

Research Reports of the Research Institute
of Industrial Safety, RIIS-RR-92, 1993
UDC 539.519:621.791.011:531.781

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 × 600 mm, 765 mm × 1235 mm and 770 mm × 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 longitudinal 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

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

**機械研究部 Mechanical Safety Research Division

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、鑄造、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

Table 1 Chemical composition of material used
供試体の化学成分 (wt.%)

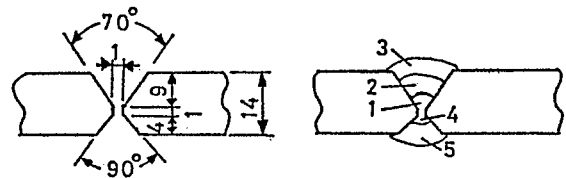
C	Si	Mn	P	S
0.15	0.25	0.66	0.012	0.002

Table 2 Mechanical properties of material used
供試材の機械的性質

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

Table 3 Welding condition
溶接条件

Pass	Method	Current (A)	Volt (V)	Speed (cm/min)	Heat-Input (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 $4 \sim 5^\circ$ 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 2θ 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

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

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 を用いてエアーマ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

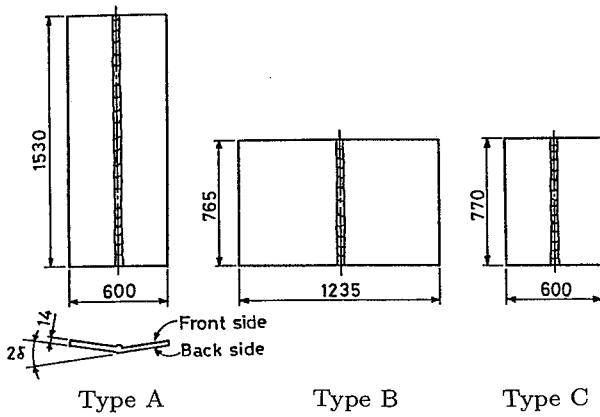


Fig. 1 Shapes and Dimensions of Specimens
供試体の形状および寸法

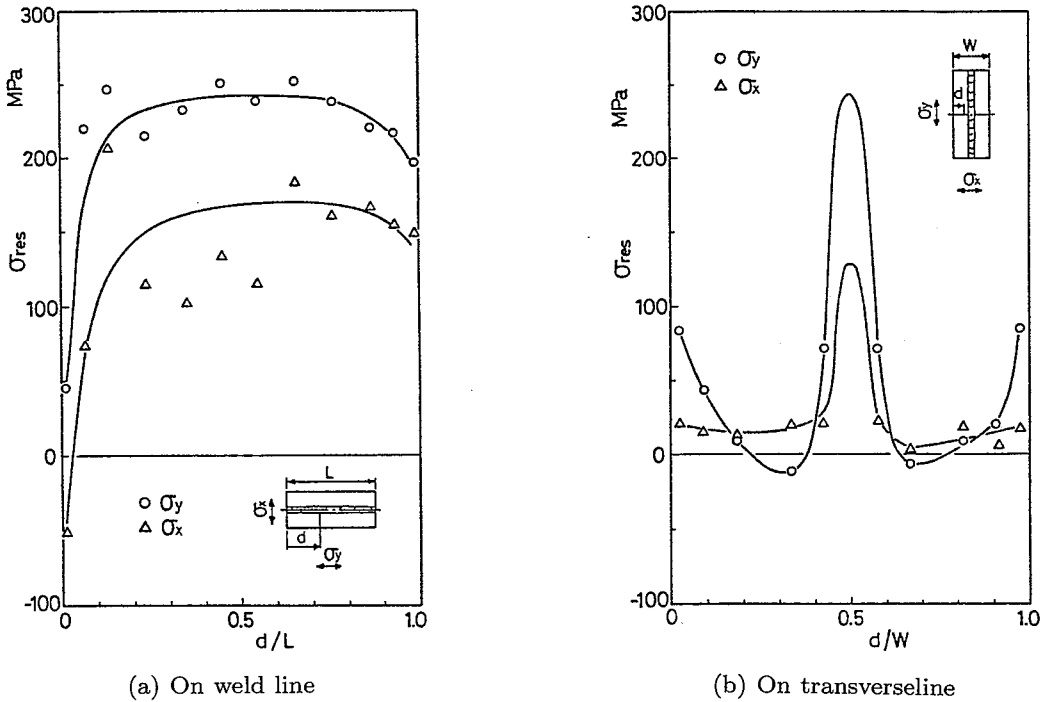


Fig. 2 Residual stress distributions for specimen type A, measured by X-ray method
X線法によるタイプ A 供試体の残留応力分布

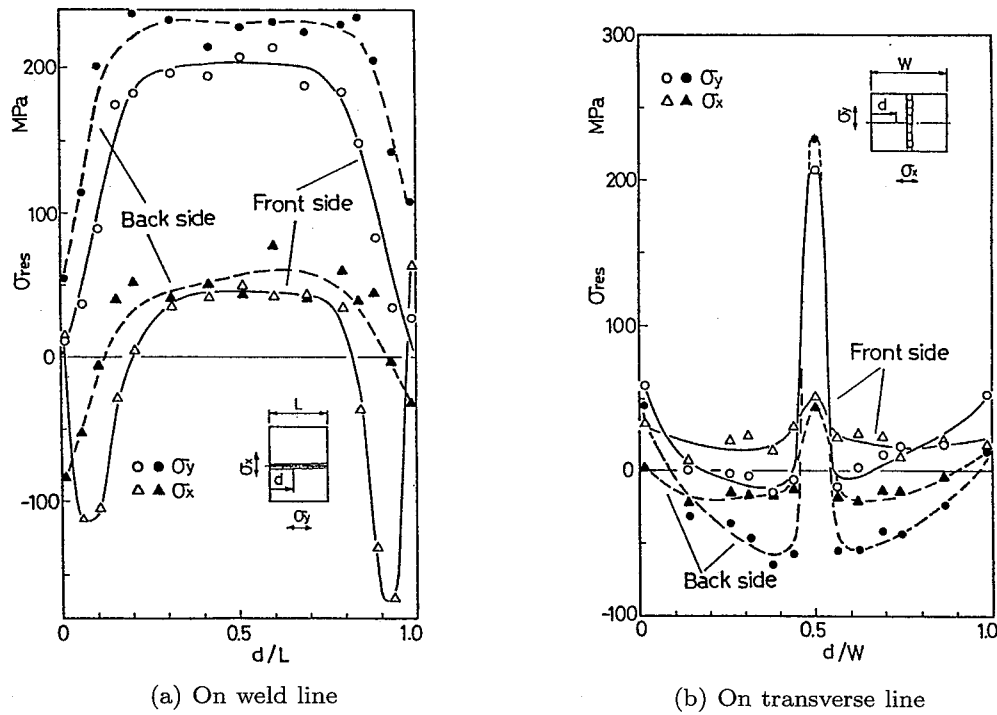


Fig. 3 Residual stress distributions for specimen type B, measured by X-ray method
X線法によるタイプB供試体の残留応力分布

ることが判る。X線の浸透深さは高々数 10μ 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や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○、△印は供試体表側、●、▲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、端部に近づくとつれ、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40MPa程低い値となっており、端部へ近づくにつれ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や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。

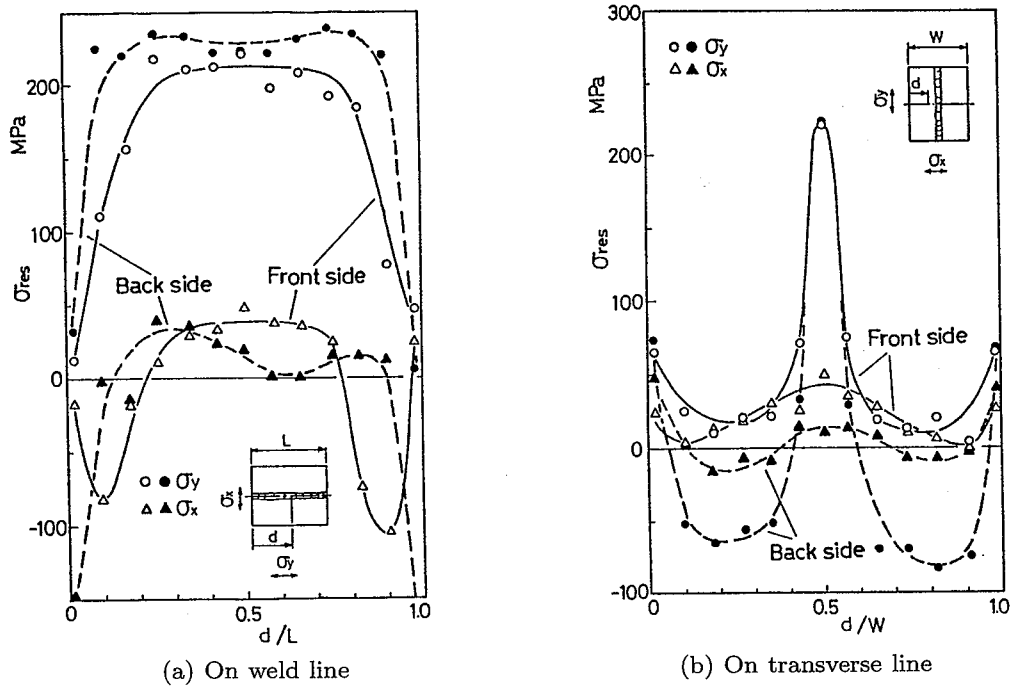


Fig. 4 Residual stress distributions for specimen type C, measured by X-ray method
X線法によるタイプ C 供試体の残留応力分布

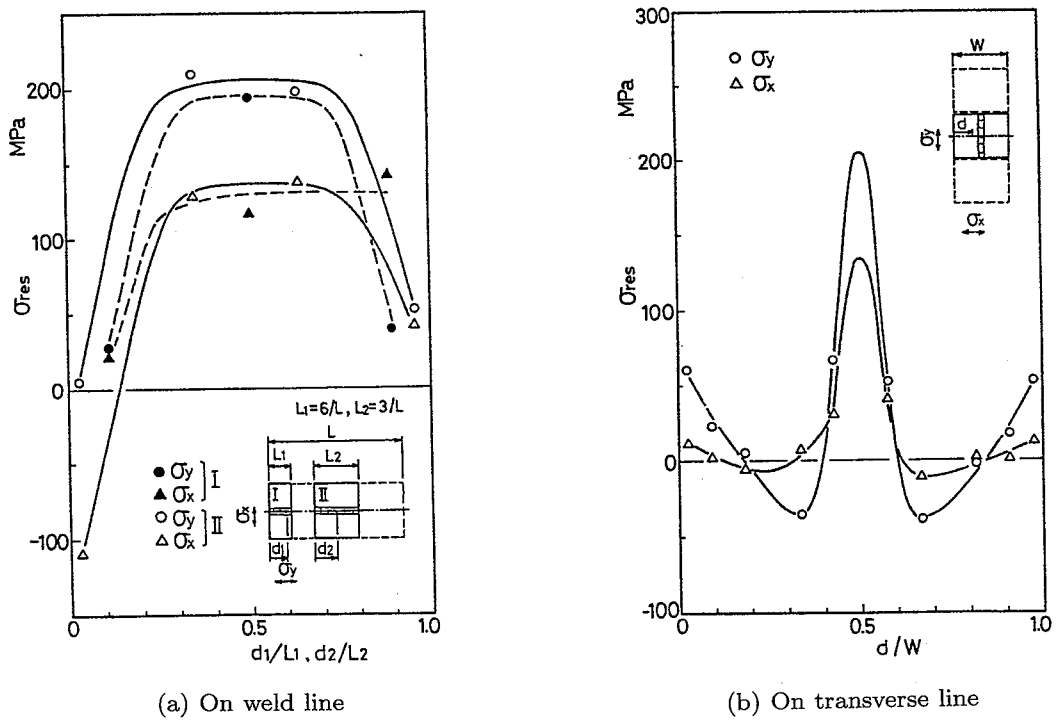


Fig. 5 Redistributed residual stresses for specimen type A sectioned in transverse direction
タイプ A 供試体の残留応力の切断による再分布

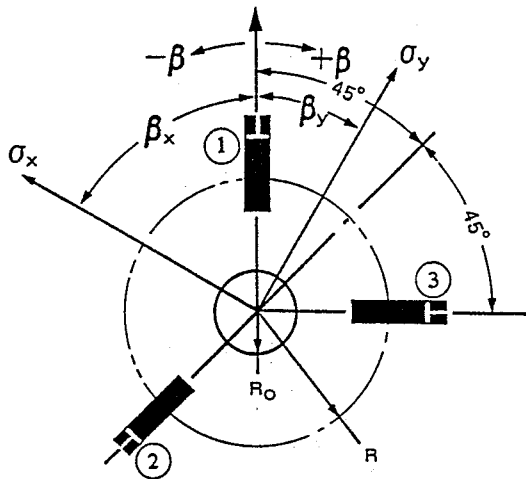


Fig. 6 Strain gage rosette arrangement for determining residual stress
 残留応力測定用ロゼット型ゲージ

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○、△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樣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。一樣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 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ として、二軸応力状態に対する主応力 $\sigma_{max}, \sigma_{min}$ 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。

$$\sigma_{max} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} - \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2}$$

$$\sigma_{min} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} + \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2}$$

$$\tan 2\beta = (\epsilon_1 - 2\epsilon_2 + \epsilon_3) / (\epsilon_3 - \epsilon_1)$$

ここで、Eを縦弾性係数、 ν 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、一樣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、穿孔前の応力の一樣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 ν 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10 μ 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樣でない場合には、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、

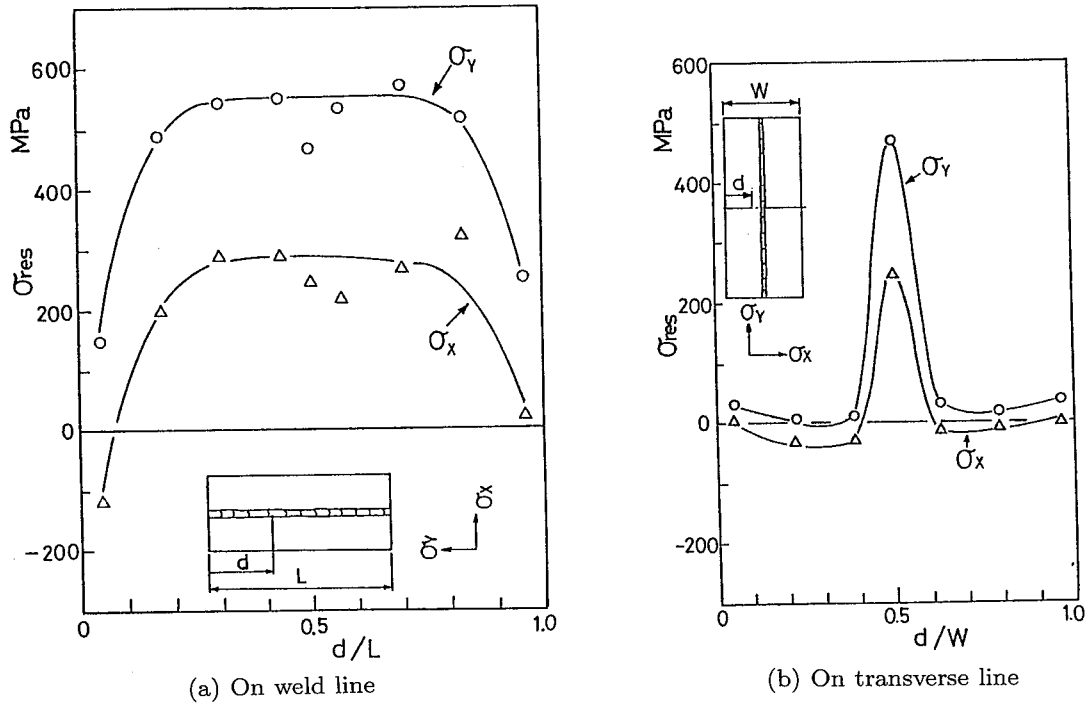


Fig. 7 Residual stress distributions for specimen type A, measured by hole-drilling method
穿孔法によるタイプ A 供試体の残留応力分布

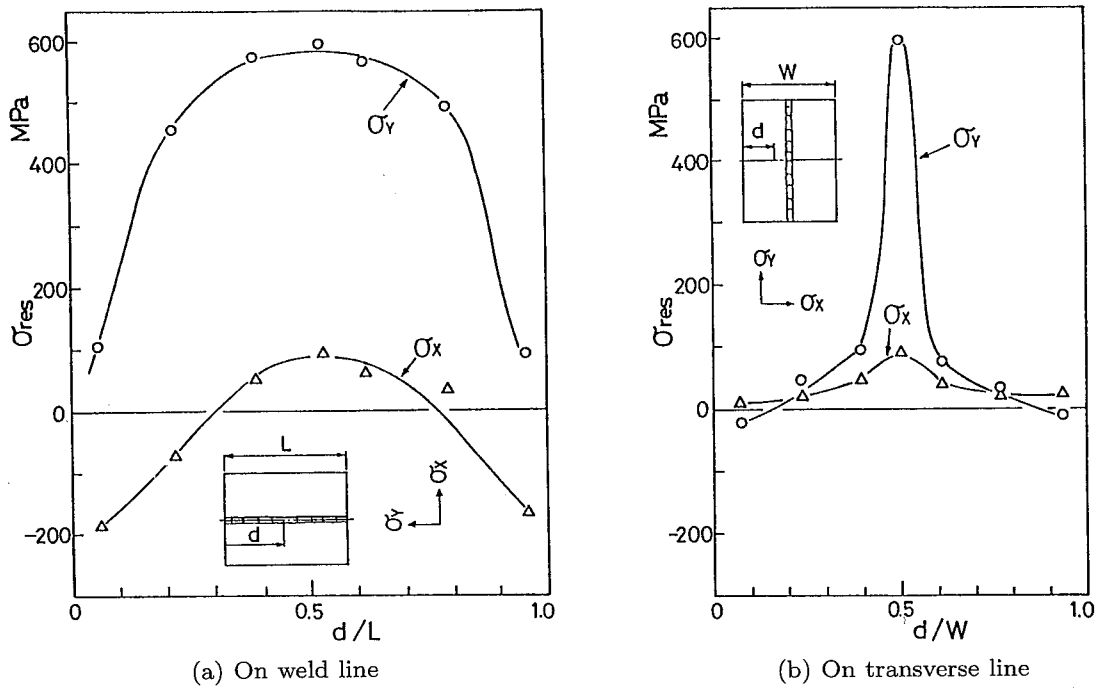


Fig. 8 Residual stress distributions for specimen type C, measured by hole-drilling method
穿孔法によるタイプ C 供試体の残留応力分布

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奨めているが、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 共にかかなり大きく、特に溶接線上の σ_y 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ふ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、 σ_y 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同様であり、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り出しても、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

- 1) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 橋内・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.
- 6) Mathar, J., Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Hole. Trans. of ASME, 56-4, (1934), pp. 249-254.
- 7) Determining Residual stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method, ASTM Standard E837-85.
- 8) 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.
- 11) 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.
- 13) 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.
- 15) Nickola, W.E., Post-Yield Effects on Center Hole Residual Stress Measurements, Proc. 5th Int. Conf. on Exp. Mech., SESA, (1984), pp. 126-136.