 波による繰り返し载荷を疲労破壊が生じるまで行った。载荷中はデータロガー（東京測器研究所、DC-104R）により荷重-変位関係を測定し続けた。また、図-2 の C/V コンバーター（エヌエフ回路設計ブロック）を用いて静電容量も同時に計測した。計測サンプリング周波数は 200 Hz とした。

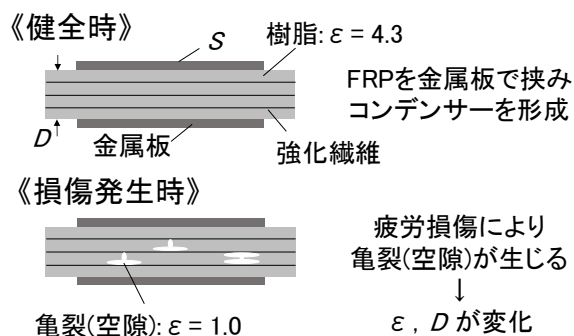


図-1 静電容量を用いたモニタリングの概念図

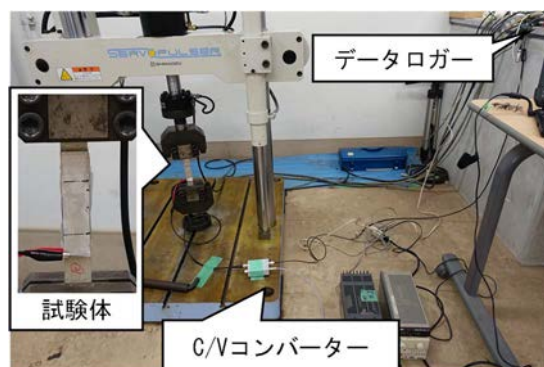


図-2 実験状況

キーワード GFRP、疲労損傷、剛性低下、モニタリング

連絡先 〒615-8540 京都府 京都市 西京区 京都大学桂 C1-2 棟 227 号室

TEL 075-383-3325

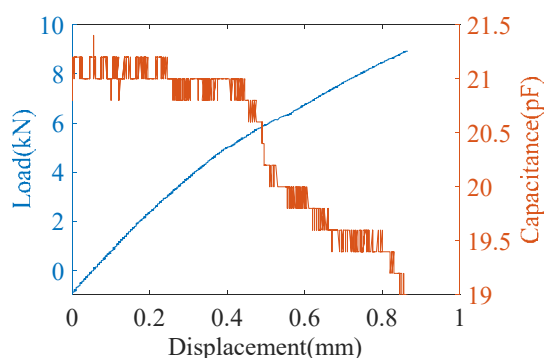


図-3 荷重-変位・荷重-静電容量関係 (試験体 No.2)

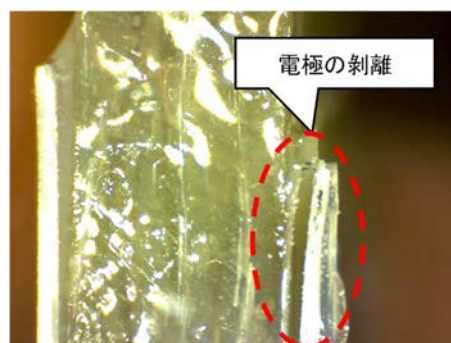
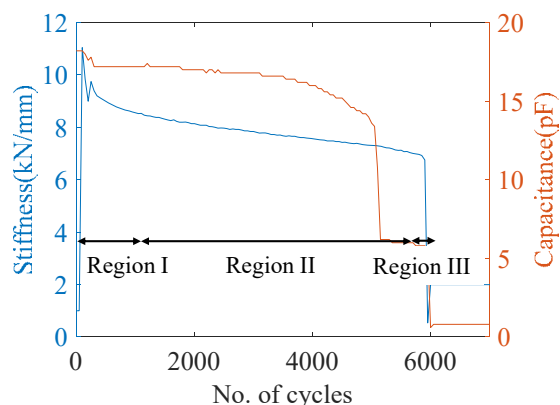
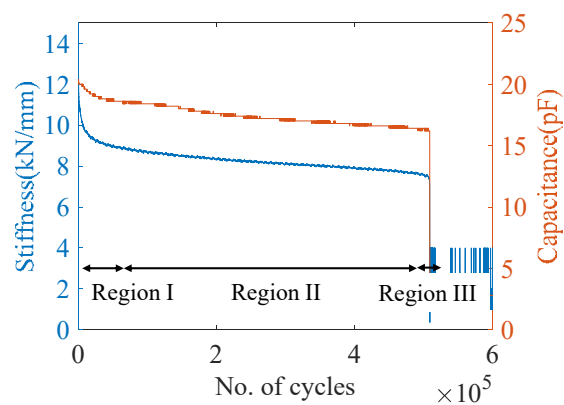


図-4 試験体 No.2 で確認された電極の剥離



(a) 試験体 No.1 (最大応力 130 MPa)



(b) 試験体 No.2 (最大応力 80 MPa)

図-5 残存剛性と静電容量の変化

4. 実験結果および考察

静的載荷により得られた荷重-変位関係、および静電容量-変位関係を図-3 に示す。図-3 から、載荷荷重の増加に伴い、静電容量は 2 pF 程度低下したことが確認できる。これは、図-4 のように端部で電極が剥離したことによって、電極間距離が増加したためだと考えられる。

疲労試験の結果得られた、繰返し数の増加に伴う残存剛性および静電容量の変化を図-5 に示す。本研究では載荷繰返し数 50 回毎に最大・最小荷重、最大・最小変位を抽出し、それらの傾きを剛性と定義した。また、静電容量も同様に繰返し数 50 回毎の最大値を代表値とした。図-5(a)から、既往の研究でも報告されている¹⁾Region I ~ III の剛性低下が確認された。また、静電容量も繰返し数の増加と共に減少した。試験体 No.1 では、剛性の低下が緩やかな Region II においても静電容量は鋭敏に低下した。このことは、静電容量によるモニタリングが Region II の疲労損傷評価に有効な可能性を示している。一方、図-5(b)の試験体 No.2 では、Region II において静電容量がほぼ線形に低下した。静電容量の低下傾向が両試験体で異なる理由としては、疲労破壊の位置は試験体 No.1 では電極接着部であったのに対して、No.2 では電極端部で疲労破壊を生じたためであると考えられる。また、静的載荷でも確認されたように、いずれの試験体においても疲労破壊時には電極が剥離していることから、疲労損傷に加えて電極自体の剥離も静電容量の低下に影響を及ぼした可能性が考えられる。

5. まとめ

本研究の結果、GFRP の Region I, II の疲労損傷評価に対して、静電容量の変化を用いたモニタリング手法の有効性が示唆された。一方で、本研究では電極の剥離が結果に影響している可能性があり、今後の課題としては電極の剥離防止策が挙げられる。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP22J15081 の助成を受け実施致しました。ここに感謝の意を表します。

参考文献 1) 佐藤ら, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 78 巻 5 号, pp. II_54-II_65, 2022。