ラム波直交スキャンによる FRP 積層板の衝撃損傷検査

渡邊 優太* 和田 明浩**

Impact Damage Inspection of FRP Laminates with Lamb Wave Cross-Scanning

Yuta WATANABE Akihiro WADA

ABSTRACT

Lamb wave Cross-scanning is demonstrated for quick inspection of FRP laminates with impact damage. One of nondestructive evaluation methods to find localized defect is ultrasonic testing. However, conventional method such as C-scan is time-consuming for wide area inspection, because the inspected area by one operation is relatively small. In this study, two orthogonal line-scanning is conducted to specify the location of impact damage. Change in power spectral density is used as damage index instead of wave velocity or attenuation. It is found that evaluation based on the centroid of spectral density is the most promising method for quick inspection of impact damage.

Key words : FRP laminates, NDT, Lamb wave

1. 緒言

FRP 積層板は繊維配向角が異なる単層を複数 重ね合わせた構造を持ち,繊維配向角を選択する ことで材料設計が可能な材料である.FRP 積層板 に衝撃負荷が加わると,層間はく離,母材き裂, 強化繊維破断などが局所的に発生し,残存強度が 著しく低下する.このため,衝撃損傷部位の効率 的な検査手法の確立が望まれている.

衝撃損傷検査の手法の1つに超音波を用いた非 破壊検査法がある.従来は板厚方向に超音波を伝 播させその反射波から欠陥を検出する垂直探傷法 や,超音波探触子を2つ用いて板面内方向に伝播 させ,超音波の減衰から欠陥を検出する斜角入射 法が多用されてきが,いずれの場合も測定一回あ たりの検査領域が小さく,試料全体を検査するに は平面走査が必要となるため,検査に時間を要す るという欠点がある⁽¹⁾.そこで本研究では時間短 縮を目的として,従来の斜角入射法を応用したラ ム波直交スキャンによる検査方法を検討した.

2. ラム波による損傷検出原理

ラム波はガイド波の一種であり,板面内方向に 比較的長距離伝播できることが知られている.板 面内を伝播するラム波の特性は材質・板厚によっ て変化し,損傷部ではその特性が大きく変化する ため損傷部位の特定に利用できる⁽²⁾.

本研究ではラム波の入射方法として斜角入射 法を用いる. Fig.1のように超音波探触子を2個用 い,一方の探触子から超音波を斜角入射して材料

* 神戸高専 専攻科機械システム工学専攻

中に伝播させ、入射角と対称となるように設置さ れた受信側探触子で漏洩波を受信する.この際、 検査領域は送受信探触子に挟まれた領域となる が、従来はこの距離を比較的小さく設定し、垂直 探傷法と同様に材料表面を平面走査することで 試料全体の検査を行っていた.本研究では、送受 信探触子を検査領域をまたぐように設置してラ ム波をロングレンジで伝播させ、一次元走査によ り損傷検査を試みる.

等方性材料の場合,一次元走査の走査方向は任 意に設定可能である.しかしながら FRP 積層板は 異方性材料のため,材料主軸以外の方向での長距 離伝播による一次元走査は困難である.このこと から本研究では直交する材料主軸方向にラム波ロ ングレンジスキャンを試み,効率のよい損傷特定 方法について検討する.



Fig.1 Experimental setup for Lamb wave inspection.

^{**} 神戸高専 機械工学科 准教授

損傷領域を画像化する際,従来は測定領域を二 次元格子状に分け,各点ごとの特性を測定するこ とで二次元配列を構成し,これに基づきグレース ケール画像を構成していた.これに対して直交ス キャンでは,Fig.2 に示すように一回の走査につ き測定領域の格子の各行および各列の積算的な特 性を測定する.さらに,それらを格子状に演算し て得られた各成分をグレースケール化したものを 検査画像とする方法である⁽³⁾.



Fig.2 Concept of cross scanning inspection.

3. 測定条件の選定

3.1 供試材

供試材はCFRP積層板とし、トレカ織物プリプレ グ(東レ F6343B-05P)を用いてオートクレーブ成 形により作製した.積層枚数は8枚で板厚約2mm, 積層板の大きさは250×300mmとした.以後,供試 材の長手方向を0°方向,短手方向を90°方向とする.

作製した供試材にFig.3に示すストライカ(質量 lkg)を用いて高さ0.7mの地点から落錘試験を行い, 測定領域中央部に衝撃損傷を付与した.衝撃損傷 は衝撃負荷面の裏面からはFig.4のように十字の割 れとして観察できたが,衝撃負荷面からはほとん ど確認できなかった.



Fig.3 Striker (steel).



Fig.4 Impact damages in CFRP laminate.

3. 2 斜角入射法を用いた最適角測定

斜角入射法を用いた超音波検査を行うにあたり, 超音波が板面内に沿って伝播するように入射角を 設定する必要がある.板の面内方向に屈折する入 射角は、Fig.5 に示すスネルの法則によって決まり、 $\theta_2 = 90^\circ$ となるときの θ_1 が最適角となる.本研究 では被検査材の最適入射角を実測により決定した. 入射波は周波数 1 MHz,振幅 400 V の矩形波とし、 伝播距離は 60 mm に設定した.受信波形の一例を Fig.6 に示す.入射角を $\theta_1 = 6^\circ$ から 2°刻みで 22° まで変化させ、各角度での受信波の最大振幅を計 測し、振幅値が最大になるときの入射角を最適入 射角とした.なお、伝播の方向によって特性が変 化することを考慮し、0°方向と 90°方向の 2 種類の 伝播方向について測定を行った.測定結果を Fig.7 に示す.これより、0°方向、90°方向ともに最適 角 14°という結果を得た.

次に板面内を伝播している波と確定するために 各方向の音速を測定した.本実験では,超音波の 伝播距離を 60 mm から 100 mm まで 10 mm 間隔で 変化させながらFig.6に示すゼロクロスポイントを 追跡し,(伝播距離)-(伝播時間)関係の傾きから音 速を計算した.これらの音速からスネルの法則を 用いて最適角を逆算した結果を Table 1 に示す.音 速により得られた計算値と測定値を比較すると多 少の開きはあるものの,Fig.7 のピークがなだらか であることから有意な差異とはいえない.以上の 結果より本研究では斜角入射法の入射角を 14°と 定めた.



Fig.5 Refraction at an interface.





Fig.7 Variation of ultrasonic intensity with incident angle.

Ultrasonic velocity [m/s]		Optimal angle[deg.]	
0°	90°	0°	90°
6860	5990	12.6	14.5

Table 1 Optimal angles of ultrasonic incidence.

3.3 有効測定範囲の選定

材料検査を行うにあたり,材料端面付近で測定 を行うと端面からの反射波の影響により,材料そ のものの特性が得られない可能性がある.そこで, 端面が影響を与える距離を調べ,確実な測定が行 える範囲を選定した.

Fig.8に端面の影響測定の概略図を示す.探触子の中心が材料端面と重なる点を0とし,端面からの距離xを2mm間隔で増加させx=80mmになるまで測定を行った.ラム波の伝播距離は60mm,80mm,100mmの3種類について測定を行った.入射波は周波数1MHz,振幅400Vの矩形波とした.各測定点における受信波形の最大振幅の測定結果をFig.9に示す.Fig.9より,今回使用した探触子の径が16mmであることから,探触子全体が材料面内に収まるように設置することで,材料端面の影響を軽



Fig.8 Distance from the specimen edge.

減することができるといえる.また伝播距離に関わらず,材料端面から20mm以上の距離を設けることで端面による影響を無視できることが確認できる.以上の結果に基づき,本研究では以後の測定を材料端面から20mm以上の距離を設けて行った.



Fig.9 Effect of specimen edge on ultrasonic measurement.

4. ラム波ロングレンジスキャンによる検査 4. 1 測定方法および評価手法

健全状態および衝撃損傷を付与した供試材に対 してラム波ロングレンジスキャンによる測定を行 い、後述するパラメータに基づいて評価し検査結 果の比較を試みた.ラム波の伝播距離を60mm, 80mm,100mmの3種類とし、材料長手方向に伝播 させ直交方向に走査する0°方向スキャン、材料短 手方向に伝播させ直交方向に走査する90°方向ス キャンの2種類の測定を各伝播距離に対して行っ た.なお、走査間隔は2mmとし、入射波は周波数1 MHz、振幅400 Vの矩形波とした.

超音波検査では従来,損傷評価パラメータとし て音速や減衰率が用いられていたが,いずれも材 料中の繊維配向の乱れなど損傷以外の影響を受 けることから,検査精度に問題があった.そこで 本研究ではこれらに代わるパラメータとして,損 傷の有無に伴い変化する受信波のパワースペク トルを評価対象とした.本研究では M.T.Kiernan らの示したパラメータ⁽⁴⁾を参考にし,以下に示す 3つの評価パラメータでパワースペクトルの特徴 を代表させた.

$$SP1 = \int_0^{f \max} S(f) df \tag{1}$$

$$SP2 = \frac{1}{SP1} \int_0^{f \max} S(f) f df$$
⁽²⁾

$$SP3 = \frac{1}{SP1} \int_0^{f \max} S(f) (f - SP2)^2 df$$
 (3)



Fig.10 Schematic of evaluation parameter.

式(1)-(3)の概略図をFig.10(a)-(c)にそれぞれ示 す.式(1)はスペクトル線図の面積,式(2)はスペ クトル線図の図心位置,式(3)はスペクトル線図の 分散度を示す.本研究ではこの3項目を損傷前後 で比較することで各パラメータの有効性を検討 した.

4.2 測定結果および考察

以下では損傷前後の差が明確に現れた伝播距 離100mmについての測定結果を示す. 0°方向スキ ャンの結果をFig.11に,90°方向スキャンの結果を Fig.12に示す.Fig.11(a)およびFig.12(a)は式(1)を評 価パラメータとし、0mm地点のデータを基準とし て各測定点におけるパラメータの変化割合を損 傷前後で比較したグラフである.以下同様に(b) と式(2), (c)と式(3)がそれぞれ対応している.得 られた結果からどの評価パラメータを用いても 損傷領域付近での変化が確認でき,損傷前後の状 態を比較することで損傷領域の特定に有効だと いえる.しかし面積(SP1)や分散度(SP3)による評 価では,損傷前の結果が不安定で損傷領域以外の 箇所においても変化が生じているため、損傷後の データのみを用いて損傷部位を特定することは 困難である.一方,図心位置(SP2)による評価では 非損傷状態において安定した結果を得られてい るため,損傷後のみのデータで損傷位置を特定す るには図心位置(SP2)による評価が最も適切だと いえる.

スペクトル線図の面積(SP1)は受信波のエネル ギに相当し,試料への超音波の入射効率に依存す るため,損傷前においても大きな変動がみられる. このことから,面積による評価によって損傷領域 を特定することは困難である.一方,スペクトル 線図の図心位置(SP2)は受信波の中心周波数の変 化を表しており,その低下は信号に含まれる高周 波成分の減衰を意味する.したがって,Fig.11(b), Fig.12(b),は損傷領域でラム波の高周波成分が選 択的に減衰したものと解釈できる.これを確認す るために損傷領域での損傷前後のパワースペク トルの変化を比較したものをFig.13,14に示す.ス ペクトル線図より損傷前後で1MHz弱での高周波 成分が減衰したことが確認できる.また,スペク トル線図の分散度(SP3)については損傷による高 周波成分の減衰によって,損傷前と比較してスペ クトルが平滑化しており,分散度が増加すること が確認できる.しかしながら,面積と同様に損傷 領域以外の箇所においても変化が生じているた め,検査精度に問題がある.





and after damage formation. $(0^{\circ} \text{ direction scanning})$





次に0°方向スキャンと90°方向スキャンの結果 を比較すると,90°方向スキャンは0°方向スキャン よりも非損傷状態での乱れが大きいことが確認 できる.しかしながら,90°方向においても面積 (SP1)や分散度(SP3)による評価は損傷領域以外の 乱れが大きく,0°方向スキャン同様に損傷領域の 特定には図心位置(SP2)による評価が最も適切だ といえる.



Fig.13 Comparison of power spectrum between intact and damaged laminates. (0°direction scanning)



Fig.14 Comparison of power spectrum between intact and damaged laminates. (90°direction scanning)

4.3 入射波による周波数成分の影響

ラム波ロングレンジスキャンによる測定から, 損傷位置の特定には1MHz付近の高周波成分が影響することが確認できた.そのため高周波成分を より多く含んだ信号を入射することで検査精度 の向上が見込まれる.そこで,矩形波(Fig.15(a)) にかえて,必要な周波数を選択的に発信すること ができるバースト波(Fig.15(b))を用いて測定を 行い,入射波による比較を試みた.

損傷前後の供試材に対して,矩形波とバースト 波の2種類の入射波を用いてラム波ロングレンジ スキャン(伝播距離100mm,走査間隔2mm)によ る測定を行った.前述の結果から0°方向スキャン, SP2による評価を採用した.バースト波と矩形波 の損傷後のみの結果をFig.16に示す.測定結果か ら特に目立った差異はなく,矩形波・バースト波 ともに損傷領域で似たような変化が確認できた. 各波における損傷領域と健全領域のパワースペ クトルの変化を比較したものをFig.17,18に示す. Fig.17はバースト波,Fig.18は矩形波のスペクトル の変化を表している.また図中の破線は損傷前後 における図心位置の変化を示している.バースト 波のスペクトルが1MHz付近に集中的に存在して いるのに対して,矩形波は低周波領域側に分散し ていることが確認できる.バースト波と矩形波の 損傷前後の高周波成分の減衰率に注目すると,バ ースト波のほうが大きいことが確認できる.この ことから図心位置の変化量はバースト波にする ことで大きくなる.しかしながら,矩形波はバー スト波に対してスペクトルの図心位置が低周波 側にあることから相対的な図心位置の変化量は ほとんど差異が現れなかった.以上のことから, SP2による評価を行う場合はバースト波による検 査精度向上は見込めないことが分かった.



Fig.15 Schematic of incident waveform.







Fig.17 Comparison of power spectrum between intact and damaged laminates. (Burst wave)



Fig.18 Comparison of power spectrum between intact and damaged laminates. (Square wave)

5. 結言

本研究ではFRPの超音波検査の時間短縮を目的 として, 直交する2方向のラム波ロングレンジス キャンを試み, 損傷領域の特定に適したパラメー タの選定を行った.以下に得られた結論を示す.

- (1) 試料端面の影響はラム波伝播距離にかかわら ず一定であり,探触子との距離を 20mm 以上 設けることでその影響を無視できる.
- (2) 本研究で使用した CFRP 積層板の場合, 衝撃 損傷によって 1MHz 弱の周波数成分が著しく 減衰することを確認した.
- (3) スペクトル線図の図心位置(SP2)の変化によ る評価を行うことで,損傷以外の影響を軽減 でき欠陥位置の特定に有効であることを確認 した.
- (4) 入射波にバースト波を用いることで,損傷位 置の特定に有効な1MHz付近の高周波成分を 集中的に入射できるが,検査精度の向上には 寄与しない.

以上の結果より, 直交する材料主軸方向にラム 波ロングレンジスキャンを行い, 得られた結果か らグレースケール画像を構成することで, 損傷位 置の特定が可能だといえる.

参考文献

- (1) Wei Yang, Tribikram Kundu, Guide Waves in Multilayered Plates for Internal Defect Detection, *Journal of Engineering Mechanics*, (1998), 311-318.
- (2) N.Toyama, J.noda, T.Okabe, Quantitative damage detection in cross-ply laminates using lamb wave method, *Composites Science and Technology*, 63 (2003), 1473-1479.
- (3) 木村友也,ラム波直交スキャニングによる FRP 積 層板の非破壊損傷評価,専攻科特別研究論 文,(2008).
- (4) M.T.Kiernan, J.C.Duke, Acousto-Ultrasonics as a Monitor of Material Anisotropy, *Materials Evaluation*, 46 (1988), 1105-1113.