

溶接部を対象とした極低サイクル疲労強度予測モデル

A prediction model for extremely low cycle fatigue strength of welded materials

館石和雄*, 半治剛**, 鬼頭和也***, 南邦明****

Kazuo TATEISHI, Takeshi HANJII, Kazuya KITOH and Kuniaki MINAMI

*工博, 名古屋大学教授, エコトピア科学研究機構 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

**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)

***名古屋大学大学院, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

****株式会社サクラダ, 技術開発室 (〒272-0002 千葉県市川市二俣新町21)

We investigated the low cycle fatigue strength of welded materials under constant and variable strain amplitude in extremely large strain region. The test results indicated that fatigue strength of welded materials, particularly heat-affected zone (HAZ), was much lower than that of plain material. We then developed a model to predict the extremely low cycle fatigue strength of welded materials. Fatigue life estimated by this model was well agreed with test results.

Key Words: *extremely low cycle fatigue strength, weld deposit, HAZ*

キーワード: 極低サイクル疲労, 溶接金属部, 熱影響部

1. はじめに

阪神・淡路大震災により, いくつかの鋼製橋脚の基部や隅角部, 角溶接部などの溶接接合部においてぜい性的な破壊が生じた¹⁾. これは, 繰り返し大変形により発生した低サイクル疲労き裂を起点として生じたものであると考えられ, 低サイクル疲労が主要な破壊モードの一つであることが明らかとなった. それ以降に行われたいくつかの実験的研究によれば, ほとんどの低サイクル疲労き裂は溶接部から発生すること²⁻⁴⁾, またそのような箇所では15%を超えるようなひずみが繰り返されていること⁵⁾が明らかとなっている. したがって, 大ひずみが数回程度繰り返されて破壊が生じるような領域 (以下, 極低サイクル疲労領域と呼ぶ) における溶接部の疲労強度を明らかにする必要がある.

従来の砂時計型試験体を用いた低サイクル疲労試験方法では, 場所によって材料特性が大きく異なる溶接部の疲労強度を評価することは困難である. そのため, 独自の試験方法によりその疲労強度を明らかにしようとする試みがなされているが, その研究例は数少ない. 例えば, 片持梁試験片の撓み変形制御によって溶接金属の比強度, 予熱, 応力焼鈍などの影響を調べた研究⁶⁻⁹⁾や, 溶接継手試験片に水圧による繰り返し面圧を加えて低サイクル疲労破壊させる実験¹⁰⁻¹²⁾, 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た研究¹³⁾などがある. しかしいずれの研究も, ひずみ計測の限界から, 極低サイクル疲労領域の溶接部の疲労強度を詳細に解明す

るには至っていない. また, 溶接継手を含む比較的大型の部材試験体による疲労試験も行われている^{4, 14, 15)}が, この場合, き裂発生位置のひずみを正確に評価することが困難であり, 部材形状や継手形状の影響を含んだ試験体固有の結果しか得られていない. したがって, 極低サイクル疲労領域における溶接部の疲労強度データは十分ではないのが現状である.

著者らはこれまでに, 画像計測技術を用いた新たな低サイクル疲労試験システムを開発し, 低サイクル疲労試験を行っている¹⁶⁾. その一部として, 一定振幅ひずみ条件のもとで溶接金属部の低サイクル疲労試験を行い, 溶接金属部の疲労強度は鋼素材のそれより低下することを示している. また, 鋼素材を用いた試験結果を基に, 鋼材の極低サイクル疲労領域における疲労強度予測モデルを提案している¹⁷⁾. しかし, 極低サイクル疲労領域における溶接部の疲労強度に関しては十分に実験が行われておらず, 特に溶接部の疲労強度を評価する上で重要な熱影響部(HAZ)に関する検討が不十分である. さらに, 変動振幅ひずみ下での溶接部の疲労強度予測手法についても検討する必要がある. そこで本研究では, 開発した試験システムにより, 極低サイクル疲労領域における一定振幅ひずみ下の疲労試験を行い, 溶接金属部およびHAZの極低サイクル疲労強度について詳細に明らかにする. また, 変動振幅ひずみ下の疲労試験を行い, 溶接部に適用可能な疲労寿命予測モデルを明らかにする.

2. 試験体および試験システム

2.1 試験体

試験体の形状および寸法を図-1 に、溶接条件を表-1 に示す。また、溶接部のマクロ写真の例を図-2 に示す。試験体は板厚 14mm の平板から採取し、長手方向中央部に突合わせ溶接を行い、板厚 12mm まで板の両面を機械切削した。その後、溶接部に変形が集中するように、溶接部近傍の板厚を 0.5mm ずつ滑らかに削りこんだ。試験体表面は傷がなくなるまで载荷軸方向に入念に研磨した。

供試鋼材のミルシートによる化学成分を表-2 に示す。また、母材、溶接金属部および HAZ に対して行った引張試験により得られた機械的性質を表-3 に示す。溶接金属部および HAZ の引張試験は、図-1 に示した試験体から砂時計型試験体を切り出して行った。砂時計型試験体の最小断面部の径は 7mm である。試験体加工に際しては、溶接金属部または HAZ の位置をエッチングにより確認し、そ

れらが最小断面位置にくるようにした。しかし HAZ を対象とした試験体においては、試験断面（最小断面）すべてにわたって HAZ が存在しているとは考えられず、試験結果の信頼性が不明であったため、それぞれの位置の硬さ試験もあわせて実施し、硬さからも強度の推定を行った。図-3 に溶接部周辺の試験体長手方向におけるビッカース硬さの分布を、表-3 にそれから換算した降伏強度¹⁸⁾を示す。硬さ試験から推定した母材、溶接金属部、HAZ の降伏強度は引張試験によるものと同様の傾向を示しており、また、値もほぼ一致している。このことから、引張試験により溶接金属部、HAZ の強度を概ねとらえることができているものと考えられる。

2.2 試験システム

本研究で用いた低サイクル疲労試験システムの詳細は既報¹⁶⁾に示すとおりであり、ここではその概要のみを示す。本試験システムは図-4 に示すように、板側面に画像計測

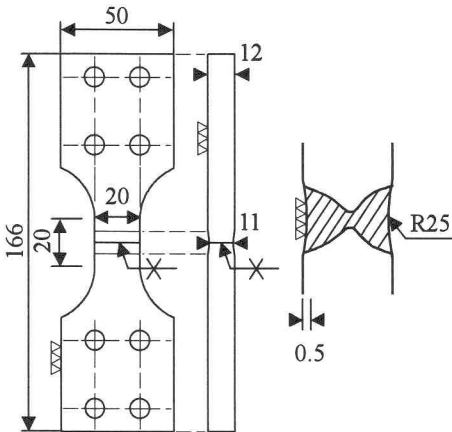


図-1 試験体の形状および寸法

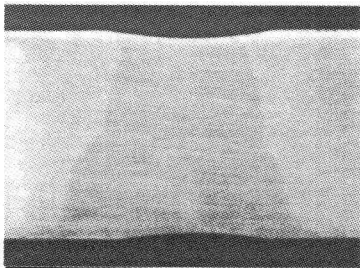


図-2 溶接部の形状

表-1 溶接条件

Welding pass	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)
1	200	30	44.4	8.1
2	260	39	27.7	22.0
3	260	39	27.3	22.3
4	260	39	20.0	30.4

before the third pass, the first pass was removed by gouging

表-2 供試鋼材の化学成分

Material	Chemical composition (%)				
	C	Si	Mn	P	S
Base steel	0.16	0.47	1.45	0.012	0.004

表-3 供試鋼材の機械的性質

Material	Tension test				Hardness test
	Yield stress (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Elongation (%)	Fracture ductility	Yield stress (MPa)
Base metal (SM490A)	371	536	29.1	1.13	380
Weld deposit	432	549		1.14	420
HAZ	453	562		1.14	430

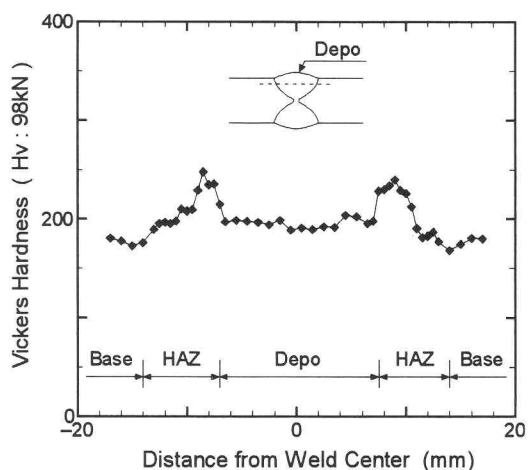


図-3 試験体長手方向における硬さ分布

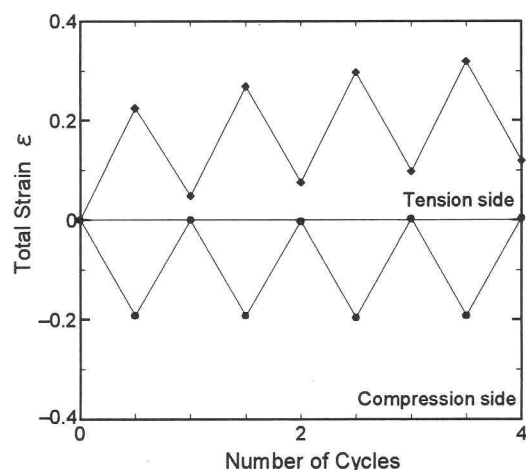


図-5 ひずみ履歴

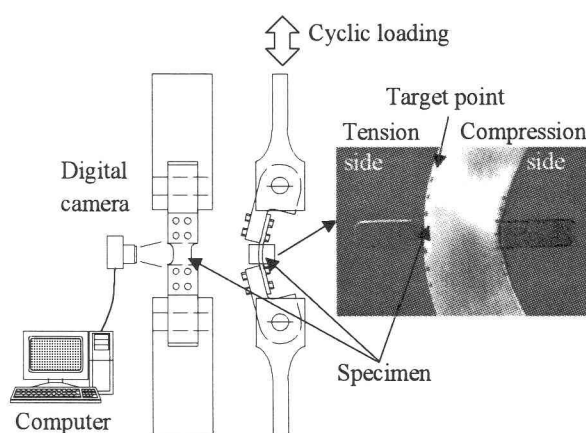


図-4 試験システムの概要

用の標点を描いた鋼板に板曲げ変形を与え、その際に生じるひずみを試験体の側面から撮影した画像より計測し、そのひずみ値を制御することにより疲労試験を行うというものである。なおここでは最小または最大ひずみを0に保つ载荷を片振り载荷と呼ぶが、試験は片振り载荷としたため、試験体には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、それぞれ圧縮側、引張側と呼ぶ（図-4 参照）。

3. 载荷方法

3.1 一定振幅ひずみの载荷方法

一定振幅ひずみ試験においては、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が、完全な片振り载荷とはなっておらず、ひずみが漸増している。しかし、圧縮側では片振り载荷となっており、また、ひずみ振幅もほぼ一定である。試験中に記録した繰り返しの伴うひずみの変化の例を図-5 に示す。設定したひずみ振幅は0.07, 0.10, 0.11, 0.14 であり、極低サイクル領域における疲労強度の解明を目的として大きめの値に設定した。なお、ひずみ振

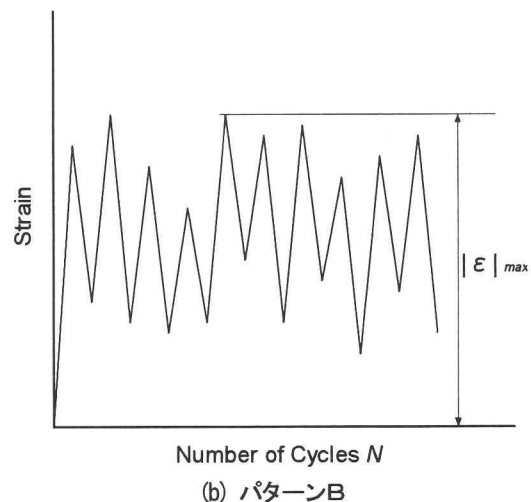
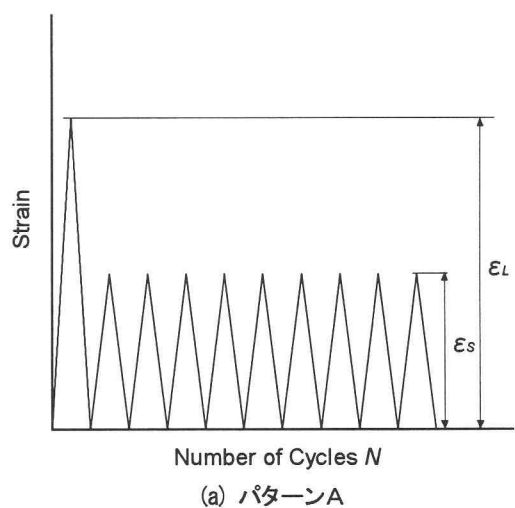


図-6 ひずみの変動パターン

表-4 試験体の名称とひずみパターン

Specimen	Pattern	ϵ_S	ϵ_L
VA10-20	A	0.10	0.20
VA15-30	A	0.15	0.30
VB	B	$ \epsilon _{\max} = 0.30$	

幅とは、ひずみ範囲（ひずみの最大値と最小値の差）の半分の値を指している。

3.2 変動振幅ひずみの载荷方法

変動振幅ひずみ試験においては、図-6 に示す 2 種類のひずみの変動パターンを試験体に与えた。試験体に与えるひずみの変動パターンと試験体の名称を表-4 にまとめる。パターン A は最初は大ひずみ ε_L を与え、その後一定振幅ひずみ ε_S を与えるものである。パターン B はランダムな変動振幅ひずみを与えるものである。パターン B において、試験体が経験するひずみの絶対値の最大値 $|\varepsilon|_{\max}$ は 0.30 とした。

4. き裂発生、進展状況

例として、一定のひずみ振幅 0.14 のときのき裂発生、進展状況を図-7 に、破面を図-8 に示す。図-7 はマイクロスコップ（KEYENCE VH-6300、倍率：×25）で、図中に示す領域の様子を撮影したものである。圧縮側では 2 サイクル時に板幅中央部の溶接金属部と HAZ において微小なき裂の発生を確認することができる。その後、複数のき裂

が合体しながら支配的なき裂に成長している。引張側では 2.5 サイクル時（3 サイクル载荷中）に板側面の溶接金属部においてき裂が発生した。引張側では板側面の他に板幅中央付近からも微小なき裂が発生し、圧縮側と同じようにそれらが合体しながら進展している。最終的にはいずれの試験体も、溶接金属部のき裂が支配的となり、図-9 に示すように、最終的な破断位置は溶接金属部である。

この例に示すとおり、一定振幅、変動振幅に関わらずいずれの試験体も、き裂は引張側、圧縮側の両側から発生した。ただし最も早期に発生するき裂の板幅方向の発生位置は引張側、圧縮側で異なっており、引張側では板の側面から、圧縮側では板幅中央部からき裂が生じた。

一定振幅ひずみ試験においては、引張側では溶接金属部からき裂が発生し、HAZ からの発生はみられなかった。圧縮側では、ひずみ振幅 0.11 の場合を除き、溶接金属部に加えてボンド部近傍の HAZ からもき裂が発生した。変動振幅ひずみ試験においては、引張側、圧縮側ともに溶接金属部からき裂が発生した。また、VA10-20 試験体では引張側の HAZ から、VA15-30 試験体では圧縮側の HAZ からもき裂が発生した。ランダム振幅ひずみを与えた VB 試験体では HAZ からのき裂発生はみられなかった。HAZ か

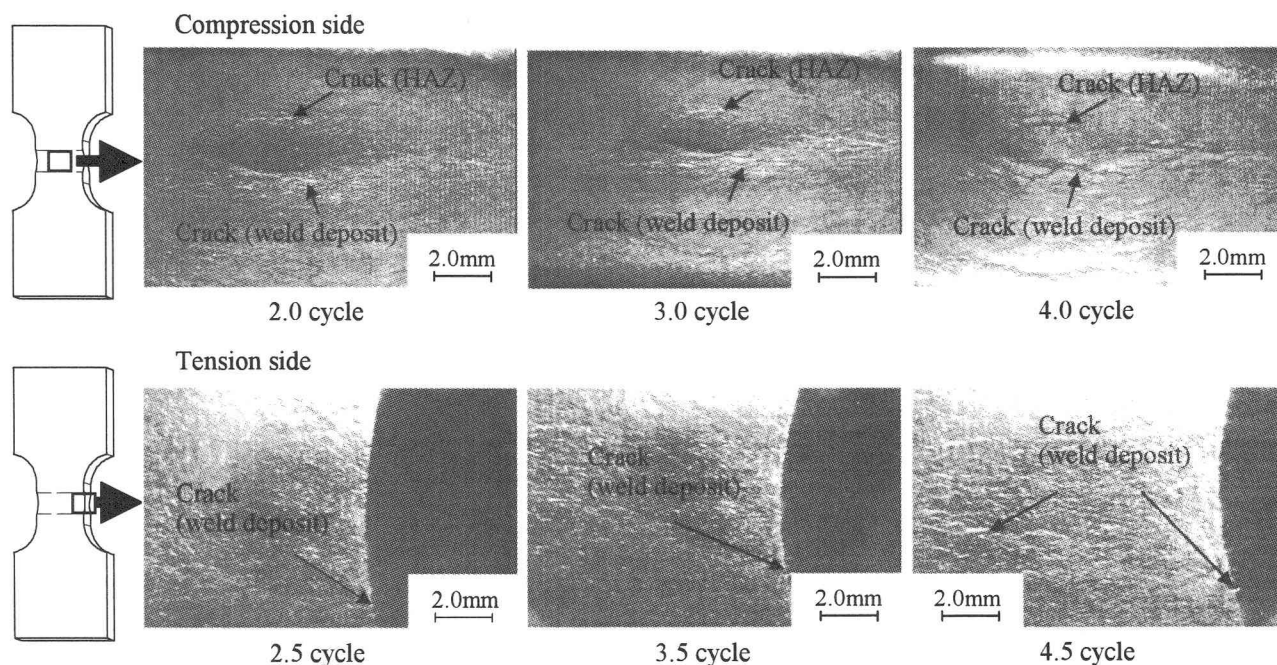


図-7 き裂発生、進展状況

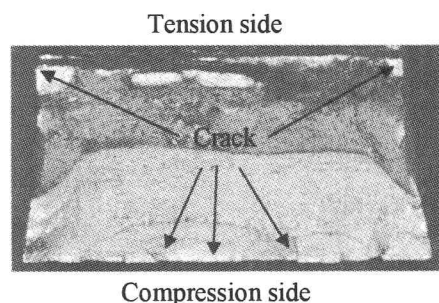


図-8 破面

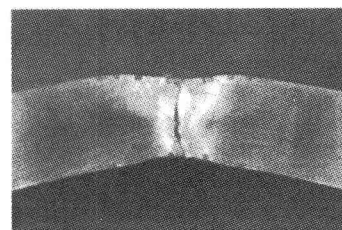


図-9 破断位置

らのき裂発生が試験体によって異なるのは次の原因によると思われる。今回の試験体は X 開先とし、両面から突合わせ溶接を行っているが、図-2 に見られるように、ガウジングの影響により溶接部寸法が上下非対称となる。図-2 を例にしていうと、上側表面における HAZ が試験体中央の溝部に位置しているのに対し、下側の HAZ はそれからはずれている。後に解析によって示すように、表面に加工した溝部ではひずみが増加するため、上側の HAZ 位置に生じるひずみの方が下側のそれと比べて大きいことになる。今回の一定振幅ひずみ試験では、図-2 に示す上側が圧縮側になるようにして試験を行っており、そのため、HAZ の位置が中央部からはずれている引張側ではひずみが小さく、き裂が生じなかったものと考えられる。変動振幅ひずみ試験では、図-2 に示す上側を引張側として試験を行ったものもあり、その試験体においては引張側の HAZ からき裂が発生している。以上のことから、HAZ からのき裂発生状況に引張、圧縮の差が生じたのは、材料強度の差によるものではなく、HAZ の位置に起因するひずみの大小によるものであると考えられる。

5. 有限要素解析

圧縮側のき裂に関しては、板幅中央部から発生したため、発生位置のひずみ振幅を計測できていない。そこで、有限要素解析によって試験体内のひずみ分布を確認した。

5.1 解析方法

有限要素解析には解析プログラム MARC を使用した。解析モデルを図-10 に示す。試験体および治具の対称性を考慮して 1/4 モデルとした。8 節点ソリッド要素を用い、その最小要素サイズは $0.5 \times 0.5 \times 1.0 \text{ mm}$ である。境界条件としては、対称軸上およびピンの中心部にあたる位置の変

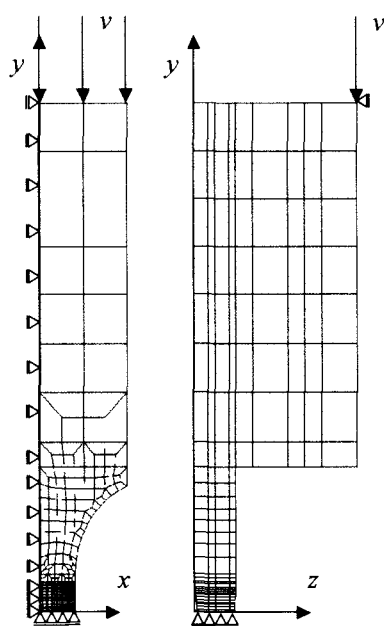


図-10 有限要素解析モデル

位を拘束した。荷重は実際の試験と同様に、試験体中心線から偏心させた位置に強制変位 v として与えた。解析モデルの母材、溶接部の機械的性質は表-3 に示した引張試験結果によって与えた。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。

5.2 ひずみ分布

引張側、圧縮側のひずみ分布の例を図-11 に示す。縦軸は試験体長手方向中央からの距離である。図中の実線は板側面の、破線は板幅中央部の解析結果である。また、◆は実際の試験において解析とほぼ同じ変位を与えたときの画像計測値であり、標点間の中央位置にプロットした。板側面における解析値と画像計測値を比較すると、引張側、圧縮側ともに画像計測値のほうが少し大きな絶対値のひずみとなっている。しかし、両者のひずみ分布は同じような形状であり、解析により実際の疲労試験を十分再現できていると考えられる。またき裂発生位置との関係を見ると、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。

以上の結果より、圧縮側から生じたき裂（板幅中央に生じたき裂）に関しては、解析により、板側面のひずみに対する板幅中央部のひずみの比を求め、それによりひずみ振幅を補正し、疲労試験結果を整理した。

6. 低サイクル寿命予測モデル¹⁷⁾

著者らが鋼素材に対して行った試験結果を基に提案した低サイクル寿命予測モデルは、損傷力学における塑性損傷の概念を考慮し、これを疲労による損傷と組み合わせたものである。すなわち、損傷度 D を次式のように疲労損傷と塑性損傷の和で表す。

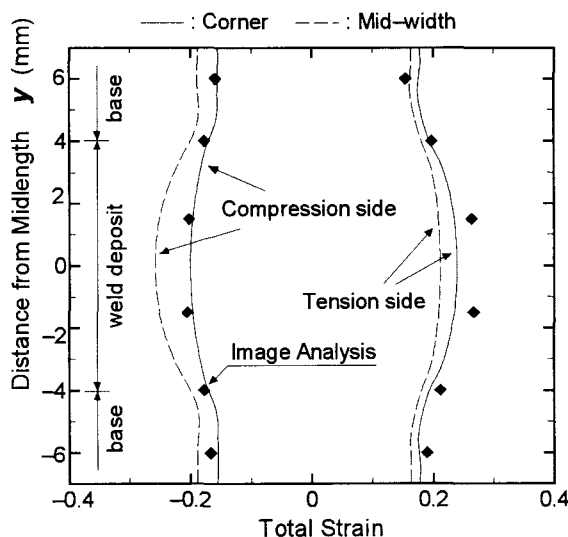


図-11 ひずみ分布

$$D = D_{cyclic} + D_{ductile} \quad (1)$$

具体的なモデルは次式で表される。

$$\varepsilon_{eq} \cdot N^k = C \cdot C_m$$

$$C_m = \begin{cases} \left(\frac{\varepsilon_f - |\varepsilon|_{\max}}{\varepsilon_f - \varepsilon_{pD}} \right)^k & \text{if } |\varepsilon|_{\max} > \varepsilon_{pD} \\ 1.0 & \text{if } |\varepsilon|_{\max} \leq \varepsilon_{pD} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 ε_{eq} ：等価ひずみ振幅、 N_c ：き裂発生寿命、 k 、 C ：材料定数、 C_m ：塑性損傷を考慮するための係数、 ε_f ：破断延性、 $|\varepsilon|_{\max}$ ：ひずみの絶対値の最大値、 ε_{pD} ：損傷発生限界ひずみ、である。損傷発生限界ひずみは、引張試験におけるくびれ開始時のひずみ、つまり最大荷重時のひずみとした。次章においてこのモデルの溶接部への適用性について検討する。

7. 疲労試験結果

7.1 一定振幅ひずみ下での疲労試験結果

き裂発生寿命とひずみ振幅の関係を図-12に示す。圧縮側のき裂に関しては、解析結果を用いてそのひずみ振幅を補正してある。ここで、き裂発生寿命は試験中、試験体表面をマイクロスコープで観察し、試験体表面にき裂を確認したときの繰り返し数とした。結果として、そのときのき裂長さは約0.5mm程度であった。○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。図中の実線は鋼素材に対する片振り载荷試験について、式(2)に示すモデルにより求めたき裂発生寿命－ひずみ振幅の関係¹⁷⁾である。鋼素材の場合、損傷発生限界ひずみは0.127であったので、ひずみの最大値がそれを越える、すなわちひずみ振幅が約0.06以上になると、曲線の傾きが緩やかになっていくが、これはその領域では塑性損傷が寄与するようになるためである。

疲労寿命が10回を下回るような極低サイクル疲労領域においても、溶接金属部の疲労強度は鋼素材のそれを明らかに下回っていることがわかる。HAZに関してはデータ数が必ずしも多くないが、溶接金属部の疲労強度をさらに下回っており、その寿命は素材の約30%程度である。

ひずみ振幅が約0.06以下の領域では、溶接金属部、HAZとも、試験結果を近似する線の傾きは鋼素材のそれとほぼ同じである。そこで、式(2)における材料定数 k は鋼素材について求められた値と同一とし、実験結果より C を回帰的に求めた。その値と引張試験により得られた ε_f 、 ε_{pD} の値をまとめて表-5に示す。これらの値を式(2)に代入することにより、溶接金属部およびHAZのそれぞれについてき裂発生寿命－ひずみ振幅の関係を求めたものが図中の破線および点線である。ただし、これらの関係は片振り载荷の場合について求めたものである。図-5に示すよ

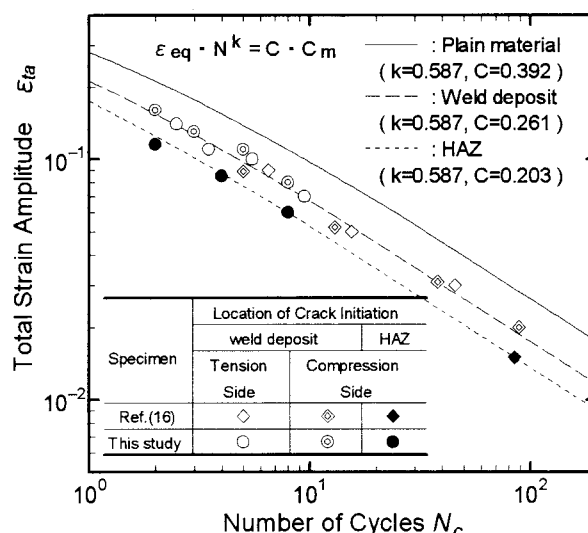


図-12 き裂発生寿命

表-5 材料定数

	k	C	ε_f	ε_{pD}
Plain material	0.587	0.392	1.13	0.127
Weld deposit	0.587	0.261	1.14	0.129
HAZ	0.587	0.203	1.14	0.121

うに引張側に関しては最小荷重時のひずみが0になつておらず、片振り载荷になっていないが、その影響は寿命でいうと1割程度の差であるので無視した。提案したモデルによる強度曲線は、極低サイクル疲労領域から低サイクル疲労領域にわたる広範囲の実験結果をよく再現している。ひずみが小さい領域においては、実験結果を基に回帰的に材料定数を求めていることからよく一致するのは当然であるが、本モデルは、大ひずみ領域における強度の低下傾向もよく表現できており、低サイクル疲労領域から極低サイクル領域までの疲労寿命を統一的にモデル化できている点で優れているといえる。

7.2 変動振幅ひずみ下での疲労試験結果

変動振幅ひずみ下での疲労寿命を提案するモデルによって予測し、疲労試験結果と比較した。すなわち、前節において求めた表-5に示す値を基に、式(2)に示す損傷度が1.0になる時点の繰り返し回数を計算し、実際の試験においてき裂が発生した繰り返し回数と比較した。図-13に結果を示す。溶接金属部から発生したき裂、HAZから発生したき裂とも、また、いずれのひずみ変動パターンにおいても、実際のき裂発生寿命と疲労寿命予測モデルによって計算された疲労寿命とは非常によく一致していることがわかる。また、図中には一定振幅ひずみ試験結果も合わせて示すが、本疲労寿命予測モデルは極低サイクル領域から低サイクル領域にわたるまで広い範囲で精度よい予測結果を与えている。以上より、本モデルは溶接継手部に対しても適用可能であり、特に母材部、溶接金属部、HAZ

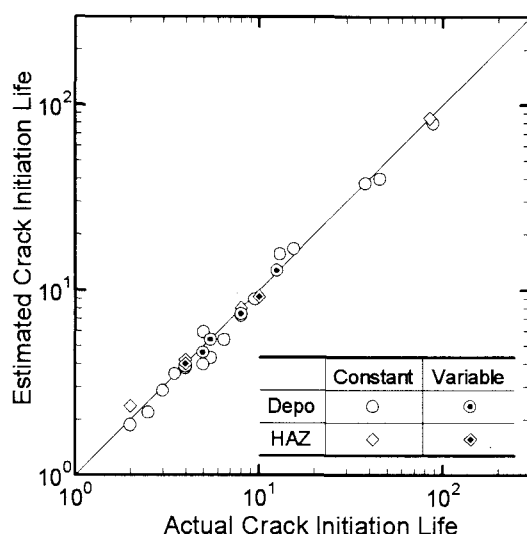


図-13 提案モデルの適用性の検討

のそれぞれに対応した材料定数を用いることで、場所によって材料特性の異なる溶接継手の極低サイクル疲労強度を、詳細にかつ高精度に予測するためのモデルとして適用可能であるといえる。

8. まとめ

本研究では、画像計測を用いた低サイクル疲労試験システムを用いて、溶接部の一定振幅ひずみ、および変動振幅ひずみ下の低サイクル疲労試験を行った。以下に本研究で得られた成果をまとめる。

- ・ き裂は一定振幅、変動振幅ひずみに関わらず引張、圧縮側の両側から生じた。引張側では板の側面から、圧縮側では板幅中央部より発生した。また、き裂は溶接金属部の他、ボンド部に近いHAZからも発生した。
- ・ 一定振幅ひずみ試験において、溶接部の低サイクル疲労強度は鋼素材のそれよりも減少し、特にHAZに関しては、溶接金属部の疲労強度をさらに下回っており、その寿命は素材の約30%程度であった。
- ・ 一定振幅ひずみ試験の結果を基に、極低サイクル疲労強度の予測モデルを明らかにした。
- ・ 一定振幅ひずみ試験、変動振幅ひずみ試験のいずれに対しても、試験結果と提案したモデルで推定した寿命はよく一致した。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金基盤研究B(2) (課題番号 16360229) によるものであり、ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 土木学会, 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会: 阪神・淡路大震災調査報告, 第1章橋梁, 1996.

- 2) 建設省土木研究所: 道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書 (総括編), 共同研究報告書第219号, 1999.
- 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) 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.
- 5) 岡下勝彦, 大南亮一, 道場康二, 山本晃久, 富松実, 丹治康行, 三木千寿: 兵庫県南部地震による神戸港湾幹線道路P75橋脚隅角部におけるき裂損傷の原因調査・検討, 土木学会論文集, No.591/I-43, pp.243-261, 1998.
- 6) Tor, S.S., Ruzek, J.M., and Stout, R.D.: Repeated load tests on welded and prestrained steels, The Welding Journal, Vol.31, pp.238s-246s, 1952.
- 7) Gross, J.H., Tsang, S., and Stout, R.D.: Factors affecting resistance of pressure vessel steels to repeated overloading, The Welding Journal, Vol.32, pp.23s-30s, 1953.
- 8) Gross, J.H., Gucer, D.E., and Stout, R.D.: The plastic fatigue strength of pressure vessel steels, The Welding Journal, Vol.33, pp.31s-39s, 1954.
- 9) Gross, J.H., and Stout, R.D.: Plastic fatigue properties of high-strength pressure-vessel steels, The Welding Journal, Vol.34, pp.161s-166s, 1955.
- 10) Bowman, C.E. and Dolan, T.J.: Biaxial fatigue properties of pressure vessel steels, The Welding Journal, Vol.32, pp.529s-537s, 1953.
- 11) Bowman, C.E. and Dolan, T.J.: Studies of the biaxial fatigue properties of pressure vessel steels, The Welding Journal, Vol.34, pp.51s-59s, 1955.
- 12) Bowman, C.E. and Dolan, T.J.: Resistance of low-alloy steel plates to biaxial fatigue, The Welding Journal, Vol.35, pp.102s-109s, 1956.
- 13) 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.
- 14) 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.49-60, 1997.
- 15) Sakano, M. and Wahab, M.A.: Extremely low cycle (ELC) fatigue cracking behaviour in steel bridge rigid frame piers, J. Materials Processing Technology, Vol.118, pp. 36-39, 2001.
- 16) 館石和雄, 判治剛: 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, 土木学会論文集, No.752/I-66, pp.277-287, 2004.
- 17) 館石和雄, 判治剛, 南邦明: 極低サイクル疲労領域における変動振幅ひずみ下の低サイクル疲労寿命予測モデル, 土木学会論文集, No.773/I-69, pp.149-158, 2004.
- 18) 日本鉄鋼協会: 鉄鋼便覧, 2002.

(2004年9月17日受付)