X 線法および穿孔法による突き合わせ溶接板の残留応力測定*

吉久悦二**

Residual Stress Measurements in Butt-Welded Plates by X-Ray and Hole-Drilling Strain-Gage Methods*

by Etsuji YOSHIHISA**

Abstract; Welding residual stresses are frequently of interest in fracture evaluations of structural components. Although some data are available on them in small-sized specimens, data for large-sized plates, in particular with a comparison of different measurement methods, are scarce.

The objects of this study were to investigate the effect of the specimen size on the welding induced residual stress and to compare the data obtained by two different methods. One was X-ray diffraction strain measurement which was the nondestructive technique. The other was hole-drilling strain-gage method which was the semi-destructive one and appropriate in field application. Three pairs of different-sized plates made of mild steel, JIS SB410, were butt-welded in the arc welding process with 5 runs to make three types of specimens. The sizes of the specimens were 1530 mm \times 600 mm, 765 mm \times 1235 mm and 770 mm \times 600 mm. Longitudinal and transverse residual stresses were measured along the weld line and the transverse line which crossed at the midpoint of the weld line. The results of this paper are summarized as follows:

(1) The shapes of the residual stress distributions in plates butt-welded with 5 runs, can be inferred from those for Bead-on-plate with single run, obtained by Ueda et al. with thermal elasto-plastic analysis of the welding process, and the longitudinal residual stresses along the weld lines are near the yield point level of the basic material.

(2) In the plates butt-welded under the same condition, the above mentioned residual stresses along the weld lines increase, as the weld lines become longer. On the other hand, the widths of the plates give little influence.

(3) The shapes of the residual stress distributions in the plates cut in the direction perpendicular to the weld lines remain similar to the shape before cutting, but the longitudial stresses along the weld lines decrease.

(4) The longitudinal and transverse stresses along the weld lines, obtained by hole-drilling method are much higher than those by x-ray method and most of the longitudinal stresses exceed the yield strength. Local yielding in the periphery of the hole cause errors in experimentally determined residual stresses. In the range near the yield level, hole-drilling method is considered to lose accuracy in the measurement of stresses.

Keywords; Residual stress, Butt-weld, X-ray diffraction, Hole-drilling method

**機械研究部 Mechanical Safety Research Division

– 1 –

^{*}The 3rd International Conference on Residual Stresses (23 ~ 26, July 1991) にて一部発表

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-92

1. 緒 言

残留応力は外部荷重が加えられていない状態にお いて既に物体中に存在している応力であり、鋳造、機 械加工そして溶接等の機械・構造物の製造、組立過 程ばかりでなく、使用状態における偶発的過大荷重 や修理、改造によっても発生する。機械・構造物の 供用時には,既に存在している残留応力に外部荷重 が重畳されて作用することから、その部材の破壊現 象、特に疲労に残留応力が悪影響を及ぼすことが少 なくない。化学プラント等に見られるような効率の 追求による負荷の過酷化と経済面からの要求が強く なってきた長期使用における装置の構造健全性の確 保の双方を満たすため、限界に近い設計法が採られ る現在、残留応力を考慮に入れることが急務であり、 実機・構造物での残留応力分布のデータを蓄積する 必要性は益々増大している。近年、残留応力場中に 発生したき裂の成長挙動を評価する試み^{1)~5)}がな され寿命推定について成果を納めているが、小型試 験片を対象に行われたものが多く、大型機械・構造物 の残留応力とはレベル、分布が異なっている可能性 もある。この成果を活かすためにも、実機等に対し て非破壊的に精度良く残留応力を測定する必要があ るが、測定が困難なために実測例は少ない。

本報では,非破壊的応力測定法として技術が確立 されていると言われている X 線応力測定法と実機へ の適用が簡単で半破壊的測定が可能である穿孔法を 用いて,実機クラスの大型鋼板について代表的な残 留応力の一つである溶接残留応力の測定を行って,両 者の結果について比較を行うとともに,同一方法で 溶接した大きさの異なる板の残留応力並びに大きな 溶接板を機械加工により切断した際の残留応力分布 の変化について調べたので,その結果について報告 する。

2. 供試体および実験方法

供試材は厚さが 14 mm, 長さが約 3000 mm, 幅が 約 1830 mm のボイラ用炭素鋼鋼板 SB410 であり, その化学成分および機械的性質を各々Table 1, Table 2 に示す。これを圧延方向と直角に溶断して,幅 300 mm ×長さ 1830 mm,幅 600 mm ×長さ 915 mm および幅 300 mm ×長さ 915 mm の板を切り出し た。そして,これら一対ずつを 100°C に余熱した後, Table 3 に示す条件で 5 層の突き合わせ溶接を行っ

Fable 1	Chemical composition of material u	sed
	供試体の化学成分 (wt.%)	

 С	Si	Mn	Р	S
0.15	0.25	0.66	0.012	0.002

Table 2	Mechanical	properties	of	material	used
	供試材の機構	威的性質			

Yield Strength	Tensile Strength	Elogation
(MPa)	(MPa)	(%)
274	411	34

Table 3	Welding condition
	溶接条件

Pa	ass Method	Current	Volt	Speed	Heat-Input
		(A)	(V)	(cm/mi	n) (kJ/cm)
1	Manual Arc	170	30	16	19
2	Submerged Arc	520	38	50	24
3	Submerged Arc	530	38	40	30
4	Submerged Arc	530	36	50	23
5	Submerged Arc	530	36	30	38



て、タイプA、タイプBおよびタイプCの3種類 の供試体を作成した。各々の形状をFig.1に示すが、 いずれも角変形(横曲がり)量 2δ が4~5°と同程度 であり、溶接線方向に若干の縦曲がり、波打ちが認め られた。なお、溶接部の余盛りをグラインダーによ り除去した後に測定に供した。

X線による残留応力測定は、理学電機製の応力測定 専用装置 MSF-2M を用いて X線入射角 ψ を一定にし て行い、 ψ には 9.56°, 24.56°, 39.56°および 54.56° の 4 種を選定した。回折角 2 θ のピーク位置は半価幅 中点法により決定し、 $\sin^2 \psi - 2\theta$ 線図の傾きから応 力を算出している。また、X線は Cr-K α 線、回折面 は (2,1,1) 面であり、照射域は縦、横共に 3 mm の 矩形領域である。X線は照射表面近傍の極く浅い領 域にしか浸透せず、測定結果は板表層部にある機械

-2 -

加工層の影響を受ける。これを除くために,電解研 磨によって厚さ 200 µm 以上にわたって表面層を除 去した後に測定を実施した。

穿孔法は Mather⁶⁾が最初に提案したもので,貫通 孔 (Through-Hole) と非貫通孔 (Blind-Hole) を あけるもの 2 種類の方法があるが,ここでは半破壊 的な方法として実機にも適用可能とされている微小 な浅い非貫通孔をあける方法を用いて,ASTM で



Fig. 1 Shapes and Dimensions of Specimens 供試体の形状および寸法

定められた基準⁷⁾に従って行った。使用したひずみ ゲージは Rendler と Vignis⁸⁾が推奨している 3 軸ロ ゼットタイプのもので,ゲージ長が 1.50 mm,ゲー ジサークルの直径は 5.14 mm である。その中心に MEASUREMENT GROUP 社のミリングガイド, モデル RS-200 を用いてエアーモータ駆動のドリル により直径約 2 mm, 深さ約 2.4 mm の円孔を開け, その際に解放されるひずみから残留応力を算出した。 なお,測定位置は X 線によるものと同じではない。

3. 実験結果および考察

3.1 X線法による残留応力

X線による残留応力測定は、溶接線上および溶接 線中央を直角に横切る線上で行った。以下では、溶 接線方向の応力を σ_y 、溶接線と垂直方向の応力を σ_x と表記する。3種類の中で最も溶接線の長いタイプA の供試体の表側(凹側)の残留応力分布をFig. 2 に 示す。溶接線上での σ_y は、端部を除いて 240 ~ 250 MPa であり、材料の降伏点に近い値にまで達してい



Fig. 2Residual stress distributions for specimen type A, measured by X-ray method
X線法によるタイプA供試体の残留応力分布



Fig. 3Residual stress distributions for specimen type B, measured by X-ray method
X 線法によるタイプ B 供試体の残留応力分布

ることが判る。X線の浸透深さは高々数10 μ であり、 測定される応力は極く表面薄層のものである。板厚 方向に応力が変化しない場合には、内部拘束による 残留応力の自己平衡性⁹⁾から、溶接線を横切る線上 の σ_y 、溶接線上の σ_x の測定値はバランスしなければ ならないが、結果はバランスがとれておらず、板厚 方向に応力変化があることを示唆している。これは 溶接時に生じた角変形や縦曲がりと座屈によるとみ られる板の波打ちが原因であると考えられる。また 角変形量がほぼ等しい他の供試体と比較して、溶接 線上の結果が左右非対称となる度合いが大きいのは、 溶接線が長いために縦曲がり、板の波打ちがより大 きくなっていることによるものと思われる。

Fig. 3 はタイプ A 供試体と比べて幅が約 2 倍, 溶 接線が半分になっているタイプ B の残留応力分布を 示したもので, 図中の〇, \triangle 印は供試体表側, \bigcirc , ▲印は裏側(凸側)での測定結果である。溶接線と直 角な線上での σ_y は中央(溶接線上)で高い引張りの ピークを示し, そこから離れると急減して圧縮応力と なり,端部に近づくにつれ, 徐々に引張り側へ移る傾 向がある。また,溶接線上の σ_y は表側で, 190 ~ 210 MPa と前記のタイプ A 供試体の場合より 40 MPa 程低い値となっており,端部へ近ずくと0に漸近す る。一方,溶接線上の σ_x の分布について見ると、中 央で引張り、両端で圧縮となっている。このような分 布形は、板上にビードを置いて行く Bead-on-Plate について熱弾塑性解析して得られた結果¹⁰⁾や1層突 き合わせ溶接を行った平板での実験結果¹¹⁾に近いも のである。しかし、表裏両側での残留応力値が異なっ ており、また溶接線に垂直な線上の σ_y と溶接線上の σ_x のアンバランス,溶接線上 σ_y 分布形の左右の非対 称性も認められ、この供試体においても溶接時の角 変形、溶接線方向での縦曲がりと波打ちの影響が現 れている。しかし、その程度はタイプ A 供試体の場 合よりも少ない。これは溶接線が短いために座屈に よる板の波打ち等が小さかったことによるものと考 えられる。

タイプ C での測定結果を示したのが Fig. 4 であ る。この供試体とタイプ B 供試体との違いは板幅が ほぼ半分になっている点だけである。全体的には, 2 つの供試体の残留応力分布は同様の傾向を示し, 溶 接線上中央部のσ_yの値もほぼ等しい。



Fig. 4Residual stress distributions for specimen type C, measured by X-ray method
X 線法によるタイプ C 供試体の残留応力分布



Fig. 5Redistributed residual stresses for specimen type A sectioned in transverse directionタイプ A 供試体の残留応力の切断による再分布



Fig. 6 Strain gage rosette arrangement for determining residual stress 残留応力測定用ロゼット型ゲージ

以上3つの供試体の結果について見ると、溶接線 上の σ_y は溶接線の長さに対応して増減しており、他 方、溶接される板の幅は溶接線上の σ_x を含めて、あ まり影響しないようである。そこで、溶接線の長さ の影響を明らかにするために、タイプA供試体を溶 接線に垂直な方向に機械加工により3等分、このう ち端部のもの1つはさらに2等分して、再分布した 後の残留応力測定を行った。その結果を示したもの が Fig.5で、図中の〇、△印は3等分した後に中央 部で得たデータ、●、▲印は端部をさらに2等分して 得たデータである。Fig.2に示した切断前のものと 比べて、溶接線上中央の σ_y は190~200 MPaでや はり約50 MPa低くなる。しかし、分布形には大き な変化がなく、ほぼ同様の形状を保っている。また、 板の採取位置と関係なしにこのような傾向が窺える。

3.2 穿孔法による残留応力

Fig. 6 に示すような半径 Rの円上に配置された 3 枚のゲージ要素①,②および③からなるロゼット型 ひずみゲージを一様な二軸応力状態にある薄い平板 に貼り付け、その中心に半径 R_0 の貫通円孔をあける 場合を考える。一様な一軸引張り力を受ける円孔付 き平板に対する解¹²⁾を用いれば、各要素が出力する ひずみの穿孔に伴う変化量を ε_1 、 ε_2 、 ε_3 として、二軸 応力状態に対する主応力 σ max、 σ min および要素① とそれにより近い主応力軸との成す角 β は次式で与え られる。

$$\sigma \max = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} - \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2}$$

$$\sigma \min = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} + \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2}$$

$$\tan 2\beta = (\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3)/(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)$$

ここで, Eを縦弾性係数, vをポアソン比とすると

$$A = -\frac{1+\nu}{2E} \cdot \frac{1}{r^2}$$
$$B = -\frac{1+\nu}{2E} \cdot \left\{\frac{4}{1+\nu} \cdot \frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4}\right\}$$
$$r = R/R_0$$

これらの式は、無限小のひずみゲージを用いて、一 様な平面応力状態にある平板に貫通孔をあけて測定 した時に厳密に成立する。微小孔であるため、穿孔 前の応力の一様性が完全に満たされなくても、実用 上問題とはならないが、非貫通孔でゲージの大きさ が有限な場合の解析は複雑で、このような閉じた形 の解析解は求められていない。Rendler と Vigness³⁾ は、貫通孔、非貫通孔周辺の応力状態が極めて類似 性が高いことから、係数 A、Bを適切に定めればこ れらの式を非貫通孔でゲージが有限の大きさを持つ 場合に流用できることを示した。Schajer の有限要素 法を用いた解析¹³⁾によれば、この A、B中には材質 に強く依存する因子は Eとv以外にはなく,他の因子 はほぼr, 孔の深さおよびゲージの形状により定まる 幾何学的因子とされており、標準型ゲージについて は ASTM の規定⁷⁾に数値が示されている。ここでは これを使用した。

穿孔法による測定はタイプAとタイプC供試体の 表側で行った。測定箇所は X 線法と同様に溶接線上 とそれを中央で横切る線上であるが、孔をあけるた めに同一位置での測定はできなかった。Fig. 7, Fig. 8に各々タイプA,タイプCの測定結果を示す。分布 形のみについて見れば、X線法によるものと類似の 形状であるが、タイプ A 供試体の溶接線上での σ_y と σ_x では X 線法の場合よりも各々対称性, バランスと いう点で良好な結果が得られた。この方法は孔の深 さ,2.4 mm までの残留応力に関する情報を深さ方向 に或る種の重み付けをした形で捉えていると考えら れる。一方,X線法は表層高々数10µの範囲の結晶 群の残留応力が平均した形で測定していることから, 残留応力が深さ方向に変化していることがこのよう な結果になった一因と考えられる。ASTM では、深 さ方向の分布が一様でない場合には、表で示してい る標準的な係数 A、Bを使うと誤差がでることから、



Fig. 7Residual stress distributions for specimen type A, measured by hole-drilling method
穿孔法によるタイプA 供試体の残留応力分布



Fig. 8Residual stress distributions for specimen type C, measured by hole-drilling method
穿孔法によるタイプ C 供試体の残留応力分布

最終的な孔の深さの10%以内を1ステップとして切 削し,ステップ毎のデータから残留応力の一様性の 度合いを検討することを奬めているが,ここではこ のような検討を行っていない。

測定された残留応力の値は σ_y , σ_x 共にかなり大き く,特に溶接線上のσyは降伏点をはるかに越えてい る。このような結果が得られた一因としては深さ方 向の残留応力の変化が挙げられるが、これだけでは 異常に高い応力値の説明はできない。主たる原因は, 穿孔による残留応力の解放に伴って応力集中源である 円孔の縁近傍領域が局部的に降伏し、塑性ひずみの影 響を考慮していない前記の算出式では誤差が大きく なってしまうことにあると考えられる。Hampton と Nelson¹⁴⁾は, 穿孔法と X 線法を用いて厚さが 5.84 mmの炭素鋼溶接試験片の残留応力測定を行って、測 定値が降伏点の 70%強の場合にも, 双方のデータが 一致する例を示しているが、降伏点に近づくにつれ 穿孔法の正確性が失われると結論づけており、また ASTM の規定では測定値が材料の降伏点の 50%を越 えた場合, Nickola¹⁵⁾は 50 ~ 70%を越えた場合, 円 孔縁の降伏により生じる誤差が小さくないとしてい る。本研究の場合, X線法によれば溶接線上のσ_yは 降伏点の 74~90%であることから, 孔の縁の降伏 域も小さいものとは言えず,このために,σuで降伏 点の約2倍という高い測定値が算出されたものと考 えられる。穿孔法の有効範囲を確実にすることは今 後の検討課題としたい。

4. 結 言

残留応力はほとんどの機械・構造物中に存在し,こ れらの破壊の主要因子となり得ることから,その分 布状態を把握することは益々重要になってきている。 本研究では,大型突き合わせ溶接板の残留応力を X 線法および穿孔法を用いて測定して,以下の結果を 得た。

- (1) 多層(5パス)突き合わせ溶接を行った場合の 残留応力分布は単層のBead-on-plate に対して 既に得られている解析結果によるものとほぼ同 一形状であり,溶接線上での溶接線方向残留応 力は降伏点に近いレベルにまで達している。
- (2) 同一の方法で溶接しても、上記の応力は溶接線の長さによって値が若干変化し、溶接線の長い方が高くなる。一方、板幅にはほとんど影響されない。

- (3)前記(2)の傾向は大きな溶接板を溶接線直角方向に切断した場合にも観察されたが、分布形はどの部分を取出しても、切断以前とほぼ同様であった。
- (4) 穿孔法により得られた溶接線上の残留応力は、溶 接線方向、溶接線直角方向共、X線法によるも のよりかなり高く、溶接線方向のものは降伏点 を越える値となった。これは、溶接線上の残留 応力が高レベルであるために穿孔に伴って円孔 回りに局部的な降伏域が生じ、算出される応力 値にかなりの誤差が含まれるようになったこと による。

(平成5年4月21日受理)

参 考 文 献

- Glinka, G., Effects of residual stresses on fatigue crack growth in steel weldments under constant and variable amplitude load, ASTM STP 667, (1979), pp. 198–214.
- 2) 仁瓶・尾野・恒成,溶接残留応力を考慮した疲労 き裂伝播寿命の推定に関する研究,造論,152, (1983), pp. 390–396.
- 小林・轟,コンパクト試験片の疲労き裂に及ぼす 溶接残留応力の影響評価,材料,35-391,(1986), pp. 73-78.
- 大路・久保・辻・小川・桜田,残留応力場における疲労き裂伝播寿命の推定法,機論(A編), 53-492, (1987), pp. 1516-1524.
- 「橘内・吉久,低温環境下における高張力鋼溶接継 手の疲労き裂伝ば挙動,機論(A編),53-492, (1987), pp. 1525-1532.
- Mathar, J., Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Hole. Trans. of ASME, 56–4, (1934), pp. 249–254.
- Determining Residual stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method, ASTM Standard E837–85.
- Rendler, N.J. and Vigness, I., Hole-Drilling Strain Gage Methods of Measuring Residual Stresses, Exp. Mech., 6–12, (1966), pp. 577– 586.
- 9) 例えば,木原,現代溶接工学,(1977),100,オーム社.

- 10) 上田・福田・中長,有限要素法による溶接応力の 解析と残留応力の発生機構,溶誌,45–1,(1976), pp. 29–35.
- 佐藤・寺崎,構造用材料の溶接残留応力分布にお よぼす溶接諸条件の影響,溶誌,45-2,(1976), pp.150-156.
- 12) 例えば, Timoshenko, S.P. and Goodier, J.N., Theory of Elasticity, 3rd Edt, (1970), pp. 90-92, McGraw-Hill.
- Schajer, G.S., Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements, Trans. ASME, J. of Engng. Mater.

and Tech., Vol. 103, (1981), pp. 157-163.

- 14) Hampton, R.W. and Nelson, D.V., Comparison of Residual Stress Measurements in Welded Thin Plates by X-Ray and Hole Drilling Methods, Symp. on Nondestructive Evaluation: NDE Planning and Application, Vol. 5, ASME, (1989), pp. 171–176.
- Nickola, W.E., Post-Yield Effects on Center Hole Residual Stress Measurements, Proc. 5th Int. Conf. on Exp. Mech., SESA, (1984), pp. 126–136.