Fig. 11. Some micro-fractographs of tensile fracture surfaces at friction welded joints.

参考文献

- 1) 沖田, 岸本: オーステナイト系ステンレス鋼の摩擦圧接に関する研究(1), 本誌48-11 (1979) 93-97
 2) 蓮井, 福島: 摩擦圧接における圧接面の温度と圧接部の構造について, 材料科学6-2 (1969) 38-50

長い溶接継手の3次元残留応力測定理論*

上田幸雄**, 福田敬二**, 福田 稔***

A Measuring Theory of Three Dimensional Residual Stresses in Long Welded Joints*

by Yukio Ueda**, Keiji Fukuda** and Minoru Fukuda***

Abstract

Two of the authors have already proposed the general principles for measurement of residual stresses. In this paper, the authors develop a new measuring theory of three dimensional residual stresses in a long welded joint by using the theory of inherent strains, which is based on one of these principles.

First of all, the characteristic of the distribution of its inherent strains induced in a long welded joint is clarified. This characteristic makes the measuring theory simple. According to this resulting theory, three dimensional inherent strains can be divided into the components of inherent strains contained in a sliced thin vertical cross section (T-specimen) to the weld line and longitudinal inherent strains contained in sliced thin plates (L_i-specimens) parallel to the direction of the weld line. Then, the measurement of three dimensional welding residual stresses in a very thick plate has become practically possible. When residual stress distributions are uniform along the weld line, the theory should provide the exact measured ones.

By this developed theory, the distributions of residual stresses in an electroslag welded joint are measured for the first time. And the estimated residual stresses show a fairly good coincidence with the directly observed stresses on its surfaces.

It can be concluded that the present theory is reliable and practically applicable to measure such complex triaxial residual stresses.

*原稿受付 昭和55年4月28日(昭和54年度第55回 溶接構造研究委員会 分科会にて発表)

**正 員 大阪大学溶接工学研究所 Member, Welding Research Institute of Osaka University

***正 員 (株)栗本鉄工所 Member, Kurimoto Iron Works, Ltd.

1. 緒 言

最近の構造物の大型化に伴って極厚板の溶接継手が採用されることが多く、このような継手の内部に生じる3次元残留応力を理論的に正しい方法で測定することは極めて重要である。

著者らはこれに関連して一連の研究を実施してきている¹⁻⁴⁾。その中では初めに3次元残留応力測定的一般原理を提案し、その適用において、(1) 固有ひずみを媒介とする測定理論と (2) 切断面力を媒介とする測定理論の2つがあることを示した。また、これらの測定理論に基づき、有限要素法と統計学的手法を用いて基礎式を展開し、さらに数値実験によって理論の妥当性と有用性を示した²⁾。

本研究では固有ひずみを媒介とする残留応力測定原理に基づいて、長い溶接継手に生じる溶接線方向に一樣な応力場に適用できる3次元残留応力測定理論を提案し、この方法を用いて極厚板エレクトロ・スラグ溶接継手に生じた3次元残留応力を実測して本法の有用性を示す。

2. 3次元溶接残留応力測定理論

一般に、溶接継手には溶接による熱弾塑性現象によって溶接部とその近傍に残留固有ひずみが生成される。この残留固有ひずみの一部は自由膨張・収縮に寄与し、継手に剛体移動をもたらすのみで残留応力には無関係である。このようなものを除いた固有ひずみが残留応力と直接対応しており、この固有ひずみを有効固有ひずみ（以下、単に固有ひずみ）という。固有ひずみを媒介とする残留応力測定原理はこのような残留応力の発生源である固有ひずみを推定し、残留応力を求めようとする考え方に基づいている。この理論の妥当性はすでに数値実験によって基本的に明らかにしている。ここではこの理論の実用化に当って、ひずみゲージなどの表面ひずみの計測手段を用いた場合の測定手法を示す。

本論文で測定対象となる典型的な一例は、Fig. 1 に示すような極厚板の突合せ溶接継手の溶接線中央横断面付近の3次元残留応力である。このような溶接継手に生じる固有ひずみ分布の特性に注目すると、一般的な測定理論を以下のように簡単化することができる。

2.1 測定理論で用いた仮定

通常、溶接継手に生じる固有ひずみは非定常温度分布とまわりの拘束状態によって生成される。長い溶接長を有する連続溶接の継手では溶接の始端、終端付近を除いて、溶接中の温度分布は準定常になるため各横断面の対応する位置の熱履歴はほぼ等しい。したがって、溶接線に沿って拘束状態が一定であれば、溶接長の長い継手に

(a) Test model (R-specimen)

(b) T-specimen

(c) Li-specimen

Fig. 1 Test model and procedure of slicing T and Li-specimens (Ly method)

生じる残留応力分布は溶接端部付近を除いて、一樣とみなすことができる。このような場合には固有ひずみも溶接線に沿って一樣とみなせる。また、溶接残留応力は良く知られているように、中央横断面 ($x=0$) に関して前後対称形に近く、このため非対称な応力を作る固有ひずみ γ_{xy}^* および γ_{xz}^* は無視できる。以上のことから、ここでは3次元溶接残留応力測定のため、次の仮定を設ける。

1) 切断に伴うひずみの変化は弾性的で、新たに固有ひずみは生じない。

2) 薄板に切り出した状態において残留する応力は平面応力状態にある（その程度の薄板にする）。

3) 固有ひずみは溶接線 (x 軸) に沿って一定で、その成分は ϵ_x^* , ϵ_y^* , ϵ_z^* , γ_{yz}^* で y, z の関数である。

2.2 3次元固有ひずみ成分の分離

Fig. 1 (a) の元の試験体 R から T 片 (Fig. 1 (b)) および $L_i \sim L_m$ 片 (Fig. 1 (c)) を切り出す。この場合、切断によって新たな固有ひずみは生成されないでやはり溶接線に沿って固有ひずみは一定である。このため T 片および L_i 片には元の試験体 R と同じ固有ひずみ分布が存在する。

一方、これらの T 片および L_i 片は薄板のため名々の板の面に垂直方向の固有ひずみ成分はその薄板に残留する応力には寄与しない。したがって、T 片を製作した後の板に残留する応力は横断面内固有ひずみ (ϵ_y^* , ϵ_z^* ,

γ_{yz}^*) のみによって作られており、また L_i 片製作後の板に残留する応力は溶接線方向固有ひずみ (ϵ_x^*) のみで生成されている (各 L_i 片に残留する ϵ_x^* は溶接線方向に一定のため、 L_i 片に残留する応力には関与しない)。

このように 3 次元固有ひずみ成分が T 片に横断面内固有ひずみ、 L_i 片に溶接線方向固有ひずみとに分離されているため、それぞれの試片では実質的に測定が 2 次元問題に置換されたことになる。このことは一方向に一定の固有ひずみ場での 3 次元残留応力測定理論の 1 つの重要な単純化である。

したがって、元の試験体 R の 3 次元残留応力 $\{\sigma\}$ は T 片および L_i 片から求められたそれぞれの固有ひずみの和によって生成されていると考えられる。このため、残留応力 $\{\sigma\}$ は試験体 R に横断面内固有ひずみのみが存在する場合の応力 $\{\sigma^A\}$ と試験体 R に溶接線方向固有ひずみのみが存在する場合の応力 $\{\sigma^B\}$ の和として表わすことができる。すなわち、

$$\{\sigma\} = \{\sigma^A\} + \{\sigma^B\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

次にそれぞれの 3 次元応力の成分 $\{\sigma^A\}$ および $\{\sigma^B\}$ の求め方について述べる。

2.3 横断面内固有ひずみによる 3 次元応力 $\{\sigma^A\}$

T 片に残留する応力から固有ひずみ法によって横断面内固有ひずみ (ϵ_x^* , ϵ_y^* , γ_{yz}^*) を求め、これを無応力状態の試験体 R に与えて 3 次元弾性解析することによって $\{\sigma^A\}$ を推定することもできる。これに対して、以下に説明する関係を利用すると、 $\{\sigma^A\}$ の測定は簡単化できる。

横断面内固有ひずみは x 方向に一定のため、これらの固有ひずみのみが試験体 R に与えられた場合、溶接の始端・終端からある程度内側に入った位置では固有ひずみを与える前に平面であった横断面は固有ひずみによって変形した後も平面を維持 (以下、平面変形と称する) する。また、これらの固有ひずみを平面ひずみ状態 ($\epsilon_z = 0$) に与えた場合に生じる応力は yz 面内で平衡状態にあるため、横断面に垂直 (x 軸) 方向のひずみの拘束によって生じる溶接線方向応力は自己平衡を保つ。したがって、前述の平面変形は平面ひずみ状態になっている³⁾。また、このように横断面内固有ひずみによる応力が平面ひずみ状態にあるための溶接端からの距離は板厚程度である。

他方、 T 片製作後に残留する応力 $\{\sigma^{A0}\} = \{0, \sigma_y^{A0}, \sigma_z^{A0}, \tau_{yz}^{A0}, 0, 0\}^T$ は平面応力状態にあり直接計測できるが、平面応力と平面ひずみの関係から、次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_y^A &= \nu(\sigma_y^{A0} + \sigma_z^{A0}) / (1 - \nu^2) \\ \sigma_z^A &= \sigma_z^{A0} / (1 - \nu^2), \quad \sigma_y^A = \sigma_y^{A0} / (1 - \nu^2) \\ \tau_{yz}^A &= \tau_{yz}^{A0} / (1 - \nu^2), \quad \tau_{xy}^A = \tau_{xz}^A = 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 ν : ポアソン比

$\sigma_y^{A0}, \sigma_z^{A0}, \tau_{yz}^{A0}$: T 片に残留する応力

したがって、これを用いると $\{\sigma^{A0}\}$ を計測することにより、直接 3 次元応力 $\{\sigma^A\}$ を求めることができ、横断面内固有ひずみの推定もそれによる 3 次元弾性解析も不要となる。

なお、3 次元固有ひずみ (ϵ_x^* , ϵ_y^* , ϵ_z^* , γ_{yz}^*) によって生成された試験体 R の溶接線方向弾性ひずみ ϵ_x を横断面内固有ひずみによるもの ϵ_x^A と溶接線方向固有ひずみによるもの ϵ_x^B に分けると、前者の固有ひずみは試験体 R で平面ひずみ状態を構成するので $\epsilon_x^A = 0$ である。したがって、溶接線の始端・終端から板厚程度内側に入った位置で試験体 R に生じた溶接線方向弾性ひずみはその方向の固有ひずみ ϵ_x^* のみによって生成されている。

$$\epsilon_x = \epsilon_x^B \quad \dots\dots\dots (3)$$

2.4 溶接線方向固有ひずみによる 3 次元応力 $\{\sigma^B\}$

この場合は固有ひずみを媒介とする測定理論本来の取り扱い方—固有ひずみ ϵ_x^* を求め、3 次元応力 $\{\sigma^B\}$ を弾性解析により推定する方法—をとらねばならない。

ところで、 L_i 片における測定は固有ひずみ ϵ_x^* の推定を目的にしているため、この固有ひずみが薄板に切り出された後に残留する弾性ひずみと明確な関係を持っている必要がある。このため、薄板 L_i の切り出し方は一辺が x 軸方向と平行であれば測定対象 R の表面に対する傾き角は任意である。これらの L_i 片の切り出し方の中で実用的なものの 1 つは薄板の面の法線が z 方向であるもの (この L_i 片の切り出し方を L_z 法と呼ぶ) であり、もう 1 つは薄板 L_i の面の法線が y 方向であるもの (この方法を L_y 法と呼ぶ) である。それぞれの適用法について、次に述べる。

2.4.1 L_z 法による測定法³⁾

通常の溶接継手では固有ひずみの存在域の幅は板幅に比べて小さい。したがって、 L_z 法によって切り出した L_i 片に存在する ϵ_x^* はその値に比例して L_i 片に残留する弾性ひずみを生成している。すなわち有効固有ひずみとして作用している。このため、各 L_i 片を切り出した後、板にひずみゲージを貼付し板を細断して、弾性ひずみを計測すればよい。このようにして得られた計測データより、各 L_i 片において平面応力状態の測定方程式 $[H^*]^{3,3)}$ を有限要素法によって構成することから、各 L_i 片の固有ひずみ ϵ_x^* の最確値が求まる。これらの固

有ひずみ分布から試験体 R の ϵ_x^* の分布が決定される。

この固有ひずみ分布 ϵ_x^* を元の試験体 R に与えて、有限要素法による3次元応力解析することにより、3次元応力 $\{\sigma^0\}$ が求まる。この L_z 法の実溶接継手への具体的な適用例はすでに文献 3) で示している。

2.4.2 L_y 法による測定法⁴⁾

L_y 法の適用法は多少 L_z 法と異なる。それは溶接継手の固有ひずみ分布が普通板厚方向 (z 方向) に貫通していることが多いことによる。この場合、溶接線方向有効固有ひずみ ϵ_x^* は z 方向に直線変化する成分 ϵ_{xi}^* とそれ以外の非直線成分 ϵ_{xn}^* との和として次のように表わせる。

$$\epsilon_x^*(y, z) = \epsilon_{xi}^*(y, z) + \epsilon_{xn}^*(y, z) \quad \dots\dots (4)$$

$$\text{ここに, } \epsilon_{xi}^*(y, z) = a_1(y) + a_2(y) \cdot z \quad \dots\dots (5)$$

$$\int_0^t \epsilon_{xn}^*(y, z) dz = \int_0^t \epsilon_{xn}^*(y, z) \cdot z dz = 0 \quad \dots\dots (6)$$

a_1, a_2 : y 座標のみの関数

(4) 式の右辺第1項は $y=y_i$ の位置の L_i 片内で直線分布する成分であるため試験体 R では有効固有ひずみとして作用しているが、 L_i 片を切り出すと y 方向の連続性がなくなりその拘束が消滅するので、この L_i 片内で直線分布する ϵ_{xi}^* は切断後の L_i 片に残留している応力には寄与しない非有効成分となる。したがって、 L_z 法と同様にして L_i 片に残留する弾性ひずみを計測データにしても推定できる固有ひずみは非直線成分 ϵ_{xn}^* にすぎない。このため、 L_y 法では各 L_i 片に残留するひずみを計測するだけでは不十分で直線成分 ϵ_{xi}^* の係数 a_1, a_2 を決定するために、試験体 R から L_i 片を切り出す際の弛緩ひずみを計測する必要がある。

一方、通常の溶接継手の長さは板厚 t に比べて十分長く、 L_i 片の長さ l を $2t$ 以上にすることができる。このような場合には、固有ひずみ ϵ_x^* を直線成分 ϵ_{xi}^* と非直線成分 ϵ_{xn}^* とに分離して測定できる。以下にその方法について述べる。

(a) 試験体 R の $x=x_0$ の位置のひずみ分布の特徴

溶接線端部から板厚以上内側に入った試験体 R の $x=x_0$ ($|x_0| < \frac{L}{2} - t$) の位置の横断面において生じたひずみ分布を考える。この位置において、横断面内固有ひずみの生成する応力は平面ひずみ状態を構成しているので、(3) 式で示したように弾性ひずみ ϵ_x は溶接線方向固有ひずみ ϵ_x^* のみによって生成される。この ϵ_x^* によって試験体 R に生じる x 方向の変形は、固有ひずみ ϵ_x^* を x 方向に平面ひずみ状態に拘束することによって生じる x 方向の等価応力 σ_x^0 を試験体 R の溶接線端面に逆向きの分布応力として作用させたときに生じる

x 方向の変形と同じである。平板の仮定「変形前の平板の中性面に垂直な直線は変形後も直線を保持する」は Saint-Venant の原理によって荷重点 (溶接線端面) から板厚以上内部に入った位置で成立すると考えられる。したがって、上述の $x=x_0$ における溶接線方向の全ひずみ e_x は板厚方向に直線と考えられる (一般には板幅方向には曲線である)。すなわち、

R の $x=x_0$ において

$$e_x(y, z) = b_1(y) + b_2(y) \cdot z \quad \dots\dots (7)$$

ここに、 b_1, b_2 : y 座標のみの関数

また、このとき物体 R の同じ位置に生じている弾性ひずみを固有ひずみと同様に板厚内での直線成分 ϵ_{xi} と非直線成分 ϵ_{xn} との和として表わすことができる。

R の $x=x_0$ において

$$\epsilon_x(y, z) = \epsilon_{xi}(y, z) + \epsilon_{xn}(y, z) \quad \dots\dots (8)$$

$$\text{ここに, } \epsilon_{xi} = a_3(y) + a_4(y) \cdot z \quad \dots\dots (9)$$

$$\int_0^t \epsilon_{xn}(y, z) dz = \int_0^t \epsilon_{xn}(y, z) \cdot z dz = 0 \quad \dots\dots (10)$$

a_3, a_4 : y 座標のみの関数

(b) L_i 片の中央部のひずみ分布の特徴

次に、試験体 R から $y=y_i$ の位置で L_i 片を製作する。切り出す L_i 片の長手方向の中心点の x 座標を上述の座標 x_0 とし、かつ、 L_i 片の長さ l を $2t$ 以上に与えるものとする。このように製作された L_i 片の長手方向の中央部はその試片の両端から板厚以上離れているため、この付近に残留する応力は Saint-Venant の原理によって、端部の影響をうけなくなる。このため溶接線方向の変形に対応する全ひずみ e_x は切り出された L_i 片の中央部で直線となる。すなわち、

L_i の中心において

$$e_x(z) = b_3 + b_4 z \quad \dots\dots (11)$$

ここに、 b_3, b_4 : 定数

また、 L_i 片の中央部では応力は x 方向のみの1軸力状態にあるので、このとき残留している弾性ひずみ ϵ_x は L_i 片内で弾性係数 E が一定ならば次式を満たす。

$$\int_0^t \epsilon_x dz = \int_0^t \epsilon_x z dz = 0$$

これと (10) 式を比較すると

L_i の中心において

$$\epsilon_x(z) = \epsilon_{xn}(y_i, z) \quad \dots\dots (12)$$

ところで、 L_i 片に生じた全ひずみ (11) 式) は (4) 式の固有ひずみと (12) 式の弾性ひずみの和であるので、

$$\epsilon_{xn} + \epsilon_{xi}^* = (b_3 - a_1) + (b_4 + a_2)z$$

(6) および (10) 式を考慮して上式を積分すると、

$$b_3 = a_1, \quad b_4 = a_2$$

$$\therefore L_i \text{ の中心において, } \epsilon_{xn} = -\epsilon_{xi}^* \quad \dots\dots (13)$$

(c) 固有ひずみ ϵ_{xi}^* を直線・非直線成分に分離して測定する方法

試験体 R に生じた全ひずみ (7) 式) は (4) 式の固有ひずみと (8) 式の弾性ひずみの和であるので次式が成立する。

$$b_1 + b_2 z = \epsilon_{xi}^* + \epsilon_{xn}^* + \epsilon_{xi} + \epsilon_{xn} = \epsilon_{xi}^* + \epsilon_{xi} + \epsilon_{xn}^* + \epsilon_{xn} \quad (14)$$

この式は試験体 R において生じた弾性ひずみの直線成分 ϵ_{xi} が固有ひずみの直線成分 ϵ_{xi}^* のみによって生成されたことを示す。また、試験体 R から各 L_i 片を切り出す際に弛緩される x 方向のひずみは ϵ_{xi}^* の y 方向の連続体としての拘束が消滅することによって生じるものであるから、試験体 R の弾性ひずみの直線成分 ϵ_{xi} そのものである。なお、非直線成分 ϵ_{xn} はこの切断によって全く弛緩されない。それは L_i 片で (13) 式が成立し、固有ひずみ ϵ_{xn}^* による x 方向の変形が完全に拘束されているためである。

このひずみ ϵ_{xi} は試験体 R の $x=x_0$ の上下表面にひずみゲージを貼付した後、各 L_i 片を製作しその間の弛緩ひずみを計算することによって、(9) 式の直線の係数を決定すると試験体 R の内部を含めて推定できる。一方、弾性ひずみの非直線成分 ϵ_{xn} は切り出された L_i 片に残留する弾性ひずみそのものであるので、試片の切断面にひずみゲージを貼付して小直方体に細断することによって、直接計測できる。

以上述べてきたように、固有ひずみ ϵ_{xi}^* を板厚方向に直線変化する成分 ϵ_{xi}^* と非直線成分 ϵ_{xn}^* の和と考えると試験体 R から L_i 片を製作した際に弛緩される弾性ひずみは z 方向に元々直線変化していた成分 ϵ_{xi} のみでこれは固有ひずみの直線成分 ϵ_{xi}^* によって試験体 R に生じたものであり、一方、切り出された L_i 片に残留する弾性ひずみは試験体 R に生じていた非直線成分 ϵ_{xn} で、これは固有ひずみの非直線成分 ϵ_{xn}^* で生じたものである。したがって、固有ひずみ ϵ_{xi}^* はその直線成分 ϵ_{xi}^* と非直線成分 ϵ_{xn}^* に分離して測定できることになる。

すなわち、直線成分 ϵ_{xi}^* は板曲げ要素を用いた有限要素法により試験体 R の測定方程式 $[H^*]$ を構成し、弛緩ひずみ ϵ_{xi} を計測データにして $[H^*]$ の一般逆行列から推定できる。一方、非直線成分 ϵ_{xn}^* は L_i 片の中央で弾性ひずみ ϵ_{xn} を計測すれば (13) 式から直接推定できる。

このようにして、溶接線方向固有ひずみ分布が直線および非直線成分の和として完全に推定できる。これを元の試験体 R に与えて3次元弾性解析することにより、3次元応力 $\{\sigma^d\}$ が測定されることになる。

Fig. 2. Test model of electrosag welded joint

Table 1 Condition of electrosag welding

Welding process	Material of welding	Current (A)	Voltage (V)	Velocity (mm/min)	Number of electrodes.
Electrosag*	ES-50xMF-38	460	56	7.38	1

* ; With weaving

これと 2.3 節で述べた横断面内固有ひずみによる応力 $\{\sigma^d\}$ の和として、元の試験体 R における3次元残留応力 $\{\sigma\}$ を推定することができる。

以上述べてきた測定理論は溶接線に沿って一定の残留応力場では正しい3次元残留応力測定値を与える。

3. 極厚板溶接継手の3次元残留応力分布の実測

これまでに示した固有ひずみを媒介とする3次元残留応力の測定理論に基づいて、極厚板エレクトロ・スラグ溶接継手の残留応力を実測し、本法の有用性および信頼性を示す。 L_i 片の切り出し方法は L_j 法を用いる。

3.1 試験片および計測位置

実験には SM 50 B 材を用い、溶接前に応力除去焼なましを行なって板の初期残留応力をほぼ完全に除去した。試験体 R は Fig. 2 に示すようにエンドタブを付けた状態でエレクトロスラグ溶接によって2枚の極厚板を接合し、溶接完了後、始・終端側の一部を切断削除して製作された。その溶接条件を Table 1 に示す。Fig. 3 に試験体 R の寸法、座標系および T 片、 L_i 片の取り出し位置を示す。ここでは L_j 法を適用するため、 L_i 片の長さは $l=2.5t=250$ mm とした。また、同図中に

Fig. 3 Locations of observing points on the top and bottom surfaces of R-specimen

Fig. 4 Locations of observing points (T-specimen)

Fig. 5 Locations of observing points (Li-specimen)

は本測定法によって推定される残留応力の信頼性を検討するために試験体表面の応力を直接計測するためのひずみの計測位置も示す。T 片製作後、その横断面でひずみを計測する位置を Fig. 4 に示す。Fig. 5 には各 L_i 片製作後の切断面内でのひずみ計測位置の一例を示す。用いたひずみゲージはゲージ長 2 mm のもので T 片および L_i 片に残留するひずみの計測は前述の Fig. 4, Fig. 5 の板の対応する表裏面にゲージを貼って行っており、その平均値を計測データとした。また、エレクトロスラグ溶接による非定常温度分布は横断面内ではほぼ上下左右対称形のため、以下では残留応力分布もこれらの対称性が成立するものとして取扱った。

3.2 横断面内固有ひずみによる応力 $\{\sigma^A\}$ の測定

T 片製作後、Fig. 4 に示した位置に 2 軸ひずみゲージを貼付し、そのまわりを約 10 mm 角の小片に細断して平面応力状態の応力 $\{\sigma^{A0}\}$ を計測した。この応力を (2) 式に代入して、横断面内固有ひずみ (ϵ_x^* , ϵ_z^* , γ_{yz}^*) に

Fig. 6 Measured distributions of stresses $\{\sigma^A\}$ due to inherent strains (ϵ_x^* , ϵ_z^* , γ_{yz}^*) contained in the cross section

よる 3 次元応力 $\{\sigma^A\}$ が直接求められた。その測定例を Fig. 6 に示す。用いた材料定数は弾性係数 $E=21,000$ kg/mm², ポアソン比 $\nu=0.3$ とした。

3.3 溶接線方向固有ひずみによる $\{\sigma^B\}$ の測定

前章でも述べたように、 L_y 法では溶接線方向有効固有ひずみ ϵ_{xi}^* を L_i 片の z 方向に直線変化する成分 ϵ_{xi}^* と非直線成分 ϵ_{xi}^{*n} に分離して測定する。そこで、以下にその測定手順と測定結果を示す。

3.3.1 溶接線方向固有ひずみの直線成分 ϵ_{xi}^* の推定

試験体 R から各 L_i 片を切り出したときの物体表面で計測した弛緩ひずみ ϵ_{xi} (上下表面の平均値) を Fig. 7 に示す。この計測データを用いて、 L_i 片の板厚方向に直線分布する ϵ_{xi}^* (この場合は xy 平面に関して上下対称と考えているので z 方向には一定) を推定するのであるが、ここではこの有効固有ひずみ分布を次式の Fourier 級数で近似した。

$$\epsilon_{xi}^* = \sum_{k=1}^{10} a_k \cos(2\pi ky/B) \quad a_k: \text{定数}$$

有限要素法を用いて測定方程式を作成し、前述の ϵ_{xi} を計測データとして残差 2 乗和を最小にする条件から上式の未定係数 a_k を求めた。得られた有効固有ひずみの直線成分 ϵ_{xi}^* の最確値を Fig. 7 に示す。また、この固有ひずみ分布 ϵ_{xi}^* を用いて有限要素法により計測位置

Fig. 7 Most probable values of linear component $\hat{\epsilon}_{xl}^*$ of effective longitudinal inherent strain and relaxed strains $\hat{\epsilon}_{xl}$ due to cutting Li-specimens out from R-specimen

Fig. 8 Remained elastic strains in Li-specimens

Fig. 9 Distribution of effective longitudinal inherent strain on the cross section of the weld line

($x=75$ mm) で再現された弾性ひずみ分布 $\hat{\epsilon}_{xl}$ を Fig. 7 の実線で示す。図から判るように計測ひずみと再現されたひずみとは極めて良く一致しており、この固有ひずみ成分の推定の精度が高いことが認められる。

3.3.2 溶接線方向固有ひずみの非直線成分 ϵ_{xn}^* の推定

試験体 R から切り出された後の各 L_i 片に残留する応力状態では L_i 片の中央部付近で (13) 式が成立する。したがって、直接計測できる弾性ひずみ ϵ_{xn} の逆符号として溶接線方向固有ひずみの板厚内非直線成分 ϵ_{xn}^* が推定される。そこで、ここでは ϵ_{xn}^* の代りに各 L_i 片で直接計測した弾性ひずみ ϵ_{xn} の代表的な測定例を Fig. 8 に示す。

3.3.3 溶接線方向有効固有ひずみと 3 次元応力 $\{\sigma^B\}$

溶接線方向有効固有ひずみ ϵ_x^* は前述の板厚内直線成分 ϵ_{xl}^* と非直線成分 ϵ_{xn}^* ($= -\epsilon_{xn}$) の和として与えられるが、それを Fig. 9 に示す。この固有ひずみによって生成される 3 次元応力 $\{\sigma^B\}$ は 3 次元有限要素法に基づいて解析されるが、その際に用いた要素分割は要素数: 420, 節点数: 660, 未知節点変位数: 1745 であり、計算実行時間 (C. P. U. time) は 406 秒であった (ACOS シリーズ NEAC システム 900 による)。推定された 3 次元応力 $\{\sigma^B\}$ の板厚に沿う分布の例を Fig. 10 に示す。

3.4 3 次元溶接残留応力分布

3.2 節, 3.3 節で求められた 3 次元応力成分 $\{\sigma^A\}$ および $\{\sigma^B\}$ の和として、極厚板エレクトロ・スラグ溶接継手の 3 次元残留応力 $\{\sigma\}$ が得られた。

推定された溶接線中央部の表面における残留応力分布を Fig. 11 に示す。推定値は同図中の検証用の直接計測値と非常に良く一致していることが認められる。この直

Fig. 10 Estimated distributions of stresses $\{\sigma^B\}$ due to longitudinal inherent strain (ε_z^*)

Fig. 11 Welding residual stresses on the surface of R-specimen

接計測値は本法による3次元溶接残留応力の推定には故意に用いられていない。このことから、ここで用いた測定理論の仮定が妥当なものであり、推定される3次元残留応力分布は十分な信頼性を有するものと考えられる。なお、表面上の $y=50$ mm 付近で残留応力は特異な分布を示しているが、横断面マクロの概形と対応してみると、この部分は熱影響部 (HAZ) に一致していることが

Fig. 12 Estimated residual stresses along y-axis

Fig. 13 Estimated residual stresses on the cross section

認められる。

次に、直接計測できない板内部の3次元残留応力分布を示すが、測定理論では板の表面と内部に取り扱い上の差はないので、内部応力の推定値の精度は表面応力のものと同程度と考えられる。Fig. 12 に板厚中心 $z=0$ における y 軸に沿う残留応力分布を示す。HAZ ($y=60$ mm) の位置に高い応力が生じていることが認められる。Fig. 13 は板厚に沿う残留応力分布を示すが、HAZ 付近で板厚中心から表面にかけて大きく応力変化している様子が

判る。

4. 結 言

本研究ではすでに著者らが示した3次元残留応力測定原理の中の固有ひずみを媒介とする測定理論を長い溶接継手に生じる固有ひずみ分布特性に基づいて単純化し、この測定理論の妥当性と実用面での有用性を示すために極厚板のエレクトロ・スラグ溶接継手の3次元残留応力の測定を行なった。得られた結論を要約すると以下のようになる。

(1) 長い溶接長を有する溶接継手では溶接の始・終端を除いて固有ひずみ分布は溶接線方向に一定とみなせることから、3次元固有ひずみ成分を横断面内固有ひずみと溶接線方向固有ひずみに分離して3次元残留応力が測定できることを示した。

(2) 横断面内固有ひずみによる応力は溶接線端部より板厚程度内部に入れば平面ひずみ状態にあるため、溶接線方向に垂直に切り出された薄板 T 片に残留する平面応力状態の応力を計測することにより、直接 (2) 式から決定できる。

(3) 溶接線方向固有ひずみによる応力は溶接線に沿って切り出された何枚かの薄板 L_i 片の溶接線方向弾性ひずみを計測することにより溶接線方向固有ひずみを求め、これによって推定できる。この L_i 片の実用的な切り出し方法にはその薄板の切断面の法線を板厚方向とする L_e 法と板幅方向に法線を持つ L_s 法の2つがあるこ

とを示した。

(4) 極厚板エレクトロ・スラグ溶接継手に生じた溶接線中央横断面付近の3次元残留応力分布を理論的に正しい測定法に基づいて初めて明らかにした。 L_i 片の切り出し方法は L_s 法を用いた。本測定理論による3次元残留応力測定値と試験体表面での直接計測値が非常に良く一致したことから、推定された3次元残留応力分布全体の信頼性を明らかにすると共に、この方法の実用性を明らかにした。

最後に、本論文を御討議いただいた溶接学会溶接構造研究委員会分科会(主査佐藤邦彦教授)の各委員に深謝いたします。また、実験に協力いただいた大阪大学溶接工学研究所の古木良一技官の労に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Y. Ueda, K. Fukuda and S. Endo: A Study on the Accuracy of Estimated Residual Stresses by the Existing Measuring Methods, Trans. JWRI (Welding Research Institute of Osaka Univ., Japan), 4-2(1975), pp. 117-121.
- 2) 上田幸雄, 福田敬二, 中長啓治, 円道節夫: 残留応力の有限要素法に基づく測定原理と推定値の信頼性, 日本造船学会論文集, 138 (1975), pp. 525-533, および Trans. JWRI, 4-2 (1975), pp. 123-131.
- 3) 上田幸雄, 福田敬二, 谷川雅之: 固有ひずみ論に基づく3次元残留応力測定法, 日本造船学会論文集, 145 (1979), pp. 203-211, および Trans. JWRI, 8-2 (1979), pp. 248-256.
- 4) 福田敬二: 残留応力測定的一般理論と3次元溶接残留応力測定法の開発に関する研究, 大阪大学提出学位論文 (1980年1月)