引張残留応力場にある溶接継手の設計疲労き裂伝ば曲線*

太田昭彦**, 前田芳夫**, 小菅通雄**, 町田 進***, 吉成仁志***

Design Curve for Fatigue Crack Propagation in Weldments
Containing Tensile Residual Stressesby Akihiko Ohta**, Yoshio Maeda**, Michio Kosuge**, Susumu Machida***
and Hitoshi Yoshinari***

Fatigue crack propagation properties of welded joints were investigated for five types of steels, SB42, SM50B, SPV50, HT80 and SUS304. Propagation data for all materials were found to be coinciding with each other. This was due to the presence of tensile residual stress around the crack tip which made the crack surfaces to open. A total of 3,335 data plots were used to fit a regression curve. For design purpose, it is advisable to adopt the fatigue crack propagation curve at 99.5% confidence limit. It is also shown that the proposed curve is applicable to random loadings.

Key Words: Design, Fatigue crack, Welded joint, Fatigue threshold, Random loadings, Steel

1. はじめに

溶接欠陥や疲労き裂が発見された場合、破壊力学を用いて疲労き裂伝ば解析を行い残存寿命を積分計算し、欠陥等の許容の可否を判定する手法はかなり使用されるようになった。しかし、積分計算に使用する疲労き裂伝ば曲線については、規格によってまちまちのものが与えられている¹⁻⁵⁾。

一方、溶接継手の疲労き裂伝ば速度と応力拡大係数範囲の関係(以後疲労き裂伝ば特性と称する)についての最近の研究によると、伝ば特性を支配する最重要因子は残留応力による応力比効果であることが明らかにされた^{6,7)}。すなわち、材料の機械的性質や金属組織は疲労き裂伝ばに対して副次的な作用しか果たさず、引張残留応力の作用によってき裂開閉口現象が起こらない場合には、応力比の如何に拘らず単一の伝ば特性が鋼種によらず得られることが認められている。

そこで、本報では上記の最近の知見に基づいて溶接構造物に適用すべき疲労き裂伝ば曲線を提案する。また、提案する疲労き裂伝ば曲線が、一定振幅の繰り返しのみでなくランダム荷重の繰り返しを受ける場合にも適用されることを示す。

2. 疲労き裂伝ば試験結果の検討

本報で検討する鋼種は、表1に示すように引張強度が441から824 MPaの広い範囲にある溶接構造用の非調質鋼(SM 50 B)、調質鋼(HT 80)、压力容器用の非調質鋼(SB 42)、調質鋼(SP V 50)ならびにオーステナイトステンレス鋼(SUS 304)である。

これらの鋼及びその横突合せ溶接継手に対する疲労き裂伝ば速度の数値データは、板厚10 mm、板幅200 mmの中央き裂試験片によって室温大気中で求めたもので、いずれも金材技研疲労データシート⁸⁾に記載されており、本検討もこれらを主体に行った。従って、残留応力

Table 1 Mechanical Properties of Materials.

Material	Mechanical Properties			
	Yield strength	Tensile strength	Elongation	Hardness
	σ_y MPa	σ_B MPa	δ %	Hv
SB42	284	441	35	146
SM50B	372	530	25	152
SPV50	579	628	40	207
HT80	784	824	31	286
SUS304	275	618	68	176

の再分布によりき裂先端には常に引張残留応力が誘起され、それによる応力比効果で疲労き裂は常に開口し、最安全側の実験データが得られている。なお、き裂先端に残留応力が存在しないか、圧縮の残留応力が存在する場合には、伝ば速度は本報で示すより遅くなる。

また、疲労き裂伝ば速度 da/dn の表示式としては、疲労下限界値 ΔK_{th} を含む応力拡大係数範囲 ΔK のべき関数、

$$da/dn = C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad \dots\dots (1)$$

を採用し⁹⁾、データプロットの密度に反比例する重み付けを行う統計手法¹⁰⁾により回帰計算を行った。なお、応力拡大係数の算出には、き裂半長 a が板幅の0から70%の範囲で精度が0.5%以内である石田の式¹¹⁾を用いた。

回帰曲線の定数は、 da/dn を $m/回$ 、 ΔK を $MN/m^{3/2}$ にとると、 $C = 1.45 \times 10^{-11}$ 、 $m = 2.75$ 、 $\Delta K_{th} = 2.40$ であり、 $\log(\Delta K)$ に沿う標準偏差は $s = 3.55 \times 10^{-2}$ となった。そこで、 t 分布表の値 $t_{0.01} = 2.58$ から $C \cdot 10^{\pm 1.5m}$ 、 $\Delta K_{th} \cdot 10^{\pm 1.5}$ として信頼区間、信頼限界を算出した。

なお、以後の図上の曲線は、定荷重振幅試験で求めた応力除去焼鈍を施していない溶接継手試験片38本について、応力比 R が0.5, 0, -1で求めたき裂伝ば特性データ3,335点について得られた回帰計算にもとずいて描いたものである。図上には参考として99, 95及び90%信頼区間並びに回帰曲線を示した。これらの信頼区間とデータプロットの関係を総合的に判定し、99%信頼区間の左

*原稿受付 昭和63年8月24日 昭和63年度 秋季全国大会及び昭和63年6月 溶接疲労強度研究委員会が発表

**正 員 金属材料技術研究所 Member, National Research Institute for Metals

***正 員 東京大学 Member, University of Tokyo

側を示す実線即ち99.5%信頼限界を提案する設計疲労き裂伝ば曲線 ($C=2.0 \times 10^{-11}$, $m=2.75$, $4K_{th}=2.00$) とした。

2.1 試験部位の影響

同一の横突合せ溶接試験板から削り出した2本の試験片の内の1本についてはき裂が溶接金属の中央部を、他の1本についてはき裂が垂直開先の熱影響部中央を通るようにして試験して得た疲労き裂伝ば特性の例を図1に示す。試験部位を溶接金属とした場合と熱影響部とした場合の疲労き裂伝ば特性は、試験部位の違いに拘らず同一となっている。他の鋼種、溶接法、応力比等についての結果も、溶接金属と熱影響部の伝ば特性は同一となっているので、以後の図では原則として試験部位によってプロット記号を変えないことにする。

2.2 溶接法の影響

溶接法を変え、被覆アーク溶接、ガスメタルアーク溶接、サブマージアーク溶接で制作した継手の疲労き裂伝ば特性を調べた例を図2に示す。この場合にも、溶接法に拘らず伝ば特性は同一となっている。

2.3 入熱量の影響

溶接入熱量を変化させた場合の疲労き裂伝ば特性を比較した例を図3に示す。入熱量に拘らず伝ば特性は同一となっている。

2.4 鋼種の影響

図4は5鋼種全ての疲労き裂伝ば特性を込にして信頼区間と共に示したものである。図から明らかなように、鋼種による違いは明瞭でない。この図ではプロットが多いため、鋼種毎のプロットと信頼区間との比較を示す例を図5、6に示す。オーステナイトステンレス鋼も含め、鋼種による違いが明瞭でないことが確認できる。

2.5 応力比の影響

図7は応力比を変化させた場合の疲労き裂伝ば特性を

示す。応力比が0.5から-1、さらに $-\infty$ から負の応力比のみの繰り返しである1.15(振幅に対し負の平均値が約15倍である)に於ても伝ば特性に変化は見られない。このようなデータが得られる原因は、試験片に存在する引張残留応力の作用でき裂先端が常に開口した状態を保つためである。なお、本報告では $4K_{th}$ に到達したときの

Fig. 2 Effect of Welding Method on Fatigue Crack Propagation Properties of Welded Joints.

Fig. 1 Effect of Crack Propagation Zone on Fatigue Crack Propagation Properties of Welded Joints.

Fig. 3 Effect of Heat Input on Fatigue Crack Propagation Properties of Welded Joints.

Fig. 4 Effect of Materials on Fatigue Crack Propagation Properties of Welded Joints.

Fig. 6 Comparison of Fatigue Crack Propagation Properties at Different Confidence Intervals for Welded Joints of SUS304 Stainless Steel.

Fig. 5 Comparison of Fatigue Crack Propagation Properties at Different Confidence Intervals for Welded Joints of SPV50 Steel.

Fig. 7 Effect of Stress Ratio on Fatigue Crack Propagation Properties of Welded Joints.

き裂半長 a は 25—45 mm であり、作用応力は小さかった。従って、欠陥寸法が小さく作用応力が高くなる場合には、残留応力の寄与が相対的に小さくなって、作用応力と残留応力が加算された応力比が応力比効果の飽和する水準より小さくなることによって、図に示した伝ば特

性よりすぐれた特性を示す場合も生ずる。また、引張残留応力場で負の応力が更に極端に作用した場合、あるいは引張残留応力場にき裂がない場合は、き裂閉口が起り伝ば特性が向上する場合がある¹²⁾が、設計伝ば曲線を考える場合には伝ば特性の向上を無視するのが安全であ

ろう。

2.6 応力除去焼鈍の影響

図8は応力除去焼鈍した継手の特性である。この材料の場合、工業的には使用されないような高い処理温度である630℃でも疲労き裂伝ば特性は改善されず、720℃で処理して初めて特性が改善された¹³⁾。なお、630℃で応力除去焼鈍した継手で、 ΔK_{th} に到達したときのき裂半長 a は、45 mm 程度であった。従って、作用応力は約12 MPa と残留応力に比べ小さくなり、残留応力を加味した応力比が高く、応力比効果が飽和するような作用応力条件となっていた。しかし、一般に応力除去焼鈍後の残留応力がどの程度低減しており、そこに作用する応力がいくらかになるかは明らかでない。従って、設計伝ば曲線としては応力除去焼鈍による改善効果を期待しないのが妥当であろう。

2.7 ランダム荷重の影響

図9は応力振幅の頻度分布がレーリー分布に従う応力比0のランダム荷重を受ける場合の疲労き裂伝ば特性である。なお、横軸にとった等価応力拡大係数範囲 ΔK_{eq} は次式で与えられる¹⁴⁾。

$$\Delta K_{eq} = \left\{ \sum n_i \cdot \Delta K_i^m / \sum n_i \right\}^{1/m} \quad \dots\dots (2)$$

但し、 $\Delta K_i \leq \Delta K_{th}$ で $n_i = 0$ とする。また平均伝ば速度 da/dn は ΔK_{th} 以下の繰り返し数を0とした総繰り返し数でき裂増分を除いて求めた。

この場合にも定荷重振幅試験で得た伝ば特性と一致していることが分かる。なお、母材に於てはランダム荷重を受けると伝ば特性が定荷重振幅試験の場合と著しく異なることが知られている^{15,16)}。最も単純なランダム荷重である二段多重試験でのき裂開閉挙動の測定例を図10, 11に示す。なお、測定は荷重振幅をステップ状に変え

Fig. 8 Effect of Stress Relief Heat Treatment on Fatigue Crack Propagation Properties of Welded Joints.

に変化は見られなかった。この例では、大小の応力拡大係数範囲を定荷重振幅試験で得た ΔK_{th} を挟むように選び、大応力拡大係数範囲 ΔK_H と小応力拡大係数範囲 ΔK_L をそれぞれ母材では4.4及び3.4 MPa、溶接継手では2.7及び2.1 MPaとした。図の横軸は P_{op} の判定を容易にするため、き裂開口変位 δ から除荷弾性コンプライアンス α に対応する開口変位 αP (P は荷重) を減じている。二段多重の繰り返しを与えた変動荷重試験を母材について実施した場合には、図10に示すように定荷

Fig. 9 Effect of Random Loadings on Fatigue Crack Propagation Properties of Welded Joints.

Fig. 10 Change of Crack Opening Load under Random Loadings in Base Metal.

Fig. 11 Same Crack Opening Load under Random Loadings in Welded Joint.

Fig. 12 Fatigue Crack Propagation Curves for Various Rules.

重振幅試験の場合に比べ、変動荷重の場合き裂開口荷重が変化し、伝ば特性が著しく変わる。これに対し、引張残留応力が存在する溶接継手の場合、図11に示すように変動荷重の場合に於てもき裂は常に開口しているため伝ば特性に変化が現れないのである¹⁷⁾。

2.8 諸規格との比較

図12に諸規格と提案した疲労き裂伝ば曲線の関係を示す。

①は溶接協会規格 WES 2805 に示された疲労き裂伝ば関係である。②及び③は本州四国連絡橋の疲労設計法

でそれぞれ SM 41-SM 50 Y の非調質鋼及び SM 58-HT 80 の調質鋼についてのデータに対する平均線として示されたものである。また、④は ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec. XI で内部欠陥及び大気中で応力比が0.25以下の条件の母材に、⑤及び⑥は英国規格 BS PD 6493 でそれぞれ溶接金属と熱影響部に対する上限界、及び0.2%耐力が 600 MPa 以下の鋼に対する99.5%信頼限界を示している。さらに、⑦はノルウェー海事協会 (DNV) 規則で海洋構造物の疲労解析に示された大気中で用いられる溶接継手について得られた95%信頼限界を示している。⑧は本報で提案した疲労き裂伝ば曲線であり、溶接継手について示された⑤と⑦のほぼ中間にあり、 ΔK_{th} 近傍は少し高 ΔK 側にある。

3. ま と め

非調質鋼 (SB 42, SM 50 B), 調質鋼 (SPV 50, HT 80) 及びオーステナイトステンレス鋼 (SUS 304) の 5 鋼種について得られた疲労き裂伝ば試験結果を解析し、室温大気中で使用される鋼構造物の疲労き裂伝ば解析に用いる疲労き裂伝ば曲線を提案した。

$$da/dN = 2.60 \times 10^{-11} (\Delta K^{2.75} - 2.00^{2.75})$$

提案した疲労き裂伝ば曲線はいずれのデータに対しても妥当であることを示しており、鋼種によらず適用されるもので、一定振幅の繰返しのみでなくランダム荷重の繰返しを受ける場合にも適用されることを示した。なお、伝ば解析をデータに対する回帰曲線を用いて実施し、その結果を得た後に安全率を考える場合には伝ば曲線は次式の回帰曲線を用いることとなる。

$$da/dN = 1.45 \times 10^{-11} (\Delta K^{2.75} - 2.40^{2.75})$$

なお、引張残留応力が存在せず、定振幅の荷重のみが繰返されることが明らかな場合、鋼種毎に求めた母材データに基づく伝ば曲線を用いることを本提案は否定するものではない。

謝 辞

本報に用いた疲労き裂伝ば速度のデータは、金属材料技術研究所材料強度データシート懇談会溶接継手検討会 (主査 中村 治方) の多大な協力により得られたものである。ここに記して謝意を表す。また、貴重な御意見を頂いた溶接学会・溶接疲労研究委員会 (委員長 井上 肇), 日本鋼構造協会・疲労設計指針改定委員会 (委員長 三木千寿), 並びに日本造船学会・材料・溶接研究委員会・材料分科会 (主査 町田 進) の委員の方々に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) WES 2805, 脆性破壊発生に対する溶接欠陥の許容判定基準 (1976).
- 2) 本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査報告書別冊1, 疲れに関する検討, 土木学会・本州四国連絡橋上部構造研究小委員会 (1981).
- 3) ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec. XI Div.1 (1985).
- 4) BSI PD 6493, Guidance on Some Methods for Derivation of Acceptance Levels for Defects in Fusion Welded Joints (1980).
- 5) DNV, Classification Notes 30.2, Fatigue Strength Analysis for Mobile Offshore Units (1984).
- 6) 太田, 佐々木, 鎌倉, 二瓶, 小菅, 金尾, 稲垣, SM 50 B突合せ溶接継手における疲労き裂伝播しきい値に及ぼす引張残留応

- 力の影響, 溶論50 (1981) 35.
- 7) 金属材料技術研究所疲れデータシート資料3 (1984).
 - 8) 金属材料技術研究所疲れデータシートNo.21 (1980), No.31 (1982), No.41 (1984), No.46 (1985), No.54 (1986).
 - 9) Ohta, A. and Sasaki, E., Influence of Stress Ratio on the Threshold Level for Fatigue Crack Propagation in High Strength Steels, Engng. Fracture Mech. 9 (1977) 307.
 - 10) Ohta, A., Soya, I., Nishijima, S. and Kosuge, M., Statistical Evaluation of Fatigue Crack Propagation Properties Including Threshold Stress Intensity Factor, Engng. Fracture Mech. 24 (1986) 789.
 - 11) Brown, W. F. Jr and Srawly, J. E., Plain Strain Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Materials, ASTM STP 410 (1967) 1.
 - 12) Ohta, A., Kosuge, M., Mawari, T. and Nishijima, S., Fatigue Crack Propagation in Tensile Residual Stress Field of Welded Joints under Fully Compressive Cycling, Int. J. Fatigue 10 (1988) 237.
 - 13) 太田, 小菅, 廻, 西島, 熱処理によって残留応力を軽減したHT 80鋼溶接継手の疲れき裂伝ば特性, 溶論5 (1987) 126.
 - 14) 太田, 前田, 町田, 吉成, 下限界値近傍におけるランダム荷重下の溶接継手の疲れき裂伝ば, 溶論6-3 (1988) 426.
 - 15) 小寺沢, フラクトグラフィと破壊力学, 機械の研究 33-4 (1981) 483.
 - 16) 菊川, 城野, 近藤, 低K領域における変動荷重下の疲労き裂進展速度の評価法, 機論47-417 (1981) 468.
 - 17) Ohta, A., Konno, T. and Nishijima, S., Near-Threshold Fatigue Crack Propagation of Welded Joint under Varying Loadings, Engng. Fracture Mech. 21-3 (1985) 521.

画像表示によるスポット溶接部の超音波測定*

里中 忍**, 立川 逸郎***, 山本 光治**

Ultrasonic Measurement for Nugget Geometry of Resistance Spot Welds of Thin Plates with Imaging Techniques*

by Shinobu Satonaka, Itsuro Tatsukawa and Mitsuharu Yamamoto

This study proposes a ultrasonic measurement of nugget geometry in resistance spot welding of two-plate lap joint of thin plate below 1 mm in thickness. This measurement is immersion method with point focussed probe and is based on the composite effects of convergence of ultrasonic beam and attenuation due to the multiple reflection. Under the condition which the focus of ultrasonic beam places beneath the backwall, there appears a echo from the backwall within the weld region or from the faying surface with an observable time delay behind the surface echo. Since the time delay of backwall echo is as same as that of interface echo but these two echoes provide different amplitude, the weld region is distinguished from unbonded zones. According to the line scanning, three distinct patterns appear; the flat pattern peculiar to the faying surface, decreasing pattern at the vicinity of nugget boundary and increasing or flat pattern at weld region. The nugget size is determined by the distance between two points changing from the decreasing pattern to increasing or flat one, from which the measurement of nugget size is performed with the accuracy of 0.3 mm. A series of parallel line scanning with aid of personal computer provide the configuration of nugget, which is displayed on the CRT with two methods, that is, colour mode and white-black mode evaluated by the amplitude and gradient of amplitude, respectively.

Key Words: Resistance spot welding, Nugget, Ultrasonic testing, Multiple reflection, Scanning detection, Imaging technique, C-scan display

1. 緒 言

スポット溶接は自動車, 電機製品, 薄板金属工業に広く用いられている接合法で, 最近の精密部品や電子部品ではその精密化, 微細化とともにさらに薄い板を対象とすることが多くなり, また, その接合部も加圧力, 溶接熱による変形, 損傷や品質, 機能の劣化を防止するために溶接条件が制限され, ナゲット形状は小さくなる傾向にある。このようなスポット溶接部の接合状態を定量的に評価することは品質管理や生産性向上の面からも重要

となるが, 適当な非破壊検査法がなく, 断面観察や剝離試験などの破壊検査に依存しているのが現状である。この問題を解決するために, 超音波探傷試験では斜角法, 板波法, 透過法などが試みられているが¹⁻³⁾, その技術はまだ確立されていない。筆者らは既報の研究で, 薄板や表層部の内部欠陥に対して有効な超音波探傷法を明らかにした^{4,5)}。この方法は集束探触子の集束による音圧上昇の効果と表面と欠陥の間で起こる多重反射特性を利用して, 欠陥エコーと表面エコーを分離して検出するもので, 薄板抵抗スポット溶接部に適用した結果, そのナゲット形状が把握できることを示した⁶⁾。

本研究はこの超音波探傷法を利用して薄板抵抗スポット溶接部のナゲット形状を定量的に評価しようとするもので, 走査探傷による探傷条件と走査グラフ, 寸法精度の関係を示し, 探傷結果の画像表示を試みてナ

*原稿受付 昭和63年9月9日 昭和62年度 秋季全国大会で発表

**正 員 熊本大学 Member, Kumamoto University

***正 員 熊本大学 (現 (財) 大分県高度技術開発研究所) Member, Kumamoto University (Present address; Oita, Prefecture Advanced Technology Research Institute)