

コンター法を用いた残留応力測定

大阪府立大学大学院

○河尻 義貴
柴原 正和
生島 一樹
河原 充
内田 友樹
宇野 新平
秋田 貢一

日本ニューマチック工業株式会社

日本原子力研究開発機構

Measurement of Welding Residual Stress Using Contour Method

by Yoshitaka KAWAJIRI, Masakazu SHIBAHARA, Kazuki IKUSHIMA, Atsushi KAWAHARA, Tomoki UCHIDA, Shimpei UNO, and Koichi AKITA

1. 緒言

近年、船舶・橋梁などの大型鋼構造物の建造において、溶接は必要不可欠である。しかしながら、溶接金属部に発生する溶接残留応力は脆性破壊強度や疲労強度の低下を招き、また応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking : SCC) に極めて大きな影響を及ぼす。したがって、溶接継手における残留応力分布について評価することは重要であると言える。Fig. 1 に様々な残留応力測定手法の大きな分類を示す。残留応力測定手法は大きく非破壊法と準破壊法、破壊法の 3 種類に区分される。非破壊法としては継手表面の残留応力測定に適した X 線回折法や中性子回折法が挙げられるが、X 線回折法では溶接継手の表層数 μm における残留応力しか測定できない。また、中性子回折法は溶接継手内部まで測定可能であるが利用可能な設備に限られており、かつ莫大なコストを要する。一方、準破壊法の代表的な測定手法としては DHD (Deep hole drilling) 法が挙げられる。DHD 法は溶接継手表面および内部の残留応力測定が可能であるが、測定可能な領域が限定的である。そこで本研究では、比較的簡便に溶接継手表面および内部における残留応力測定が可能で、測定装置の高精度化により近年注目されているコンター法に注目した。コンター法は破壊法に分類され、溶接継手を切断した際の残留応力解放に伴う切断面の弾性変形量を元に、弾性 FEM 解析により切断前の残留応力分布を算出する手法である。本研究では、コンター法により測定した残留応力分布と熱弾塑性 FEM 解析を用いて算出した残留応力分布とを比較検討することにより、コンター法の有用性について検討を行った。また、溶接継手の切断方法の違いが残留応力測定結果に及ぼす影響に関して検討し、各切断方法を用いた際の残留応力測定結果の特徴について整理し、考察を行った。さらには、実機試験体の内部残留応力測定に対しコンター法を適用し、その有用性に関して検討を行った。

2. コンター法による残留応力測定の原理

Fig. 2 にコンター法を用いた残留応力測定原理の概略を示す。コンター法では次の①～⑤の流れに従って残

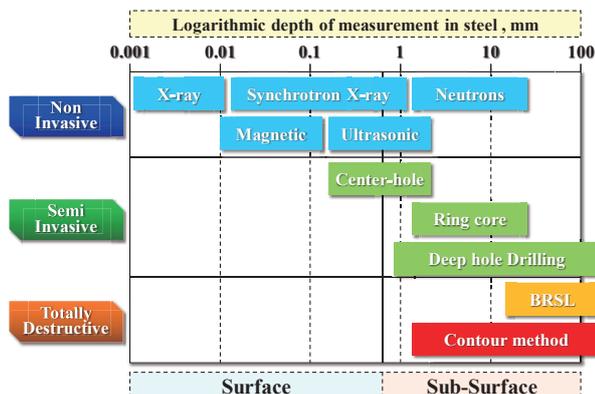


Fig. 1 Methods of residual stress measurement.

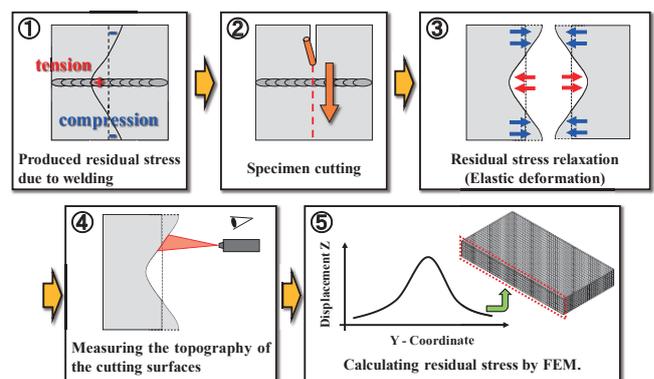


Fig. 2 Contour method principle.

留応力の測定を行う。

- ① 金属材料の溶接部には残留応力が生じる。
- ② 残留応力を評価する位置で溶接部材を切断する。
- ③ 切断面において、残留応力の解放に伴い凹凸の弾性変形が生じる。
- ④ レーザー変位計を用いて切断面の形状を測定する。
- ⑤ 測定した切断面の変位分布に対して移動最小二乗法を用いたスムージング処理を施し、FEM モデルに強制変位として付与し、弾性解析を行う。

以上より、溶接部材の切断面の全領域において切断以前の残留応力分布を測定することが可能である。

3. 熱弾塑性 FEM 解析の妥当性検証

コンター法による残留応力測定結果に関して述べる前に、熱弾塑性 FEM 解析による算出結果と中性子回折法による測定結果の比較により、熱弾塑性 FEM 解析の妥当性検証を行う。Fig. 3 に本章における残留応力測定対象を示す。長さが 200 mm、幅が 200 mm、板厚が 19 mm の SM490 材に対し、同図のようにビードオンプレート溶接を行う。溶接条件は電流が 300 A、電圧が 32 V、溶接速度が 70 cm/min である。Fig. 4 に溶接線方向中央断面における溶接線方向の残留応力分布を示す。同図の (a) のコンター図は FEM 解析により算出された残留応力分布を示し、(b) は中性子回折法によって測定された残留応力分布を示す。また、Fig. 4 の AA' 間に示すように試験片表面から 4 mm の深さにおける FEM 解析と中性子回折法の比較を Fig. 5 の (a) に示す。同図の (b) は Fig. 4 の BB' 間における厚さ方向の残留応力分布の比較を示す。同図内の緑色の線は FEM 解析による算出結果、黒い×印は中性子回折法による測定結果を示す。Fig. 4, Fig. 5 より、両者の残留応力分布が極めて良好に一致していることが分かる。したがって、以降の検討では FEM 解析の算出結果とコンター法の測定結果を比較することにより、コンター法の有用性について検討を行う。

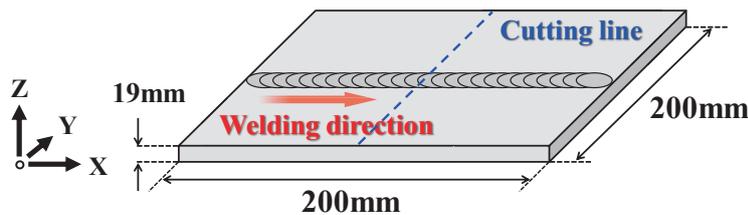


Fig. 3 Specimen of bead on plate welding.

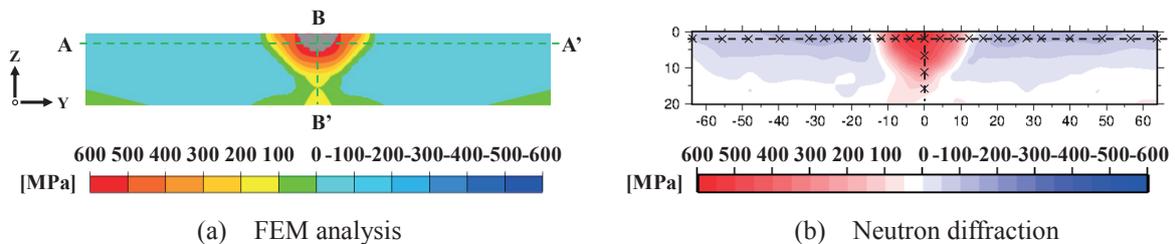


Fig. 4 Comparison of longitudinal stress between FEM and Neutron diffraction.

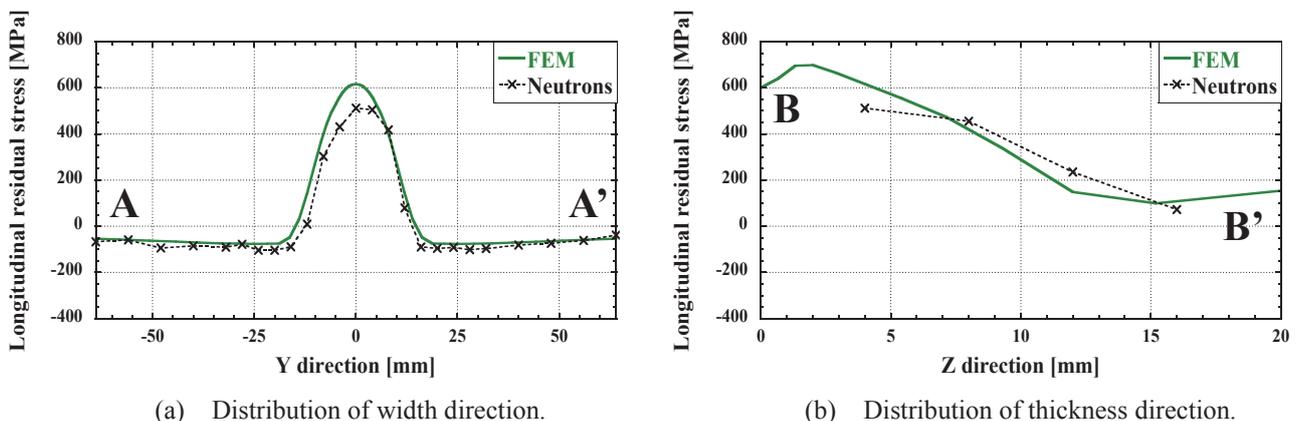


Fig. 5 Comparison of distribution of longitudinal residual stress between FEM and Neutron diffraction.

4. コンター法を用いた残留応力測定

本章では、2章で述べたコンター法を用いた残留応力測定の流れのそれぞれについてより詳しく述べる。

4. 1 切断面形状の測定

残留応力測定対象はビードオンプレート溶接である。試験片の寸法は長さ 200 mm、幅 200 mm、板厚 12 mm であり、材料は SM490 材である。また、溶接条件は電流が 300 A、電圧が 32 V、溶接速度が 40 cm/min である。Fig. 6 に試験片の切断面を示す。試験片の切断面では、切断時の残留応力の解放に伴い弾性変形が生じ、切断面形状をレーザー変位計を用いて測定する。Fig. 7 に切断面形状の測定結果を示す。同図より、切断面には切断時の傷やレーザー変位計の測定誤差による値のばらつきが見られる。同図の変位分布を用いた場合、変位分布のばらつきが残留応力測定結果に悪影響を及ぼすと考えられる。そこで、切断面形状の測定結果の生データに対して、次のようなスムージング処理を施す。

4. 2 変位分布のスムージング処理

切断時の傷として、一方の切断面に凸型の変位が生じた場合、もう一方の切断面には凹型の変位が生じる。また、被溶接材の両切断面の変位分布の測定結果は、幅方向中央部を軸として左右対称となる。したがって、片方の切断面における測定結果を左右反転し、両切断面の測定結果の平均値をとることによって、切断時の傷による値のばらつきは概ね取り除かれる。

4. 3 スプライン補間

切断面変位分布の測定点が FEM モデルの節点数に満たない場合、測定点間の変位データをスプライン法を用いて滑らかな曲線で補間することにより、変位データ数と節点数を一致させる。Fig. 8 にスプライン補間の概略を示す。式 (1) に示す 3 次スプライン補間式を用いて切断面内において変位データの補間を行う。

$$S_i(x) = (x - x_i)^3 a_i + (x - x_i)^2 b_i + (x - x_i) c_i + d_i \quad (1)$$

4. 4 移動最小二乗法によるスムージング処理

また、測定結果にはレーザー変位計の計測誤差などの平均化処理では取り除ききれない小さな誤差が含まれている。このような誤差を取り除き滑らかな変位分布を作成するために、移動最小二乗法を用いたスムージング処理を行う。Fig. 9 に移動最小二乗法を用いたスムージング処理の概略を示す。注目点周辺のいくつかの変位データ群より式 (2) のような最小二乗平面を作成する。

$$z = ax + by + c \quad (2)$$



Fig. 6 Cut surface of specimen.

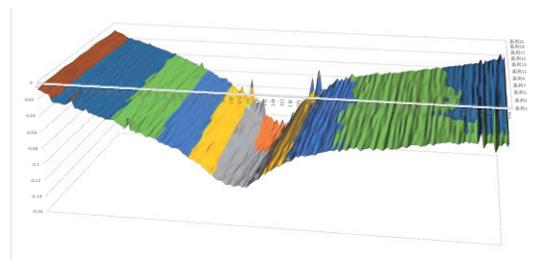


Fig. 7 Displacement of cutting section. (before smoothing)

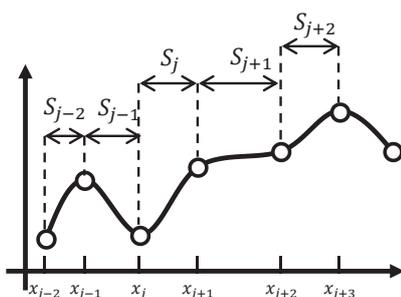


Fig. 8 Outline spline interpolation.

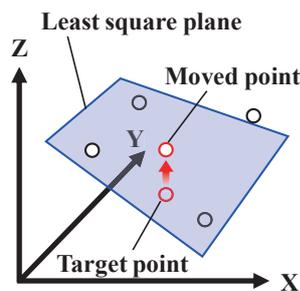


Fig. 9 Displacement of cutting section.

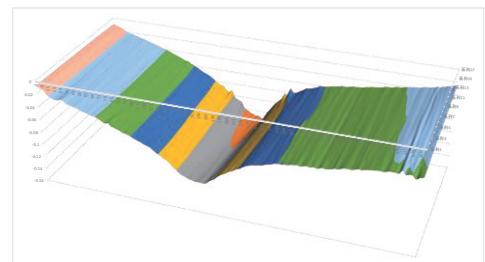


Fig. 10 Displacement of cutting section. (after smoothing)

注目点の値を求めた最小二乗平面上の値へと修正し、切断面の全領域において同様の処理を行うことによって滑らかな変位分布が作成される。Fig. 10 にスムージング処理後の変位分布を示す。また、Fig. 11 にスムージング処理前後の変位勾配の比較を示す。黒色の線はスムージング処理前の変位勾配、赤色の線はスムージング処理後の変位勾配を示す。同図より、スムージング処理を施すことによって比較的滑らかな変位分布が作成されたことが分かる。

4. 5 弾性解析による残留応力分布の算出

Fig. 7, Fig. 10 に示すスムージング処理前後の変位分布それぞれに関して弾性 FEM 解析によって残留応力の算出を行う。Fig. 12 に弾性解析モデルの寸法および拘束条件を示す。解析モデルの寸法はビードオンプレート溶接試験片の切断後の寸法とする。試験片の切断面に相当する面に対して、Fig. 7, Fig. 10 の変位分布を強制変位として付与する。なお、ヤング率は 209 GPa、ポアソン比は 0.290 である。Fig. 13 に FEM 解析結果とコンター法による測定結果を示す。同図 (a) は FEM 解析による算出結果、(b) はスムージング処理前の変位分布を用いた場合のコンター法の測定結果、そして、(c) はスムージング処理後の変位分布を用いた場合のコンター法の測定結果である。また、同図 AA'間の残留応力分布の比較を Fig. 13 に示す。Fig. 12, Fig. 13 より、スムージング処理前後のいずれの測定結果も FEM 解析結果と残留応力分布が良好に一致しているが、スムージング処理を施すことによってより滑らかな残留応力分布が測定されたことが分かる。以上のように、コンター法を用いた残留応力測定を実施する際には、変位分布の測定データに対して移動最小二乗法やそれと同等のスムージング処理を最低限施す必要があることが分かる。

5. 切断方法の違いが残留応力測定結果に及ぼす影響に関する検討

コンター法は破壊法であるため、必ず切断加工を必要とする。切断方法にも様々なものがあり、切断方法が異なる場合、切断精度の違いによって残留応力測定結果に違いが生じる可能性がある。そこで本研究では、エンドミル切断、ワイヤーカットの 2 種類の切断方法で試験片を切断し、コンター法の残留応力測定結果と FEM 解析結果を比較することで、それぞれの切断方法をとった際の残留応力測定結果の特徴を捉え、整理し考察する。

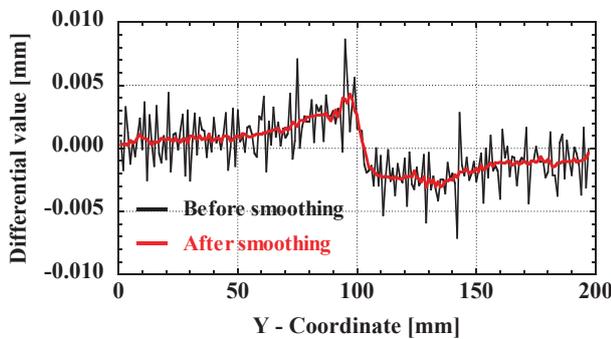


Fig. 11 Distribution of different value.

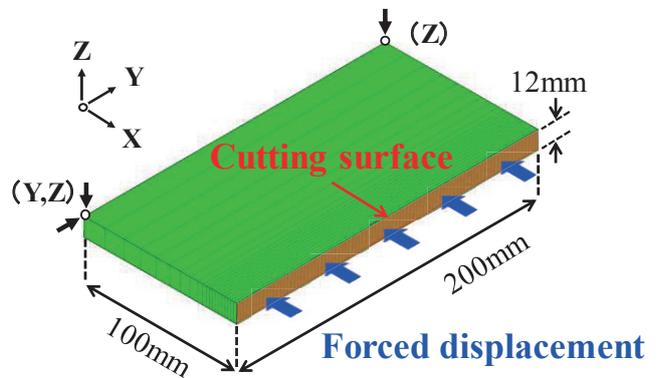


Fig. 12 Elastic analysis model.

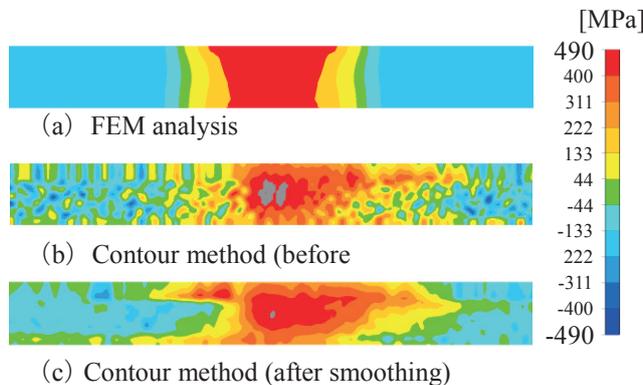


Fig. 13 Comparison of longitudinal residual stress.

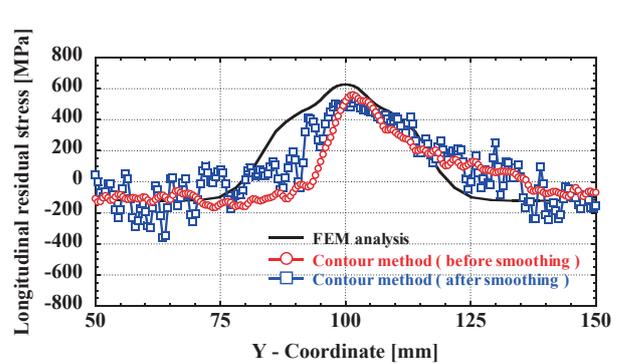


Fig. 14 Comparison of longitudinal residual stress.

5. 1 ワイヤークットの場合の残留応力測定結果の特徴

Fig. 15 にワイヤークットによって切断した際の残留応力測定結果を示す. 同図 (a), (b), (c) は電流と電圧は一定で溶接速度をそれぞれ 40 cm/min, 50 cm/min, 70 cm/min とした場合の測定結果のコンター図と板厚中央部における残留応力分布の比較である. それぞれの場合について同様の溶接条件で 2 つの試験片で残留応力の測定を行った. なお, 切断に使用したワイヤーの直径は 0.2 mm である. ワイヤークットを用いた際の測定結果の特徴として, いずれの溶接条件においても 2 ケースの測定結果の再現性が極めて高いことが分かる. しかしながら, 溶接速度 40 cm/min の Specimen 1 において切断中にワイヤーが断線し, 測定結果に大きな影響を及ぼしたケースがあった. また, 切断方向に依存するような形で残留応力分布が一方向に偏る傾向が見られた. いずれのケースにおいても同様の傾向があることから, これはワイヤークットを用いた際の測定結果の特徴であると考えられる.

5. 2 エンドミル切断の場合の残留応力測定結果の特徴

Fig. 16 にエンドミルによって切断した際の残留応力測定結果を示す. 同図 (a), (b), (c) の溶接条件はそれぞれ Fig. 15 の溶接条件と同様である. エンドミルを用いて切断した際は, ワイヤークットの断線時のように厚さ方向全体に渡る大きな傷が生じることは無いが, Fig. 16 のコンター図から分かるように, 切断面の板表裏面側で比較的大きな傷が生じやすく, 残留応力測定結果に悪影響を及ぼすことが分かる. しかしながら, 測定結果の再現性は十分高く, FEM 解析結果とも概ね良好に一致していることから, エンドミルを用いた場合のコンター法による残留応力測定に関しても, ワイヤークットと同様に十分に有用であるといえる.

以上が, 各切断方法を用いた場合のコンター法による残留応力測定結果の特徴である. いずれの切断方法を用いた場合も十分な測定結果が得られたことが分かる.

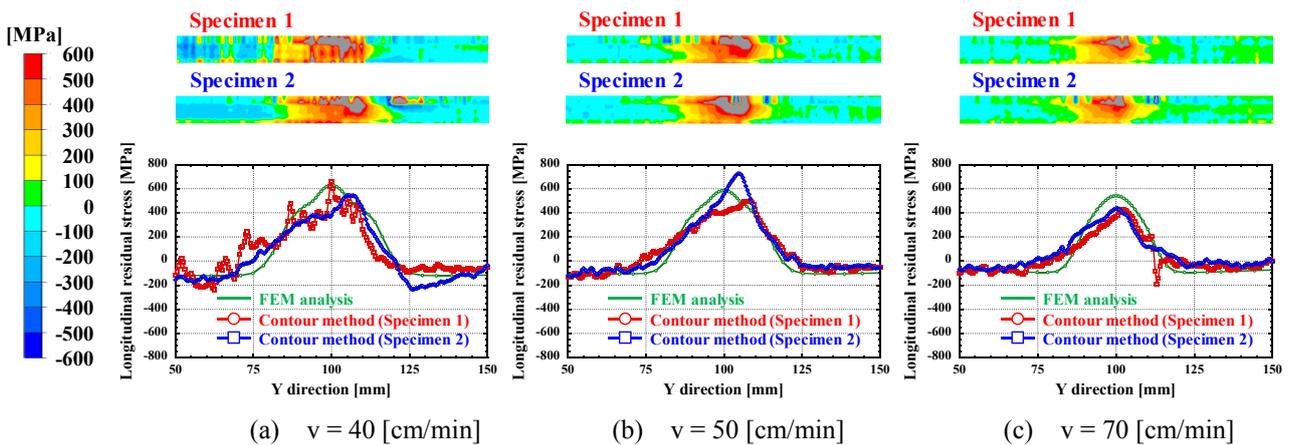


Fig. 15 Distribution of longitudinal residual stress when cutting with wire cut.

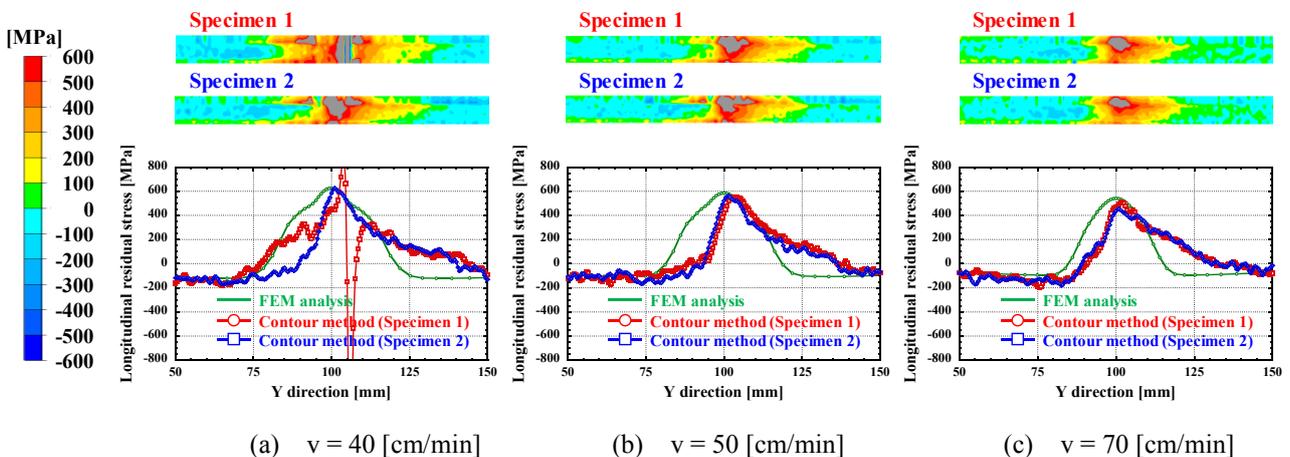


Fig. 16 Distribution of longitudinal residual stress when cutting with endmill.



Fig. 17 Bead on plate welding Specimen.

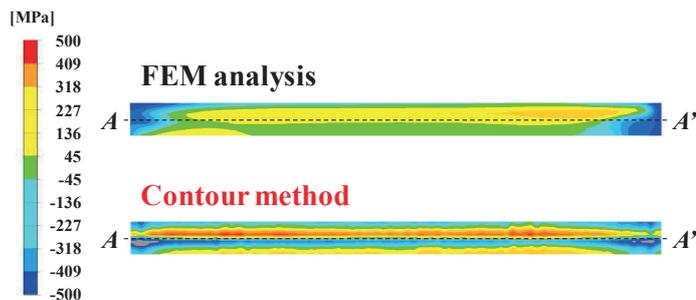


Fig. 18 Distribution of Transverse residual stress between FEM and Contour method.

7. 溶接線垂直方向成分の残留応力測定に関する検討

前章では、残留応力の溶接線方向成分の測定に関して検討を行った。本章では、溶接線垂直方向成分の残留応力測定に関する検討について述べる。測定対象は前章までと同様のビードオンプレートであり、長さが 200 mm、幅が 200 mm、板厚が 12 mm の SM490 材、また溶接条件は 95 A、30 V、20 cm/min である。Fig. 17 に示すように試験片を溶接線に沿って切断する。そして、切断面における Y 軸方向の凹凸形状を測定し、測定データに対して前章までと同様に移動最小二乗法を用いたスムージング処理を施した後に弾性解析を実施する。Fig. 18 に FEM 解析結果とコンター法による測定結果の比較を示す。また、同図 AA'間における板内部での両者の残留応力分布の比較を Fig. 19 に示す。Fig. 18, Fig. 19 より、FEM 解析結果とコンター法の測定結果が板内部において良好に一致している。これより、溶接線垂直方向成分の残留応力測定に対してコンター法が有用であることが分かる。

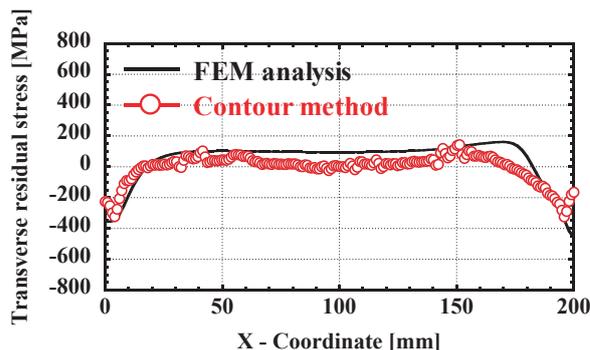


Fig. 19 Distribution of Transverse residual stress at the thickness center.

8. 実機試験体の残留応力測定に対するコンター法の適用に関する検討

本章では、コンター法を実機試験体の溶接残留応力測定に適用し、コンター法の有用性について検証する。Fig. 20 に残留応力測定の対象である実機試験体の寸法を示す。また Fig. 21 に溶接順序を、Table 1 に入熱条件を示す。一部に直径 40 mm の穴の開いた母材の表面に 2 層の円周溶接を行い、その後、裏面に Fig. 22 に示すように計 8 パスの隅肉溶接を行う。溶接後の実機試験体を Fig. 20 の青色の点線で示す位置においてワイヤーカットを用いて切断し切断面の形状を測定した後、コンター法による残留応力測定を行う。切断時のワイヤー径は 0.25 mm である。Fig. 22 に切断面における X 軸方向成分の残留応力について、FEM 解析結果とコンター法による測定結果の比較を示す。同図において両者の残留応力分布の傾向がおおよそ一致していることが分かる。これより、実機試験体についてもコンター法による残留応力測定が有用であるといえる。

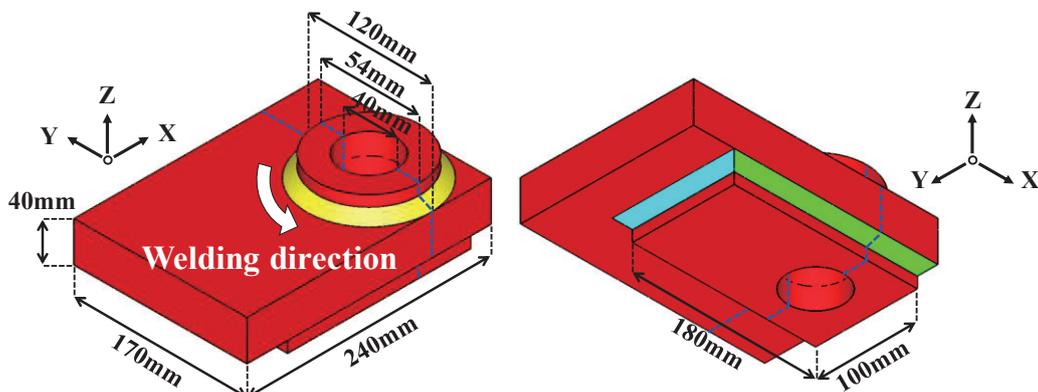


Fig. 20 Model used for thermal elastic plastic analysis.

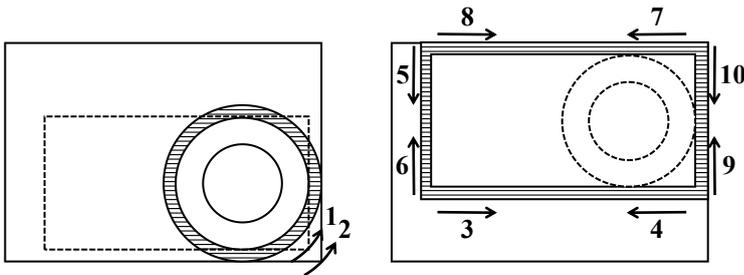


Fig. 21 Welding sequence.

Table 1 Welding condition.

	I [A]	V [V]	v [mm/sec]
First layer	280	30	4.5
Second layer	230	25	4.5

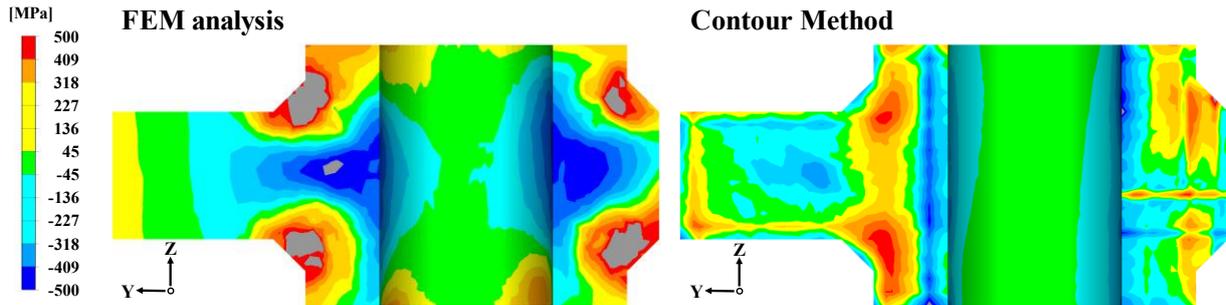


Fig. 22 Distribution of longitudinal residual stress between FEM analysis and contour method.

9. 結 言

本研究では、溶接金属の切断面形状の測定結果に含まれる誤差のスムージング方法について提案し、溶接継手の表面および内部の残留応力測定におけるコンター法の有用性に関する検討を行った。また、切断方法が異なる場合の残留応力測定結果の比較検討を行った。さらに、溶接線垂直方向成分の残留応力測定および実機試験体の残留応力測定に対してコンター法を適用し、その有用性に関して検討を行った。その結果、以下の知見を得た。

- 1) ビードオンプレート溶接における溶接線方向成分残留応力分布に関して、熱弾塑性 FEM 解析による算出結果と中性子回折による測定結果を比較した結果、板内部において両者が良好に一致し、熱弾塑性 FEM 解析による残留応力分布の評価が妥当であることが分かった。
- 2) 試験片切断時に切断面に生じた傷やレーザー変位計による切断面形状の測定誤差を取り除くために、切断面の変位分布に対し移動最小二乗法を用いたスムージング処理を行った。その結果、測定データと比較してより滑らかな変位分布を作成することができた。また、スムージング処理後の変位分布を用いることによって、コンター法において滑らかな残留応力分布を作成することができた。
- 3) エンドミル、ワイヤーカット 2 通りの切断方法について、各切断方法をとった場合の残留応力測定結果がもつ特徴を整理した。その結果、いずれの場合も FEM 解析結果と良好に一致する測定結果が得られたが、エンドミルと比較して、ワイヤーカットの場合はより測定結果の再現性が高いことが分かった。
- 4) 同じくビードオンプレート溶接試験片について、試験片を溶接線に沿って切断した際の切断面における溶接線垂直方向成分の残留応力測定に対してコンター法を適用した結果、板内部において FEM 解析結果とコンター法の測定結果の両者が良好に一致した。ゆえに、溶接線垂直方向成分の残留応力測定に対してコンター法は有用であるといえる。
- 5) 実機試験体の残留応力測定に対してコンター法を適用した結果、FEM 解析結果とコンター法の測定結果の両方で残留応力分布のおおよその傾向が一致することを確認した。したがって、実機試験体の残留応力測定に対してコンター法が有用であるといえる。

参考文献

- 1) Hidekazu Murakawa, Seiichirou Tsutsumi, Huang Hui, Toshiyuki Miyazaki : Measurement of Welding Residual Stress in Thin and Thick Weld Joints Using Contour Method, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.97, No.250, 202-203, 2015-09
- 2) Daisuke Takakura : Multi-Layer Analysis and Its Validation Using Contour Method, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.99, No.420, 354-355, 2016-09
- 3) Ramy Gadallah, Seiichiro Tsutsumi, Hidekazu Murakawa : Prediction of Residual Stress Produced by LTT Welding Material and its Validation Using the Contour Method, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.99, No.420, 354-355, 2016-09
- 4) Houich Kitano, Shigetaka Okano, Masahito Mochizuki : Improvement of Residual Stress Measurement by Deep Hole Drilling Technique, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.99, No.433, 226-227, 2014-04
- 5) Kazuki IKUSHIMA, Shinsuke ITOH and Masakazu SHIBAHARA : Development of Parallelized Idealized Explicit FEM Using GPU, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.31, No.1 (2013) p23-32
- 6) Yukio Ueda, Keiji Fukuda, Keiji Nakacho, Setsuo Endo : A New Measuring Method of Residual Stresses with the Aid of Finite Element Method and Reliability of Estimated Values, Journal of Society of Naval Architects of Japan, Vol.1975, No.138, p499-507
- 7) Yukio Ueda, Keiji Fukuda, Minoru Fukuda : A Measuring Theory of Three Dimensional Residual Stresses in Long Welded Joints, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.49, No.12, 845-853, 2011-08
- 8) Makoto Hayashi, Shinobu Ohkido, Nobuaki Minakawa, Yukio Morii : Development of Residual Stress Measurement Apparatus by Neutron Diffraction and Its Application to Bent Carbon Steel, Vol.47, No.4, p420-426, 1998-04
- 9) AKITA Koichi, SUZUKI Hiroshi : Residual Stress Measurement by Neutron Diffraction, RADIOISOTOPES, 59, 741-750, 2010
- 10) Micheal B. Prime, Adrian T. DeWald : Practical Residual Stress Measurement Methods, p109-138, 2013
- 11) GADALLAH Ramy, MURAKAWA Hidekazu : Validation of the Contour Method Considering the In-plane Displacements at the Cut Surface, Transactions of JWRI, Vol.43, No.2, p53-63, 2014
- 12) Tatsushi SATO, Seiji SATO, Hidetaka MIYAKE, Koichiro HATTORI Hitoshi TOKURA : Wire-break prevention on Wire Electrical Discharge Machining, Journal of The Japan Society of Electrical Machining Engineers, Vol.48, No.118, p108-117, 2014