レーザー誘起超音波を用いた 薄板中の内部き裂の非破壊評価

池田 翔* 伊藤 海太 南部 将一 榎 学

東京大学大学院工学系研究科

J. Japan Inst. Met. Mater. Vol. 77, No. 9 (2013), pp. 402–407
© 2013 The Japan Institute of Metals and Materials

Non-Destructive Evaluation of Internal Crack in Thin Sheet by Using Laser Induced Ultrasonic Waves

S. Ikeda*, K. Ito, S. Nambu and M. Enoki

Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, Tokyo 113–8656

A novel, noncontact, non-destructive evaluation technique for thin sheet specimens which may have internal cracks is drawing attention. In this technique, pulsed lasers generate ultrasonic waves on the surface of specimen, and an interferometer is used to measure the waves of the surface of specimen. Correlation between laser induced ultrasonic waves and size of internal cracks was investigated. Resin specimens with various size and location of internal cracks were prepared, and ultrasonic waves generated by YAG pulsed laser were measured by He–Ne laser interferometer. Results of FEM analysis and natural frequencies of flexural vibration were used to compare with the results of experiments. As a result, this method could detect location of cracks by using correlation coefficient and FFT peak frequency, and there were correlations between induced ultrasonic waves and size of internal cracks. This method was applied to inspect multi-layered-steel specimens with interlayer cracks.
[doi:10.2320/jinstmet.J2013008]

(Received February 19, 2013; Accepted June 6, 2013; Published September 1, 2013)

Keywords: non-destructive evaluation technique, laser induced ultrasonic waves, multi layered steel, finite element method

1. 緒 言

各種構造物の信頼性確保の必要性から、従来から構造物や製品の欠陥検出、品質検査を目的として超音波探傷や X 線探傷、電磁気探傷をはじめとした各種の非破壊検査技術が開発され実用化されてきている^{1–8)}。技術発展・応用を期待されている非破壊検査法として、レーザー誘起超音波を用いた非接触超音波探傷法がある⁹⁾。これは、試料にパルスレーザーを照射して発生した超音波をレーザー干渉計で非接触計測する探傷法であり、微小領域に対しても遠隔探傷が可能という特徴がある^{10,11)}。

一方、近年異なる性質を有する金属を重ね合わせた複層鋼板が従来の合金では両立が困難な高強度、高延性等の相反する特性の両立が可能な材料として注目されており、ヘテロ界面制御等により特性の改善が行われてきている¹²⁾。複層鋼板は製造プロセス時に層間においてはく離による内部損傷が生じる可能性があり、信頼性向上のためには材料内部に対する非破壊評価が不可欠である。

そこで本研究では、複層鋼板等の薄板内部に損傷を有し得る材料に対する、非接触での非破壊評価を行うことを目的と

し、評価方法としてレーザー誘起超音波を用いることにした。き裂の寸法および位置が出力波形におよぼす影響を調べるために、まずスチロール樹脂製のモデル試料を用いて計測を行い FEM による解析の結果との比較を行った。その後モデル試料の実験結果を踏まえ実際の製造プロセス時に層間はく離が生じたと思われる複層鋼板試料に対しての評価を行った。

2. 実 験 方 法

2.1 試 料

2 枚のスチロール樹脂板(幅 50 mm, 奥行き 20 mm)の中央に厚さ 10 μm , 幅 $W=1.0, 1.5, 2.0$ mm の金属箔を奥行き方向に平行に差し込み、スチロール樹脂板の間にアセトンを通して溶着させた後に箔を引き抜くことにより、内部にはく離を有するモデル試料を作製した。樹脂板の厚さは 2 枚の合計が 1.5 mm になるように 1.0 mm + 0.5 mm および 1.2 mm + 0.3 mm の 2 タイプの組み合わせのものを用意し、鉛直上方から見てのき裂の厚さ方向の位置 Z が 0.3, 0.5, 1.0, 1.2 mm と異なる試料を用意した。またき裂の存在しない参照用の接着試料として、金属箔を差し込まない 1.0 mm + 0.5 mm タイプの試料も用意した。

複層鋼板試料としては SUS304/SUS420 を合計 15 層重ね

* 東京大学大学院生 (Graduate Student, The University of Tokyo)

合わせ、1023 K で 10 分間熱処理した後冷間圧延したものを用意した。試料の寸法は $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 1.26\text{ mm}$ で、事前に断面を観察した結果はく離が生じていないと推定される部位から参照用の健全試料 M1 を切り出し、はく離が生じたと思われる部位が走査範囲内に入るように損傷試料 M2, M3, M4 を用意した。

2.2 実験系

実験装置は Fig. 1 のような構成にした。まずレーザー発振装置として Nd:YAG レーザー (New Wave Research 社製 Tempest 20) を使用し、レンズを用いて集光したレーザーを試料上部中央に照射し、超音波振動を発生させた。レーザー誘起超音波では熱応力およびアブレーションの 2 つのモードで振動が発生するが、本研究では熱応力モードが主になるようにレンズの焦点距離を調節した。試料の振動検出には He-Ne レーザーを用いたヘテロダイン型干渉計 (Graphtec 社製発振器 AT0022, 復調器 AT3600S) を用い、パルス

Fig. 1 Overall view of ultrasonic vibration measurement system.

Fig. 2 Measurement range and positions of jigs of (a) resin specimens and (b) multi-layered-steel specimens.

Fig. 3 Overall view of models for FEM analysis.

レーザー照射点直下の反対側表面に干渉計のレーザーの焦点を合わせた。得られた振動の情報を連続波形記録装置 CWM にて記録した。パルスレーザーの出力エネルギーは約 8 mJ とし、Fig. 2 のようにそれぞれの試料において、試料の両端から 5 mm 内側を上下から三角柱状のジグで挟んで固定し、

Fig. 4 Flexural vibration at a specimen which has internal cracks.

Fig. 5 (a) Modified correlation coefficient, (b) FFT peak intensity, and (c) FFT peak frequency of each model specimen.

試料中央の $8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ の範囲に $200\text{ }\mu\text{m}$ の間隔で合計 $41 \times 41 = 1681$ 箇所に対して計測を行った。

2.3 断面観察

き裂の実際の形状を確認するために一部試料を切断し、モデル試料に対しては SEM で、複層鋼板試料に対しては光学顕微鏡で断面観察を行った。

3. FEM による解析

モデル試料から得られた超音波波形における強度ピーク周波数から、き裂の寸法および厚さ方向の位置による FFT 結果に対する影響を調べるために有限要素法 (FEM) による解析解の導出を行った。解析には LS-DYNA (Livermore Software Technology) を用いた。

まず以下の条件で試料をモデル化した。試料全体の内、ジグに挟まれた内部の部分 ($40\text{ mm}(x) \times 20\text{ mm}(y) \times 1.5\text{ mm}(z)$) を、 x, y, z 方向にそれぞれ $200, 100, 10$ 等分し、1つの要素のサイズが ($200\text{ }\mu\text{m} \times 200\text{ }\mu\text{m} \times 150\text{ }\mu\text{m}$) となるようにモデリングした。上下の樹脂板の接着面においてき裂部位以外にはく離等は存在せず、試料の x 方向両端を拘束した振動であるとした。試料の物性値はヤング率 3.35 GPa 、ポアソン比 0.34 、密度 1.05 g/cm^3 とし、弾性変形のみを考慮した。モデル内部のき裂は試料中央部の任意の深さに存在するものとした。入力する関数としては一般にガウス関数¹³⁾や三角関数等が用いられるが、今回の解析では入力関数 F として次の式を用いた。

$$F = A \sin(\pi t / 2t_r) \quad (1)$$

ここで A, t, t_r はそれぞれ入力関数の振幅、時間、周期である。 $A = 0.01\text{ N}$, $t_r = 2\text{ }\mu\text{s}$, $0 < t < 2t_r$ とし、主モードとして考

えられている熱応力モードでは試料表面平行に応力が伝わるため、Fig. 3 のように入力関数を入力した。

以上の条件で作製したモデルファイルを LS-DYNA によって計算し、試料中央下部での z 軸方向の速度成分を抽出して解析を行った。計測時間は $1.5 \times 10^{-4}\text{ s}$ 、計算時間間隔は $1.0 \times 10^{-9}\text{ s}$ 、出力時間間隔は $1.0 \times 10^{-7}\text{ s}$ とした。

4. 評価方法

解析方法として、本研究では修正相関係数 $1 - r^2$ というパラメータ¹⁴⁾を用いて波形の類似性の評価を行うことにした。ただし r は相関係数であり、以下の式で表すことができる。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (R_n - \bar{R})(A_n - \bar{A})}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (R_n - \bar{R})^2\right) \left(\sum_{i=1}^n (A_n - \bar{A})^2\right)}} \quad (2)$$

ここで R_n は参照信号、 $\bar{R}$ は R_n の平均値、 A_n は R_n と比較される参照信号、 $\bar{A}$ は A_n の平均値である。 r は $-1 < r < 1$ であり、 R_n と A_n の間に正の相関があれば 1 を、負の相関があれば -1 を、全く相関がない場合は 0 を返す。修正相関係数には、出力信号の時間関数を直接用いる方法が考えられるが、この方法には信号の発生時刻を正確に推定しないと類似した波形でも修正相関係数が大きな値をとってしまうという問題がある。よって本研究ではそのような影響を極力避けるために出力信号を FFT 変換し、周波数成分に対して修正相関係数を算出しての評価を行った。

修正相関係数による評価に加えて FFT 結果におけるピークの強度およびその周波数のプロットも行った。モデル試料においては低周波帯でノイズと思われる大きな値を有するこ

Fig. 6 Cross section observation of model specimens (a) $W = 1.0\text{ mm}$, (b) $W = 1.5\text{ mm}$, (c) $W = 2.0\text{ mm}$.

とがあったので、FFT 結果のうち 10 kHz 以下の値を除いて評価を行った。

き裂が存在する部位においては、レーザー照射時に Fig. 4 のようにき裂の上部に存在する要素が曲げ振動を起こすと考えられ、その固有振動数は以下の式(3)のように表すことができる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \times \frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho BZ}}, \quad I = \frac{BZ^3}{12} \quad (3)$$

ここで L, B, Z はそれぞれき裂の幅、奥行き、深さであり、 ρ, E は試料の密度、ヤング率である。式(3)を用いて算出した曲げ振動の固有振動数と実験における FFT ピーク周波数との比較も行った。

Fig. 7 (a) FFT spectra at different crack width L . (b) FFT peak frequency and natural vibration frequency at different crack width L .

Fig. 8 (a) FFT spectra at different crack location Z . (b) FFT peak frequency and natural vibration frequency at different crack location Z .

5. 結果および考察

5.1 モデル試料における実験結果

モデル試料において修正相関係数を用いた健全試料との間の比較評価 (Fig. 5(a)) の結果, 各試料においてき裂が存在すると推定される部位において修正相関係数が周辺より高い値を取るということが分かった. FFT ピーク強度による評価 (Fig. 5(b)) においては, 全体的にき裂推定部位において高い強度を有していた. しかしあまり高い強度を示さなかった試料も多く, 試料間の結果のばらつきが大きかった. FFT ピーク周波数による評価 (Fig. 5(c)) ではき裂推定部位において特定の値の周波数が一様に存在していたことが分かった. またき裂の幅 W が少ないほど損傷部位でのピーク周波数が高い値をとる傾向があった.

次に断面観察の結果の一例を Fig. 6 に示す. 実際には用いた金属箔の幅よりも大きな幅のき裂が存在していることが分かったので, 以後実際のき裂の幅を L とし, $W=1.0, 1.5, 2.0$ mm の試料において $L=1.4, 1.9, 3.0$ mm であるとして評価を行った.

5.2 FEM 解析結果および曲げ振動における固有振動数との比較

FEM 解析において, $Z=0.45$ mm に固定し, $L=1.2\sim 2.4$ mm まで変化させて周波数特性の評価を行ったところ, 結果は Fig. 7(a) のようになり, 実験の結果と同様に特定の周波数帯でピークを有していた. Z を固定し, L を変化した場合の曲げ振動の第一固有振動数と実験結果および FEM 結果との比較は Fig. 7(b) のようになり, 3 つのデータ群において, L が増加するにつれ, 周波数の値が減少していく傾向が見られた.

次に $L=2.0$ mm として, き裂の深さ方向の位置 Z を $Z=0.3\sim 1.2$ mm まで変化させて評価を行った場合の FEM 結果は Fig. 8(a) のようになり, この図から $Z=0.3$ mm と $Z=1.2$ mm, $Z=0.45$ mm と $Z=1.05$ mm, $Z=0.6$ mm と $Z=0.9$ mm がそれぞれ近い値を取るということが分かった. L を固定し, Z を変化した場合の比較結果は Fig. 8(b) のようになり, ここから実験値および FEM 結果の FFT 周波数は $Z=0.75$ mm を軸に対称な地点でお互いに類似した特性を取るということが分かった. 曲げ振動の理論値はそれらとは異なり単調

Fig. 9 (a) Fixed correlation coefficient, (b) FFT peak intensity, and (c) FFT peak frequency of each model specimens.

Fig. 10 Cross section observation of multi-layered-steel specimen M2.

増加の形となったが、これは試料が比較的薄い板のため、 $Z > 0.75$ mm では試料の下部分の要素が曲げ振動を起こしていることの効果が大きいからであると推測される。 $Z > 0.75$ mm において試料下部分の要素の固有振動数をプロットすると、曲げ振動数の固有振動数の値も Z に対して対称性を有するようになった。

以上の結果より、モデル試料において L および Z が FFT ピーク周波数と相関を有しており、 L が小さくなる程、 Z の位置が試料中央に近くなるほど、FFT ピーク周波数が高くなるということが分かった。また実験による計測値がき裂をモデル化したメッシュモデルに対する FEM 解析値および曲げ振動の第一固有振動数と近い値をとることが分かり、このことからモデル試料内部のき裂がレーザー誘起超音波の波形に影響を与え、それが試料の局所的な曲げ振動に由来するものであるということが推測された。よって計測結果の FFT ピーク周波数から内部き裂の有無のみでなく、 L や Z のき裂の状態を推定することが可能であると思われる。

5.3 複層鋼板試料における実験結果

複層鋼板に対する実験結果は Fig. 9 のようになり、モデル試料に対する結果と同様にき裂が存在すると思われる部位にて修正相関係数が高い値を取り、強度も周辺部位よりも大きい値を有していた。複層鋼板の FFT 周波数がモデル試料のそれよりも低い値で高い強度を有しているため、複層鋼板試料においては 10 kHz 未満の FFT ピーク値を除外せずにピーク周波数の検出を行ったところ、試料 M2, M3, M4 において損傷のある部位にて健全部よりも大きな値を示していたが、部位によるピーク周波数の値の差が大きかった。これは複層鋼板試料におけるき裂の形状がモデル試料のそれと比較して複雑であり、き裂の幅等が試料内で一様ではないことに由来すると思われる。試料 M2 の断面観察の結果が Fig. 10 のようになり、Fig. 9 から推定されるき裂のサイズと同程度のき裂が存在していることが分かった。

これらの結果から、複層鋼板においてもき裂の存在および位置を推定することが可能であることが示された。Fig. 7 (b), 8(b) のようなき裂の条件と FFT ピーク周波数との間の相関関係は複層鋼板試料に対しても成立する可能性があると思

われる。例えば Fig. 9(c) の M3 の図において修正相関係数および FFT ピーク周波数により推定されるき裂の幅が小さくなる程 FFT ピーク周波数が高くなっており、この傾向は Fig. 7(b) のそれと一致している。このことより複層鋼板に対する非破壊評価も可能であると思われる。

6. 結 言

本研究では複層鋼板等の薄板内部に損傷を有する材料に対する非接触での非破壊評価を行うことを目的とし、評価方法としてレーザー誘起超音波を用いた。

内部き裂を有するモデル試料におけるパルスレーザー誘起超音波をレーザー干渉計で計測し、計測波形の FFT 結果から修正相関係数、FFT ピーク強度、FFT ピーク周波数の 3 種類のデータを算出し、プロットを行うことで評価を行った。その結果き裂部位において出力波形が変化し、修正相関係数、FFT ピーク強度および FFT ピーク周波数を用いてき裂の位置を推定することができ、さらにき裂の幅 L および厚さ方向の位置 Z が FFT ピーク周波数の値と相関関係を有していることが分かった。実験値と FEM 解析の結果および曲げ振動の固有振動数との比較より、これらの相関関係が実際に内部き裂の存在に由来するものであることが示され、さらにそれがき裂上部または下部のうち薄い方の材料要素の曲げ振動の固有振動数に由来するものであると推定された。内部き裂を有する複層鋼板に対しても同様の評価を行ったところ、モデル試料と同様にき裂が存在する部位を推定できた。断面観察を行うことにより推定された部位にて実際にき裂が確認された。

文 献

- 1) H. Cho, H. Sato and M. Takemoto: Jpn. J. Appl. Phys. **35**(1996) 3062-3065.
- 2) H. Nishino, Y. Tsukahara, C. Hideo, Y. Nagata, T. Koda and K. Yamanaka: Jpn. J. Appl. Phys. **34**(1995) 2874-2878.
- 3) K. Yamanaka: Journal of JSNDI **45**(1996) 330-336.
- 4) H. Nakano, S. Nagai and H. Imai: Int. J. Thermophys. **8**(1987) 473-480.
- 5) H. Nakano and S. Nagai: Jpn. J. Appl. Phys. **32**(1993) 2540-2542.
- 6) R. J. Dewhurst and O. Shan: Optics and Lasers in Engineering **16**(1992) 163-178.
- 7) J. P. Monchalin and R. Heon: Materials Evaluation **44**(1996) 1231-1237.
- 8) H. Yamawaki, T. Saito, H. Fukuhara, C. Masuda and Y. Tanaka: Jpn. J. Appl. Phys. **35**(1996) 3075-3079.
- 9) H. Yamawaki: Journal of JSNDI **49**(2000) 307-312.
- 10) J. P. Monchalin: IEEE Trans. Components and Packaging Tech. **33**(1986) 485-499.
- 11) R. S. Sharpe: Research Techniques in Nondestructive Testing **7**(1984) 259-365.
- 12) S. Nambu, M. Michiuch, J. Inoue and T. Koseki: Kinzoku **80**(2010) 289-293.
- 13) H. Sato, H. Ogiso and K. Yamanaka: Jpn. J. Appl. Phys. **42**(2003) 3184-3188.
- 14) L. Zhangl, I. C. Ume, J. Gamalski and K. Galuschki: IEEE Trans. Components and Packaging Tech. **29**(2006) 13-19.