ラム波用電磁超音波センサを用いた
引っぱり試験中のオンサイト応力評価*村山 理一^{*1}, 三角 和広^{*2}

Development of a Non-Contact Stress Measurement System During Tensile Testing Using the Electromagnetic Acoustic Transducer for a Lamb Wave

Riichi MURAYAMA^{*3} and Kazuhiro MISUMI^{*3} Department of Intelligent Mechanical Engineering, Fukuoka Institute of the Technology,
3-30-1 WaziroHigashi, Higashi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka, 811-0295 Japan

In recent years, investigations into the changes in the microstructure during the processing of functional metal materials have been carried out by many researchers. Therefore, it is required that the change in the material characteristic during processing by a nondestructive evaluation method be evaluated. However, conventional technology has been restricted to a static material characteristic evaluation. For example, a strain gauge has the problem that it can influence the measurement conditions of the tensile test and can only evaluate the position at which the strain gauge is attached. We then tried to develop a non-contact stress measurement system for tensile testing using an EMAT with a Lamb wave as a first step for the material characterization evaluation during a mechanical testing. The EMAT measures the propagation time of a Lamb wave between the receiver and a transmitter during the tensile testing. The interval between the transmitter and the receiver of the first set is 10 mm and can move in the direction of the tensile load. In this presentation, the specifications of the measurement system and the evaluation results are reported.

Key Words: Stress, Acoustoelasticity, Lamb Wave, Tensile Test, Electromagnetic Acoustic Transducer

1. 結 論

近年、高機能材料の開発が進められており、その為に加熱、圧延等を実施している間の材料特性をオンタイムで評価できることが求められ始めている。しかしながら、従来の非破壊評価法はこの要求に応えるに至っていない。特に内部材質評価可能な超音波法において、一般に用いられる圧電振動子型超音波センサが接触媒質を必要とする接触型であるため、材料開発試験に影響を与えないオンサイト評価が困難であった。

そこで、各種材料試験中のオンタイム材料特性評価試験方法開発の為に第1ステップとして、引っぱり試験中の引っ張り試験片内の応力分布をオンタイムで測定するシステムを検討した。非破壊的な応力評価方法として音弾性法がよく知られているが、応力による音速変化は極微小であるため、圧電振動子型超音波センサでは、センサ移動中に十分な測定精度で応力を評価することはできなかった。

この課題を克服する手段として接触媒質を用いない電磁超音波センサを用いて、板厚方向に伝播する横波を利用する場合^①、或いは板面方向に伝播する表面SH波を利用する場合^②が報告されている。これらの手法に対して筆者等は、板厚方向に入射する超音波モードでは、板厚により受信信号波形の位置分解能或いは時間分解能が不十分な場合があること、また表面SH波の場合は十分な感度で歪みゲージに相当する大きさの電磁超音波センサの製作が将来的にも困難であることが考えられる。そこで、申請者らは引っ張り方向に伝搬するラム波(薄板の場合)、或いはレーリー波(厚板の場合)を用いれば、歪みゲージと同じ空間分解能を持ち、センサを移動させながら、オンサイトな応力評価が可能であると考えた。

2. 音弾性法的基本原理

材料が応力を受けた状態では、微小な弾性率変化が発生し、超音波伝搬速度も変化する。この応力による音速変化の現象を音弾性現象と言い、式(1)で表される。ただし元々の音弾性式には超音波が伝播する材料の組織異方性の効果に起因する定数項が存

* 原稿受付 2005年9月5日。

^{*1} 正員、福岡工業大学知能機械工学科(☎ 811-0295 福岡市東区和白東3-30-1)。^{*2} 福岡工業大学知能機械専攻。
E-mail: murayama@fit.ac.jp

在し、一般的に応力による音速変化よりも大きい値を示すため、式(1)では材料に応力が付加されていない場合と、付加されている場合の音速差を表すことを前提としている。また式(1)中の C_A (1/MPa) は音弾性定数とよばれ、応力による音速変化率を表す^⑥。図1(a)に示すような固定間距離を超音波が伝搬する場合、その伝搬時間は式(2)で示される。この状態で試験片に引っぱり荷重が加わったと考えると式(1)で表わされる音速変化は極めて小さく、また図1(b)に示すように超音波センサが試験片に固定された状態では、試験片が延ばされることにより、超音波伝搬距離も変化するため、伝搬時間変化は式(3)のように変化することになり、その影響は無視できない。さらに、このような接触型センサでは、センサを移動させながらの測定が非常に困難であり、歪みゲージを補完できる応力センサには不向きであった。もし、センサ間距離が固定で、接触媒質の厚み変化も考慮不要であれば、応力による音速変化は式(4)のようになり、信頼性の高い応力評価が可能になると考えられる。

$$\Delta V = C_A \times V_{solid} \times \sigma \quad \dots \dots (1)$$

$$T_1 = \frac{L}{V_{solid}} + \frac{D_1}{V_{water}} \quad \dots \dots (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta T_1 &= \left(\frac{L}{V_{solid}} - \frac{L + \Delta L}{V_{solid} - \Delta V} \right) + \frac{D_1 - D_2}{V_{water}} \\ &\cong \left\{ (L + \Delta L) \times \Delta V \right\} / V_{solid}^2 + \frac{D_1 - D_2}{V_{water}} \quad \dots \dots (3) \\ &= \left\{ (L + \Delta L) \times C_A \times \sigma \right\} / V_{solid} + \frac{D_1 - D_2}{V_{water}} \end{aligned}$$

$$\Delta T_2 = (L \times C_A \times \sigma) / V_{solid} \quad \dots \dots (4)$$

L : Distance between the transmitter and the receiver

ΔL : Elongation of L in the tensile specimen

V_{solid} : Velocity without the stress into the specimen

V_{water} : Velocity without the stress into the specimen

ΔV : Velocity change due to the stress

σ : Stress

C_A : Acoustoelastic Constant

T_1 : Transit time traveling the distance between the transmitter and the receiver before loading

ΔT_1 : Change in the transit time after loading

ΔT_2 : Change in the transit time ignoring the variation of the traveling distance and the Couplant thickness

Fig.1 Principle of acoustoelastic method

3. 開発システムの特徴

音弾性法をオンサイトな応力評価に適用する場合の課題を解決する方法として、図2に示す非接触超音波センサを適用する事を考えた。この場合は、固定治具を用いれば、送受信センサ間の距離もセンサ前面と試験片表面の距離も不変となる。

Fig.2 Merit of non-contact ultrasonic sensor

実際に使用する超音波モードは、板厚方向に縦波或いは横波を伝搬させる場合と引っぱり応力方向に伝搬するガイド波が考えられたが、板厚方向に伝搬させる場合、試験片厚が薄くなると受信信号の弁別が極めて困難になること、伝搬時間が短くなり応力による伝搬時間変化が検出できなくなること等の短所が考えられた。ガイド波の場合、送受信間距離を固定すれば、受信信号の弁別は常に可能である。また板厚が薄く、引っぱり荷重による板厚変化を原因とする音速変化が応力変化による音速変化より十分小さい場合はラム波、この条件が成立しない厚さの板厚の場合はレーリー波を適用することで板厚の影

間を遅延させながら式(5)に示す相互相関計数 G_{xy} を算出し、その相互相関係数が最大になる遅延時間を伝搬時間変化として評価した。同一点で負荷荷重を変えていった場合に、負荷荷重に対して伝搬時間が比例すると考え、その場合の測定値のばらつき(標準偏差)を評価すると、0.8nsであった。

$F_1(t)$: Digitized waveform before loading

$F_2(t)$: Digitized waveform after loading

t : time

Δt : Digitized time interval

τ : Delayed time $= k \times \Delta t$

x_i : Signal amplitude at the order of i in $F_1(t)$

y_i : Signal amplitude at the order of i in $F_2(t)$

k : Shift number of the sampling data

n : Total number of the sampling data

Fig.5 Transit Time Measurement Method

$$G_{xy}(k) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_{i-k}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n}}} \dots (5)$$

6. 実験条件

開発中のシステムで応力測定を行うための応力評価実験用の試験片を作成した。作成した試験片を図6に示す。試験片の材質は純度 99.5%の純鉄である。板厚は0.5mmとした。この試験片は両端に試験機によるつかみの部分を持ち、通常の引張り試験片とは異なっている。上部の試験片A型は、引張り時に試験片上下で非対称な応力分布が発生するように作成した。また下部の試験片B型は、引張り試験時に、試験片中央で対称な応力が発生するように製作した。

また引張り試験機はJT トーシ (株) 製の卓上試験機ミドルセンサ (最大引張り荷重 10kN) を用いた。

Fig.6 Tensile Specimen

7. 板厚変化の影響

引っぱり試験中の板厚変化による音速変化については、板厚変化量が塑性歪み以下の最大負荷応力がかかったとしても $0.1 \mu\text{m}$ 以下であることを実測した。図7は式(6)を使って、 S_0 モード波の場合の板厚変化に対する音速変化を計算した結果である。 $0.1 \mu\text{m}$ 以下の板厚変化を音速変化に換算すると 5×10^{-6} 以下となり、応力による音速変化に換算すると 5MPa程度となった。すなわち開発システムが目標としている応力評価には殆ど影響しないことを確認した。

$$V = V_0 \left[1 - \left\{ \frac{\lambda}{\lambda + 2\mu} \right\}^2 \frac{(kd)^2}{3} \right] \dots (6)$$

V_0 : Elementary Velocity

λ, μ : Lamé Constant

d : Plate Thickness

k : Wavenumber

Fig.7 Relationship between the plate thickness and the change in the velocity

8. 実験結果

図8(a)に引張り試験片に応力を負荷していない場合と負荷している(400MPa)状態での、受信信号波形例を示している。応力が負荷されている試験片で、わずかに伝搬時間が増加(音速が低下)していることが

わかる。図 8(a)に、この2個の波形に対して相互相関法を適用した遅延時間と相互相関係数の関係を示す。この結果から 8ns の伝搬時間遅延があったことがわかる。

図 9 に段階的に負荷応力を変えていった場合の、遅延時間と負荷応力の関係を示す。試験片 A、B 型各々について 5 枚用意し、静止状態、移動中 0.32mm/s、0.38mm/s の条件で実験を行った。遅延時間測定値のバラツキ度は 0.5%以下であり、静止状態、移動中の測定値に有意差は無かった。この測定値より音弾性定数を $731 \pm 0.05 \times 10^6$ (1MPa)と評価した。遅延時間値から応力値の換算は、全てこの評価した音弾性定数値を用いた。

(a) Direct received signal

(b) Cross Correlation Function

Fig.8 Example of a transit time measurement

Fig.9 Relationship between the stress and the transit time

図 10 は A 型試験片を用いて引っ張り応力方向の試験片内の応力分布を評価した例である。引っ張り荷重を試験片断面積で割った応力計算値と超音波に評価した応力値は良く一致しており標準偏差は 12MPa であった。但し、引っ張り試験片中心部に対して、引っ張り試験片端部で、測定値と計算値のずれが大きくなる傾向が見られる。この理由は、未だ明らかでないが理想的なラム波は半無限板を伝搬する波であり、本システムのセンサのように超音波ビーム幅（センサ幅）が板幅に対して有限である場合、試験片の板幅が変化することにより、超音波ビーム幅/板幅が変化することが影響している可能性があり、今後の検討課題である。

Fig.10 Example of evaluated value in A-type tensile specimen

図 11 は B 型試験片を用いて引っ張り応力方向の試験片内の応力分布を評価した例である。ほぼ引っ張り荷重に比例した超音波による応力評価値となっている。

しかし測定位置 2, 3 では負荷加重 350N, 700N の結果が逆転しており、また測定値 1, 2 に対して測定位置 5, 6 でも試験片断面積に対応した応力変化に比べて小さな変化しか示しておらず、A 型試験片に比べて、評価誤差が大きい結果となっている。原因として、試験片形状が引っぱり方向の試験片中心に対して極端に非対称であるため、中心から離れた位置では応力集中が生じている可能性がある。また引っぱり試験実施中に試験片に加わる負荷そのものに偏りが生じている可能性も考えられる。また図 10 の測定結果でも述べたが、ラム波のビーム幅に対して試験片幅が有限幅であるため、板幅が変化していくにつれてラム波発生条件が変化している可能性も否定できない。今後、センサ寸法の見直し、評価試験片形状の見直し再評価を進める予定である。

Fig. 11 Example of evaluated value in A-type tensile specimen

9. まとめ

オンサイトな材質評価システム開発のための第1段として、引っぱり試験中の試験片一軸方向の応力分布を評価するシステムを検討した。システムは S_0 モードラム波用電磁超音波センサを一軸方向に非接触で移動させながら、相互相関法利用した高精度な音速測定をおこなう方式を採用した。

評価試験の結果、試験片内の一軸方向応力分布を約 10MPa の精度で評価する事が可能であった。

今後は、評価システムを 2 次元応力評価が可能のように改造する事と、板厚 2mm 以上に対応させるために表面波モード用電磁超音波センサも利用可能なシステムの改造を進めていく。

文献

- (1) Toda et al.: Residual stress analysis using non-contact electromagnetic acoustic transducer, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, JSME Kansai Branch, The 60th Conference, No.854-1, pp.65-67 (1985)
- (2) M. Toda et al.: Stress measurement in thin plate using an EMAT, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.5, No.518, pp.2178-2183 (1989)
- (3) D.I. Crecraft: The Measurement of Applied and Residual Stress in Metals using Ultrasonic Waves, J. Sound and Vibration, Vol.5, pp.173-192 (1967)
- (4) M. Hirao et al.: Non-Destructive Evaluation of Hardening Depth using Surface-Wave Dispersion Patterns, Journal of Mechanical Working Technology., Vol.8, pp.171-179 (1983)
- (5) K. Okada: Stress-Acoustic Relation for Stress Measurement by Ultrasonic Techniques, Journal of Acoustical Society of Japan (E), Vol.1, pp.193-200(1980)
- (6) Y.H. Pao et al.: Acoustoelasticity and Ultrasonic Measurement of Residual Stress, in Physical Acoustics, Vol. X, VII, eds. W.P.Mason and R.N.Thurston, pp.61-143, Academic Press (1984)
- (7) B. Thompson: A Model for the Electromagnetic Generation and Detection of Rayleigh and Lamb Wave, IEEE Transactions., SU-20, pp.340-346 (1973)
- (8) B. Thompson: Mechanisms of Electromagnetic Generation and Detection of Ultrasonic Lamb Waves in Iron-Nickel Alloy Polycrystals., Journal of Applied Physics, Vol.48, pp.4942-4950 (1979).
- (9) T. Yamasaki et al.: Generation and detection of S_0 mode Lamb wave using electromagnetic acoustic transducers. Proceeding of the 1994 Far East Conference on NDT, pp.87-94 (1994).