き裂を有する溶接材の変形挙動に及ぼす 機械的応力緩和の影響*

小田 勇**, 坂本 英俊***, 山本 光治***

Effect of Mechanical Stress-Relieving on Deformation Fields near a Crack in Weldment*

by Isamu Oda**, Hidetoshi Sakamoto*** and Mitsuharu Yamamoto***

Considerable papers which experimentally examined the effect of residual stress on the brittle fracture strength of weldment have been published. The effect of stress-relieving on the brittle fracture strength has been experimentally examined too. In those papers, the residual stress distributions were measured by the stress-relaxation method, assumed as a simple curve and represented by a simple function. There have been, however, few analytical works concerned with stress and strain near a crack in the residual weld stress field.

In the present study, an as-welded plate and a welded plate stress-relieved mechanically are dealt with. Each of them has a through-thickness center crack perpendicular to the welding bead. The crack initiates after welding or after stress-relieving. The residual stresses due to welding and those after stress-relieving by the uniform pre-straining are measured by means of the ultrasonic technique, because, from a practical point of view, the residual stress should be measured nondestructively. A uniform tensile load perpendicular to the crack is applied to the plate. Stress, strain, plastic zone near a crack and crack opening displacement are examined by elasto-plastic finite element analysis as well as experiment. Considering the residual stresses distributed after pre-cracking, the deformation near the tip of a crack in a plane stress field are analyzed. The effect of residual stresses and that of stress-relieving on the deformation near a crack are revealed. The tensile residual stress around a crack tip contributes to the increase of stress, strain, plastic zone size near the crack and crack opening displacement. The stress-relieving contributes to the increase of fracture strength of welded plate.

Key Words: Residual Stress, Weldment, Mechanical Stress-Relieving, Acoustoelasticity, Finite Element Method, Deformation, Plastic Zone, Crack Opening Displacement

1. 緒 言

溶接残留応力が継手の脆性破壊強度に及ぼす影響については、既に実験的に¹⁾あるいは破壊力学的に²⁾検討がなされている。応力拡大係数に関する溶接残留応力の影響についても報告されている³⁾。また、いくつかの方法によって溶接残留応力を緩和できることも知られている⁴⁾。しかしながら、溶接材の破壊に密接な関連をもつ、き裂近傍の変形挙動に及ぼす残留応力の影響を詳細に解析した研究はまだ少ないようである。さらに、これまでの研究では溶接残留応力の分布として、別の試験片に対する弛緩法によって測定されたもの⁵⁾や比較的簡単な形状に仮定したもの^{1,2)}等が用いられている。しかしながら、残留応力の大きさと分布は、非破壊的に実測することができれば、その結果を用いることが実用上最良である。著者は、溶接残留応力の絶対値測定および機械的な残留応力緩和の評価に対して、非破壊的応力測定法である音弾性法を適用し、その有効性を検討した⁶⁾。また、音弾性法による残留応力の測定結果を組み入れたFEM解析によって溶接材の変形挙動を明らかにした⁷⁾。本研究では、機械的な方法で残留応力緩和を施した溶接材に

ついて、残留応力を音弾性法で測定し、その結果を組み入れたFEM弾塑性解析および実験を行い、き裂近傍の変形挙動に及ぼす機械的残留応力緩和の影響を検討する。

2. 実 験

板厚25 mmの軟鋼平板からFig.1のような試験片を作製した。試験片の長手方向は圧延方向に一致させた。試験片中心線(Y軸)に図に示すようなV型溝を切削加工し、表裏両面から各2層の被覆アーク溶接ビードを置き、その後、溶接線方向に一様引張りを加えて除荷した。この機械的な残留応力緩和の後に、図のような溶接線に直角方向の板厚貫通中央き裂を人工的に導入した(これをtype SRと称する)。比較のために、機械的な残留応力緩和を施していない同様な溶接材に人工き裂をつけたもの(type T)および、溶接を行っていない同寸法のき裂材(type N)も用いて、変形挙動に及ぼす機械的残留応力緩和の影響を検討した。き裂の両先端の長さ3 mmは直径0.03 mmのワイヤによるワイヤカット放電加工によって設定した。実験では、これらの試験片にY方向の一様引張りを加えたときのx, y両方向のひずみおよびき裂開口変位を測定した。ひずみは試験片両面のx軸上に貼付した標点距離2 mmの2軸ひずみゲージにより測定した。弾性範囲内では、2方向のひずみ測定値と平面応力での応力-ひずみ関係式から、x, y両方向の応力

*原稿受付 平成4年1月23日 平成2年度秋季全国大会で発表

**正 員 熊本大学工学部 Member, Kumamoto University

*** 熊本大学工学部 Kumamoto University

Fig. 1 Specimen used in experiment.

を得た。

3. 変形挙動の解析

解析はひずみ増分理論に基づく FEM 弾塑性計算⁹⁾によって行い、平面応力と仮定した。解析では、実験で用いた試験片に対応させて、Fig. 2 に示すような 3 type のモデルを用いた。材料のひずみ硬化特性は次のような Swift の式に従うものとし、材料定数には Table 1 のものを用いた。

$$\bar{\sigma} = c(\alpha + \bar{\epsilon})^n \quad (1)$$

ここで、 $\bar{\sigma}$ (MPa) および $\bar{\epsilon}$ は相当応力および相当塑性ひずみである。なお、試験片は溶接、応力緩和のための過ひずみ、き裂加工等の応力-ひずみ履歴を受けており、厳密にはこれらが材料の異方性やひずみ硬化則に影響すると考えられる。しかし、本報では降伏条件として Mises の条件を用い、移動硬化や複合硬化は考慮していない。材料定数は、溶接部断面の硬さ試験および従来用いられている硬さと強度の関係⁹⁾に基づいて、母材および溶接

金属+HAZ) で異なる値とした。要素分割において、き裂先端近傍は底辺 0.05 mm、高さ 0.05 mm の二等辺三角形とした。

type T および type SR では、残留応力（き裂導入後の再分布応力）を計算に組み入れた。この残留応力は実用上の観点から、音弾性法に基づく非破壊測定⁶⁾によって得た。測定では、弱い直交異方性と平面応力状態を仮定した。供試材における音弾性に関する係数、および、x 軸上の各測定点における組織音響異方性と無応力時の縦波と横波の音速比を溶接前にあらかじめ測定しておき、溶接後あるいは機械的応力緩和後に音響異方方法（横波の音速変化率）および音速比を測定した。音速は超音波パルスを垂直法によって板厚方向に入射し、底面からの多重反射エコーを利用してパルスエコーオーバーラップ法により測定した。

Fig. 3 は超音波横波による音響異方性のみを利用して測定した¹⁰⁾、縦方向残留応力 σ_{ry} と横方向残留応力 σ_{rx} の差の x 軸上における分布である。この場合、横波の振動方向は、主応力軸が溶接線方向及びこれと直角方向に一致するとみなして決定した。図には、type SR において、溶接のままの状態で測定した結果と、これに過ひずみによる機械的残留応力緩和を施し、さらに、き裂を導入した後の測定結果を比較して示している。この場合、機械的残留応力緩和のための一様引張り net 応力は母材降伏点の 0.8 倍であるが、過ひずみによって残留応力がかかり緩和されていることが認められる。実際の変形挙動解析に際しては、残留応力の差ではなく絶対値が必要となる。type T においては、上述のような超音波横波による音響異方性に加えて、縦波と横波による音速の比を測定し、それらの結果を組み合わせることによって¹¹⁾、 σ_{ry} および σ_{rx} の絶対値を得た。Fig. 4 はこのようにして求めた type T における σ_{ry} 、 σ_{rx} の絶対値の、x 軸上での分布である。破線は溶接した後でき裂導入前における残留応力分布、また、実線はき裂導入後に再分布した残留応力分布である。なお、この場合、音弾性法による残留応力測定の後、力のつりあいや材料の降伏点等を考慮して若干の修正を加えた。そしてこれを最小 2 乗法によって多項式近似して計算に取り入れた。type T では、Fig. 4 の実線の残留応力分布を組み込んで変形挙動解析を行った。ところで、type SR における σ_{rx} は、板端においては当然 0 であるが、Fig. 3 の実線における正負の力の比較

Fig. 2 Models for FEM analyses.

Table 1 Mechanical properties of material used.

	E (MPa)	ν	σ_{ys} (MPa)	σ_u (MPa)	α	c (MPa)	n
Base metal	2058×10 ⁴	0.3	304	441	0.013	721	0.2
Weld metal+HAZ			421	541	0.026	873	

E: Young's modulus

ν : Poisson's ratio

σ_{ys} : Yield strength

σ_u : Ultimate strength

Fig. 3 Distributions of difference of residual stresses.

Fig. 4 Distributions of residual stress (Type T).

を行ってみると、引張り残留応力で最も大きな値を示すと予想されるき裂先端付近でも、かなり小さな σ_{rx} 値であると思われる。このような小さな絶対値を本実験のような方法で精度よく求めることはやや困難である⁹⁾。そこで本報では、type SRにおいては近似的に σ_{rx} は0とみなし、Fig. 3における実線を σ_{ry} の分布と仮定して計算に取り入れた。なお、残留応力は、x座標が一定であってもy座標によって異なる。この残留応力のy方向分布は、文献7)におけると同様に線形に変化すると仮定した。また、き裂面($-8\text{ mm} \leq x \leq 8\text{ mm}$, $y=0$)においては当然 $\sigma_{ry}=0$ であるが、簡単化のため、 $-8\text{ mm} \leq x \leq 8\text{ mm}$ の範囲ではy座標にかかわらず、 $\sigma_{ry}=0$ とした。

4. 結果と考察

Fig. 5はy方向に一樣引張りを加えたときの、y方向応力 σ_y のき裂延長線上における分布である。ただし、図は解析結果で残留応力を含んだ値を示し、応力比が0.4の場合である。ここで、応力比は外荷重による最小実断面での平均応力 σ_{net} と母材の降伏応力 σ_{ys} との比である。以下の図は同じ応力比0.4の場合について示すこととする。Fig. 5によると、いずれのtypeにおいてもき裂先端での応力集中が明らかであるが、き裂先端付近の σ_y 値は残留応力の影響により、大きい方からtype T, type SR, type Nの順となっている。type SRにおけるき裂先端付近の σ_y は残留応力緩和の影響により、type Tのそれに比べてかなり低下していることがわかる。また、き裂先

Fig. 5 Distributions of stress σ_y on the prolongation of crack.

Fig. 6 Increase of stress σ_y caused by external load.

端から離れた位置での σ_y も、外力を加える前の残留応力の影響をうけた分布をなしている。これらの σ_y のうちから残留応力を除いて、外力による σ_y の増加量の、き裂延長線上の分布を求めると Fig. 6 のようになる。type T では、Fig. 4 に示したようにき裂先端領域に母材の降伏応力程度の引張応力 σ_{ry} が残留していたために、外力の小さな段階からすでに塑性領域が大きく拡がり、従ってその領域での、外力による σ_y の増加は極めて小さい。type SR においても、き裂先端の極く近傍では同様の理由から、溶接なしの type N に比較して σ_y の増加量は小さくなっている。しかし、き裂先端の極く近傍以外の領域では、type N の場合とほぼ同様の σ_y の増加を示す。図の弾性領域では、2 軸ひずみゲージによるひずみ測定値を用いて計算した、平面応力での σ_y の実験値を併記しているが、各 type で解析結果と実験結果はよい一致を示している。

Fig. 7 は Y 方向の見かけのひずみ ϵ_y のき裂延長線上における分布である。図は解析結果で残留ひずみを含ん

Fig. 7 Distributions of strain ϵ_y on the prolongation of crack.

Fig. 8 Increase of strain ϵ_y caused by external load.

だ値を示す。いずれの type でもき裂先端近傍でのひずみ集中が明らかである。type T ではこのひずみ集中と引張残留ひずみが重畳するために、き裂先端近傍では、溶接なしの type N に比較して極めて大きな引張りひずみを生じている。type SR では残留応力緩和により、き裂先端付近の ϵ_y は type T より大きく低下し、全般的には、type T と type N の中間の分布状態を示している。これから残留ひずみを除いて、外力による ϵ_y の増加の分布を求めると、Fig. 8 のようになる。type T では、引張残留応力の影響で、低い負荷段階からき裂先端付近に塑性領域が大きく拡がるため、この付近の ϵ_y 値は他の type に比べて極めて大きくなっている。type SR における塑性領域の大きさを type T に比較すると、残留応力緩和の影響により、後述のようにき裂先端の極く近傍に限定されて狭くなる。従って type SR は、その領域では、溶接なしの type N より大きな ϵ_y 値を生じるが、type T に比べると、き裂先端付近の ϵ_y 値はかなり小さくなっている。また、き裂先端から離れたと、type N とほぼ同様の ϵ_y 分布を示している。図には、解析結果と実験結果を併記しているが、両者にはよい一致が見られる。

Fig. 9 は応力比 0.4 において、き裂先端から拡がった塑性領域の大きさを各 type について示したものである。type T では、き裂先端付近に残留していた大きな引張応力のために、外力が加わる前にすでに塑性領域が生じているが (図で Initial と表示している)、外力が加わると、この Initial 領域を含めた極めて大きな塑性領域を形成する。この塑性領域の大きさは type N のそれに比べて極めて大きなものである。また、この塑性領域は X 方向へも拡がるが、引張残留応力が存在する Y 軸に沿う方向への拡がりが顕著である。type SR における塑性領域は、type N より大きな拡がりを示しているが、残留応力緩和の影響をうけて、type T に比べると著しく減少していることが明らかである。すなわち、同一応力比 (同一負荷段階) においてき裂先端部の塑性領域の大きさを比較すると、残留応力緩和材 (type SR) の塑性領域は、溶接のままの材 (type T) と溶接なしの材 (type N) のそれらの中間の大きさとなっている。

き裂先端から内部へ 4 mm の位置における開口変位 Vg と一様引張り gross 応力 σ との関係を示すと Fig. 10 のようになる。a はき裂の半長である。図にはクリップゲージで測定した結果と FEM 解析結果を併記してい

Fig. 9 Plastic zones.

Fig. 10 Relationships between crack opening displacement and applied stress.

るが、両者に若干の差が認められる。これには、解析におけるメッシュ分割その他の仮定など種々の影響因子が考えられるが、前述のように type T, type SR において、 $-8\text{ mm} \leq x \leq 8\text{ mm}$ の範囲では y 座標にかかわらず $\sigma_y = 0$ と仮定したことや、type SR では $\sigma_x = 0$ とみなしたことも影響しているものと思われる。しかしながら、実験結果と解析結果はほぼ同様の傾向を示している。き裂開口変位を同一負荷段階と比較すると、前述のような塑性領域の拡がり方に対応して、大きい方から type T, type SR, type N の順となっている。そして、引張りの溶接残留応力場に存在するき裂 (type T) の開口変位の著しい上昇を、type SR のような残留応力緩和によって、かなり抑制できることがわかる。このような結果から、COD 仮説に基づいた場合、もし、各 type で破壊じん性値にそれ程大きな差がなければ、残留応力緩和を施すことにより、溶接材における破壊強度の低下をある程度まで防止できること¹²⁾が説明できる。

なお、文献6)に示したように、過ひずみの程度によっては溶接残留応力を極めて良く緩和することができる。そのような残留応力緩和材における変形挙動は、type N の場合とおおよそ同様なものとなり得ることが予想される。

5. 結 論

突合せ溶接材およびこれに機械的な残留応力緩和を施した材において、残留応力を音弾性法によって非破壊的に測定し、その結果を組み入れた FEM 弾塑性解析と実

験によって、残留応力場にき裂を有する材の変形挙動を求めた。そして、変形挙動に及ぼす残留応力緩和の影響について検討した。得られた結果を要約すると次のようになる。

(1) 残留応力緩和材 (type SR) においては、負荷後の応力 σ_y のき裂延長線上での分布は、応力緩和を施していない溶接材 (type T) と溶接なしの部材 (type N) との中間的なものとなる。type SR においては、残留応力を含まない、外力による σ_y の増加量は、type T の場合と同様に、そのときのき裂先端近傍の塑性領域内では、type N よりも小さくなる。しかし、それ以外の領域では、おおよそ type N と同様の σ_y の増加量を示す。

(2) type SR におけるひずみ ϵ_y の、き裂延長線上での分布は、残留応力緩和の影響により、き裂先端付近では type T の場合よりかなり減少し、全般的な分布としては type T と type N の中間的なものとなる。type SR における、残留ひずみを含まない、外力による ϵ_y の増加量は、type T に比べて大きく減少する。type N と比較した場合、そのときのき裂先端近傍の塑性領域内では、かなり大きな ϵ_y の増加量を示すが、その他の領域ではおおよそ同様な ϵ_y 分布となる。

(3) type SR におけるき裂先端付近の塑性領域の大きさは、残留応力緩和の影響をうけて、type T の場合より著しく小さくなり、type T と type N の場合の中間的なものとなる。

(4) type SR におけるき裂開口変位は、残留応力緩和の影響により type T の場合よりかなり低下し、type T と type N の場合の中間的なものとなる。

(5) 非破壊的応力測定と解析とを組み合わせることによって、変形挙動に及ぼす残留応力緩和の効果を推定することができる。

参 考 文 献

- 1) 秋田, 矢田, 西井: 鋼構造物に発生する脆性破壊と残留応力, 日本造船学会論文集, 第125号 (1969), 227-235.
- 2) 佐藤, 豊田: 溶接継手の脆性破壊強度に及ぼす残留応力と材料の力学的特性の影響, 日本造船学会論文集, 第131号 (1972), 355-365.
- 3) H. Tada and P.C. Paris: The Stress Intensity Factor for A Crack Perpendicular to the Welding Bead, Int. J. of Fracture, 21 (1983), 279-284.
- 4) 溶接学会編: 溶接・接合便覧, 丸善 (1990), 147-153.
- 5) H. Kihara and K. Masubuchi: Effect of Residual Stress on Brittle Fracture, Welding Journal, 38-4 (1959), 159s-168s.
- 6) 小田, 岩崎, 行徳: 溶接残留応力とその機械的緩和効果の音弾性法による非破壊評価, 溶接学会論文集, 9-2 (1991), 299-304.
- 7) 小田, 坂本, 雑賀, 木村: き裂を有する溶接材の変形挙動に及ぼす残留応力の影響, 溶接学会論文集, 8-3 (1990), 409-414.
- 8) 山田: 塑性・粘弾性, 培風館 (1972).
- 9) 吉沢編: 硬さ試験法とその応用, 裳華房 (1977), 287.
- 10) 徳岡, 岩清水: 音弾性, 機械の研究, 27-7 (1975), 860-864.
- 11) H. Toda, H. Fukuoaka and Y. Aoki: R-value Acoustoelastic Analysis of Residual Stress in A Seam Welded Plate, Jap. J. Appl. Phys., Supplement 23-1 (1984), 86-88.
- 12) H. Kihara, K. Masubuchi, K. Iida and H. Oba: Effect of Stress Relieving on Brittle Fracture Strength of Welded Steel Plate, IIW Document X-218-59 (1959).