

画像計測を用いた試験システムによる 突合わせ溶接継手の低サイクル疲労強度の検討

館石 和雄¹・判治 剛²

¹正会員 工博 名古屋大学教授 理工科学総合研究センター (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²学生員 工修 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

本研究では、従来の砂時計型試験体では困難とされている、溶接部の低サイクル疲労強度を実験的に明らかにすることを目的とし、新たな試験システムとして、画像計測を用いたひずみ制御低サイクル曲げ試験システムを開発した。あらかじめ、画像計測面近傍にひずみゲージを貼付し、それにより測定できた範囲内で画像計測値とゲージ値を比較することで本計測手法の精度を確認した。本手法を用いて素材試験体と突合わせ溶接継手試験体の疲労試験を行った結果、素材試験体に関しては過去の研究におけるデータと同様の傾向を示した。一方、溶接継手試験体では、素材試験体の疲労強度を大幅に下回っており、溶接継手の低サイクル疲労強度は著しく低下することを明らかにした。

Key Words : low cycle fatigue strength, welded joint, image analysis

1. はじめに

1995年1月に発生した阪神・淡路大震災において多くの低サイクル疲労による損傷事例が報告された¹⁾。例えば橋脚基部周辺において、数サイクルの反復曲げにより、低サイクル疲労と考えられるき裂が発生し、部材が終局状態に至る事例²⁾や、ラーメン橋脚隅角部において、塑性変形の繰り返しにより延性き裂が発生し、脆性破壊が生じた事例³⁾などがある。このように鋼橋のひずみ集中部では過大な外力の繰り返しによりき裂が発生し、耐荷力が著しく低下する危険性がある。そのため、地震時の繰り返し荷重による低サイクル疲労や脆性破壊など、高塑性域での破壊メカニズムについて解明する必要があると考えられる。

鋼素材の低サイクル疲労に関する研究は、造船や機械などの分野で数多く行われており⁴⁾、鋼素材の低サイクル疲労強度については、塑性ひずみ振幅と疲労寿命が両対数で直線関係を表すという、Manson-Coffin流関係式がほぼ成り立つことが明らかとなっている。しかし、大震災での事例やその後の

研究^{2), 5)}により、ほとんどの低サイクル疲労き裂は溶接継手部から発生することが示されている。したがって鋼素材のみでなく、溶接継手の低サイクル疲労強度を明らかにすることが重要となる。しかし従来の砂時計型試験体を用いた方法(WES-1101)⁶⁾では、試験断面は一断面のみであり、さらにその断面内でひずみ、応力の分布も表面と内部では異なることが知られており、疲労強度を評価するための物理量を捉えにくい。したがって、場所によって材料特性が大きく異なる溶接継手に適用することは困難である。そのため金多・甲津⁷⁾、町田ら⁸⁾は、溶接部から小片を切り出し、円柱状に加工した丸棒試験体を用いて溶接部の疲労強度に関する研究を行っている。また飯田ら⁹⁾は、9%Ni鋼の母材および溶接継手に対して、板曲げにより低サイクル疲労試験を行っている。いずれの研究においても溶接部の疲労強度は母材のそれより明らかに低下することを示している。しかし、金多・甲津や町田らの研究では試験体の形状による制約から、また飯田らの研究ではひずみの測定にひずみゲージを用いていることから、対象とできるひずみの大きさに限界があり、大ひずみ領域

に適用することは難しい。したがってこれまでのところ、溶接継手部の低サイクル疲労強度に関する十分なデータを得るには至っていない。

近年、酒井・松浦¹⁰⁾は、板の曲げ試験によって生じる平板側面の変形形状を画像計測によってとらえ、大ひずみを計測する手法を提案している。板曲げ試験では試験体に生じる応力状態を把握することが困難であるという欠点があるが、試験体に変形を与えるのが容易であり、溶接を含んだ試験体にも適用可能であると考えられる。また小茂鳥ら^{11), 12)}、桑村・山本¹³⁾は、ひずみ振幅が大きくなるとき裂発生位置が材料表面から内部へと遷移することを明らかにしているが、板曲げ試験では、き裂は試験体表面から発生すると考えられることから、このようなき裂発生位置の相違について考慮する必要がないという利点もある。

そこで本研究では、板曲げ試験による低サイクル疲労試験システムの構築を行った。その際のひずみ計測手法として、ひずみゲージによる測定が挙げられるが、15%程度以上のひずみの測定は不可能であり、大変形の繰り返しによりひずみゲージが剥離してしまうなどの問題がある。そこで、画像計測を用いた大ひずみ計測システムを開発し、これによりき裂発生位置におけるひずみを計測した。本計測システムは酒井・松浦のシステムを改良したものであり、試験体側面に描いた標点の移動量からひずみを計測するものである。

本研究では、まず鋼素材の試験体に対して開発した低サイクル曲げ疲労試験を行い、過去のデータと比較することで、本試験システムの妥当性を検証する。さらに、溶接継手に対して適用し、溶接継手の低サイクル疲労強度について明らかにする。

2. 画像計測によるひずみ計測システム

(1) 計測システム

計測システムは、デジタルカメラ、画像処理プログラム、疲労試験機で構成されている(図-1参照)。デジタルカメラは一般に市販されているものを使用した。また、カメラはコンピュータに接続されており、リリース操作をコンピュータ側から制御でき、画像データの高速自動転送が可能である。なお、カメラの有効画素数は約311万画素(2160×1440)、撮影距離は18.8~36.1cmである。

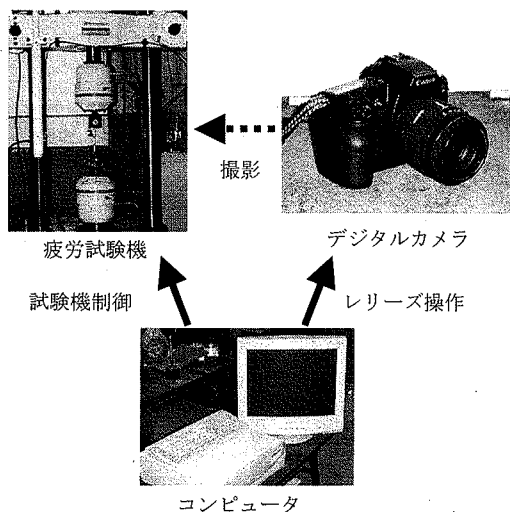


図-1 試験システムの概要

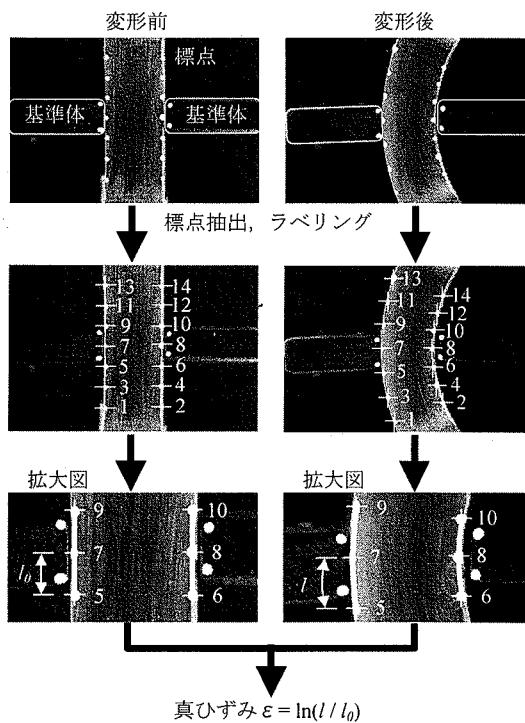


図-2 ひずみ計測の流れ

(2) ひずみ計測手法

画像計測によるひずみ計測の流れを以下に示す(図-2参照)。なお、使用したコンピュータの性能はPentium II 600MHz / 256MByteRAMであり、画像を撮影し、ひずみを算出するまでに要する時間は画像データの受信が約15秒、ひずみ算出が約45秒の計約60秒である。

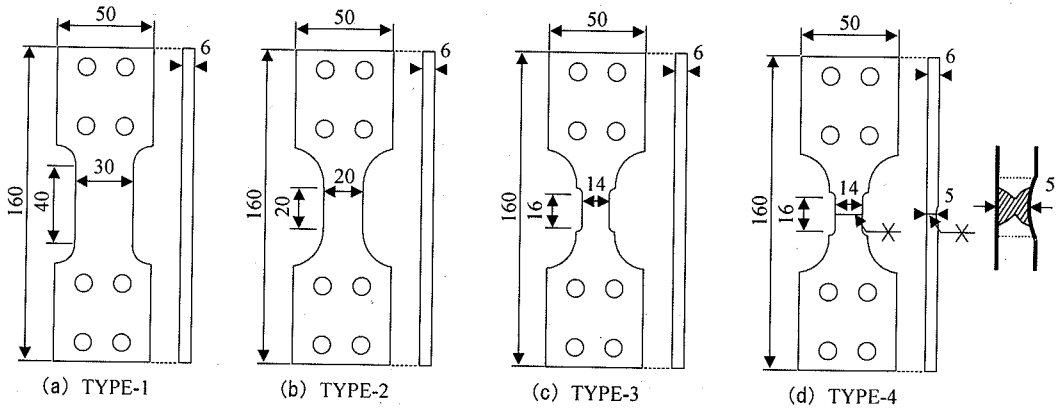


図-3 試験体の形状および寸法 (Unit:mm)

表-1 供試鋼材の機械的性質と化学成分

種類	鋼種	溶接	引張試験			化学成分 (%)				
			降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	C ×100	Si ×100	Mn ×100	P ×1000	S ×1000
TYPE-1, 2	SM490A	無	437	551	26	16	34	145	17	4
TYPE-4		有								
TYPE-3		無	344	513	27	14	37	143	16	5
溶接棒*	JIS Z 3211		410	460	32	8	14	34	14	9

*溶接棒機械的性質, 化学成分は規格値である

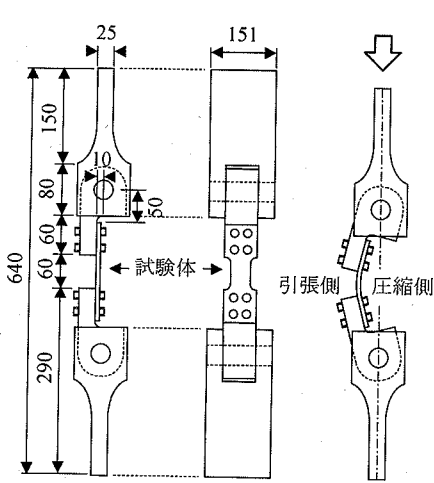


図-4 試験治具のおよび荷荷方法 (Unit:mm)

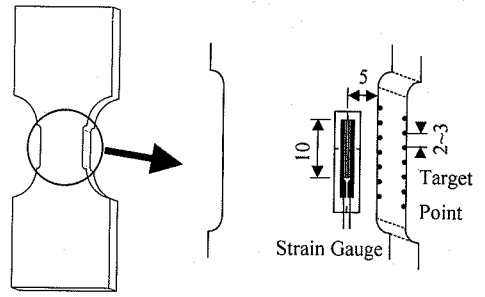


図-5 標点とひずみゲージの位置関係 (Unit:mm)

a) 標点の抽出

計測前に試験体側面のエッジに沿ってひずみ計測用の標点を設ける。画像計測による標点抽出を容易にするため、標点は赤色とした。まず、デジタルカメラで変形前後の試験体側面の画像を記録し、コンピュータへ転送する。次に、画像データの色彩情報にしきい値を設け、赤色の領域のみを抽出する。ただしこの時点では、標点以外のノイズ成分も画像内に含まれる。さらに赤色の領域をラベリングし、それぞれの画素数を求め、ある画素数以下の領域はノ

イズ成分として除去する。これにより標点のみがメモリ上に記録される。

b) ひずみの算出

記録した標点の重心の座標を求め、再度、標点をラベリングし、行、列を規則正しく並べなおす。次に、各標点間の重心間距離を計算し、変形前後の距離の変化から、各標点間の真ひずみを求める。ここで標点間距離は、隣り合う3つの標点から回帰曲線をひき、その曲線を積分することにより求めた(図-2参照)。また、試験体側面と同一平面に位置

するようにキャリブレーション用基準体を試験体に貼り付け、同時に写し込んだ。これは、変形前後の画像における1画素の大きさの変化を補正するためのものである。

(3) 試験体および载荷方法

試験体の形状および寸法を図-3に、供試鋼材のミルシートによる機械的性質、化学成分を表-1に示す。試験体は板厚8mmの平板から採取し、6mmまで機械切断した後、表面に傷がなくなるまで载荷軸方向に入念に研磨した。素材試験体はTYPE-1, 2, 3の3種類用意したが、これは試験を進める過程で最適な形状を試行錯誤し、加工したためである。また、TYPE-4は中央に突合わせ溶接を施した試験体である。溶接はX開先に3パス(電流130A, 電圧20V)で行った。溶接ビードによるひずみ集中をなくすために余盛りは削除した。さらに、溶接部で最大のひずみが生じるように中央部の板厚を滑らかに削りこんだ形状とした。なお、超音波探傷により溶接部に欠陥は検出されなかった。また、試験体表面に傷がなくなるまで入念に研磨した。

試験には島津サーボパルサを用い、曲げ荷重の負荷には図-4に示す治具を使用した。この治具は試験機のヘッドを上下させることにより、試験体に曲げ荷重が作用する構造となっている。

(4) ひずみ計測結果の比較

画像計測結果と比較するために、図-5に示すように抵抗線式塑性域ゲージ(東京測器製)を試験体の画像計測面から約5mmの箇所には貼付した。ひずみゲージのベース材は大きな面外方向の変形を受けると剥離しやすく、今回のような曲げ試験には不向きであるが、ひずみゲージが剥離しない範囲で曲げ試験を行って、画像計測により求めたひずみと比較した。なお、今回使用した塑性域ゲージは、鋼板の単調引張試験において約15%程度までのひずみが測定可能とされている。その比較結果を図-6に示す。今回の画像計測における標点間距離は約2~3mmであり、ひずみゲージのゲージ長は10mmであるため、画像計測値はゲージ測定範囲とほぼ同範囲におけるひずみの平均値とした。ひずみゲージにより測定できた範囲は概ね $-0.12 \sim +0.15$ であるが、その範囲内で両者は非常によく一致した。これより、大ひずみ領域においても画像計測を用いて十分な精度でひずみが計測できているものと考えられる。本ひずみ計測手法は標点剥離しない限り計測が可能であり、これまでに約25%程度のひずみを与えても標点剥離しないことを確認している。

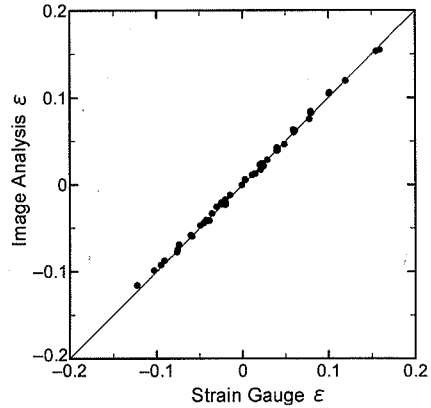


図-6 画像計測結果とひずみゲージ値の比較

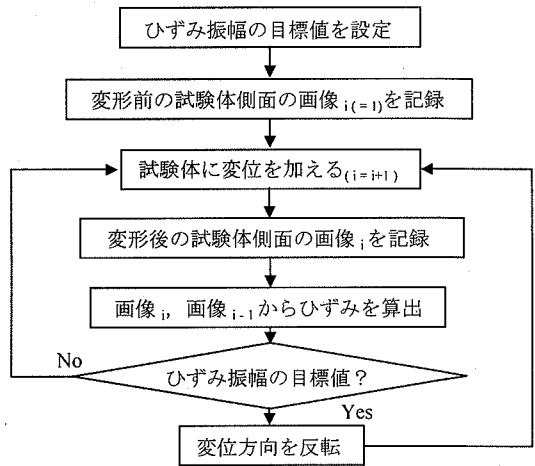


図-7 疲労試験のフロー

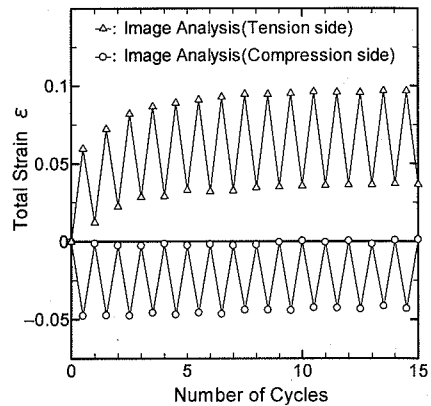


図-8 繰り返し数とひずみ履歴

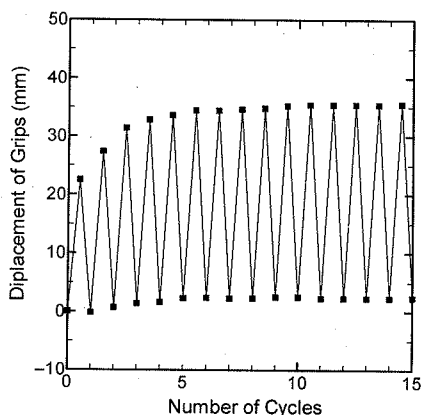


図-9 繰り返し数と変位履歴

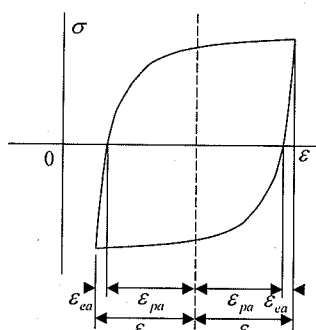


図-10 記号とヒステリシスループとの対応

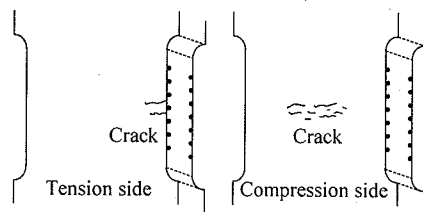
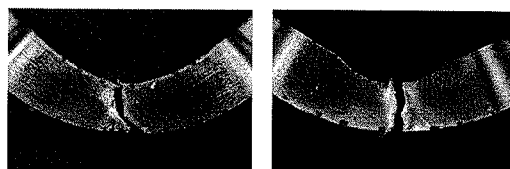


図-11 引張側と圧縮側のき裂発生位置



図-12 圧縮側に生じたき裂



(a) 素材試験体 (b) 溶接継手試験体

図-13 破断位置

3. 低サイクル疲労試験方法

疲労試験の流れを図-7に示す。画像計測を用いたひずみ計測と板曲げ試験を連携し、き裂発生が予想される位置のひずみを制御することにより低サイクル疲労試験を行った。堀田ら¹⁴⁾によると、構造用鋼材はひずみ速度にさほど敏感ではないが、軸方向ひずみ速度が $10^{-2}/\text{sec}$ 以上になると低サイクル疲労強度への影響があるといわれている。今回の試験では、数mmゆっくり変位させ(約 $10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3}/\text{sec}$ 程度)、その都度ひずみを計測したため、ひずみ速度の影響はないものと考えられる。なお疲労試験は片振り試験としたため、試験体には長手方向に圧縮ひずみのみが作用する側と引張ひずみのみが作用する側が存在する。以後、前者を圧縮側、後者を引張側と呼ぶ(図-4参照)。

疲労試験中に記録した繰り返し数とひずみ履歴の関係の例を図-8に示す。今回は、引張側のひずみ振幅が一定となるようにひずみを制御した。その結果として、圧縮側のひずみ振幅もほぼ一定となった。

なお設定したひずみ振幅は、素材試験体で0.02～0.13、溶接継手試験体で0.02～0.09である。

今回の制御方法ではそれぞれの側に平均ひずみが生じるが、過去の研究^{15)~17)}によると、平均ひずみは低サイクル疲労特性にほとんど影響しないといわれており、特に飯田ら¹⁷⁾は、平均ひずみが0.16の場合でもその影響はごく僅かであると述べている。したがって、今回設定したひずみ振幅では平均ひずみの影響は無視できると考えられ、本研究においても平均ひずみの影響は考慮していない。また、同試験中の繰り返し数と治具の変位の関係を図-9に示す。変位は5サイクル目まで徐々に増加し、その後定常状態となっている。SM490は繰り返し硬化する鋼材であり、硬化現象は2サイクル目までが著しく、その後の変化はわずかであるとされており、この結果はその傾向をよく表している。なお、変位-ひずみ関係が定常状態となった後は、ひずみ制御と変位制御は同じ意味合いとなるため、試験時間の短縮を考え、変位制御で試験を行った。

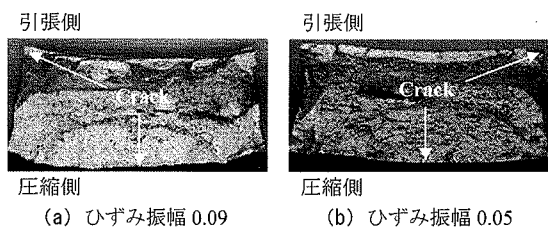


図-14 素材試験体の破面状況

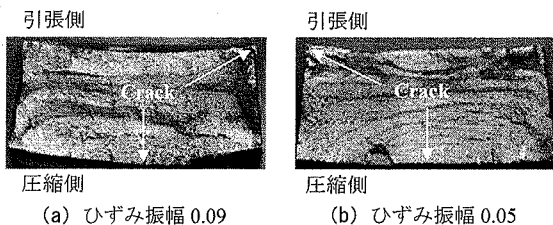


図-15 溶接継手試験体の破面状況

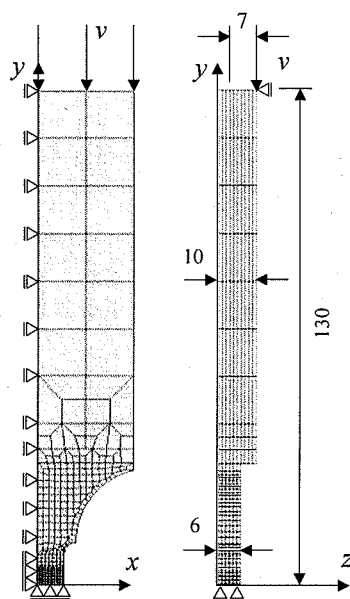


図-16 解析モデルの例および境界条件 (Unit:mm)

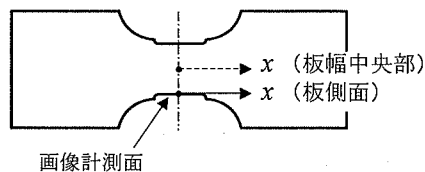


図-17 座標

4. 疲労試験結果

本論文中で記す記号とヒステリシスループの関係を図-10に示す。ここで ϵ_{ia} : 全ひずみ振幅, ϵ_{pa} : 塑性ひずみ振幅, ϵ_{ea} : 弾性ひずみ振幅である。なお、本研究で用いたような板曲げ試験では断面内の応力が測定できず、塑性ひずみ振幅、弾性ひずみ振幅を区別できないため、全ひずみ振幅で結果を整理した。以後、全ひずみ振幅をひずみ振幅と呼ぶ。

(1) き裂発生状況

素材試験体、溶接継手試験体ともに、き裂は引張側、圧縮側の両側から発生した。画像計測面とき裂の位置関係を図-11に示す。板幅方向についてのき裂発生位置は、引張側、圧縮側で異なっており、引張側では板の側面(画像によりひずみを計測した面)から、圧縮側では板幅中央部からき裂が生じた。ただし、ひずみ振幅0.02の溶接継手試験体に関しては引張側からき裂が発生せず、圧縮側においては試験体の長手方向中央部の他にHAZ付近からも発生した。圧縮側に生じたき裂の例を図-12に示す。多くのき裂が板幅中央に発生していることを確認できる。また破断位置は図-13に示すように、どの試験体も長手方向の試験体中央部である。

(2) 破面観察

ひずみ振幅0.09, 0.05のときの破面を図-14, 15に示す。図-14は素材試験体の、図-15は溶接継手試験体の破面である。前述のように、引張側は板側面か

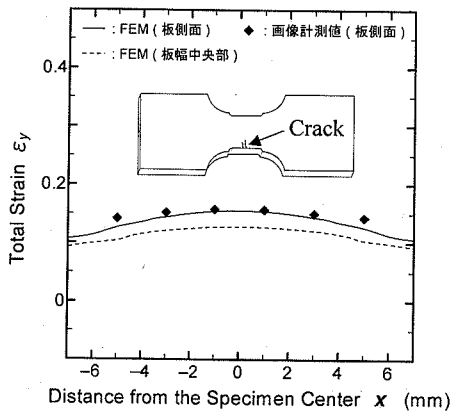
ら、圧縮側は板幅中央部からき裂が発生している。圧縮側では板幅方向に数個の微小なき裂が発生し、それらが合体することで進展する様子を確認できる。また、ひずみ振幅が大きい場合は段差を伴って進展している。

5. 有限要素解析

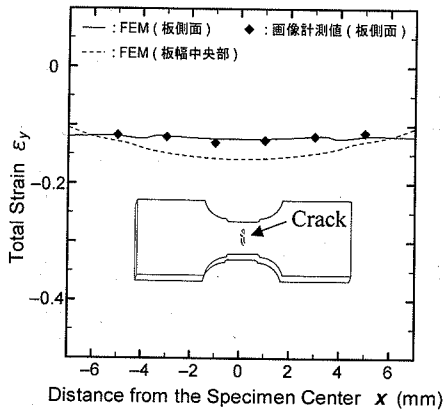
今回の疲労試験においては、引張側では画像計測によってひずみを計測した板側面からき裂が発生したが、圧縮側では板幅中央部から生じたため、き裂発生位置でのひずみを計測できていない。そこで、有限要素解析を用いて板幅方向のひずみ分布を確認した。

(1) 解析方法

有限要素解析には解析プログラムMARCを用いた。解析モデルの例および境界条件を図-16に示す。解析モデルは試験体および治具の対称性を考慮して、

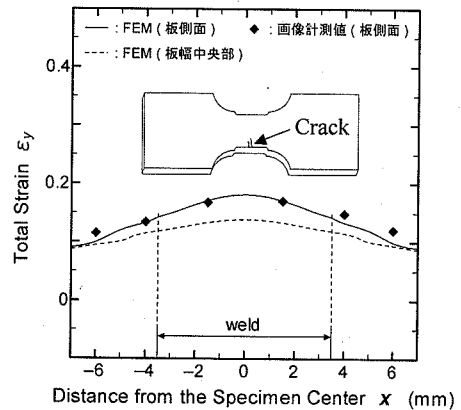


(a) 引張側

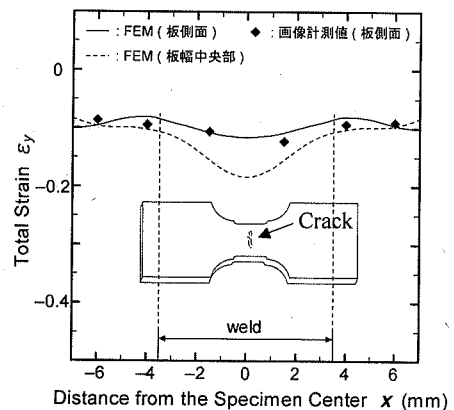


(b) 圧縮側

図-18 素材試験体の長手方向ひずみ分布



(a) 引張側



(b) 圧縮側

図-19 溶接継手試験体の長手方向ひずみ分布

1/4モデルとした。解析に用いた要素は8個の節点からなる3次元要素であり、最小要素サイズは $0.5 \times 0.5 \times 1.0\text{mm}$ である。境界条件としては、対称軸となるy軸上、x軸上の変位を拘束し、ピンの中心部にあたる位置でz方向の変位を拘束した。荷重は実際の試験と同様に、試験体中心線から7mm偏心させた位置にy方向の強制変位 v として与えた。解析モデルの母材部の鋼種はSM490Aであり、その機械的性質はミルシート値を参考にした。溶接部に関しては、実際に強度試験を行っていないため、今回は溶接部の降伏点をSM490Aの20%増しと仮定した。構成則はバイリニア型とし、二次勾配はヤング係数の1/100とした。また、硬化則は移動硬化則とした。

(2) 解析結果

a) 長手方向のひずみの分布

例として素材試験体 (TYPE-3)、溶接継手試験体 (TYPE-4) に40mmの変位を与えたときの、引張

側、圧縮側における試験体長手方向のひずみの分布を、図-17に示すように座標をとり、図-18, 19に示す。図-18は素材試験体の、図-19は溶接継手試験体の解析結果である。図中の実線は板側面 (画像計測面) の、破線は板幅中央部の解析結果である。また、◆は解析と同程度の変位を与えたときの画像計測値である。画像計測では標点と標点の間の平均的なひずみを計測しているため、標点間の中央の位置にプロットした。板側面における解析値は画像解析値とよく一致しており、解析により実際の疲労試験をよく再現できていると考えられる。また引張側では板側面の方が、圧縮側では板幅中央部の方が大きな絶対値のひずみが生じており、き裂発生位置と同様の傾向を示している。

b) 応力の多軸性の影響

今回の試験では引張側と圧縮側でき裂発生位置が異なった。板側面と板幅中央部では塑性拘束の違いにより、応力多軸性の強さも異なっている可能性が

ある。応力多軸性が低サイクル疲労強度に与える影響については大南ら¹⁸⁾、大路¹⁹⁾の研究があり、それによれば多軸応力下においても、次式で求められる八面体せん断ひずみ説に基づく等価ひずみで低サイクル疲労強度を整理することができるとされている。そこで、有限要素解析結果からこの等価ひずみを算出し、検討を加えた。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{oct\ eq} &= \frac{3}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{\gamma_{oct}}{1+\nu} \\ &= \frac{\sqrt{2}}{3} \left\{ (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 \right\}^{1/2} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで γ_{oct} : 八面体せん断ひずみ

ε : 全ひずみ (x : 板幅方向, y : 長手方向, z : 板厚方向)

$\varepsilon_{oct\ eq}$: 等価ひずみ, ν : ポアソン比 (=0.5)

長手方向のひずみと等価ひずみの比較の例を図-20に示す。これは素材試験体において40mmの変位を与えたときのものであり、引張側は板側面の、圧縮側は板幅中央部の解析結果である。図中の実線は長手方向のひずみの分布であり、破線は等価ひずみの分布である。なお、座標は図-17に示すようにとってある。図より、板幅方向の位置によらず等価ひずみは長手方向のひずみとほとんど一致しており、本載荷方法では応力の多軸性の影響は板幅方向の位置によらず小さいものと考えられる。

以上の結果より、長手方向のひずみ振幅を用いて疲労試験結果を整理した。また、圧縮側から生じたき裂に関しては、解析結果から求めた板側面と板幅中央部のひずみの比を用いて、そのひずみ振幅を補正した。

6. 疲労試験結果の整理

(1) 素材試験体

a) き裂発生寿命

素材試験体におけるき裂発生寿命と長手方向のひずみ振幅の関係を図-21に示す。なお、圧縮側のひずみ振幅に関しては解析結果を用いて補正してある。ここでき裂発生寿命は、試験中、試験体表面をルーペで観察し、約0.5mm程度のき裂を確認したときの繰り返し数とした。併記した線は、西村・三木¹⁵⁾、中込・李¹⁶⁾、二瓶ら²⁰⁾による砂時計型におけるき裂発生寿命 - ひずみ振幅の提案式であり、次式のようなManson-Coffinの関係式である。

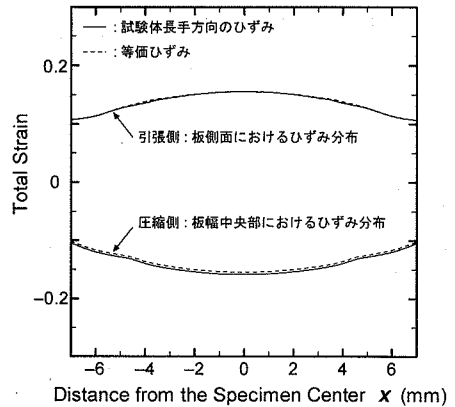


図-20 長手方向のひずみと等価ひずみの比較

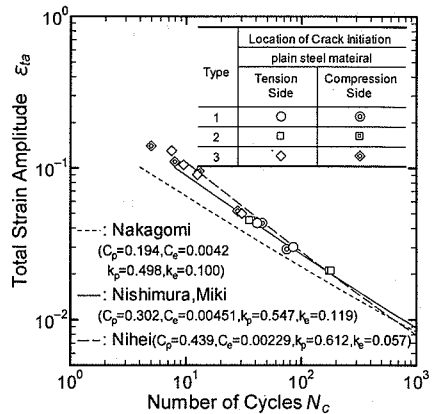


図-21 ひずみ振幅補正後の素材試験体のき裂発生寿命

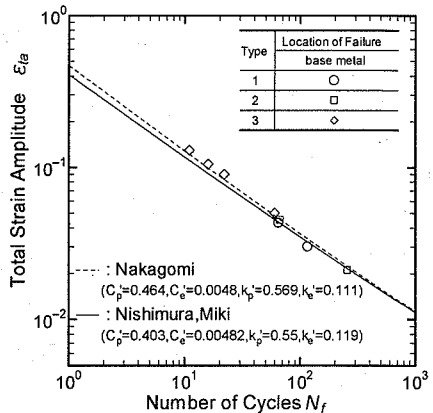


図-22 素材試験体の破断寿命

$$\varepsilon_{ta} = \varepsilon_{pa} + \varepsilon_{ca} = C_p \cdot (N_c)^{-k_p} + C_c \cdot (N_c)^{-k_c} \quad (2)$$

ここで N_c : き裂発生寿命, C_p, C_c, k_p, k_c : 定数

それぞれの研究におけるき裂発生寿命は、西村・

三木は0.3mm程度、中込・李は0.1mm程度、二瓶らは0.5~0.8mm程度のき裂を発見したときと定義している。また、西村・三木、中込・李の提案式はひずみ振幅0.1以下のデータから、二瓶らのものは0.01以下のデータからそれぞれ求めたものである。図より、試験体のタイプによる疲労強度の違いはみられず、試験体の形状によらない試験結果となっている。また、本研究のき裂発生の定義、設定ひずみ振幅が同程度である西村・三木の提案式と比較すると、引張側、圧縮側ともによく一致している。

従来より板曲げの疲労強度は砂時計型試験体のような軸力による疲労強度と比べ同程度、もしくはやや高くなるといわれている²¹⁾。その原因は明らかでなく、また両者の強度の差も研究者^{20)~22)}によりばらついているが、今回の結果をみる限り疲労強度の差はほとんどない。これは従来の板曲げ試験で用いられていたゲージによるひずみ計測法よりも、画像計測によりき裂発生位置のひずみを高精度に測定できたことによるとも考えられるが、詳細は不明である。しかし、素材に関して従来の試験結果と同じ結果が得られたということから、本システムのひずみ計測手法およびひずみ制御の精度は十分であることが確認できたといえる。

b) 破断寿命

素材試験体における破断寿命と長手方向のひずみ振幅の関係を図-22に示す。なお、ひずみ振幅は引張側、つまり画像計測により計測したものである。破断寿命は、試験体が完全に分離したときの繰り返し数とした。図中に西村・三木、中込・李が提案した破断寿命 - ひずみ振幅の提案式(式(3))も併記した。

$$\epsilon_{ia} = \epsilon_{pa} + \epsilon_{ca} = C_p' \cdot (N_f)^{-k_p'} + C_e' \cdot (N_f)^{-k_e'} \quad (3)$$

ここで N_f : 破断寿命, C_p', C_e', k_p', k_e' : 定数

今回の試験体は、破断面で一様なひずみ分布の砂時計型試験体とは異なり、板厚方向のひずみ分布は変化しており、また両者の破断面の断面積も異なっている。さらに、今回の試験では複数のき裂が発生している。このようにひずみ分布や断面積、き裂発生状況が異なる両者の結果を一概に比較することはできないが、今回の試験結果は過去のデータと同じような傾向を示している。

(2) 溶接継手試験体

a) き裂発生寿命

突合せ溶接継手試験体に本試験システムを適用し、そのときのき裂発生寿命と長手方向のひずみ振幅の関係を図-23に示す。なお、圧縮側のひずみ振

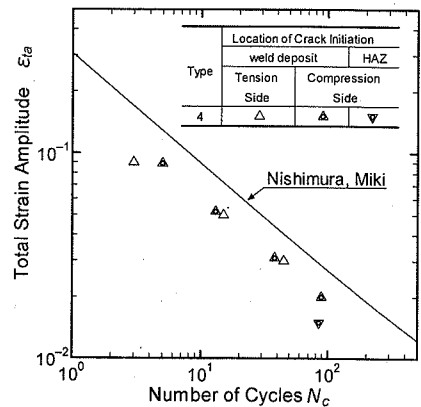


図-23 ひずみ振幅補正後の溶接継手試験体のき裂発生寿命

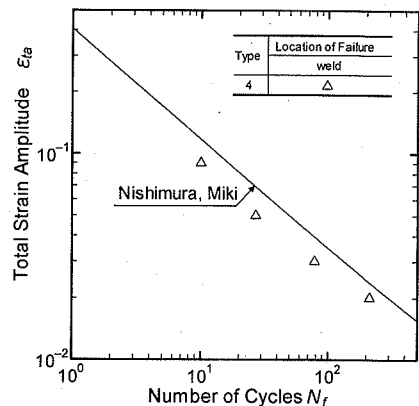


図-24 溶接継手試験体の破断寿命

幅は解析結果を用いて補正してある。併記した線は西村・三木の提案式、すなわち鋼素材におけるき裂発生寿命とひずみ振幅の関係である。Δは引張側の溶接金属部から、▲は圧縮側の溶接金属部から、▽は圧縮側のHAZからそれぞれき裂が発生したものである。どのひずみ振幅においても、き裂発生寿命は母材のそれを下回っている。その低下率は寿命で約50%程度であり、溶接によりき裂発生寿命は著しく減少することがわかる。

一般に溶接部、特にHAZは母材と材料特性が大きく異なり、じん性が低下することなどが知られている。したがって、溶接部の低サイクル疲労強度を評価する上で、HAZの疲労強度についても十分に検討しておく必要がある。今回の試験でHAZからき裂が発生したのはひずみ振幅0.02の場合の1体のみであるが、その疲労強度は溶接金属のそれをさらに下回っている。しかし、1つのデータのみであり、HAZの疲労強度を明らかにするまでには至っていない。

今後、試験体形状を改良し、さらに検討していく必要があると考えている。

b) 破断寿命

溶接継手試験体における破断寿命と長手方向のひずみ振幅の関係を図-24に示す。なお、ひずみ振幅は引張側のもとした。図中に西村・三木による提案式、すなわち鋼素材のものも併記した。今回の結果から、溶接継手の破断寿命は母材のそれよりも減少していることがわかり、寿命で約40%程度低下している。したがって、溶接により破断寿命もき裂発生寿命と同程度減少し、溶接が低サイクル疲労強度に与える影響は非常に大きいと考えられる。

7. まとめ

本研究では、画像計測を用いたひずみ制御低サイクル疲労試験を開発した。そのシステムを用いて素材試験体と溶接継手試験体に対して低サイクル疲労試験を行い、試験システムの妥当性の確認、および溶接による低サイクル疲労強度への影響について明らかにした。以下に本研究の成果をまとめる。

- 構築したひずみ計測手法により求めたひずみと計測面近傍に貼付したひずみゲージの出力値を比較し、大ひずみ領域において十分な精度で計測できることを確認した。なお、画像を撮影し、ひずみを計算するまでに要する時間は約 60 秒であった。
- き裂発生位置は、引張側においては板側面、すなわち画像計測により計測した面であり、き裂発生位置とその箇所におけるひずみ振幅の関係を捉えることができた。また圧縮側では、画像計測によりひずみを計測していない板幅中央部からき裂が発生した。
- 有限要素解析を用いて板幅方向のひずみ分布を確認すると、き裂が発生した位置でひずみが最大となった。
- 圧縮側のひずみ振幅に関しては FEM により補正し、それにより疲労試験結果を整理した。その結果、素材試験体では両側とも過去のデータとよく一致し、本試験システムにより低サイクル疲労強度を評価できると考えられる。
- 本試験システムを突合わせ溶接継手試験体に対して適用した。その結果、どのひずみ範囲においても、き裂発生寿命および破断寿命は素材のものを下回った。寿命において前者では約 50%、後者では約 40%低下した。

参考文献

- 1) 渡邊英一, 前川義男, 杉浦邦征, 北根英雄: 阪神・淡路大震災特集-第4回-鋼橋の被害と耐震性, 土木学会誌, Vol.80, No.7, pp.54-62, 1995.
- 2) 坂野昌弘, 岸上信彦, 小野剛史, 森川友記, 三上市蔵: 三角リブ付き鋼製橋脚基部の超低サイクル疲労挙動, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1281-1288, 1998.
- 3) 三木千寿, 四十沢利康, 穴見健吾: 鋼製橋脚ラーメン隅角部の地震時脆性破壊, 土木学会論文集, No.591/I-43, pp.273-281, 1998.
- 4) 例えば, 飯田国広: 歪制御低サイクル疲労, 溶接学会誌, Vol.37, No.6, pp.542-559, 1968.
- 5) 坂野昌弘, 三上市蔵, 鷹羽新二: 鋼製橋脚隅角部の低サイクル疲労挙動, 土木学会論文集, No.563/I-39, pp.49-59, 1997.
- 6) WES-1101: 溶接構造用金属材料及び溶接金属のひずみ制御方法による低サイクル疲労試験法, 日本溶接協会, 1979.
- 7) 金多潔, 甲津功夫: 鋼構造溶接接合部の低サイクル疲労強度に関する実験的研究(その1), 日本建築学会論文報告集, No.313, pp.30-38, 1982.
- 8) 町田進, 的場正明, 吉成仁志, 西村隆一: ホットスポット応力基準による疲労強度評価(第2報), 日本造船学会論文集, Vol.170, pp.705-721, 1991.
- 9) 飯田國廣, 高允宝, 永井英晴: 9%Ni鋼母材および溶接金属の低サイクル両振り曲げ疲労強度線図, 日本造船学会論文集, Vol.138, pp.403-409, 1975.
- 10) 酒井理哉, 松浦真一: 画像計測を用いたひずみ制御の低サイクル疲労試験システム, 電力中央研究所報告, U00068, 2001.
- 11) 小茂鳥潤, 清水真佐男: 極低サイクル疲労における延性低下挙動とその支配要因について, 日本機械学会論文集(A編), Vol.57, No.544, pp.2879-2883, 1991.
- 12) 嶋田勝紀, 小茂鳥潤, 清水真佐男: 極低サイクル疲労におけるManson-Coffin則の適用性と累積損傷, 日本機械学会論文集(A編), Vol.53, No.491, pp.1178-1185, 1987.
- 13) 桑村仁, 山本恵市: 三軸応力状態における構造用鋼材の延性き裂発生条件, 日本建築学会構造系論文集, No.477, pp.129-135, 1995.
- 14) 堀田知道, 村木潤次郎, 石黒隆義, 石井伸幸, 関口進: 鋼材の歪制御低サイクル疲労強度推定に関する研究(第1報), 日本造船学会論文集, Vol.124, pp.341-353, 1968.
- 15) 西村俊夫, 三木千寿: 構造用鋼材のひずみ制御低サイクル疲れ特性, 土木学会論文報告集, No.279,

pp.29-44, 1978.

- 16) 中込忠男, 李建: 繰返し力を受けるSM490鋼の疲労性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.469, pp.127-136, 1995.
- 17) 飯田国広, 井上肇, 小林佑規, 宮本武: 歪制御低サイクル疲労における平均歪の影響, 日本造船学会論文集, Vol.127, pp.215-225, 1970.
- 18) 大南正瑛, 坂根政男, 浜田直巳: クリープ温度域における二軸応力下の低サイクル疲労, 材料, Vol.35, No.390, pp.230-240, 1986.
- 19) 大路清嗣: 多軸応力下の低繰返し数疲労, 材料, Vol.13, No.163, pp.213-227, 1967.
- 20) 二瓶正俊, 今野武志, 飯田國廣: ヒステリシスエネ

ルギー論による曲げ疲労強度の予測, 日本造船学会論文集, Vol.156, pp.458-468, 1984.

21) 飯田國廣, 松本善朗, 永井英晴: 撓み制御平面曲げおよび径歪制御軸力による低サイクル疲労強度の比について, 日本造船学会論文集, Vol.137, pp.307-315, 1975.

22) Gross, M. R. : Engineering Materials Evaluation by Reversed Bending, ASTM STP 465, pp.149-162, 1969.

(2003. 5. 26 受付)

A STUDY ON LOW CYCLE FATIGUE STRENGTH OF WELDED JOINTS BY MEANS OF TESTING SYSTEM WITH IMAGE ANALYSIS

Kazuo TATEISHI and Takeshi HANJJI

Low cycle fatigue strength of welded joints was investigated by means of newly developed fatigue testing system in which image analysis technique was applied to measure the strain of specimens. It was validated that the strain measured by the image analysis was almost equal to measured value by strain gauge, and the low cycle fatigue strength of steel plate without welding was in good agreement with the results reported in former researches. After verifying the testing system, fatigue tests were carried out on welded joint specimens. The test results indicated that the low cycle fatigue strength of welded joints was much lower than that of plain material, and fatigue life was reduced by half.