

ガイド波を用いた先進グリッド構造の損傷診断手法の構築

学生証番号 56201 新井健夫
(指導教員 武田 展雄 教授)

Key Words : Advanced Grid Structure, CFRP, Longitudinal wave, Flexural wave, Damage detection.

1. 緒言

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)は、繊維配向方向の比強度・比剛性に優れており、この特性を最も効率良く利用した構造の一つとして、CFRP一方向材をリブに用いた先進グリッド構造(Advanced Grid Structure: AGS, Fig.1)が注目されている。本研究ではこの構造の信頼性向上及びメンテナンスコスト削減のため、ガイド波を用いた損傷診断手法の構築を目的とし、AGSに生じた損傷によるガイド波(疎密波、曲げ波)の伝搬特性の変化を評価し、それを基に各損傷に対する診断手法を提案、検証した。



Fig.1 先進グリッド構造

2. 疎密波・曲げ波の伝搬特性の評価

各ガイド波のエネルギーがAGSの交点から周囲のリブへどのように伝搬するか調べるため、以下の試験を行った。Fig.2(a)に疎密波、(b)に曲げ波に対する試験の概要を示す。AGSのリブ端部に接着した圧電素子により疎密波を発振し、(a)図のA~Cで得られた初期到達波の最大振幅値 V_p を比較した。曲げ波については(b)図の交点の上面に接着した素子により伝搬させ、周囲a~f点で信号を計測し V_p を比較した。

Fig.3に各計測点で得られた V_p の値を示す。(a)図を見るとB点での振幅が最も大きいことから、疎密波は直進する傾向がある事がわかった。また(b)図を見ると各計測点での V_p の大きさは等しく、曲げ波は交点より全方向に均等に伝搬していく事がわかった。

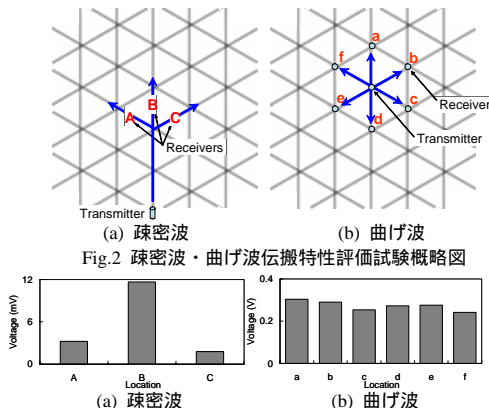


Fig.3 疎密波・曲げ波の交点における伝搬特性

3. 対象とする損傷形態

本研究で対象とする損傷は低速衝撃荷重によるものとする。AGSに発生する低速衝撃損傷に関して、既存の研究において以下のことがわかっている。まずスキンの付かない場合のAGSではリブの繊維破断によるクラック(以下、クラック)とリブ上面のスプリットが生じる。またスキン付きAGSの場合はこれらの損傷は発生せず、更にリブとスキンの剥離損傷はリブ幅を損傷設計パラメータとして検討することで制御できる。但し経験上、製造欠陥としてリブとスキンの接着不良が生じることが考えられる。以上より本研究で対象とする損傷はクラック、スプリット、スキンの接着不良とした。また予備試験としてこれらの損傷による疎密波、曲げ波の伝搬特性の変化を調べたところ、クラックにより疎密波が、接着不良により曲げ波がそれぞれ変化することがわかり、これらに対し損傷診断手法を構築することとした。

4. クラックの疎密波による診断手法の提案と検証

4.1 クラックによる疎密波伝搬特性変化の評価

本節ではクラックの発生による疎密波を伝搬特性の変化を評価した。Fig.4に試験の概要を示す。試験ではまず、2節で明らかになった疎密波の直進性を考慮して図のように圧電素子を配置し、aの素子で疎密波を発振しbの素子で信号を計測した。次にクラック(Fig.4写真参照)を図に示す位置に発生させた。ここでは損傷を発生させるため、低速衝撃荷重を与える代わりに静的押し込み試験を行った。そして損傷発生後、先と同様に疎密波を計測し、損傷発生前後で受振信号がどのように変化したのか評価した。

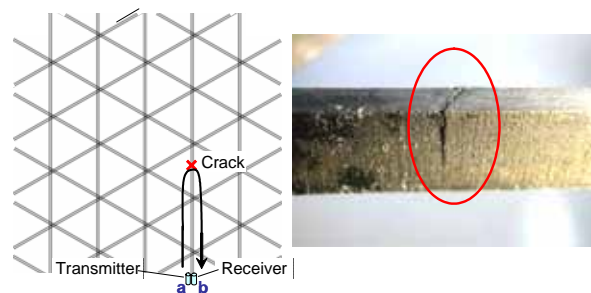


Fig.4 クラックによる疎密波の信号変化評価試験概略図

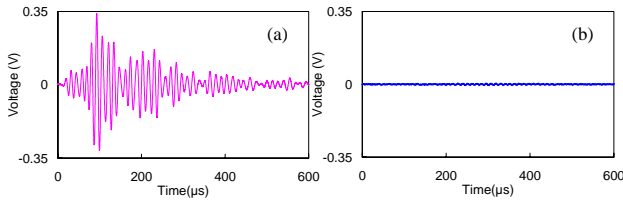


Fig.5 クラックによる疎密波の伝搬特性の変化

Fig.5(a)に損傷導入前後に計測した波形の差を示す。グラフを見ると、損傷導入前後で振幅差が生じている事がわかる。これは損傷部で疎密波が反射し、その信号が差となって計測されたためと考えられる。

4.2 損傷診断手法の提案と検証 クラックの自動的検知手法を提案する。まずFig.4において無損傷状態で2回計測した波形の振幅差の離散データ y_i^{Intact} ($i=1,2,\dots,200, t=0\sim 200\mu s$ 、事前に計測した結果をFig.5(b)に示す)は計測器等の計測誤差に埋もれ正規分布に従うと仮定する。またクラック発生前後に計測した波形の振幅差の離散データ y_i^{Damage} は、Fig. 5(a)に示したようにクラックからの反射波により大きな値となる。そして y_i^{Intact} のデータ集合に属しないと考えられる、 y_i^{Damage} の値が生じた場合、クラックがあると判定するという方法を考えた。具体的には y_i^{Intact} の標本平均 \bar{y} と標本標準偏差 s を求め、それを用いて y_i^{Damage} を標準化した値 Z が

$$|Z| = \left| \frac{y_i^{Damage} - \bar{y}}{s} \right| \geq 4 \quad (1)$$

となる場合を損傷ありと判定する事とした。尚、 $Z = \pm 4$ は標準正規分布の両側99.996%点であり、この範囲から外れたものを異常値、つまり損傷ありと判断する。ここでこの手法の有効性を検証する。 y_i^{Intact} から求めた \bar{y} 、 s と、 y_i^{Damage} より Z を求めたところ最大で約261となった。この結果から素子を貼り付けたりリブ直線上に損傷があると判定され、提案した診断手法により損傷の有無の検知が可能である事がわかった。

5. 曲げ波による損傷診断手法の提案と検証

5.1 損傷による曲げ波伝搬特性変化の評価 接着不良の発生による曲げ波伝搬特性の変化を評価するため以下の実験を行った。Fig.6に試験の概要を示す。図に示すように圧電素子を配置し、その反対の面に

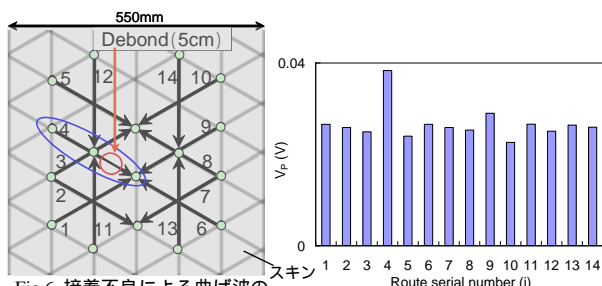


Fig.6 接着不良による曲げ波の变化評価試験概略図

Fig.7 各経路での V_p の比較

カップラントによりアルミスキンをAGSに貼り付け、全14経路で曲げ波を伝搬させ V_p の値 V_i ($i=1, \dots, 14$: 経路番号) を評価した。尚、図中4番の経路に未接着領域を設け接着不良を模擬した。

Fig.7に各経路で計測された V_p の値を示す。これを見ると未接着の領域を設けた経路番号4における値が他に比べ大きく、他の経路における値はほぼ同様となっている。これは接着不良が存在した場合、完全に貼り付いている場合よりもスキンに流れ込む弾性波エネルギーが少なくなり、結果、リブを伝搬するエネルギーが増加したためと考えられる。

5.2 曲げ波による損傷診断手法の提案と検証 ここではリブとスキンの接着不良の診断手法を提案する。まず、Fig.7において健全な経路で得られた V_p の値は、経路毎の成形のばらつきの影響はなく、計測誤差によりばらつきが生じると仮定し、その値は正規分布に従うものとする。正規分布に従うと考えられる標本中の異常値(ここでは接着不良のある経路で得られた V_p) を見つける手法としては、以下の式に基づいて行う方法がある。

$$T_j = \max \left(\frac{|\max x - \bar{x}_j|}{s_j}, \frac{|\min x - \bar{x}_j|}{s_j} \right) \quad (j=1,2,\dots,k) \quad (2)$$

ここで、 S_j を x_1, x_2, \dots, x_{j-1} を除いたデータ集合として、 \bar{x}_j, s_j はそれぞれ、 S_j の標本平均、標本標準偏差を表し、 k は最大許容損傷数を表す。まず(2)式を用いて T_1, \dots, T_k を決定する。そして $T_j > f_j(\cdot)$ となった場合 x_1, \dots, x_j が異常値と判定される。ここで $f_j(\cdot)$ は n, k 及び検定に用いる有意水準 から決定される閾値である。

以上の手法をFig.7で得られた V_i ($i=1, \dots, 14$) に対して適用し手法の有効性を検証した。まず本研究では $k=3$ と設定し、 x_1, x_2, x_3 に対応する V_p が、 V_4, V_9, V_{10} とわかった。これから T_1, T_2, T_3 を求め、事前に $\alpha = 0.01$ として計算した閾値 $f_j(\cdot)$ と比較した。これらの値をTable 1に示す。この表より x_1 つまり V_4 が異常値と判定され経路番号4にリブとスキンの接着不良が存在すると診断された。以上より提案した損傷診断手法により損傷の存在と位置を判定できる事がわかった。

Table 1 損傷診断に用いる異常値検定量と閾値

j	T_j	$\lambda_j(\alpha)$
1	3.19	2.81
2	2.14	2.58
3	2.37	2.47

6. 結言

本研究ではAGSに対する、ガイド波を用いた損傷診断手法を検討した。まずAGSにおけるガイド波伝搬特性として、疎密波の直進性が強いこと、曲げ波が交点より全方向へ均等に伝搬する事がわかった。またリブに発生した繊維破断部で疎密波が反射する事、またリブとスキンの接着不良の存在により曲げ波の受振振幅が増加する事を利用し、それらの損傷に対する診断手法を構築し、その有効性を実証した。