溶接継手の疲労き裂発生寿命の自動計測*

太田 昭彦** 鎌倉 将英*** 二瓶 正俊***
前田 芳夫*** 池川 和彦*** 佐々木 悦男**

An Automatic Detection of Fatigue Crack Initiation Life of Welded Joints

by

Akihiko OHTA, Masahide KAMAKURA, Masatoshi NIHEI
Yoshio MAEDA, Kazuhiko Ikegawa and Etsuo SASAKI
(National Research Institute for Metals, Tokyo)

In order to clarify the discrepancy of the fatigue life of welded joint specimens and that of welded structures, it is indispensable to detect the fatigue crack initiation life. For this purpose, the fatigue testing machine was stopped automatically by means of an electrical signal which was generated when the grille of copper foil on welded joints broke. Fracture of the grille corresponded to the crack initiation on the toe of weld of welded joints, because the grille adhered strongly on the weld zone through insulation coated on the weld zone. The grille was put in place by the vacuum deposition. The depth of the crack at the time of fatigue crack initiation was 0.2~2 mm on the fracture surface. This was well distinguishable by a colored part which appeared by heating the specimen after the fatigue testing machine was stopped. The above described treatment of specimens was found not to influence the fatigue life. So, this method is regarded as an effective way for detecting the fatigue crack initiation life. It was also revealed that the aspect ratio decreased with the increment of stress range. The smallest value of the aspect ratio was 0.05.

(Received Apr. 4, 1979)

キー・ワード：溶接継手，疲労き裂発生寿命，計測法

1 緒 言

構造物の疲労設計基準として疲労き裂発生寿命 N_c を採用すべきことが提案されているが、 N_c の測定は非常に困難であるため、 $S-N_c$ 曲線を求めた実験データは比較的少ない。これに対して、破断寿命 N_f を求めることは容易であり、 $S-N_f$ 曲線については数多くのデータが集積されている。そこで、 $S-N_f$ 曲線をもとに $S-N_c$ 曲線を予測するような手順を用いて疲労設計に対する基準を満たすような体裁がとられているのが現状である。

しかし、合理的な設計を行うためには、 N_f から N_c を予測するのではなく、 $S-N_c$ 曲線を直接求めることが望ましい。このためには、 N_c を容易に測定する方法を開発することが必要である。

N_c を求めるために用いられている従来からの方法には、疲労試験中試験片表面を絶えず監視してき裂発生を捕えるもの、二段多重試験により破面にピーチマ

ークを付け、ピーチマーク本数を数えることによって N_c を N_f から逆算して求めるもの等がある。しかし前者の方法では人間の眼に頼ることで恣意性があると同時に多大な労力を要し、後者ではき裂寸法が小さい領域で明りょうなピーチマークを付けることが困難である。

著者等は、溶接部という不規則な凹凸形状を有する試験片表面に塗布した電気的絶縁被膜を介して格子線状の銅箔を真空蒸着することによって、疲労き裂発生を銅箔格子線の破断による格子線の電気抵抗の急変による電気信号の変化として検出し、この信号で疲労試験を自動的に中断させるという N_c の自動計測を試みた。本報告はこの N_c 自動計測法の紹介である。

2 供試材料および疲労試験法

実験に用いた材料は、溶接構造用圧延鋼材 SM50B である。この材料および溶接材料素線、溶着金属、溶接継手の諸性質を Table I および Table II に示す。溶接加工は Table III に示す条件で施工した。Fig. 1 は用いた試験片の形状である。

疲労試験は、電気油圧式疲労試験機を用い、完全片

* 原稿受理 昭和54年4月4日

** 正会員 金属材料技術研究所 東京都目黒区中目黒

*** 金属材料技術研究所 東京都目黒区中目黒

Table I. Chemical composition of materials (wt %).

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	O ₂	N ₂	C _{eq}
Base metal SM50B	0.166	0.33	1.45	0.021	0.011	—	0.01	0.01	0.01	0.026	0.0035	0.0045	0.43
Filler material D5016	0.06	0.01	0.52	0.010	0.011	0.01	0.01	0.01					
Weld metal	0.08	0.58	0.92	0.013	0.008								

Table II. Mechanical properties of materials.

	Yield stress σ_y (N/mm ²)	Tensile strength σ_B (N/mm ²)	Elongation (%)	Charpy impact value (J)	Bend test	Hardness H _V 98 (N)
Base metal SM50B	397	534	31	187	Good	154
Weld metal	485	570	32	182		

Table III. Welding condition.

Welding method		Arc welding with covered electrode	Welding process
Welding condition	Welding rod	Low hydrogen type, JIS-D5016, 4mmφ	Edge preparation
	Welding position	Flat	
	Welding current	170 A(A.C.)	gouging
	Welding speed	14.6 cm/min	
	Arc voltage	19-23 V	Pass sequence
	Heat input	15-20 kJ/cm	
	Preheating	100°C	
	Re-drying of rod	350°C-1hr	
	Interpass temperature	100°C

Fig. 1. Shape of specimen.

振動荷重試験を行った。試験周波数は1~100 Hzである。

3 N_e 自動計測用試験片作製手順

まず、試験片溶接部をワイヤブラシを用いて摩き、アセトンで洗浄後電気的絶縁材（コダックフォトレジスト KMER）を塗布した。この試験片を恒温槽に入れ135℃10分間保持することによってフォトレジストを乾燥させた（Fig. 2 (a)）。乾燥後の膜厚は0.1~0.3 mmである。上記の処理を施した試験片溶接部に、予めケミカルミイリングの手法を用いて作ったアルミニウム製格子線用マスクをスプレー糊を用いて貼り付けた。次いで、Fig. 2 (b)に示すように2個の蒸着源からの銅を約0.5μmの厚さになるまで真空蒸着した。真空蒸着後、アルミニウム製マスクを手ではがし（Fig. 2(c)）、格子線一本一本について両端間に導通があり、しかも試験片との間に絶縁抵抗が充分あることを確認した後、すべての格子線が直列に継がるように導電塗

料で補修し、両端にリード線を付けた（Fig. 2 (d)）。以上の処理が完了した N_e 測定用試験片溶接部の写真を Fig. 3 に示す。なお、格子線の幅は1.5 mm、格子線の間の隔間は0.5 mmとした（A試験片）。しかし、アルミニウムマスクを用いず、細いセロテープ片を平行に並べて貼ったものをマスクとして用いた試験片では、格子線の太さが不揃いで1.5~3 mmのもの（B試験片）もある。

4 き裂発生による試験一時中断およびき裂寸法の確認

試験片表面にき裂が発生するに伴い電気的絶縁被膜にき裂を生じ、銅箔格子素線も破断する。この銅箔格子素線の破断を電気信号として捕え、疲労試験機の破断リレーを働かせ、試験を一時中断することによって N_e を自動検出した。 N_e を検出した時点での疲労き裂形態および寸法を確認する目的で次のような処理を行った。すなわち、試験片溶接部をアセチレンバーナで200~500℃程度に加熱した。こうすることによって、破面が酸化着色され、 N_e 検出時のき裂形態および寸法が破断後の破面で明りょうとなった。なお、B試験片については、二段多重試験によるビーチマーク法や肉眼監視によってき裂発生を捕える方法も併用し

Fig. 2. Procedure for preparing specimens.

Fig. 3. View of fatigue specimen for detecting N_e .

た。

5 実験結果および検討

Table IV に疲労試験結果を示す。上段は銅箔格子線の幅が 1.5 mm の A 試験片についての結果，中段は格子線幅が 1.5~3 mm の B 試験片の結果，下段は N_e 測定用の処理を施さない C 試験片の結果である。C 試験片を用いた理由は，試験片表面に塗料等を塗ることによって N_f が変化するという報告が見うけられることから， N_e 測定用の処理がどの程度 N_f に影響を及ぼすかを確かめるためである。B 試験片の応力範囲の欄に数字が 2 行書き入れられているのは，破面にビーチマークを付けるために， N_e 信号発生後，2 段多重試験を行ったことを示し，この場合 N_f は高応力範囲での繰返し数の総和が記入されている。また，き裂寸法が記入されていないものは，酸化着色を行わなかったため， N_e 検出時のき裂形態および寸法が不明であったものである。ここで， a はき裂深さ， $2c$ は試験片表面でのき裂の幅である。多数個の表面き裂があるときは，これを単一な表面き裂として評価するために ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. XI. IWA-3330⁶⁾ に従って，き裂深さ a とき裂の幅 $2c$ を計算した。ただし，この評価法に従って計算した $2c$ が，試験片幅以上になった場合は，試験片幅 25 mm

Table IV. Fatigue test data.

Specimen number	Stress range (N/mm ²)	Number of cycles to crack initiation N_0 (cycles)	Number of cycles to failure N_f (cycles)	Dimension of crack		Width of grille (mm)
				a (mm)	$2c$ (mm)	
A-1	200	3.60×10^5	4.58×10^5	0.9	6.8	1.5
A-2	240	6.15×10^4	2.59×10^5	0.2	1.3	
A-3	280	4.20×10^4	1.81×10^5	0.5	3.6	
A-4	360	3.98×10^4	6.10×10^4	0.9	(25)	
A-5	400	1.67×10^4	3.17×10^4	0.6	(25)	
B-1	$\begin{Bmatrix} 157 \\ 98 \end{Bmatrix}$	1.41×10^6	2.17×10^6	0.2	1.0	1.5~3.0
B-2	$\begin{Bmatrix} 196 \\ 138 \end{Bmatrix}$	2.45×10^5	3.24×10^5	—	—	
B-3	$\begin{Bmatrix} 196 \\ 138 \end{Bmatrix}$	5.25×10^5	7.73×10^5	1.4	5.8	
B-4	$\begin{Bmatrix} 235 \\ 117 \end{Bmatrix}$	2.88×10^5	3.11×10^5	—	—	
B-5	240	4.13×10^5	5.03×10^5	2.1	6.2	
B-6	275	1.13×10^5	1.79×10^5	—	—	
C-1	400		3.08×10^4			
C-2	360		6.56×10^4			
C-3	280		1.74×10^5			
C-4	240		2.53×10^5			
C-5	240		3.41×10^5			
C-6	200		4.40×10^5			
C-7	200		5.17×10^5			
C-8	160		2.01×10^6			
C-9	140		9.64×10^6			
C-10	120		4.02×10^6			
C-11	120		1.02×10^7			
C-12	100		$> 2.97 \times 10^7$			
C-13	100		$> 3.15 \times 10^7$			

をもって $2c$ とした。なお，B-6 試験片では， N_e 信号によってそのときの繰返し数のみを記録させ，試験の一時中断を行わなかった。Fig. 4 は，破断後の破面写真である。酸化着色した破面では， N_e 検出時のき裂形態および寸法が以後の破面と明りょうに区別できる。B-1 および B-3 試験片は，酸化着色法とビーチマーク法を併用した破面である。ビーチマークが観察可能となるき裂寸法は，酸化着色によって明りょうと

Fig. 4. Fracture surface and side view of fractured specimen.

なった N_c 。検出時のき裂寸法に比べ非常に大きくなっており、ピーチマーク法によるき裂の検出は小寸法のき裂を捕えるためには感度が不足であることがわかる。ここで、試験片表面の観察によるき裂の検出についても言及する。 N_c 信号によって疲労試験を一時中断した後、試験片表面のフォトレジスト等を除去し、20～

80倍の実体顕微鏡でき裂の有無を調べたり、再試験開始直後に試験片溶接部表面に液体を塗り、き裂開閉口によってき裂へ出入する液体による液体表面の光の反射の変化をルーペで観察したが、き裂の存在は認められなかった。しかし、この観察を行った B-1 試験片では、観察時にはすでにき裂が存在していたことが酸

化着色によって明らかとなっている。

ここで、格子線幅とき裂寸法の関係について論じておく。Fig.4 および Table IV から明らかなように、格子線幅とき裂発生検出時における試験片表面でのき裂の幅、 $2c$ は一致しておらず、大部分の試験片で格子線幅に比べ $2c$ は非常に大きい値となっている。この事実から次のことが推察される。すなわち、き裂が深さ方向にある程度進み、試験片表面でのき裂開口量がある程度大きくならないとフォトレジストおよび銅箔格子にき裂が生じない。ここで、フォトレジストの膜厚は、き裂開口量と銅箔格子線破断の関係に大きな影響を及ぼすものと思われる。しかし、溶接部という非常に複雑な表面形状を有する試験片の表面に、均一な厚さのフォトレジスト膜を塗布することはできない。そのため、A試験片とB試験片の格子線幅の差異よりも、同一試験片でのフォトレジスト膜厚の不均一の方が銅箔格子の破断に及ぼす影響が大きく、従って、格子線幅を 1.5 mm と固定した A 試験片と 1.5~3 mm とした B 試験片で、 $2c$ について系統的な差異が認められないのであろう。さらに、き裂深さ a についてもフォトレジストの膜厚は大きな影響を及ぼすものと思われる。 a の値は A 試験片で 0.2~0.9 mm、B 試験片で 0.2~2.1 mm となっているが、このような a の変化は主としてフォトレジストの膜厚の不均一によるものであろう。以上述べたことから、溶接部のき裂発生寿命測定ということを工業的に考える場合には、A 試験片と B 試験片の差をそれほど区別する必要はないと思われるので、以下では両者をひっくるめて扱うこととする。

Fig.5 は Table IV を S-N 線図に描きなおしたものであり、白抜き印は N_c を、黒塗りの印は N_f を示し、同一試験片の N_c と N_f は矢印付細線で結び対応を示してある。また、+印は N_c 測定用の処理を行わなかった試験片の N_f を示している。 N_c 測定用の処理を行ったものと行わなかったものの N_f の間には大きな差違が認められず、この処理によって疲労試験

Fig. 5. S-N diagram.

結果が影響を受けていないことがわかる。

Fig.6 は、き裂発生寿命 N_c とこれに対応する破断寿命 N_f の関係を示すものである。両者の間には、実線で示されるように、 $N_c=0.171$ 、 $N_f=1.10$ の関係が成立しており、寿命の大きなものほどき裂発生までに要する寿命の割合がわずかながら増している。なお、図中 () 付の記号は、き裂発生検出時に酸化着色によってき裂寸法を確認しなかった試験片の値を示している。

Fig. 6. Relationship between N_f and N_c .

再び、Fig.4 にもどって見ると、応力範囲の小さな長寿命の試験片ほど、本方法による N_c 検出時のき裂形態が半円に近く、き裂の発生点個数が少い傾向にある。一方、応力範囲が大きく寿命の短い試験片では、き裂発生点が非常に密になり、深さ方向に浅く幅が広いき裂形態を示すようである。

そこで、ASME Code に従って定めた a と c を用いて計算したアスペクト比 a/c と応力範囲の関係を図.7 に示すように描いた。先に述べた傾向がはっきりと現れ、しかも、アスペクト比 a/c が 0.05 という非常に小さい値になる場合があることがわかる。

Fig. 7. Relationship between aspect ratio and stress range.

溶接止端部の形状は、非常に不規則な凹凸形状を呈しており、従って、溶接止端部の応力集中係数は溶接止端線にそって不規則に変化している。定性的にはき裂発生点は溶接止端線上の応力集中係数の大きな点であるが、応力範囲が大きい試験条件では、ある水準以上の応力集中係数を有する点でひずみ範囲が充分大き

くき裂発生条件を満たすため, 1本の試験片で多数のき裂発生点を有することになり, 本法による N_e 発生検出時のき裂は数個の発生点からのき裂が連結した浅く広いき裂形態となったものと思われる. これに比べ応力範囲の小さな試験条件では, き裂発生条件を満たすに足る大きな応力集中係数を有する点は1本の試験片について非常に少数しか存在しなくなる傾向にあり, き裂形態は独立した半だ円形態をとったものと思われる.

6 結 言

(1) 試験片表面に電氣的絶縁被膜を介して銅箔格子を固着させた試験片を作製することにより, 溶接止端部での疲労き裂発生寿命を自動検出することができた.

(2) 疲労き裂発生検出時のき裂形態および寸法を, 破面の酸化着色により確認した. 確認されたき裂深さは, 0.2~2 mm であった.

(3) 疲労き裂発生寿命自動測定用の処理を行った試験片と無処理の試験片の破断寿命には差が認められなかった.

(4) 本自動検出法によって捕えた疲労き裂発生時のき裂形態は, 応力範囲が大きくなるに従ってアスペクト比が減じ, アスペクト比が0.05という非常に小さい値も観察された.

本研究を行うに当たり, 金属材料技術研究所疲労データシート検討会第二分科会から多大な協力を得た. ここに記して謝意を表する.

(昭和53年11月7日 日本材料学会第12回疲労シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 日本鋼構造協会疲労設計指針・同解説(案), 日本鋼構造協会誌, **10**, 22 (1974).
- 2) 松本重人, 小林邦彦, 田中康浩, 川崎製鉄資料 (1977).
- 3) 益本 功, 篠田 剛, 渡部芳久, 田島直之, 溶接学会誌, **46**, 815 (1977).
- 4) Gurney, T. R., British Welding Journal, 530 (1963).
- 5) Gilde, W., G. Müller, and H. Schwarz, Schweisstechnik., **12**, 64 (1962).
- 6) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. XI, ASME (1977).