振動解析による高分子系繊維強化複合材料の損傷評価* (振動特性変化からのアプローチ)

水谷 修平^{*1}, 松岡 敬^{*2}, 坂口 一彦^{*2}

Damage Estimation on Fiber Reinforced Plastics by Vibration Analysis (Approach from the Changes of Vibration Properties)

Shuhei MIZUTANA, Takashi MATSUOKA^{*3} and Kazuhiko SAKAGUCHI

^{*3} Doshisha University, Dept. of Mechanical Engineering and Systems,
1-3 Tatara Miyakodani, Kyo-tanabe-shi, Kyoto, 610-0321 Japan

The changes on vibration properties were investigated to develop a NDT for FRP in working conditions. Glass/vinylester fabric composites were used for a test specimen and a damage specimen was made by 1-cycle load-unload static tensile tests. Impulse response tests, which are very useful to carry out in working conditions, were performed before and after the static tensile tests in order to estimate changes of the vibration properties of the specimen. It became clear from the comparison of vibration properties before and after the test that vibration properties were changed by the damage (i.e. the decrease of natural frequencies and gains at resonance, and increase of damping ratios). Also, it became clear that the changes of vibration properties clearly occurred with the increase of damage. It was remarked that there was a linear relationship between the changing rate of vibration properties and the increasing rate of transverse cracks. These results showed that there was able to estimate the value of damage from vibration analysis.

Key Words: Fiber Reinforced Plastics, NDT, Vibration Properties, Impulse Response Test, Knee Point, Modulus Decay, Transverse Crack

1. 緒 言

高分子系繊維強化複合材料 (以下: FRP) は, 高比強度・比剛性を有することから, 近年, 様々な分野において用いられている. 特に航空宇宙分野におけるその利用の拡大は著しく, 輸送効率の高効率化を目指した軽量化の方針が広まりつつある中, FRP が構造部材として適用されてきている^①. このように FRP が輸送用機器における構造材料として用いられるようになってきた現在, 安全性の確立という観点から, 運用期間内において, 設計時に設定した強度および剛性等の機械的性能を有していることが求められる. しかし, FRP は異種材料を混合させた構成であるため, 運用中において発生すると考えられる損傷は複数の形態を持ち, それら複数の損傷形態が複雑に混在すると考えられる. さらに FRP の損傷は温度・湿度等, 運用環境の影響を受けることが広く知られており^{②③}, 適用環境に対応した損傷形態および損傷進展の予測, および耐用期間の設定はより困難となる. したがって, 運用

中である FRP の損傷を把握するための非破壊検査技術の確立が重要である.

FRP の損傷を検知・評価するためには, アコースティック・エミッションや超音波探傷等に代表される非破壊検査があるが, 前者は損傷発生を検知する必要があるため常にセンサを設置する必要があり, 後者は大規模な施設を必要とするばかりか, 検知することのできる損傷形態や, 対象となる試験片の構成に限界がある等, 現在使用されている非破壊検査には, 現場における利便性に乏しい. 一方, FRP の損傷による振動特性の変化に着目した非破壊検査が研究されてきているが^{④~⑫}, それらの研究は FRP の最終破壊に直接的に関与する層間剥離等, 比較的大規模な損傷を対象にしたものが多く, FRP において運用開始と共に発生・蓄積していくと考えられる損傷形態の 1 つであるクラック (き裂) に着目した研究^{④⑤}は少ないのが現状である.

本研究では, 運用環境下にある FRP に対して利便性があり, かつ損傷の蓄積を評価することのできる非破壊検査の確立を目指し, インパルス応答法によって得られる振動特性と損傷との関係について検討した.

* 原稿受付 2002 年 5 月 8 日.

^{*1} 学生員, 同志社大学大学院 (〒610-0321 京田辺市多々羅部谷 1-3) [現, 准員, 三菱重工工業(株)].

^{*2} 正員, 同志社大学工学部.

E-mail: tmatsuoka@mail.doshisha.ac.jp

2 実験方法

2.1 試験片 本研究では、FRP 内のクラックによる振動特性の変化に着目するために、ガラス繊維強化ビニルエステル複合材料を試験片として使用した。ビニルエステル樹脂[Declite UE3505 : 大日本インキ化学工業]を母材とし、8枚の平織りガラス繊維[MS253C: 旭ファイバーグラス]を強化材として使用した。ハンドレイアップ法により作成した積層板は、24 時間常温硬化させた後、80℃、4 時間のアフターキュアを施した。試験片は積層板から図1に示すような形状に切り出して作成した。

Fig.1 Dimensions of specimens

2.2 静的引張試験による材料特性の把握 試験片の材料特性を把握するために、静的引張試験を実施した。試験機として電気油圧式サーボ動的試験機[INSTRON8516 : INSTRON]を使用し、荷重制御にて引張試験を実施した。応力負荷速度は 1.40MPa/sec である。本試験機から電圧値により出力される荷重、変位情報を PC に電圧式データ収集システム[NE110 : キーエンス]により記録し、応力-ひずみ線図を作成することにより試験片強度および剛性を求めた。その結果、本試験片の強度は 282MPa、強度の標準偏差は 18.4MPa となり、強度のばらつきを示す変動係数 (= [標準偏差]/[平均]) は 0.0652 と低い値を示した。

Fig.2 Stress-strain curve on static test

2.3 与損傷試験 試験片に損傷を与えるため、破壊に達するまでに除荷を行う静的引張試験を実施した (以

下、本静的引張試験を与損傷試験と定義する)。与損傷試験においても、2.2 で使用した電気油圧式サーボ動的試験機を使用した。応力負荷・除荷速度は静的引張試験と同じ 1.40MPa/sec とした。静的引張試験によって得られた応力-ひずみ線図 (図2参照) より、本試験片には、引張応力 50MPa 付近において、knee point が観測された。平織り繊維強化複合材料においては、この knee point を境にして損傷が発生するため⁽¹³⁾、与損傷試験の最大負荷応力を、knee point 前 (30MPa)、knee point 通過直後 (80MPa)、および knee point 後 (200MPa) の3種類に設定した (図3参照)。損傷した試験片に対するインパルス応答試験の後、与損傷試験と同一負荷条件の静的引張試験を、与損傷試験後の試験片の剛性 (応力-ひずみ線図の初期勾配) を求めるために実施した (以下、剛性低下確認試験と呼ぶ)。また、与損傷試験前後の試験片表面を透過光学顕微鏡[VH-7000 : キーエンス]を用いて観察した。

Fig.3 Loading conditions on damage tests

Fig.4 Photograph of the equipment for impulse response test

2.4 インパルス応答試験 試験片の振動特性を測定するために、インパルス応答試験を行った。図4に示すように、試験片両端をクランプにより圧縮固定し、振り子を利用することにより打振エネルギーを一定にすることができる試験装置を製作した。インパルスハンマ[5800SL : Dytran]より得られる入力波と、加速度センサ

[NP-3120 : 小野測器]より得られる出力波を増幅器[SA-16 : TEAC]により増幅させ, FFT アナライザ[CF5210 : 小野測器]に入力して周波数応答関数 (Frequency Response Function: 以下 FRF) を導出し, 振幅 $|H_{12}|$, 固有振動数 N_f を求め, 減衰比 ξ を FFT アナライザより得られたナイキスト線図を用いてサークルフィット法⁽⁴⁾により求めた. なお, インパルス応答試験は与損傷試験前後に実施し, 得られた振動特性の比較を行った.

3. 試験結果および考察

Fig.5 Variation in FRF-Applied tensile stress 200MPa

3.1 損傷と振動特性の変化 図 5 に与損傷試験 (200MPa 負荷) 前後の周波数応答曲線 (FRF) を, 表 1 に振動特性を示す. 図 5 より, FRP 試験片の共振現象は 4ヶ所で確認されたが, 第 1 次共振付近においては, 周波数刻み幅が大きいため適切なナイキスト線図が得られなかったことに加え, 振動現象の信頼性を示すコヒーレンス関数が低い値を示したため, 本共振現象における減衰比は除外した. 図 5 および表 1 より, 与損傷試験で生じた損傷により, FRP 試験片の固有振動数および振幅は減少し, 減衰比が増加したことがわかる. 与損傷試験前後における試験片表面の顕微鏡写真 (図 12 参照) の比較より, 与損傷試験によって生じたクラックが振動特性の変化に影響を及ぼしたと考えられる. また, 与損傷試験として設定した 3 条件, すなわち各最大負荷応力における固有振動数, 振幅, 減衰比の変化を図 6~8 に示す. 試験片数は各条件共に 3 個である. なお, 振動特性の変化は各モードにおける振動特性の変化を平均したものである. それぞればらつきはあるものの, 最大負荷応力が高まるにつれて固有振動数および振幅は減少し, 減衰比は増加することがわかる. 固有振動数のばらつきは少ないものの,

減衰比と振幅のばらつきが大きくなっている. これは, 固有振動数は試験片形状にしか影響を受けないのに対

Table1 The variation of vibration properties obtained from the damage test ($\sigma_{max}=200\text{MPa}$)

mode	Natural frequency		Gain at Nf		Damping ratio	
	$N_{f_{vir}}$	$N_{f_{dam}}$	$ H_{12_{vir}} $	$ H_{12_{dam}} $	ξ_{vir}	ξ_{dam}
1	301	295	-17.25	-18.00	***	***
2	838	818	-0.79	-1.82	0.028	0.037
3	1633	1592	7.36	6.81	0.044	0.054
4	2662	2593	10.81	9.19	0.079	0.084

Fig.6 The decrease of natural frequencies by the damage tests

Fig.7 The decrease of gains by the damage tests

Fig.8 The increase of damping ratios by the damage tests

し、減衰比および振幅は試験片の固定状況や打振力のばらつきの影響を受けるためであると考えられる。

Fig. 9 The relation between modulus decay and decrease of natural frequency by damage

Fig.10 The relation between modulus decay and decrease of gain by damage

Fig.11 The relation between modulus decay and increase of damping ratio by damage

3-2 剛性低下と振動特性の変化 損傷による材料特性の低下と振動特性の変化を定量的に評価するため、与損傷試験および剛性低下確認試験より得られた試験

片の剛性低下と振動特性の変化との関係を図 9～11 に示す。これより、振幅に関してはばらつきが多いものの、固有振動数および振幅は剛性低下にともなって減少し、一方、減衰比は増加することがわかる。これら振動特性の変化には、永久ひずみによる試験片の形状変化の影響も考えられるが、本与損傷試験によって得られた永久ひずみは最大でも 0.1[%]以下であり、形状の変化は振動特性の変化に大きな影響を与えないと考えられる。特に剛性低下と固有振動数の変化の間には剛性低下が見られない領域を除いてばらつきが少なく、剛性低下率と固有振動数の低下の間には密接な相関関係があると考えられる。この結果は、運用中の FRP 部材に対して、その剛性低下を振動応答法で測定することが可能であることを示している。

各図において、最小 2 乗法により求めた直線式、および相関係数 (R^2 値) を示す。これより、振幅に関しては剛性低下との相関性は低いと言わざるを得ないが、固有振動数と剛性低下の間には良好な相関関係 ($R^2=0.752$) があることがわかる。一方で剛性低下に対する振動特性変化の感度 (最小 2 乗法によって求めた直線方程式右辺第 1 項の係数) という点に着目すると、減衰比の増加は剛性低下に対する感度が高い ([直線方程式右辺第 1 項の係数]=0.019) ことがわかる。このことより、損傷を剛性低下により評価する場合において、その固有振動数および減衰比双方の変化を用いることにより、信頼性が高く、かつ損傷に対する感度の高い非破壊的な損傷評価を行うことの可能性が示された。

3-3 クラックと振動特性の変化 各条件の与損傷試験前後における FRP 試験片の表面顕微鏡写真を図 12 に示す (引張荷重負荷方向は紙面左右である)。これより、最大負荷引張応力を knee point 到達前に設定した場合 (図 12(a)参照) はクラックがほとんど発生・進展していないことがわかる。knee point 到達後まで応力を負荷した場合 (図 12(b), (c)参照) においては、トランスバースクラックが主に発生しており、最大負荷応力が高くなるに従い、クラックが増加していることがわかる。さらに最大負荷応力が 200MPa の試験片には、トランスバースクラックに加え、縦方向へのクラックおよび繊維交差部にはデラミネーション (以下、メタデラミネーションと定義する) が発生していることが

わかる。これら顕微鏡写真と前述の振動特性の変化から、FRP 試験片の振動特性は損傷の発生・進展の影響を受けたため、変化が生じたと考えられる。

Fig.12 The microphotographs of the specimens before and after the damage tests

3・4 損傷進展と振動特性の変化 繊維強化複合材料の損傷は、knee point に到達するとトランスバースクラックが発生する⁽¹³⁾。本研究においても knee point に到達することによるトランスバースクラックの発生が確認された（図 12 (b)参照）。knee point 到達後の損傷進展過程は、図 12 (c) に示したように、縦方向へのクラックやメタデラミネーションもみられるが、これらの損傷はトランスバースクラックの増加およびクラック長さの伸展による材料内部における応力負担機構の変化の結果生じたものである。したがって、トランスバースクラックの増加および伸展が主な損傷進展形態であると考えられる。

図 13 に与損傷試験における最大負荷引張応力と剛性低下率との関係を示す。この図より、剛性低下率は knee point に到達することによって著しく増加していることがわかるが、knee point 以降においてその増加率は鈍化していることがわかる。しかしながら、先述の通

り、knee point 以降においても、本材料内における損傷の増加・進展が生じていることは明白である。このように、knee point 以降、最終破断を誘起する大規模な繊維破断に至るまでの領域においては、トランスバース

Fig.13 The relation between modulus decay and loading condition

クラックに代表される損傷が新たに発生、またはその長さが伸展したとしても、材料全体では応力負担機構に大きな変化が生じないため、顕著な剛性低下が生じないと考えられる。この状態を安定的損傷蓄積過程と定義すると、本過程において、剛性低下率を用いた損傷評価は、損傷の蓄積に対する感度が低く、剛性低下を用いた非破壊的な検査指針を確立することには困難を伴う。

本研究において定義した繊維強化複合材料の安定的損傷蓄積過程において、トランスバースクラックが応力を負担する縦繊維束に到達することによって生じる応力拡大や、トランスバースクラックによって誘起される縦方向へのクラックおよびメタデラミネーションが増加することによって生じる材料内部の特異性の増大によって、繊維強化複合材料は最終的な繊維破断を起こし、破壊に至るものと考えられる⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。すなわち、安定的損傷蓄積過程から最終破断に至る主な原因は、本材料内部に新たに発生・伸展するトランスバースクラックであると考えられる。

トランスバースクラックの増加・伸展と振動特性の変化を定量的に評価するため、トランスバースクラック増加率を、与損傷試験前後の同一領域（面積 2.0mm^2 ）におけるトランスバースクラックの総延長比と定義して測定した。図 14, 15 にトランスバースクラック増加率と振動特性変化率（固有振動数および減衰比）との関係を示す。この図より、与損傷試験により発生・伸展したトランスバースクラックにより、振動特性の変化が線形的に増加していることがわかる。

すなわち、損傷が増加しても剛性低下には現れない安定的損傷蓄積状態において、トランスバースクラックの増加にともなって振動特性は変化することがわかる。したがって、剛性低下のみでは捉えられない損傷領域においても、振動特性の変化から、試験片の損傷状態を評価できる可能性が示された。

Fig.14 The relation between natural frequency and transverse crack length

Fig.15 The relation between damping ratio and transverse crack density

4. 結 言

本研究において、FRP 試験片に与損傷試験として静的引張応力を負荷する前後においてインパルス応答法により振動特性を測定し、比較したところ、以下の結論が得られた。

- (1) 損傷により FRP 試験片の固有振動数および振幅は減少し、減衰比は増加することが示された。
- (2) 剛性低下と振動特性の変化との間には固有振動数が最も良好な相関性があり、減衰比は損傷に対する感度が高いことが示された。

- (3) 与損傷試験により発生・進展したトランスバースクラックが振動特性の変化に影響を及ぼすことが示され、さらに振動特性の変化には、剛性低下では停留するため評価することのできない knee point 以降におけるトランスバースクラックの増加にともなって線形的に変化するという関係があることが示された。

以上より、振動特性の変化を測定することにより FRP 内においてトランスバースクラックの増加から損傷を評価することのできる可能性が示された。

なお、本研究を行うにあたり、私立大学学術研究高度化推進事業の補助による同志社大学大学院 RCAST の支援を受けた。また、大日本インキ化学工業株式会社にビニルエステル樹脂を、旭ファイバーグラスに平織りガラス布をそれぞれ提供して頂いた。ここにこのことを記し、深く謝意を表す。

文 献

- (1) 今村次男, 山口泰弘, 日本航空宇宙学会誌, 43 巻 495 号, (1995), 29-39
- (2) 川上洋司, 井上敦, 藤井透, 機論 A, 66 巻 651 号, (2000), 2049-2054
- (3) 金 権, 文昌権, 宮崎則幸, 第30 回 FRP シンポジウム講演論文集, (2001), 41-44
- (4) A. B. Schultz, and D. N. Warwick, J. Compos. Mater. 5, (1971), 394-404
- (5) R. D. Adams, J. E. Flicroft, N. L. Hancox, and W. N. Reynolds, J. Compos. Mater. 7, (1973), 68-75
- (6) P. Cawley and R.D. Adams, J. Compos. Mater. 13, (1979), 161-175
- (7) A. K. Pandey, M. Biswas, and M. M. Samman, J. Sound and Vibration, 145(2), (1991), 321-332
- (8) C. P. Ratcliffe, J. Sound and Vibration, 204(3), (1997), 505-517
- (9) 金原勲, 景山和郎, 鈴木敏夫, 大沢勇, 伊出浩司, 材料, 43 巻 487 号, (1994), 476-481
- (10) 稲田貴臣, 島村佳伸, 轟章, 小林英男, 機論 A, 67 巻 664 号, (2001), 1929-1935
- (11) 邊吾一, 山口達也, 福田行義, 青木義男, K. C. Park, 機論 A, 66 巻 644 号, (2000), 721-726
- (12) 荻芳郎, 福永久雄, 亀山正樹, 日本複合材料学会誌, 26 巻 6 号, (2000), 236-242

- (13) 番作和弘, 仲井朝美, 武田展雄, 機論 A, 65 巻
630 号, (1999), 287-292
 - (14) 加川幸雄, 石川正臣, モーダル解析入門, (1987),
オーム社, 175-177
 - (15) 孫峰, 鈴木恵, 中西博, 岩本正治, 自念栄一, 材
料, 37 巻 416 号, (1988), 517-522
 - (16) H. Maeyama, K. Okubo, T. Fujii, Mater. Sci. Research
International-Special Technical Publication-2, (2001),
250-255
-