実働荷重による疲労破面[†]

岡 本 太 郎* 福 島 正 治* 上 田 実 彦**

Evaluation of Service Load by Micro-Fractography of Fatigue Fracture

by

Taro OKAMOTO, Masaharu FUKUSHIMA and Jitsuhiko UEDA

(Technical Research Institute, Hitachi Zosen Co., Osaka)

Fatigue tests under a constant average load with load spectrum of conditional distribution, which resembles a usual service load in structural parts, were carried out on CT test specimens of stainless steel (SUS 304) and the striation spacings formed on the fracture surface were measured by micro-fractography.

As preliminary tests, five kinds of block loadings were applied to the test specimens, and the relationship between the applied load and striation spacings was investigated. Fatigue tests and fractography on two kinds of random loadings simulating a usual service load were then carried out, and the possibility to evaluate the random load by striation spacing measurements was examined. It is suggested that fractography is useful for evaluation of main service load spectrum responsible to fatigue crack growth.

(Received Aug. 31, 1982)

キー・ワード：実働荷重，疲労，き裂伝ば，フラクトグラフィ

1 緒 言

実働荷重によって形成された疲労破面上の模様より、き裂伝ば寿命に寄与する主な荷重スペクトラムを推定することは、構造部材の疲労破損事故の原因究明において重要である^{1,2)}。構造物は一定の死荷重のもとで短期的な変動外力スペクトラムが負荷されることが多い。そこで本研究においては、疲労試験における荷重条件として、死荷重を想定し、平均荷重を一定に保ち、荷重振幅を変動させる実験を行い、その疲労破面を検討することとした。まず基本的な試験として、代表的なブロック波を負荷した実験を行った。特に負荷の大きさの順序の影響に着目して検討し、破面に生ずるストライエーション間隔の測定と共に平均的なき裂進展速度についても検討した。

つぎに、死荷重を一定にし荷重振幅として短期分布のランダム荷重を負荷した実験を行い、試験片破面のストライエーション間隔測定などの結果をブロック波の実験結果と対比して定量的な評価を行った。

これらの結果を総合して、ランダム荷重下の疲労破面観察から得られるストライエーションの分布データを基に負荷荷重スペクトラム推定の実用性を検討した。

2 実験方法

供試材は所定の溶体化処理を施した市販の SUS304 板材とした。供試材の化学組成は、C: 0.074, Si: 0.58, Mn: 1.40, P: 0.027, S: 0.004, Ni: 8.40, Cr: 18.79, Mo: 0.19 wt. %である。室温の機械的性質は、引張強さ: 601MPa, 0.2%耐力: 251MPa, 伸び: 67%, 絞り: 79%である。供試材の顕微鏡組織を Fig. 1 に示す。疲労試験は板厚 20 mm の CT 試験片を用い、電気油圧式閉ループ試験機により行った。負荷荷重波形はマイクロコンピュータにより作成したブロック波およびランダム波を用いた。巨視的なき裂伝ば速度は、試験片の側面にクラックゲージ (0.2 mm ピッチ) を貼付して計測した。

実験した試験片は Table I に示す 8 本であり、内 1 本には一定振幅荷重 (S-1) を、5 本にはブロック波

Fig. 1. Microstructure of material used (SUS 304).

† 原稿受理 昭和57年8月31日

* 日立造船(株)技術研究所 大阪市此花区桜島

** 正会員 日立造船(株)技術研究所 大阪市此花区桜島

Table 1. Load condition of test specimen.

Specimen No	Stage No	Mode	Applied load (kgf) {kN}		Loading	Number of cycles in a block, M	Number of cycles in a load step, m	Remarks												
			Average	Amplitude(max)																
S-1	—		660{6.47} 935{9.17}	540{5.30} 765{7.50}	Constant amplitude	—	—	—												
S-2	1		1064{10.4}	1064{10.4}	Block loading (5 load steps in a block)	5	1	Rate of load amplitude in a block <table border="1" data-bbox="927 311 997 421"><thead><tr><th>Step</th><th>Rate</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>2</td><td>5/6</td></tr><tr><td>3</td><td>2/3</td></tr><tr><td>4</td><td>1/2</td></tr><tr><td>5</td><td>1/3</td></tr></tbody></table>	Step	Rate	1	1	2	5/6	3	2/3	4	1/2	5	1/3
	Step	Rate																		
1	1																			
2	5/6																			
3	2/3																			
4	1/2																			
5	1/3																			
2		632{6.20}	632{6.20}	50	10															
S-3	—		1149{11.3}	1149{11.3}	5	1														
S-4	1		1089{10.7}	1089{10.7}	50	10														
	2		735{7.20}	735{7.20}	5	1														
S-5	1		1148{11.3}	1148{11.3}	Block loading (2 load steps in a block)	100	10	max load/min load amp = 1/2												
	2		736{7.21}	736{7.21}		10	1													
S-6	1		1149{11.3}	1149{11.3}	Block loading (2 load steps in a block)	13	2+11	max load/min load amp = 1/2												
	2		1149{11.3}	1149{11.3}		31	2+29													
S-7	—		1090{10.7}	900{8.83}	Random loading (Rayleigh distribution)	—	—	—												
S-8	—		1300{12.7}	1300{12.7}	Random loading (Rayleigh distribution)	—	—	—												

(S-2～S-6)を、そして2本には荷重振幅がRayleigh分布に従うようなランダム荷重(S-7とS-8)を負荷した。S-1にて基本的なストライエーション間隔(以後SSで示す)を求め、ブロック波を負荷した試験片S-2～S-6にて負荷の大きさの順序による影響を検討した。また試験片S-7、S-8には実働荷重を模擬したランダム荷重を負荷し、その結果をS-1～S-6のデータより得た知見を基に検討した。いずれの試験片においても平均荷重は一定に保った。S-2～S-5のブロック波を負荷した試験片では振幅を5種類変えて負荷し、5種の振幅それぞれの比率 r_i を一定とした。さらに試験片S-2～S-5においては負荷の大きさの順序として昇順、降順および昇降順という三つの組合せを採用し、1ステップの負荷(m 個)を1回ずつかけるものと10回ずつかけるものと2種類にした。結局6種類のブロック波を採用し、各試験片を2ステージに分けてノッチ底から近い部分をステージ1、遠い部分をステージ2とした。各ブロック波においてストライエーション間隔をFig.2のように定義した。すなわち1ブロックの負荷をAと呼び、1ブロック内の5ステップ

の各荷重を大きい順にB, C, D, E, Fと定義した。それぞれの各ステップに対応するストライエーション間隔を、 $SS_B, SS_C, \dots$ と表すことにした。またS-6においては、1ブロック内で2段の荷重振幅を負荷した。小さい方の荷重振幅は大きい方に対しステージ1で1/2、ステージ2で1/3とした。また1ブロック内の負荷回数は、大きい方の振幅を2回(B_1, B_2 とする)とし、小さい方の振幅(Cとする)の回数は一定荷重振幅試験結果を用いて、この荷重振幅で $SS_{B_1}+SS_{B_2}$ に等しいき裂成長量となる値を、加速遅延効果を無視して算定して決めたものであり、ステージ1では11回、ステージ2では29回とした。このブロック波はS-2～S-5までのブロック波と異り、低次のランダム性を有するもので2段荷重で小さい振幅の回数が多くなっているため、大きな遅延効果が予測される。この試験片では荷重振幅が大きく変化する際の破面の特徴を調査することを主眼とした。

3 実験結果

3.1 ブロック荷重下の破面

まず試験片S-1のクラックゲージにより測定した巨視的き裂伝ば速度と応力拡大係数範囲 $4K$ との関係を求めてParis則にて表すと材料定数C, m はそれぞれ $C=2.56 \times 10^{-8}$, $m=3.44$ となった。つぎにブロック波形の負荷を与えた試験片破面をSEM観察し、その結果をFig.3～7に示す。この観察結果からFig.2の定義に従ってSSを測定した。巨視的なき裂伝ば速度と1ブロックのストライエーション間隔 SS_A を比較した例(S-4)をFig.8に示す。ここで両者はよく一致しているのが認められる。また、1ブロックのSSの測定結果をFig.9に示す。S-2の測定結果を疲労き裂長さ a_e (初期切欠き長さ: 20 mm)の関数として示したものである。実効K値を表現するために応力比の効果として、ここでは応力比Rにおけるき裂伝ば

Fig. 2. Profiles of block load. Note: Striation spacings corresponding to load B, C, D... are expressed as $SS_B, SS_C, SS_D, \dots$ respectively.

Fig. 3. Fractograph of specimen S-2 stage 1 ($a_c=8.5\text{mm}$). Note: Arrow shows crack growth directions.

Fig. 4. Fractograph of specimen S-2 stage 2 ($a_c=20.5\text{mm}$).

速度を $\frac{da_i}{dN} = \{(1+R_i)/(1-R_i)\} \cdot C \cdot \Delta K_i^m$ で表すこととした。Table I に示した B～F に対応するそれぞれの R は、S-2、S-5 の各試験片とも同一の値を採用しておりブロック波の i ステップにおけるき裂伝ば速度を、き裂の加速遅延効果がないと考えた場合は負荷の大きさの順序に関係なく式(1)で評価できる。

$$\Delta a_i / \Delta N_i = \{(1+R_i)/(1-R_i)\} \cdot C \cdot \Delta K_i^m \quad (1)$$

ここで 1 ブロックの負荷に対するき裂の成長量 Δa は全き裂長 a に比べて無視できるほど小さいので ΔK_i は 1 ブロックの負荷に対して応力のみに依存し、き裂長さには依存しないとして取扱える。Table I に示した r_i を用いると $R_i = (1-r_i)/(1+r_i)$ となり、式(1)より結局 i ステップのき裂成長量を 1 ブロックのき裂

Fig. 5. Fractograph of specimen S-3 ($a_c=14\text{mm}$).

Fig. 6. Fractograph of specimen S-5 stage 2 ($a_c=15.7\text{mm}$).

Fig. 7. Fractograph of specimen S-6 stage 2 ($a_c=9\text{mm}$).

成長量で無次元化した δ_i は、

$$\delta_i = r_i^{m-1} / \sum_{i=1}^5 r_i^{m-1} \quad (2)$$

となる。それぞれの δ_i は Fig. 10 に実線で示した値となる。これに対応する SS の測定値として $SS_B \sim SS_F$ の SS_A に対する比率を Fig. 10 にプロットしているが、ほぼ直線上にのっている。相対比較においては幾分遅延は認められるものの、ほぼ負荷の大きさの順序の影響はないとみなされる。これは本実験では平均応力を一定としたため応力振幅の小さいステップは応力比が高く、遅延効果が顕著にあらわれないためと思われる。1 ブロック内を 2 段の荷重振幅とした S-6 の試験片では Fig. 7 にみられるように、 SS_C は SS_{B1}

Fig. 8. Macroscopic crack growth rate and striation spacing in specimen S-4.

Fig. 9. Striation spacing of specimen S-2.

Fig. 10. Normalized crack growth rate for load steps in a block.

+SS_{B2} に比べるとはるかに小さく、遅延効果が大きいことを示している。また、SS_{B2} に比べ SS_{B1} は常に大きく、SS_{B1} において加速効果が大きいようである。SS_{B2} と SS_G との境界では比較的サブクラックが多く観察され、このことは大きな荷重振幅の後に小さい荷重振幅が繰返されるとサブクラックを形成しやすくなることを示唆している。SS の絶対値を比較するために、最大の荷重振幅 B に対応するストライエーション間隔 SS_B を応力拡大係数範囲の関数として示すと Fig. 11 が得られた。昇順の波形では若干遅延し、降順の場合は加速されている。両方が混在した昇降順では一定荷重振幅と同様となっている。この結果はランダム性が増すにつれてほぼ一定振幅試験結果に近づくことを示唆している。Fig. 11 には S-6 の SS_{B1}, SS_{B2} の結果も併記しており、SS_{B1} は、降順のブロック波同様、加速がみられ、SS_{B2} もやや加速側の結果を示しているのがわかる。

Fig. 11. Striation spacing corresponding to load B.

つぎに 1 ブロックのき裂成長量 SS_A に対応するクラックゲージの計測値に基づく平均的なき裂伝ば速度に関して検討する。用いるパラメータとしては ΔK 値のき裂の平均伝ば速度と等価な m 乗平均値 (式(3))を採用することにした。

$$\Delta K(m) = \left(\frac{\Delta K_1^m}{n} \sum_{i=1}^n r_i^m \right)^{1/m} \quad (3)$$

ここで n : ステップ数, ΔK_1 : 最大荷重振幅における ΔK , 1 ブロック内の各ステップでは応力比が異っているため、等価な ΔK を得るためには平均応力の効果を考へる必要がある。すでに示した平均応力の効果を含む Paris 則を変形すると

$$da/dN = C \frac{1+R}{1-R} \Delta K^m = C \left[\left(\frac{1+R}{1-R} \right)^{1/m} \cdot \Delta K \right]^m \quad (4)$$

となる。式(3)に対して式(4)の $\{(1+R)/(1-R)\}^{1/m}$ の効果を含んだ等価な ΔK 値すなわち $\Delta K_{eq}(m)$ (式(5)) を求めた。

$$\Delta K_{eq}(m) = \left\{ \frac{\Delta K_i^m}{n} \left(\sum_{i=1}^n r_i^m \cdot t_i^{-m/m} \right) \right\}^{1/m} \quad (5)$$

ここで $t_i = \Delta K_i / (2 \cdot Km)$, Km : 平均応力に対する K 値である。 $\Delta K_{eq}(m)$ で整理したブロック波の実験結果を Fig. 12 に示す。この結果と一定荷重振幅試験 (S-1) の結果を応力比の効果も補正して $R=0$ とした一点鎮線とを比較すると、負荷順序に関係なく m 乗平均値のほうが、よりよく一致しているのがうかがえる。このことは平均値的なき裂成長という観点からみると加速と遅延効果が適当に混在し、平均化されているということを意味している。

以上の結果をまとめると下記の通りである。

(1) 巨視的き裂伝ば速度と1ブロックの SS は対応

Fig. 12. Macroscopic crack growth rate of specimens S-1~S-6.

している。(Fig. 8)

(2) 1ブロック内の最大荷重(B)によるき裂の成長量は一定荷重振幅試験の結果とはほぼ一致する (Fig. 11)

(3) 荷重負荷の大きさの順序の影響として、1ブロックの成長量の相対的な比率でみた場合、順序の影響はあまりなく式(2)で統一的に表現することができる。(Fig. 10)

(4) 平均的なき裂伝ば速度は、等価 m 乗平均 ΔK 値でよく評価することができる。

(5) 大きい荷重振幅から急に小さい荷重振幅へ移行した場合はサブクラックが多く形成される傾向がある。

残る問題は各荷重ステップの出現頻度による影響であり以下のランダム荷重の項では、ブロック波で得た知見に基づき、この問題に観点をのべて検討する。

3.2 ランダム荷重下の破面

Rayleigh 分布に従うような荷重振幅を有し、平均荷重を一定に保ったランダム荷重を与えた試験片 S-7, 8 の破面観察結果を Fig. 13, 14 に示す。ここで測定されたストライエーション間隔を基に工学的に寿命評価を行う手法について検討する。各荷重ステップの出現頻度をみるため Fig. 15 (a) に S-6 に負荷した荷重スペクトラムを5階差に分割して示す。このような荷重スペクトラムに関し、き裂成長量はブロック波の結果と同様に考え式(2)における出現頻度に対する重み g_i をつけ加えた式(6)で表現できる。

$$\delta_i = g_i \cdot r_i^{m-1} / \sum_{i=1}^n g_i \cdot r_i^{m-1} \quad (6)$$

この結果は Fig. 15 (b) のように試験片の各き裂位置でのき裂成長量すなわち SS の全スペクトラムのき裂成長量で無次元化した値の確率分布として表現される。ストライエーションの読み取り限界は撮影された倍率および写真の鮮明度に依存すると考えられる。このような読み取り限界の問題は次のような2種類を含んでいると考えられる。

(1) 読み取り限界が大きすぎ、現実には存在しているストライエーション間隔以上となり、複数の SS を一個として読みとる危険性

(2) 読みとられた SS がどの程度の精度で読みとら

Fig. 13. Fractograph of specimen S-7 ($a_c=10\text{mm}$).

Fig. 14. Fractograph of specimen S-8($a_c=3\text{mm}$).

Fig. 15. Load histogram and crack growth rate in test specimens S-7 and S-8.

Fig. 16. Striation spacings measured by various magnifications for specimen S-7.

れているかという問題

(1)の問題は Fig. 16 に示すような、同一視野で観察された低倍率の750倍のように、他の高倍率の母集団と共通した集合を有さない場合である。これは明らかに(1)の危険性を示しているが、さらに倍率をあげて比較し、共通した集合の存在を確認することで避けることができる。Fig. 16 の3500倍と15000倍のように共通した集合を有する場合(2)の問題に対しては Fig. 17 (a)(b)に示すように、SS の観察結果を対数正規分布にて示し、SS 分布の計算値すなわち Paris 則および式(6)より求めたものとの比較を行った。なお一点鎖線で示す計算値は、読み取り限界以下の SS の累積頻度

(P_D^0) を無視し、残りの部分に関する計算を行ったものである。この結果高倍率における SS の測定結果は計算値と良好な一致をみており、読みとられた SS は測定範囲内で妥当なものとなすことができる。

このような結果から、測定された SS 母集団が倍率を変えても共通した集合を有する場合は、かなりの精度で SS が読みとられていることが認められ、(2)の問題は小さいことがわかった。Fig. 17 (a)(b)のように全スペクトラムのうち50~60%という多大の荷重スペクトラムを無視しても Fig. 15 からわかるように、それが低レベル側の荷重スペクトラムのためき裂成長に及ぼす効果は15%程度と小さいことがわかる。このためフラクトグラフィから得られる SS に基づき推定される荷重分布は疲労寿命に及ぼす影響という観点からは高荷重側の荷重スペクトラムを推定することとなるので、安全側の妥当な値を与えると考えることができる。なお SS として観察されない小さな領域は、本考察で無視した遅延効果が Fig. 10 に示すように存在するため、推定結果よりさらに小さな影響しかないと考えられる。

つぎにブロック波の場合と同様、平均的なき裂伝ば速度と等価 ΔK 値の関係を検討する。ランダム波の場合、その荷重振幅を n 階差におとした場合、各階差の頻度を g_i とすると、式(5)は以下のように表される。

$$\Delta K_{eq}(m) \doteq \left[\frac{\Delta K_1^m}{n} \left(\sum_{i=1}^n r_i^m \cdot t_i^{-m/m} \cdot g_i \right) \right]^{1/m} \quad (6)$$

$\Delta K_{eq}(m)$ 値で、実験結果をまとめたのが Fig. 18 である。一定荷重振幅試験の結果にほぼ近い結果となっているが、 m 乗平均値を採用すると、同等ないしは安全側の評価となるため、実用的には m 乗平均値を用いるのが良いと思われる。

4 結 言

実働荷重下の疲労破壊を想定して平均荷重一定で、ブロック荷重および、短期的な外力スペクトラムを負荷した疲労き裂伝ば試験を行った。その結果次のような結論を得た。

(1) 本実験範囲内において、平均応力下の5ステッ

Note : Fig. 17 (a) and (b) correspond to Fig. 13 (a) and (b).

Fig. 17. Comparison of striation spacing with evaluated crack growth rate in specimen S-7.

Fig. 18. Macroscopic crack growth rate of specimens S-7 and S-8.

ブのブロック波のき裂成長に関し、大きな遅延効果はみられない。

(2) ブロック波の試験において、最大荷重振幅に対するストライエーション間隔の観察によれば、降順ブロックにおけるものが加速効果が認められる。

(3) 一定荷重振幅試験結果を基に式(1)~(7)を用いると、本実験に用いたブロック荷重およびランダム荷重における平均的き裂伝ば速度をよく推定できる。

(4) ブロック波において荷重振幅が急に小さくなった場合、サブクラックが形成されやすく、ランダム波荷重下の破面においてサブクラックが多い一因がこの効果だと思われる。

(5) ランダム荷重下疲労破面のストライエーションの測定において、倍率をかえても、相互の母集団が積集合を有している場合は、実在するものをほぼ読みと

ったと考えてよい。

(6) ランダム荷重下のストライエーション間隔のデータを基に、疲労き裂伝ば寿命のほとんどを支配する荷重振幅の外力スペクトラムを推定することができる。
(昭和57年6月25日 第3回フラクトグラフィシンポジウムにて講演)

参考文献

- 1) J. C. McMillan and R. M. N. Pelloux, ASTM STP, 415, 505 (1967).
- 2) 小寺沢良一, 志茂大治郎, 近藤潤一, 材料, 27, 54 (1978).
- 3) 原 洋一, 堀 徹, 豊貞雅宏, 岡本太郎, 日立造船技報, 41, 236 (1980).
- 4) 金沢 武, 町田 進, 糸賀興右, 日本造船学会論文集, 136, 207 (1974).