縦波と横波を併用した音弾性法による溶接残留応力の測定*

荒居 善雄^{*1}, 小林 英男^{*1}Measurement of Welding Residual Stresses by the Acoustoelastic Technique
using Longitudinal and Transverse Waves

Yoshio ARAI and Hideo KOBAYASHI

For nondestructive evaluation of the structure anisotropy in the stressed state, a new method to adjust the isotropic component of the elastic stiffness of anisotropic materials is presented. The new method is applied to the measurement of welding residual stresses of a welded joint of carbon steel. The results obtained are as follows; (1) As the sum of the square of velocities in three directions becomes constant, the texture model is applicable. (2) The coefficient of adjustment for the isotropic component of the elastic stiffness of anisotropic materials, K , is unique to the measurement system. Nondestructive evaluation of the structure anisotropy in the stressed state is possible using longitudinal and transverse wave velocities. (3) Applying the new method to measurement of welding residual stresses of a welded joint of carbon steel, it is made clear that the precision of measurement is improved compared with that of the conventional method.

Key Words: Acoustoelastic Technique, Nondestructive Stress Measurement, Welding Residual Stresses, Ultrasonic, Material Anisotropy

1. 結 言

音弾性法は超音波速度と応力の関係を利用し、応力を非破壊測定する手法である⁽¹⁾⁻⁽³⁾。音弾性法を用いて残留応力を非破壊的に測定する場合、超音波速度に及ぼす材料の集合組織と応力の影響の区別が問題となる⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾。以下では、集合組織に起因する弾性異方性を材料異方性、応力に起因する弾性異方性を応力異方性と呼ぶ。

異方性材料の超音波速度に関する従来の研究結果から、縦波と振動方向が互いに直交する2つの横波のいずれの速度にも、材料異方性が影響を及ぼすことが知られている(集合組織モデル)⁽⁸⁾。このモデルを用いて、縦波と横波の速度を連立させることにより、応力異方性と材料異方性を分離する手法が提案されている⁽⁹⁾。この手法において、多結晶体の弾性係数は等方性成分と異方性成分の和で表され、前者は単結晶の弾性係数のみから、後者は単結晶の弾性係数と結晶方位分布関数から得られる。応力異方性と材料異方性の影響を分離する場合、弾性係数の等方性成分の測定誤差が応力

の測定誤差の原因となり、その補正方法が重要となる。しかし、この点に関する詳細な検討は未だ行われていない。

そこで、本研究では、異方性材料の弾性係数の等方性成分の測定誤差を補正する方法を提案した。そして、実際に原子力用配管炭素鋼溶接継手について、縦波と横波の速度を測定し、集合組織モデルの成立と、等方性成分の測定誤差補正方法の有効性を検討した。さらに、この結果を用いて溶接継手の残留応力が非破壊的に、精度よく測定できることを示した。

2. 弾性係数の等方性成分の測定誤差の補正

集合組織異方性材料の巨視的弾性係数(多結晶材料全体の弾性係数)は、結晶方位分布関数 W (任意の方位を持つ結晶粒の体積密度)を重みとし、各結晶粒を単結晶とみなした弾性係数の体積平均として与えられる。図1を参照して、材料に固定した座標系 $O-X Y Z$ と、各結晶粒に固定した座標系 $O-x y z$ を考える。 $O-x y z$ 系の方位は Z 軸周りの回転角 η 、 Z 軸と z

* 昭和63年12月9日 第32回材料研究連合講演会において講演、原稿受付 平成元年3月29日。

*1 正員、東京工業大学工学部 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)。

軸の傾き角 θ および z 軸周りの回転角 ϕ で表すことができる(オイラー角)。結晶方位分布関数 $W(\xi, \eta, \phi)$ の分布形を、 θ 方向はルジャンドル関数、 η および ϕ 方向は調和関数とし、次式で近似する⁽¹⁰⁾。

$$W(\xi, \eta, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l \sum_{n=-l}^l W_{lmn} P_{lmn}(\xi) \times \exp(-im\phi) \exp(-in\eta) \quad (1)$$

ここで、 W_{lmn} は分布形状を与える展開係数、 P_{lmn} は一般化されたルジャンドル関数、 $\xi = \cos \theta$ である。立方晶系多結晶異方性材料の場合、結晶の対称性から W_{lmn} は0となることが多い。今、最も単純な集合組織として、 z 軸および z 軸周りの回転角について対称(等方)な集合組織(繊維状集合組織)を仮定する。この場合、 l は最低次数 $l=4$ のみとなり、独立な W_{lmn} は W_{400} のみとなる。Purseyらはこの近似によって、引抜き加工した鉄鋼材料の集合組織を精度よく表せることを実験的に確認している⁽¹¹⁾。

フォークトモデルに基づく繊維状集合組織異方性材料の巨視的弾性係数から算出した超音波速度には、伝播方向($i = X, Y, Z$)にかかわらず、次式の関係が成立する⁽⁹⁾。

$$\rho \Sigma V^2 = \rho (V_{iz}^2 + V_{ix}^2 + V_{iy}^2) = C_{11} + 2C_{44} \quad (2)$$

ここで、 V は超音波速度、 V_{ij} の第1添字は超音波の伝播方向を、第2添字は振動方向を示し、 C_{11} 、 C_{44} は立方晶系単結晶の弾性係数、 ρ は密度である。式(2)が成立する場合、縦波の速度の自乗の比 $R_L = V_{zz}^2 / \Sigma V^2$ および横波の速度の自乗の差の比 $\Delta R_T = (V_{yz}^2 - V_{yx}^2) / \Sigma V^2$ は、各伝播方向の伝播時間から一義的に定まる。また、集合組織モデルによれば、上記の比は単結晶の弾性係数と結晶方位分布関数から

一義的に定まる。したがって、次式が成立する。

$$R_L \equiv V_{zz}^2 / \Sigma V^2 = 1 / [(T_{yy}/T_{yz})^2 + (T_{yy}/T_{yx})^2 + 1] = [C_{11} - (2/5)C + (2/15)\pi^2 C W_{400}] / (C_{11} + 2C_{44}) \quad (3)$$

$$\Delta R_T \equiv (V_{yz}^2 - V_{yx}^2) / \Sigma V^2 = [(T_{yx}T_{yy})^2 - (T_{yy}T_{yz})^2] / [(T_{yx}T_{yy})^2 + (T_{yy}T_{yz})^2 + (T_{yz}T_{yx})^2] = (2/9)\pi^2 C W_{400} / (C_{11} + 2C_{44}) \quad (4)$$

ここで、伝播時間 T_{ij} の第1添字は超音波の伝播方向を、第2添字は振動方向を示し、 C_{ij} は立方晶系単結晶の弾性係数、 $C = C_{11} - C_{12} - 2C_{44}$ である。式(3)の右辺、3番目の $C_{11} - (2/5)C$ の項が弾性係数の等方性成分、残りの項が異方性成分を示す。式(3)、式(4)を展開係数 W_{400} について解くと、次式が得られる。

$$W_{400}(R_L) = 15 [R_L(C_{11} + 2C_{44}) - \{C_{11} - (2/5)C\}] / (2\pi^2 C) \quad (5)$$

$$W_{400}(\Delta R_T) = 9(C_{11} + 2C_{44}) \Delta R_T / 2\pi^2 C \quad (6)$$

上記の R_L の測定結果には、探触子の遅延特性、結晶粒の形状因子などの測定系固有の誤差が影響を及ぼす。一方、 ΔR_T は速度の自乗の差の比なので、測定結果にこれらは影響しないと考えられる。したがって、一般に $W_{400}(R_L)$ と $W_{400}(\Delta R_T)$ の測定結果は一致しない。すなわち、式(5)において弾性係数の等方性成分 $C_{11} - (2/5)C$ (右辺、第2項)は単結晶の弾性係数から得られた理想的な値であるが、 $R_L(C_{11} + 2C_{44})$ (右辺、第1項)には測定系固有の誤差が影響を及ぼす。そこで、弾性係数の等方性成分にこの測定誤差を補正する係数 K を導入し、次式で $W_{400}(R_L, K)$ を再定義する。

$$W_{400}(R_L, K) = 15 [R_L(C_{11} + 2C_{44}) - \{C_{11} - (2/5)C\}K] / (2\pi^2 C) \quad (7)$$

誤差補正係数 K は次式の成立を仮定し、決定できる。

$$W_{400}(R_L, K) = W_{400}(\Delta R_T) \quad (8)$$

ここで、弾性係数の等方性成分の測定誤差が0の場合、 $K = 1$ である。

R_L 、 ΔR_T の応力依存性は、次式で表示される。

図1 座標系の定義

$$R_L = [K \{C_{11} - (2/5)C\} + (2/15)\pi^2 C W_{400}] / (C_{11} + 2C_{44}) + A\sigma \quad (9)$$

$$\Delta R_T = (10/45)\pi^2 C W_{400} / (C_{11} + 2C_{44}) + B\sigma \quad (10)$$

ここで、A、Bは比例定数、 σ は溶接線方向の垂直応力である。上述した誤差補正係数Kが得られていれば、式(8)が成立するから、式(9)と式(10)は以下のように、応力 σ と展開係数 W_{400} について解くことができる。

$$\sigma = [(C_{11} + 2C_{44})(5R_L + 3\Delta R_T) - 5K \{C_{11} - (2/5)C\}] / \{(C_{11} + 2C_{44})(5A + 3B)\} \quad (11)$$

$$W_{400} = 45 \{(C_{11} + 2C_{44})(A\Delta R_T - BR_L) + KB[C_{11} - (2/5)C]\} / \{(5A + 3B)(2\pi^2 C)\} \quad (12)$$

以上が組織異方性材料の弾性係数の等方性成分の測定誤差を補正する方法であり、式(11)、式(12)から応力異方性と材料異方性の影響を非破壊的に分離できる。以下では、提案した方法の有効性を、従来手法であるエコー列の不連続点を用いる方法⁽⁶⁾、参照試験片を用いる方法⁽⁷⁾、およびひずみゲージを用いた破壊測定法の結果と比較することにより、実験的に確認する。

3. 材料と実験方法

3・1 供試材 材料は原子力用配管炭素鋼STS 42である。化学成分と力学的性質をそれぞれ表1、表2に示す。外径508mm、肉厚32.5mmの大口径管を900℃、30分の焼ならし処理後、長手方向を管軸と一致させた幅110mm、厚さ14mm、長さ700mmの平板を切り出した。この平板から、1辺が15mmの立方体の母材試験片と図2(a)に示す引張試験片を採取した。また、この平板2枚をX開先、表側5層で裏はつり後、裏側4層で長手方向にサブマージアーク溶接法による突合せ溶接を行った。したがって、ビード方向が管軸方向である。溶接継手の溶接部の板厚中央から、1辺が15mmの立方

体の溶接部試験片と図2(b)に示す溶接継手試験片(厚さ7mm)を採取した。

以下では、板幅方向をX方向、板厚方向をY方向、長手方向をZ方向と、座標系O-XYZを定める。いずれの場合も、試験片表面はエメリー紙800番で仕上げた。

3・2 測定方法 シングア라운드音速測定装置(超音波工業社 UVM-2型)を用いて、超音波伝播時間を測定した。超音波探触子は中心周波数5MHzの縦波垂直型(東京計器5Z5N-M、直径5mm)、横波垂直型(パナメトリックスV156、直径7mm)を使用し、試験片と探触子の結合には、横波用媒質(パナメトリックス社)を用いた。試験片表面に探触子を圧着し、ロードセルにより接触圧力を実測した。超音波伝播時間測定の詳細は前報と同様である⁽¹²⁾。探触子の位置制御には、専用に製作した治具を用いた。位置の読み取り精度は0.1mmである。引張試験片に探触子を固定した状態で負荷、除荷を行い、超音波の伝播時間を測定し、速度の応力依存性を調べた。溶接継手試験片について、Y方向の縦波とXZ面内の偏向方向に振動する横波の速度および偏向方向から45°に振動する横波のエコー列の極小点を測定した。測定位置は図2(b)を参照して、X軸上で5mm間隔とした。

4. 実験結果と考察

母材試験片、溶接部試験片の各伝播方向($i = X, Y, Z$)の実測速度の自乗和と密度の積 $\rho \sum V_i^2$ を図

(a) 引張試験片(厚さ7mm)

(b) 溶接継手試験片

図2 試験片形状

表1 化学成分 (wt.%)				
C	Si	Mn	P	S
0.21	0.28	1.14	0.026	0.012

表2 力学的性質		
σ_{ys} (MPa)	σ_B (MPa)	δ (%)
401	556	38.0

3に示す。 $\rho \Sigma V_{ij}^2$ は伝播方向に無関係にほぼ一定値を示し、式(2)が成立していることがわかる。すなわち、溶接部の材料異方性についても、集合組織モデルの適用が有効であると判断される。

R_L , ΔR_T の実測結果から、それぞれ式(5), 式(6)を用いて W_{400} を算出した。 W_{400} と ΔR_T の関係を図4に白抜き印で示す。式(5)の $W_{400}(R_L)$ と式(6)の $W_{400}(\Delta R_T)$ は、いずれも ΔR_T の増加に伴い減少するが、定量的には一致しない。式(8)を仮定し、決定した K の平均値は、 $K=1.00563$ となった。この K を用いた式(7)の $W_{400}(R_L, K)$ を図4に黒塗り印で示す。 $W_{400}(R_L, K)$ と $W_{400}(\Delta R_T)$

は全く一致する。したがって、 R_L , ΔR_T の応力依存性の式(9), 式(10)において、展開係数を $W_{400}(R_L, K) = W_{400}(\Delta R_T)$ とすれば、応力異方性と材料異方性の影響が非破壊的に分離できる。

引張試験片の R_L , ΔR_T と応力 σ の関係を図5, 図6に示す。 R_L , ΔR_T は σ と比例関係にあり、式(9)式(10)が成立している。比例定数は $A=1.89 \times 10^{-6}$, $B=2.99 \times 10^{-6} (\text{MPa}^{-1})$ である。

溶接継手試験片の R_L , ΔR_T の板幅方向(X軸上)分布をそれぞれ図7, 図8に示す。横波(ΔR_T)のみならず縦波(R_L)も、溶接ビード上とその近傍で、溶接残留応力に起因する大きな変化を示している。

R_L , ΔR_T の実測結果から誤差補正係数 K を決定し、式(11)の応力 σ と、式(12)の展開係数 W_{400} を算出した。結果を図9, 図10に示す(○印)。比較のために、エコー列の不連続点を用いて評価した

図3 速度差と伝播方向の関係

図4 異方性係数と横波の速度差の関係

図5 縦波速度と応力の関係

図6 横波速度と応力の関係

図7 縦波の速度差比の分布

図9 異方性の係数の分布

図8 横波の速度差比の分布

図10 残留応力の分布

W_{400} の測定結果(△印)と、異なる溶接継手から切り出した参照試験片(母材と溶接部)を用いて評価した W_{400} の測定結果(□印)を図9に併記した⁽⁶⁾。また、それらを用いて算出した σ とひずみゲージを用いた破壊測定法による σ の測定結果(●印)を図10に併記した⁽⁷⁾。

図9を参照して、提案した方法による材料異方性の係数 W_{400} の測定結果(○印)は、母材、溶接部ともに参照試験片を用いた測定結果(□印)を中心に変動し、平均値は一致している。これは提案した方法により、試験片の材料異方性の局所的な不均一性が測定可能なことを示している。また、提案した方法による W_{400} の測定結果(○印)とエコー列の不連続点を用いる方法の測定結果(△印)は、 W_{400} の絶対値の大きい溶接部

の場合に一致するが、 W_{400} の絶対値の小さい母材の場合に一致しない。すなわち、提案した方法の精度は、エコー列の不連続点を用いる方法よりも高いと判断される。したがって、図10を参照して、提案した方法による溶接残留応力分布(○印)は従来手法の結果(△印、□印)よりもひずみゲージ法を用いた破壊測定法の結果(●印)によく一致している。もちろん、本方法は従来手法のように参照試験片を必要とせず、完全な非破壊測定が可能である。

5. 結 言

音弾性法における応力異方性と材料異方性の影響の非破壊的な分離を目的として、集合組織異方性材料の弾性係数の等方性成分の測定誤差を補正する方法を提

案した。そして、実際に原子力用配管炭素鋼溶接継手について、縦波と横波の速度の実測結果に基づき、集合組織モデルの成立と、等方性成分の測定誤差補正方法の有効性を検討した。さらに、この結果を用いて溶接継手の残留応力を非破壊的に、精度よく測定できることを示した。得られた結果を要約すれば、以下のとおりである。

(1) 母材、溶接部の各伝播方向の実測速度の自乗和と密度の積はほぼ一定値を示し、溶接部の材料異方性にも集合組織モデルの適用が有効であると判断される。

(2) 弾性係数の等方性成分には測定系固有の誤差が影響を及ぼす。測定誤差補正方法を提案し、その有効性を示した。その結果、縦波と横波の速度の測定を併用して、応力異方性と材料異方性の影響を分離することが可能となった。

(3) 以上の方法を溶接継手の残留応力測定に適用し、従来手法との比較において、材料異方性を精度良く分離できた。その結果、提案した方法による溶接残留応力分布は従来手法の結果より、ひずみゲージを用いた破壊測定法の結果によく一致することを示した。

文 献

- (1) Y. H. Pao, W. Sachse, and H. Fukuoka, Phys. Acoust., XVII, (1984), 61.
- (2) Y. Torikai and H. Lee, Proc. 15th Jpn National Cong. Appl. Mech., (1965), 209.
- (3) 福岡, 非破壊検査, 33-9 (昭59), 633.
- (4) 荒居・小林・中澤, 機論, 51-471, A(昭60), 2544.
- (5) 荒居・小林・大沢・轟, 機論, 53-492, A(昭62), 1574.
- (6) 大沢・荒居・小林, 機論, 53-496, A(昭62), 2410.
- (7) 荒居・小林・鈴木, 機論, 54-500, A(昭63), 823.
- (8) C. M. Sayer, J. Phys. D, Appl. Phys., 15(1982), 2157.
- (9) C. M. Sayer, Proc. ONR Symp., II, (1987) 320.
- (10) R. J. Roe and W. R. Krigbaum, J. Chem. Phys., 40-9(1964), 2608.
- (11) H. Pursey and H. Cox, Phil. Mag., 45 (1954), 295.
- (12) 荒居・小林・住永, 機論, 55-511, A(平元), 622.

討 論

〔質問〕 伊 達 和 博〔宮城工業高等専門学校〕

音速の組織異方性を検討した興味ある論文と思われる。以下の点について、ご教示願いたい。

(1) 図3で $\rho \sum V_{ij}^2$ が母材と溶接材で異なっている。これは、同一材料でも組織が異なるためと思われる。したがって溶接材では、場所によって $\rho \sum V_{ij}^2$ の値が異なってくると思われるが、これと誤差補正係数 K の測定位置による変化との関係は、どのようなものか。

(2) 縦波の音速測定は、試験片板厚のわずかな変化により影響されると思われる。その辺の誤差の取扱はどのようなされるのか。

(3) ひずみゲージによる残留応力は、表面付近の応力値であり、超音波を用いた方法は板厚の平均的な残留応力である。図10に示されるように両者が一致するのは、ある意味では不思議に思われる。お考えがあれば、お聞かせ願いたい。

〔回答〕 (1) ご指摘のとおり、溶接材では場所によって $\rho \sum V_{ij}^2$ の値が異なってくる。これと誤差補

正係数 K の測定位置による変化との関係は以下のとおりである。

本文中の式(7)の K の定義と式(6)を式(8)に代入すれば、 K は次式で与えられる。

$$K = \frac{c_{11} + 2c_{44}}{c_{11} - (2/5)c} (R_L - \frac{3}{5} \Delta R_T)$$

ここで、

$$R_L = \frac{\rho V_{yy}^2}{\rho \sum V_{ij}^2}, \quad \Delta R_T = \frac{\rho (V_{zz}^2 - V_{yz}^2)}{\rho \sum V_{ij}^2}$$

すなわち、測定位置による $\rho \sum V_{ij}^2$ の変化は $R_L, \Delta R_T$ を通して K の変化に影響する。しかし、以下の理由から $\rho \sum V_{ij}^2$ の変化に起因する K の変化は小さいと考えられる。

まず、図3の $\rho \sum V_{ij}^2$ の母材と溶接材の相違の大部分は母材と溶接材の密度の相違によると判断される[母材密度7,805, 溶接部密度7,772 (kg/m³)]. R_L と ΔR_T は密度に依存しないので、 K の変化は小さい。

上述したとおり、 $\rho \sum V_{ij}^2$ の相違の内、 V_{ij} の変化に起因する相違は小さく、近似的には V_{ij} の i, j にかか

わらず同程度の変化と考えられる。この場合、 R_L 、 ΔR_T は速度の比であるので V_{ij} の変化に起因する R_L 、 ΔR_T の変化は小さく、それによる K の変化も小さい。

(2) R_L 、 ΔR_T の定義 [本文中の式(3)、(4)] から、 R_L と ΔR_T は超音波伝ば時間のみで評価される、試験片厚さの変化には独立な量であり、試験片の厚さ

測定は誤差の原因とはならない。

(3) 本研究で対象とした溶接継手試験片は厚さ 7 mm であり、厚さ方向の残留応力分布が小さいと考えられる。これが超音波法の結果とひずみゲージ法の結果が一致した原因と考えている。