

3次元画像相関法による溶接部における 不均一強度分布の測定

Measurement of Inhomogeneous Strength in Weld Joint by 3D Image Correlation Technique

川久保 政洋 (Masahiro Kawakubo)*¹ 釜谷 昌幸 (Masayuki Kamaya)*¹

要約 原子力発電プラントの溶接部やその近傍では、応力腐食割れが発生する可能性がある。発生したき裂に対しては、日本機会学会の維持規格に基づいて、き裂の進展予測と破壊評価が行われる。破壊評価のためには、材料の降伏点や引張強さが必要になるが、一般的に溶接部やその近傍の材料強度分布は均一でない。溶接部における正確なき裂進展予測や破壊評価のためには、不均一な材料強度特性を把握しておくことが重要となる。本研究では、デジタル画像相関法(DIC)を用いて溶接部とその周辺の不均一な材料強度分布を調べることを試みた。配管の突合せ溶接部から試験片を採取し、引張試験中の試験片表面の変位をDICにより測定した。その結果、溶接部やその周辺における応力-ひずみ曲線を取得することができ、不均一な0.2%耐力の分布を求めることができた。また、DICを用いることで、引張試験中の荷重軸方向の不均一な断面積の変化を推定し、局所的な応力(真応力)を推定することができた。

キーワード デジタル画像相関法, 溶接継手, 不均一強度分布, 0.2%耐力, 応力-ひずみ曲線, 微小試験片

Abstract It is possible for stress corrosion cracking to occur in weld joints and their neighborhood of nuclear power plants. Crack growth prediction and fracture assessment based on fitness-for-service is applied to initiated cracks. Yield point and tensile strength of material is used for fracture assessment. However, the material strength distribution of a welded part is usually not uniform. Therefore, to assess structural integrity correctly, it is important to understand the inhomogeneous strength distribution. In this study, identification of an inhomogeneous material strength distribution of a welded part was tried using a digital image correlation technique (DIC). A specimen was taken from a butt welded joint and the displacement of the specimen surface during a tensile test was measured using the DIC. It was shown that the nominal stress-local strain curves on a specimen surface and 0.2% proof strength distribution around the weld part could be corrected by the DIC. Furthermore, change in the cross-section during the tensile test was estimated by the DIC, and the local stress (true stress) at an arbitrary cross-section of the specimen could be identified.

Keywords Digital image correlation, Weld joint, Inhomogeneous strength, 0.2% proof strength, Stress-strain curve, Small specimen

1. 緒 言

原子力発電プラントの溶接部やその近傍では溶接施工時に生じる残留応力などの影響により、応力腐食割れが発生する可能性がある⁽¹⁾。国内の原子力発電プラントでは、応力腐食割れによるき裂が発生しても、日本機械学会発電用原子力設備規格維持規格⁽²⁾によ

れば、き裂が無害と判断されれば、補修することなく運転を継続することができる。維持規格の評価はき裂の進展予測と、予測されたき裂サイズに基づく破壊評価により行われる。その際には、降伏応力や引張強さなどの材料強度が必要となる。とくに、降伏応力は材料の変形に対する強度のみでなく、応力腐食割れのき裂進展速度にも影響することが知られている⁽³⁾。し

* 1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

かし、一般的に溶接部およびその近傍の材料強度の分布は均一でない、溶接部における正確なき裂進展予測や破壊強度評価のためには、不均一な強度特性を把握しておくことが重要となる。

溶接部の材料強度分布を調べる方法として、以下が考えられる。まず、溶接部から微小な試験片を切り出し、引張試験により各部の材料強度を調べる方法がある。この方法では、本質的には通常の引張試験と変わらないことから、試験部位の材料強度を直接的に知ることができる^{(4)~(6)}。また、スモールパンチ試験と有限要素法を用いて材料強度を推定する方法も提案されている⁽⁷⁾。しかし、試験片サイズの制約により、同定できる強度分布の空間分解能には限界がある。間接的に材料強度を推定する方法として、硬さ試験がある。これまでも硬さと材料強度に相関があることが報告されている⁽⁸⁾。また、単純な硬さのみでなく、押し込み試験による荷重と変位の関係から応力とひずみの関係を含めた材料強度を推定する手法もある⁽⁹⁾。さらに、溶接部を含む試験片表面の引張試験中の不均一な変形を同定して、荷重とひずみの関係から材料強度を調べる方法がある。具体的には、レーザスペックル干渉法⁽¹⁰⁾やモアレ干渉法⁽¹¹⁾などがある。これらの方法では、微小な変位が測定可能なことから、不均一なひずみを高い空間分解能で測定することができる。しかし、いずれの方法も破壊評価に必要な引張負荷時の大きな塑性ひずみを測定することは難しい。一方、デジタル画像相関法⁽¹²⁾⁽¹³⁾（以下、DICとよぶ）は比較的大きなひずみを測定することができる。この方法では、変形によって生じる試験片表面の模様の変化から変位を測定するため、変形が大きくなるほどひずみの測定精度が向上する。

本研究では、DICを用いて溶接部とその周辺の不均一な材料強度分布を求めることを試みた。316ステンレス鋼配管の突合せ溶接部から採取した試験片を用いて引張試験を行い、DICにより荷重とひずみの関係を取得した。そして、各部位での応力-ひずみ曲線を取得し、材料強度の分布を求めた。得られた結果は、微小試験片による引張試験や硬さ試験の結果と比較した。また、DICにより不均一材の各断面における局所的な応力を推定することも試みた。

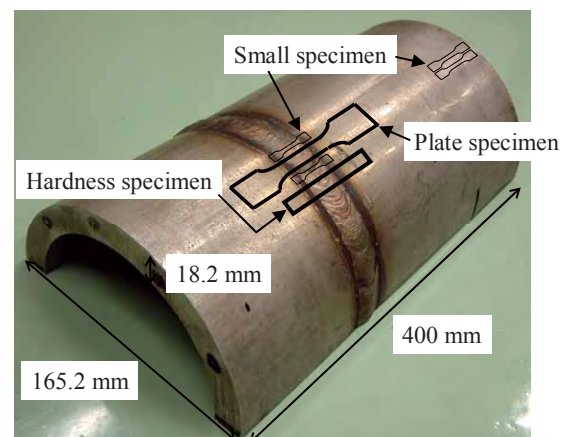


Fig. 1 Whole view of butt welded pipe used for the tests.

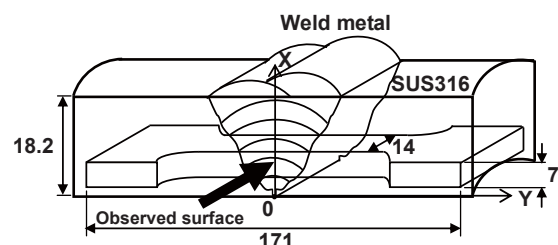
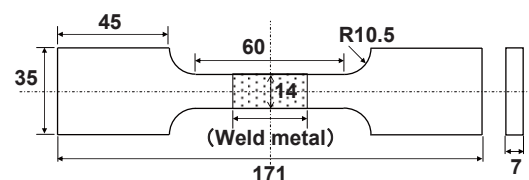
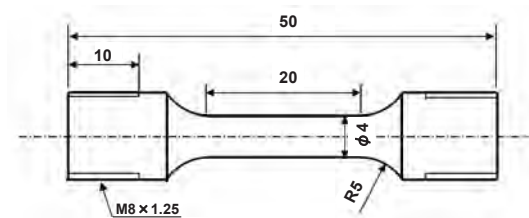


Fig. 2 Location and direction of tensile specimen.

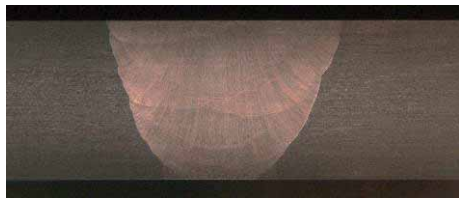


(a) Tensile specimen

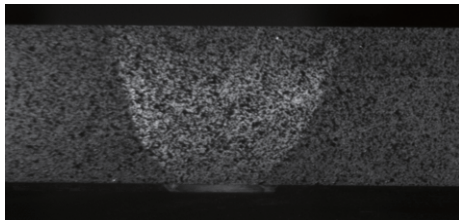


(b) Small specimen

Fig. 3 Geometry of specimens for tensile test.



(a) Cross-sectional view of welded joint (etched by aqua regia)



(b) Printed pattern for digital image correlation technique

Fig. 4 Surface image of tensile specimen.

2. 試験方法

2.1 試験手順

供試材には、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316TP 配管の突合せ溶接継手を用いた。供試材の概観図と試験片の切り出し位置を Fig.1 に示す。配管の寸法は、外径 165.2 mm, 板厚 18.2 mm (6B 管 Sch160 規格品) で、全長は 400 mm とした。開先加工を施した後、初層溶接はガスタングステンアーク溶接、2 層目以降は被覆アーク溶接で合計 7 層の突合せ溶接を実施した。溶接電流は 105 - 150 A, 溶接電圧は 10 - 27 V とした。

試験片は、Fig.2 に示すように、引張方向と溶接継手の長手方向が一致するように切り出した。これを

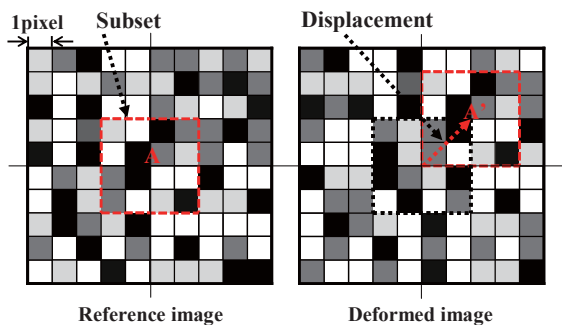


Fig. 5 Measuring method of displacement for digital image correlation.

Fig.3(a)に示すゲージ長さ 60 mm, 断面 14 mm × 7 mm の平板試験片に加工し、Fig.4 (a)に示すように溶接部が明確になるように試験片表面を王水でエッチングした。その後、Fig.4 (b)のように、DIC で変形を判別するための模様を観察面に付けた。試験片には、室温大気中で毎分 1 mm のクロスヘッド移動速度で引張負荷を加え、試験中の標点間の伸びはビデオ伸び計で測定した。

2.2 画像相関法によるひずみ測定

撮影したデジタル画像から市販のソフトウェア (Vic-3D) を用いて変位を測定し、ひずみを同定した。具体的には、Fig.5 で示す参照画像中における任意の領域 (Subset) の輝度値分布と最も良い相関がある領域を変形後の画像から探索し、変位と方向を同定する。この操作を画像全体に行うことで 2 次元平面上の変位分布を得ることができる。ひずみは、得られた変位を空間微分することにより算出される。つまり、DIC で算出されるひずみは、評点間距離の小さい局所的なひずみと考えることができる。

本研究では、2 台の CCD カメラを用いて、試験片表面の変形を同時撮影することにより、視差を利用した 3 次元の変位測定を行った⁽¹⁴⁾。CCD カメラの解像度は 2448 × 2048 ピクセルであり、撮影した画像では 1 ピクセル当たり 32.5 μm であった。引張試験中の試験片の変形は 1 秒毎に記録した。

2.3 微小試験片を用いた材料強度測定

DIC 測定により同定される材料強度と比較するために、微小試験片を用いた引張試験を実施した。微小試験片は、Fig.1 に示すように、平行部に供試材の溶接部を含むものと溶接部から最も離れた母材部から各 2 本切り出した。試験片形状を Fig. 3(b) に示す。平行部の径は φ 4 mm とした。微小試験片には、毎分 1 mm のクロスヘッド移動速度で引張負荷を加え、試験中の標点間の伸びはビデオ伸び計で測定した。

溶接部およびその近傍の硬さを測定するために、Fig. 1 に示す位置から溶接部を含む試験片を切り出した。測定面は #320, #800, #1200 のエメリーペーパーで研磨した後、粒径 9 μm, 3 μm のダイヤモンド研磨剤を用いて各 10 分間の研磨を行い、鏡面に仕上げた。硬さ測定はピッカース硬さ試験機を使用した。押し込み荷重は 4.9 N, 荷重保持時間は 10 秒とした。

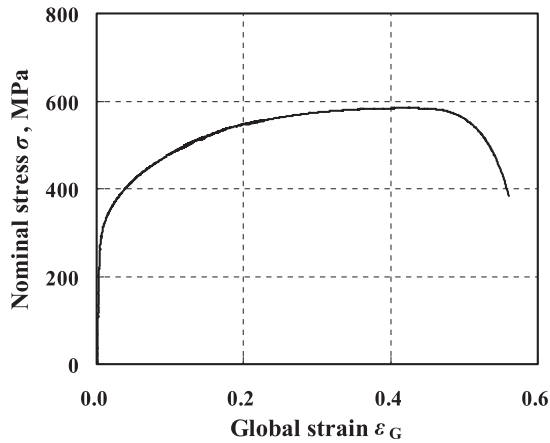
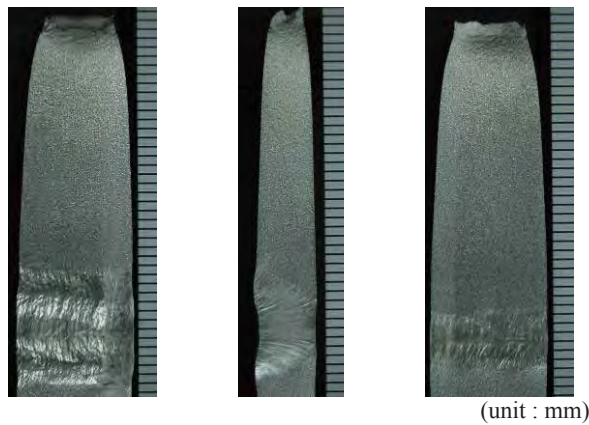


Fig. 6 Stress-strain curve of tensile specimen.



(a) Left side (b) Observed surface by DIC (c) Right side

Fig. 7 Photographs of plate specimen after tensile test.

圧痕の対角線の長さは約 $70 \mu\text{m}$ であり、硬さの測定値が他の圧痕の影響を受けないように、圧痕サイズの5倍程度の間隔をあけて測定を行った。

3. 試験結果

3.1 試験結果

平板試験片の公称応力-ひずみ関係を Fig. 6 に示す。ひずみはビデオ伸び計による測定値から求めた。引張試験中に平板試験片に負荷された最大応力は 584 MPa であった。

試験片破断後の観察面および右側面、左側面の写真を Fig. 7 に示す。溶接部は不均一に変形しており、試験片は溶接部から離れた母材部分で破断した。

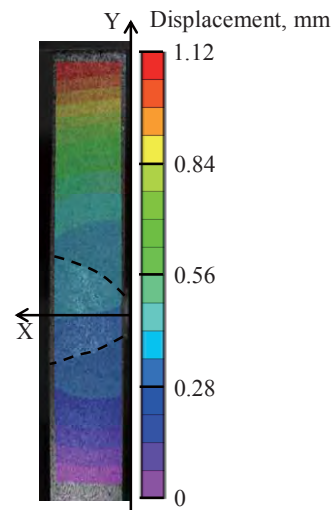


Fig. 8 Axial displacement field obtained by digital image correlation at 400 MPa tensile stress.

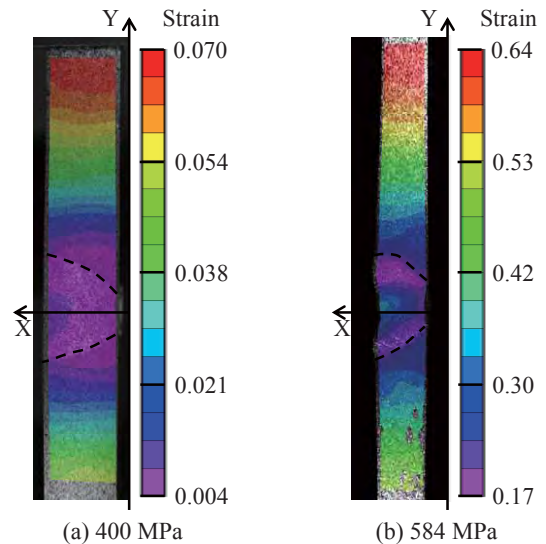


Fig. 9 Axial local strain field at 400 MPa and 584 MPa.

3.2 DIC によるひずみ分布測定結果

DIC による測定の一例として、応力が 400 MPa のときの Y 方向の変位分布を Fig. 8 に示す。Fig. 2 の定義にならい、平板試験片の板厚方向を X、溶接部を中心とした長手方向の座標を Y で表す。図中の破線は溶接線の位置を示し、溶接部の内側を溶接部、外側を母材部と呼ぶことにする。DIC により測定された変位は滑らかに分布していた。そして、溶接部およびその周辺では、X 軸に平行な直線上の変位が不均一になった。この変位を Y 方向について空間微分し

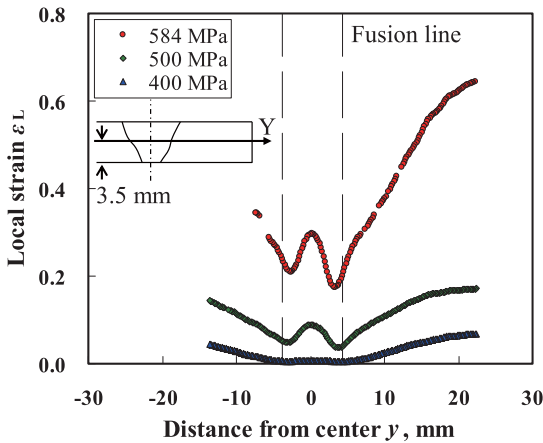


Fig. 10 Axial local strain distribution at 400, 500 and 584 MPa ($x = 3.5$ mm).

て求めたひずみの分布を Fig. 9(a)に示す. ひずみは, 溶接線付近で最小になった. また, Fig. 9(b)には平板試験片に負荷された最大応力 584 MPa におけるひずみ分布を示す. 最大応力においても溶接部およびその近傍のひずみが相対的に小さかった.

Fig. 10 には, 応力が 400, 500, 584 MPa における $x = 3.5$ mm の Y 方向のひずみを示す. 図中の破線は溶接線の位置を表している. 応力が 400 MPa では, 母材部のひずみが大きく, 溶接部のひずみは相対的に小さかった. 応力の増加とともに, 溶接部にもひずみが生じ, 溶接線の 1 mm 程度内側でひずみが最小になった. また, ひずみは母材部から溶接線に向かって小さくなり, 溶接線から溶接部中心に向けて再び増加に転じた. このように, 溶接線近傍でひずみは複雑に変化していて, DIC によってその変化をとらえることができた.

Fig. 10 に示したように, DIC では試験片表面のひずみ分布を得ることができるため, ひずみの時間変化を求めることで, 任意の位置の応力-ひずみ曲線を得ることができる. $x = 3.5$ mm における溶接部中心 ($y = 0$), 溶接線付近 ($y = 4$ mm) および母材部 ($y = 22$ mm) の位置における応力-ひずみ曲線を Fig. 11(a) に示す. 破断した位置に近い $y = 22$ mm では, 応力に対してひずみが相対的に大きかった. それに対して, 溶接部中心と溶接線付近のひずみは相対的に小さく, 破断時のひずみはそれぞれ 0.30, 0.19 であった. Fig. 11(b) に示すように, 得られた応力-ひずみ曲線から, 各部の 0.2% 耐力が求まっていることがわかる. しかし, 試験片の最も強度の低い部分が引張強さに達すると, くびれが生じて変形が集中するために, DIC

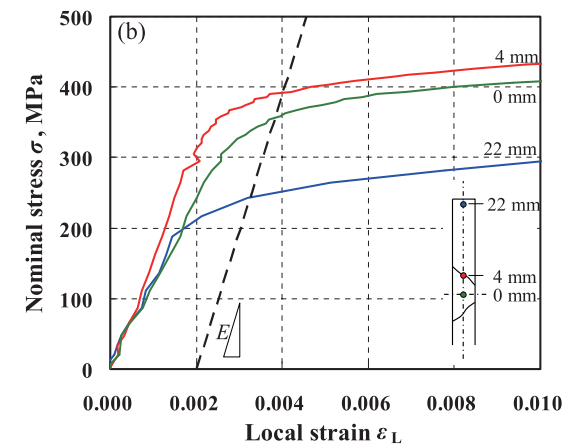
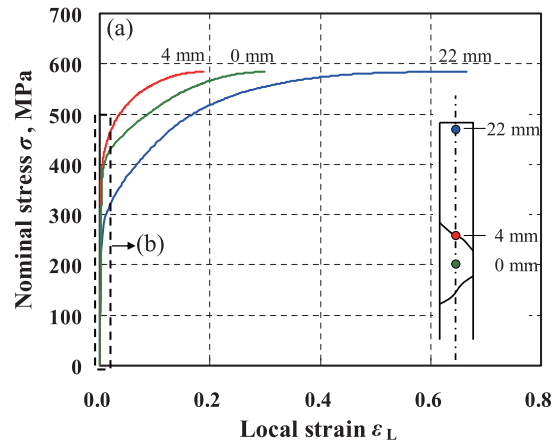


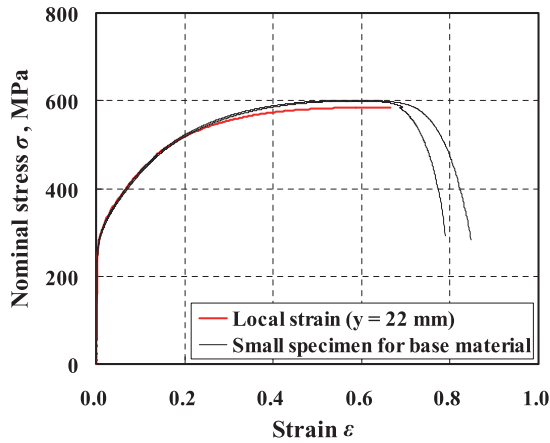
Fig. 11 Local stress-strain curves at weld metal, fusion line and base material ($x = 3.5$ mm).

で全ての位置の引張強さを求めることは難しかった.

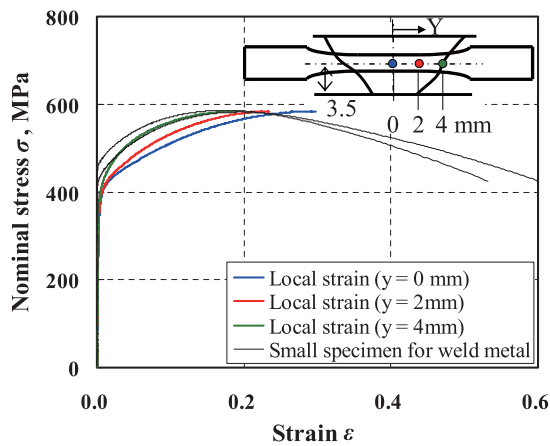
4. 考 察

4.1 応力-ひずみ曲線の比較

DIC により同定した平板試験片の破断位置に近い母材部 ($x = 3.5$ mm, $y = 22$ mm) における応力-ひずみ曲線を Fig. 12(a) に示す. DIC では, 0.67 程度の相対的に大きなひずみまで同定することができた. 図には, 微小試験片 (母材) の応力-ひずみ曲線も併せて示した. 試験は各 2 回実施し, その平均の引張強さは 600 MPa, 破断伸びは 82% であった. 微小試験片 (母材) の引張強さと差はあるものの, DIC により同定された応力-ひずみ曲線は微小試験片 (母材) とよく対応していた. とくに, ひずみが 0.2 以下で両者はほぼ一致していた. この結果から, ヤング率を 195 GPa⁽¹⁵⁾ として両者の 0.2% 耐力を求めた. DIC に



(a) Base material



(b) Weld metal

Fig. 12 Comparison of stress-strain curve between flat plate specimen and small specimen.

より同定した0.2%耐力は241 MPaであった。それに対して、2本の微小試験片（母材）の0.2%耐力はそれぞれ239 MPa、265 MPaであった。DICにより得られる0.2%耐力は、単軸の引張試験から得られる0.2%耐力とは異なる可能性があることに注意する必要があるが、両者の差は小さかった。

Fig. 12(b)には、平板試験片の溶接部における応力-ひずみ曲線を示す。DICでは、 $x = 3.5$ mmにおける $y = 0, 2, 4$ mm のひずみを求めた。図には、微小試験片（溶接部）の応力-ひずみ曲線を併せて示した。微小試験片（溶接部）では、切り出し位置により溶接部の形状が異なるため、応力-ひずみ曲線には違いが見られた。2本の微小試験片（溶接部）の平均の最大応力は585 MPa、破断時の伸びは57%であった。DICで同定した溶接線に近い $y = 4$ mm の応力-ひずみ曲線が最も微小試験片の応力-ひずみ曲線に近くなった。しかし、DICにより同定された応力-ひずみ

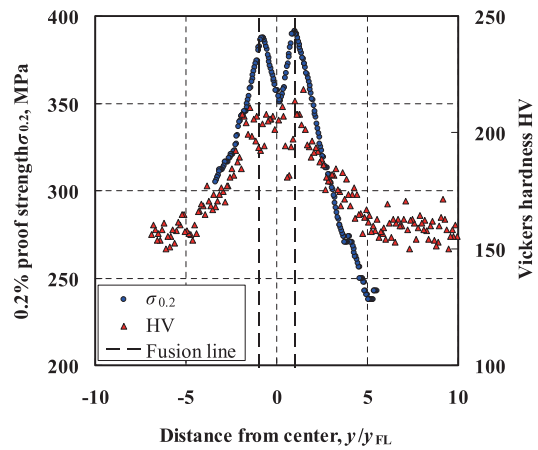


Fig. 13 Distribution of 0.2% proof strength and Vickers hardness.

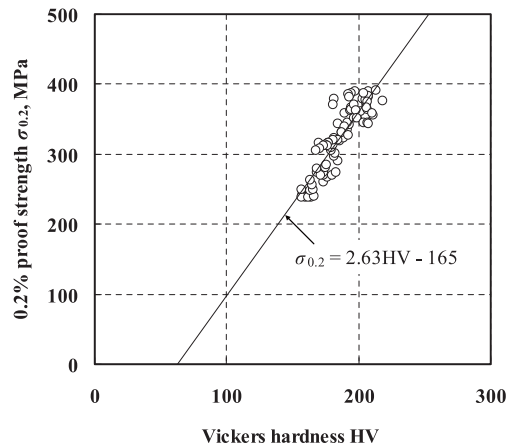


Fig. 14 Correlation between 0.2% proof strength and Vickers hardness.

曲線と比べると、微小試験片（溶接部）の0.2%耐力は大きかった。DICでは、評点間距離が小さい局所的なひずみが得られるのに対し、微小試験片（溶接部）で得られるひずみは、評点間に含まれる溶接部の形状に依存する。そのため、従来の伸び計を用いた引張試験では、径の小さい微小な試験片を用いても溶接部の応力-ひずみ曲線を取得するのは難しいようである。

4.2 0.2% 耐力と硬さの関係

DICで同定した $x = 3.5$ mm における Y 方向の0.2%耐力の分布を Fig. 13 に示す。図の横軸は、長さ Y を溶接部中心から溶接線までの長さ Y_{FL} で正規化して表している。図には、対応する位置におけるピッ

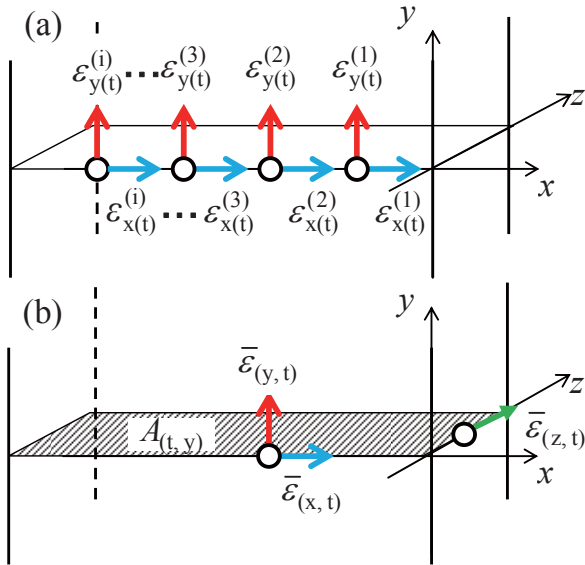


Fig. 15 Method for estimating cross-section using digital image correlation.

カーブ硬さの分布も併せて示した。0.2%耐力は溶接線付近で最大になり、溶接部中心に向けて減少した。また、溶接線から母材部に向かって距離が増加するにつれて0.2%耐力は減少した。溶接線付近の0.2%耐力は最大391 MPaであり、DICにより得られた母材の0.2%耐力241 MPaの約1.6倍であった。また、溶接部中心から溶接線までの長さの5倍までは母材よりも0.2%耐力が大きかった。このように、DICでは溶接線近傍の特異な0.2%耐力の分布を、高空間分解能で連続的に捉えることができている。一方、硬さは溶接部で相対的に大きくなり、溶接線から母材部に向かって距離が増加するにつれて小さくなった。

0.2%耐力と硬さの関係を Fig. 14 に示す。図には、測定値を最小二乗法により近似した直線も示した。0.2%耐力とビッカース硬さの間には、鋼種や圧延による加工硬化に関係なく相関があることが報告されている⁽⁸⁾。硬さの測定値にはばらつきがあるが、不均質な材料の変形過程において同定された0.2%耐力と硬さの測定値にも相関が見られた。

4.3 DIC による局所応力の同定

溶接部およびその周辺の降伏応力は240 MPa から390 MPa まで分布していて、Fig. 7 に示したように、破断後の試験片は不均一に変形した。このように強度が不均一な材料では、降伏後の断面積が荷重軸方向に対して均一でなくなる。そのため、材料強度を評価す

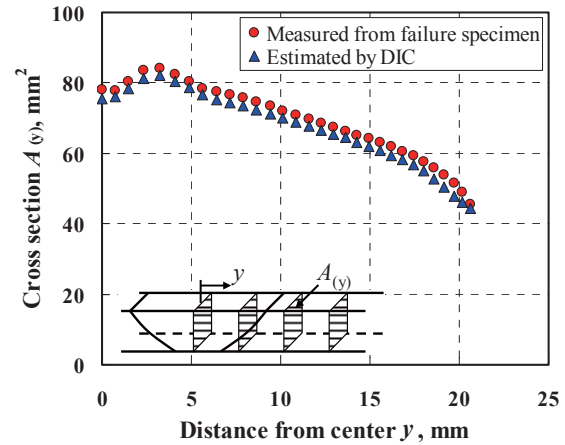


Fig. 16 Comparison of cross-section estimated by digital image correlation at maximum stress and measured from failure specimen.

るためには公称応力では適切でない可能性がある。そこで、DICにより各断面における断面積の変化を推定し、局所的な応力を同定することを試みた。

DICによる断面積の推定方法を Fig. 15 に示す。まず、時刻 t において、X 軸に平行な直線上の X および Y 方向のひずみ $\epsilon_{x(t)}^{(i)}$, $\epsilon_{y(t)}^{(i)}$ を DIC で求める。そして、以下の式で求めたひずみの算術平均値を、X および Y 方向の平均的なひずみ $\bar{\epsilon}_{x(t)}$, $\bar{\epsilon}_{y(t)}$ とする。

$$\bar{\epsilon}_{x(t)} = \frac{\sum \epsilon_{x(t)}^{(i)}}{n} \quad (1)$$

$$\bar{\epsilon}_{y(t)} = \frac{\sum \epsilon_{y(t)}^{(i)}}{n} \quad (2)$$

n はひずみを同定する X 軸に平行な直線の分割数であり、本研究では $n = 101$ とした。塑性変形中の体積は一定と考えられるため、以下の式で奥行き方向のひずみ $\bar{\epsilon}_{z(t)}$ を算出した。

$$\bar{\epsilon}_{z(t)} = \frac{1}{(1 + \bar{\epsilon}_{y(t)})(1 + \bar{\epsilon}_{x(t)})} - 1 \quad (3)$$

そして、 $\bar{\epsilon}_{x(t)}$ と $\bar{\epsilon}_{z(t)}$ から式(4)で断面積 $A_{(t,y)}$ を推定した。

$$A_{(t,y)} = A_0(1 + \bar{\epsilon}_{x(t)})(1 + \bar{\epsilon}_{z(t)}) \quad (4)$$

最大応力の時点で、DICで推定した断面積と Y 方向位置の関係を Fig. 16 に示す。図には、試験片破断後に測定した板厚および板幅から求めた断面積を併せ

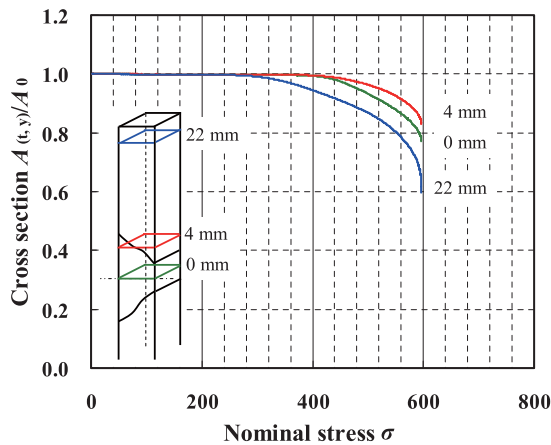


Fig. 17 Change in cross-section estimated by digital image correlation.

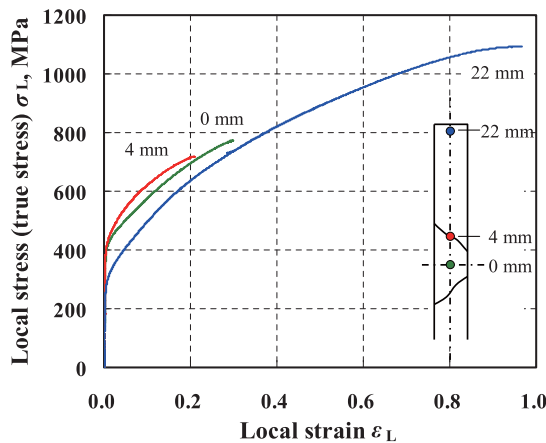


Fig. 18 Local stress-strain curve obtained by digital image correlation.

て示した。試験片が最大応力に到達した後は、変形がくびれ部に集中するため、最大応力以降の荷重によるくびれ部以外の変形は相対的に小さいと考えられる。溶接部の断面積は相対的に大きく、溶接部から母材部分に向かって離れるにしたがって断面積は小さくなった。DICにより推定された断面積は実測値に近く、 $y = 15$ mm 以下の範囲では推定された断面積は3%程度の誤差範囲内で一致した。

DICにより推定された試験中の断面積の変化をFig. 17に示す。図の縦軸は、推定された断面積 $A(t, y)$ を試験前の断面積 A_0 で正規化した値で表した。Fig. 11で求めた $y = 0, 4, 22$ mmにおける0.2%耐力は、それぞれ358, 391, 241 MPaであった。各部の応力が0.2%耐力に到達した時点での断面積の減少率は0.4%以下であり、断面積の変化が応力におよぼす影

響は無視できるほど小さかった。つまり、0.2%耐力はFig. 11の公称応力-ひずみ曲線で十分に求まっていることがわかる。

Fig. 18には、 $y = 0, 4, 22$ mmにおいて推定された局所的な応力（真応力）とひずみの関係を示す。図の縦軸は、荷重をその時刻における断面積 $A(t, y)$ で除した局所的な応力を表している。Fig. 11に示したように、公称応力で表した最大応力は584 MPaであった。一方、局所応力で表すと最大応力は、 $y = 20$ mmで1092 MPa、溶接部および溶接線近傍では、それぞれ771, 718 MPaに到達していることがわかった。

5. 結 言

本研究では、DICにより引張試験中の試験片表面の変位分布を測定し、溶接部とその周囲の不均一な材料強度分布を求めることを試みた。また、DICで同定された局所的な応力-ひずみ関係や0.2%耐力分布を、供試材から採取した微小試験片や硬さの測定結果と比較した。得られた結果を以下に示す。

- (1) DICにより溶接部周囲の変位分布およびひずみ分布を高空間分解能で連続的にとらえることができた。
- (2) 微小試験片（母材）の応力-ひずみ曲線は、DICにより得られた応力-ひずみ曲線とよく対応した。一方、従来の伸び計を用いた引張試験では、評点間に含まれる溶接部の形状により同じ応力でもひずみが異なるため、微小な試験片を用いても応力-ひずみ曲線を得ることは難しかった。
- (3) DICで求めた0.2%耐力分布は硬さの分布と同様の傾向を示した。また、溶接材についても硬さと0.2%耐力の間には相関関係があると考えられた。
- (4) DICを用いることで、引張試験中の断面積の変化を推定することができた。そして、溶接部を含む不均一な材料の任意の位置の局所応力（真応力）を推定することができた。

参考文献

- (1) G. F. Li and J. Congleton, "Stress corrosion cracking of a low alloy steel to stainless steel transition weld in PWR primary waters at 292°C", Corrosion Science, Vol. 42, Issue 6, pp.

- 1005-1021 (2000).
- (2) The Japan Society of Mechanical Engineers ed., The Rules on Fitness-for-Service for Nuclear Power Plants, JSME S NA1-2004, (2004), Maruzen.
 - (3) M. O. Speidel, R. Magdowski, "Stress corrosion crack growth in alloy 600 exposed to PWR and BWR environments", Proceedings of CORROSION/2000, NACE, Orlando, Paper no. 222 (2000).
 - (4) J. W. Kim, K. Lee, J. S. Kim and T. S. Byun, "Local mechanical properties of alloy 82/182 dissimilar weld joint between SA508 Gr.1a and F316 SS at RT and 320° C", Journal of Nuclear Materials, Vol. 384, pp.212-221 (2009).
 - (5) C. Jang, J. Lee, J. S. Kim and T. E. Jin, "Mechanical property variation within Inconel 82/182 dissimilar metal weld between low alloy steel and 316 stainless steel", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 85, pp.635-646 (2008).
 - (6) K. Minoshima, K. Yoneda, A. Yonezu, M. Sakihara and K. Kuroda, "Evaluation method of local mechanical properties using micro tensile testing and its application to cold-worked materials", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. A Vol. 76, No.764, pp. 493-499, (2010).
 - (7) T. Nakata, S. Komazaki, Y. Kohno and H. Tanigawa, "Tensile Property Evaluation by Stress/Strain Analyses of Small Punch Test Specimen Using Finite Element Method", Proceedings of the 47th Symposium on Strength of Materials at high Temperatures, pp.30-34, (2009).
 - (8) S. Matsuoka, Relationship between 0.2% Proof Stress and Vickers Hardness of Work-hardened Low Carbon Austenitic Stainless Steel, 316SS, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. A Vol.70 No. 698, pp. 1535-1541 (2004).
 - (9) A. Yonezu, T. Kondo and K. Minoshima, "Method to Determine Elasto-Plastic Properties by Indentation", Proceedings of the 56th JSMS Annual Meetings, pp.287-288, (2007).
 - (10) A. Kato, "Whole Field Measurement of Deformation Distributions Using Speckle Pattern", Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics, Vol. 2, No. 1, pp.15-19 (2002).
 - (11) K. Arakawa, R. H. Drinnon Jr., F. X. Wang and A. S. Kobayashi, "Measurement of Dynamic Crack Opening Displacement by Moire Interferometry", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. A Vol. 58, No. 545, pp. 59-63, (1992).
 - (12) F. Grytten, H. Daiyan, M. Polanco-Loria and S. Dumoulin, "Use of digital image correlation to measure large-strain tensile properties of ductile thermoplastics" Polymer Testing, Vol.28, Issue 6, PP.653-660 (2009).
 - (13) F. Lagattu, J. Brillaud, M. Christine and L. Frenot, "High strain gradient measurements by using digital image correlation technique", Materials Characterization, Vol. 53, Issue 1, pp. 17-28 (2004).
 - (14) M.A. Sutton, J.H. Yan, V. Tiwari, H.W. Schreier and J. J. Orteu "The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements", Optics and Lasers in Engineering, Vol. 46, Issue 10, pp.746-757 (2008)
 - (15) The Japan Society of Mechanical Engineers ed., The Rules on Design and Construction for Nuclear Power Plants, JSME S NC1-2005, (2005), Maruzen.