曲げ波の伝搬による薄板構造物の健全性評価に関する研究*

(波動の測定と損傷同定に関する一考察)

東 明彦^{*1}, 水口文洋^{*2}A Study on Health Monitoring of Structures Composed Thin Plate by
Using Bending Wave Propagation
(Measurement of Bending Wave Propagation and Identification of Damage)Akihiko HIGASHI^{*3} and Fumihiro MIZUGUCHI^{*3} Japan Coast Guard Academy,
5-1 Wakaba, Kure-shi, Hiroshima, 737-8512 Japan

The purpose of this study is to develop the structural health monitoring system by using the bending wave propagation. We investigate the velocity of the bending wave, which is one of the characteristics of the wave propagation. In this paper, the rectangular aluminum thin plate is used in the experiment, which is a basic element of structures. The plate is excited sinusoidal at one point by the exciter, and the vibration data is measured by using two non-contact displacement sensors. The velocities of the bending wave are analyzed by wavelet transform analysis. Then we investigate the possibility of identification of damage by using bending wave propagation. As results, the velocities of the bending wave could be measured exactly by wavelet transform, and the proposal method was able to identify damage.

Key Words: Transient Response, Measurement, Identification, Bending Wave Propagation, Wavelet Analysis, Structure

1. 結 論

近年、船舶などの大型機械構造物においては一層の大型化、複雑化に加え、合理化によって構造物の健全性について常時把握することが非常に困難な状況にある。また、これらの構造物に損傷が生じた場合、構造物の強度低下を招くだけでなく、さらには事故へとつながる可能性もある。そこで、構造物の健全性について常時モニタリングを行うシステムの開発は非常に重要な課題であると思われる。

構造物の健全性に関する研究としては、非破壊検査に代表されるように多くの研究がなされているが、その多くが材料内部の欠陥に関するものであり、薄板における損傷等の欠陥に関する研究は非常に少ない。薄板に関する研究としては、スリットの大きさなどによる構造物の固有振動数の変化を求めた研究^{①②}があるが、スリットの同定を行った研究ではない。そこで著者らは、固有振動数の変化から損傷欠陥の同定を行うことを考え、スリットの大きさや位置などがその構造物の剛性に与える影響を予測し、スリットの同定を行う方法^③について報告した。しかし、固有振動数だけを評価パラメータとした場合

には、固有振動数の変化が非常に微小であるため、測定誤差の中に埋もれてしまう可能性が十分に考えられる。また、AE (Acoustic Emission) 法により健全性を把握することも可能であるが、AE 法は異常が発生したときに放出されるエネルギーが波動として伝搬する信号を検出するものであり、波動の周波数帯域が数 kHz から数 MHz と非常に高い。そのため、異常箇所からのエネルギーの放出がない場合には、健全性の把握は非常に困難であり、エネルギーの放出があっても信号の減衰がはやいため広範囲での測定には不向きである。さらに、従来の非破壊検査法や AE 法等は、非常に大きな構造物に対して適用することが、設備・コスト等などから非常に困難であることが考えられる。

そこで本研究では、広範囲にわたって構造物の健全性を常時監視するシステムの構築を目指し、損傷の同定を行う上で有用となるパラメータとして振動の波動伝搬現象に着目することとした。構造物を伝搬する振動の波動は、伝搬経路における構造物の状態をすべて含んだ信号であることから、この波動の伝搬を計測及び解析することにより構造物の健全性を把握する手法を構築することを目的としている。また、振動はほぼ全ての構造物に存在すると共に、構造物の状態によって振動波動の伝搬状態が変化することから、伝搬状

* 原稿受付 2003年10月8日。

^{*1} 正員、海上保安大学校(〒737-8512 呉市若葉町5-1)。^{*2} 海上保安大学校。

E-mail: higashi@jcga.ac.jp

態を解析することによって構造物の状態を把握することができると考えられる。そこで、ここではまず実際に構造物の波動伝搬現象の解析を行うため、構造物の基本要素である薄板を加振することにより、曲げ波の伝搬現象について実験的に解析を行うこととした。ここで解析の際、非定常信号の検出に効果のあるウェーブレット変換を用いることによって、曲げ波の波動到達時間の検出を行うこととした。また、薄板にスリット上の欠陥を与え、この薄板を伝搬する振動波動の伝搬速度等から欠陥を同定する手法について提案し、数値解析を行うと共に妥当性について検討を行った。

2 実験装置及び方法

2.1 実験装置

実験に用いた試験片および実験装置の概略を図1に示す。実験に用いた試験片は幅 300mm、長さ 950mm、厚さ 2mm のアルミニウム平板であり、1端が固定された片持ち平板として実験を行った。なお、片持ち平板として実験を行うことから、自重による平板のたわみの影響をなくすため、平板を垂直に支持することとした。また、平板に垂直に加振器を取り付け、FFT アナライザの有する信号発生器からの信号を加振器に入力することにより試験片を加振することとした。

2.2 実験方法

波動の伝搬現象として、ここでは薄板における曲げ波の波動の伝搬について取り扱うこととしている。さらに広範囲に伝搬する振動波動とするため、低周波数領域の信号を取り扱うこととし、試験片に垂直に取り付

けられた加振器により加振を行うこととした。またここでは、任意の周波数の正弦波信号によって加振を行い定常状態になった後、別の周波数の正弦波信号に瞬時に切り替えることによって、その切り替えた瞬間の信号の変化から波の伝搬現象、特に伝搬時間の解析を行うこととした。そこで、加振点及び測定点での振動応答を非接触変位計により測定し、FFT アナライザを介してパソコンにデータを送り、パソコン上でデータ解析を行うこととした。

3. 波動伝搬の解析方法

本研究においては、2つの周波数の正弦波信号を瞬時に切り替えることによって、その瞬間に変化する信号の伝搬について解析を行うこととした。そこで、この信号に対し、ここではウェーブレット変換⁷⁾を適用することとする。ウェーブレット変換は、通常の周波数分析（フーリエ解析）が定常信号に対する解析に用いられるのに対し、非定常信号に対して適用することができ、また、時間-周波数分析が可能であると共に、信号の不連続点の検出に効果がある。そこで、測定データに対してウェーブレット変換を適用し、データ処理を行うことによって信号の切り替え時間の検出を行い、加振点と測定点における検出時間の時間差より、波動の伝搬速度について解析を行うこととする。なお、数値解析及びウェーブレット解析には MATLAB を用いて解析を行った。

3.1 ウェーブレット変換

ウェーブレット変換とは、振動的で局所的な関数 $\phi(x)$ （これをマザー関数といい、本研究においては haar 関数を用いることとした。）を選び、これを b だけ平行移動させ、 a だけ拡大あるいは縮小した式(1)で表される関数を積分核とする積分変換のことで、式(2)で表される。

$$\phi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \phi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (1)$$

$$(W_\phi f)(b,a) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \overline{\phi\left(\frac{x-b}{a}\right)} f(x) dx \quad (2)$$

ここで、 $\overline{\phi((x-b)/a)}$ は、 $\phi((x-b)/a)$ の共役複素を表す。

この変換によって信号 $f(x)$ は、横軸を b 、縦軸を a とする信号平面上の表現に写され、これが元の信号の周波数と時間の情報を同時に抽出することになり、時間一周波数解析を行っていることになる。よって、このウェーブレット変換により、波形の変

Fig.1 Experimental system

化について非常に敏感に捉えることができるようになる。

そこで、図2に示す入力信号の波形についてウェーブレット変換を行い、ウェーブレット係数を求めた結果について図3に示す。図3は横軸に時間を示し、縦軸はスケールを表す。ここでスケールは周波数と非常に密接に関係しているものであり、図中において明るい部分はそのスケールに相当する周波数成分の強度を示している。この図を見ると周波数を切り替えた時間が時間応答波形に比べより明確になることがわかる。そこで、この値が変化する時

Fig.2 Input signal

Fig.3 Result of wavelet analysis

Fig.4 Analyzed results of wave front

間を読み取ることによって、周波数が切り替わった時間の検出ができることとなる。

次に、曲げ波の伝搬に伴う波頭の到達時間に関する解析例を図4に示す。図4(a)は、2種類の正弦波信号を途中で重ね合わせたときの時間波形であり、Signal A, Bは重ね合わせる時期をずらしたものである。この図において縦軸は信号の振幅を示している。そこで、これらの信号に対してウェーブレット変換を適用し、解析を行った結果を図4(b)に示している。この図は、信号の変化が顕著に表れるスケールでの信号の時間変化を取り出したものであり、Signal A, Signal Bはウェーブレット変換後のスケールが $a=20$ のときの結果を示している。また、縦軸のレベルは信号の強度を表している。

図を見ると、正弦波信号に別の信号を重ね合わせた時間差が、ウェーブレット変換後のそれぞれの波形における最初の極値をとるときの時間差と同じであることがわかる。これは、ウェーブレット変換の時間一周波数分析によって解析周波数成分の強度が大きくなることに起因するものである。よって、ウェーブレット変換後の波形において最初の極値を比較し相互相関数を求めることによって時間差、すなわち波動の伝搬時間が求められることがわかる。

以上のことから、ウェーブレット変換を適用し、相互相関数を求めることによって、振動波動の到達時間について解析を行うこととした。

3.2 波動伝搬の解析結果及び考察

平板の曲げ波の伝搬現象を捉えるため、図1に示す加振点から x 方向へ 30, 60, 90, 120, 150, 210, 300, 450, 600mm 離れた測定点において波動の伝搬速度の解析を行うこととした。

まず、加振点及び測定点の振動測定波形を図5に示す。ここで、入力信号の切り替え時間は 0.219 秒である。この図を見ると、実際の加振点において測定された時間応答波形から信号の切り替え時間について大まかにはわかるが、測定点における波動の到達時間を正確に読み取ることは非常に困難であることがわかる。このことは、周波数を切り替える際に一時的に多くの周波数成分が励起されることから、その影響を受け測定された時間応答波形には多くの周波数成分が混在しているためではないかと考えられる。

そこで、本研究では測定された信号をウェーブレット変換し、波動の伝搬状況について解析を行った結果を図6に示す。なお、図4(b)の結果は、ウェーブレット変換後のスケールが $a=20$ における信号の時間変化の結果を示している。この図を見ると、先ほどの振

Fig.5 Experimental results of time response
(Measurement point $x=300\text{mm}$)

Fig.6 Experimental results of wavelet analysis
(Measurement point $x=300\text{mm}$)

Fig.7 Analyzed result of velocity of wave propagation

Table 1 Data of analyzed results

Distance (mm)	Time lag (ms)	Velocity (m/s)	Deviation (%)
30	0.781	38.4	0.642
60	1.562	38.4	0.642
90	2.343	38.4	0.642
120	3.125	38.4	0.642
150	3.710	40.4	5.939
210	5.468	38.4	0.642
300	8.203	36.5	4.149
450	12.500	36.0	5.647
600	15.625	38.4	0.642

動データから直接解析するよりもウェーブレット変換することによって、加振点から測定点への波動の伝搬の様子が図5に示した時間応答波形よりも比較的容易に読み取れることが実際の解析結果からもわかる。そこで、加振点及び測定点で測定された振動データに対してウェーブレット変換を適用し、あるスケールにおけるウェーブレット係数の相互相関関数を求め両者の比較を行うことにより、時間差、すなわち波動の到達時間を求め、求められた時間と測定点間の距離から伝搬速度を求めることとした。その結果を図7に示す。この図において、▲印は実験により求めた伝搬速度であり、実線は実験値の平均値を示している。また、表1に伝搬速度の実験結果を示している。なお、表1は、加振点と測定点間の距離ごとに到達時間を求め、その値を用いて伝搬速度を求めた結果を表したものである。また、表中に実験によって求めた値の平均値とのずれを表している。

これらの結果を見ると、ウェーブレット変換を適用することによって、全体的に同程度の速度が求められていることがわかる。また、測定場所による解析結果のばらつきも非常に小さく、実線で示している実験値の平均からのずれは最大で6%程度生じている場合もあるが、ほとんど1%以下の範囲内におさまっていることから、本手法を用いて平板の曲げ波の伝搬速度を測定することが可能であることがわかる。

4. 波動伝搬による損傷同定

曲げ波の伝搬時間を用いて、スリット状の損傷を同定する方法について検討を行った。ここでは、少ない測定点で測定されたデータによって同定を行う方法について検討することとする。

まず、数値解析モデルを図8に示す。数値解析モデルは平板とし、実線で示すスリット上の損傷が存在するものとしている。また、図中に示す加振点において加振し、*印で示す測定点において波動の到達時間の測定が行われることとしている。そこで、ある測定点に波動が到達する経路について考えると、到達損傷のない平板の場合であれば図8に示す経路Aを通過するが、損傷がある場合には波動が迂回するため経路Bを通る経路が最短経路となる。このことから、加振点と測定点の間に損傷が1箇所存在する場合のように、波動の伝搬経路が、加振点と損傷の一端を結ぶ直線と、損傷の一端と測定点を結ぶ直線の2本の直線で表される経路を通る場合においては、加振点と測定点を焦点とした楕円軌道上に損傷の一端が存在することとなる。

すなわち、経路 A は楕円の焦点間距離を表し、測定点と加振点はそれぞれ楕円の焦点となる。また、経路 B の距離は楕円の長軸方向の長さを表す。さらに、加

Fig. 8 Model of numerical simulation

Fig. 9 Analyzed result of numerical simulation
(1-point excitation)

Fig. 10 Analyzed result of numerical simulation
(2-point excitation)

振点と測定点より、その中心を求めることにより、楕円の中心位置が求められる。これらのことを用いて、加振点と測定点を焦点として、経路 B が一定となる楕円の軌道を求めることができる。

そこで、このことを利用して、スリット上の損傷の同定可能性について検討を行った結果を図 9 に示す。

図 9 を見ると、加振点と測定点の距離と、伝搬時間及び伝搬速度から求めた伝搬距離より求めた楕円軌道状にスリット上の損傷の両端が存在していることがわかる。また、複数の測定点での結果を重ね合わせることで、楕円軌道の交点と損傷の両端が重なっていることから、複数の楕円軌道を求めることにより、楕円軌道の交点から損傷の同定が可能であることがわかる。

次に、測定誤差の影響を考慮するため、伝搬時間と伝搬速度から求められる伝搬距離に誤差がある場合について数値解析を行った結果を図 10 に示す。この図を見ると、先ほどの結果と異なり楕円軌道の交点がずれていることがわかる。しかし、同定の精度は落ちるが測定点を増やすことにより損傷の同定は可能であることがわかる。また、図に示すように加振点の位置を変えることによって、更に多くの楕円軌道を描くことが可能となることから損傷の同定が可能であることがわかる。

以上のことから、薄板構造物における曲げ波の波動伝搬時間等から、スリット状の損傷について同定できることがわかる。

5. 結 言

本研究では、薄板構造物における曲げ波の伝搬を用いて、薄板構造物の損傷の同定に関する検討を行った結果、以下の結論を得た。

(1) 曲げ波の伝搬時間の測定に、ウェーブレット変換を適用し、相互相関関数を求めることによって伝搬時間の解析が可能であることがわかった。

(2) 広範囲での損傷の同定可能性を調べるため、ここでは低周波数の信号を用いて解析を行ったが、低周波数の信号でも十分に伝搬時間や伝搬速度の測定が可能であることがわかった。

(3) スリット状の損傷など比較的形状単純な場合における数値解析の結果、本研究で提案した加振点と測定点の距離及び伝搬時間等から求められる楕円軌道を複数求めることによって損傷の位置や大きさ等に関し同定可能であることがわかった。

最後に、伝搬時間の測定誤差が損傷の同定精度に影響を与えることから、今後測定精度の向上に関し研究を進めると共に、より複雑な形状の損傷に対する同定手法等について研究を進める必要があるものと思われる。

参考文献

- (1) B.Stahl, L.M.Keer, VIBRATION AND STABILITY OF CRACKED RECTANGULAR PLATES, *Int. J. Solids Structures*, 8(1972), 69.
- (2) 山口, スリットの入った片持長方形板の自由振動, 機論, 52-480, C(1986), 2068-2074.
- (3) 沖津・下田・平, スリットを有する長方形板の振動解析, 機論, 52-482, C(1986), 2617-2622.
- (4) 山田・小林・横田, 境界要素法によるスリットを有する平板の過渡応答解析, 機論, 57-533, C(1991), 15-21.
- (5) R.D.Adams, P.Cawley, C.J.Pye, B.J.Stone, A Vibration Technique for Non-Destructively Assessing the Integrity of Structures, *J. Mechanical Engineering Science*, Vol.20, No.2(1978), 93-100.
- (6) 東・水口, 固有振動数を用いた亀裂予測手法の検討, 機講論, No.99-7(B)(1999), 582-585.
- (7) 山田, ウェーブレット変換とは何か, 数理科学, No.354(1992), 11-17.