破面解析による実働疲労荷重の推定†

岡本 太郎* 福島 正治** 上田 実彦***

Evaluation of Cyclic Service Load by Micro-Fractography

by

Taroh OKAMOTO*, Masaharu FUKUSHIMA** and Jitsuhiko UEDA***

For prevention of fatigue fracture troubles in structural parts, the establishment of a procedure to evaluate service load by micro fractography is desirable. Fatigue tests under block loading with four or five load steps and random loading with a constant minimum load were carried out using CT test specimens of stainless steel (SUS 304). Micro-fractographic analysis was performed on the test specimens and the relationship between the applied stress and the striation spacing observed was investigated. The results obtained are summarized as follows:

- (1) The striation spacing corresponding to the maximum stress amplitude in the block loading tests was equal to that in the constant load test.
- (2) Retardation of fatigue crack propagation was recognized in the striation spacing corresponding to the stress amplitude lower than the maximum amplitude in the block loading test.
- (3) The data of fatigue crack propagation rate obtained in the block and random loading tests fitted well to a straight line when plotted against m factorial mean ΔK value.
- (5) The random test loads could be evaluated almost correctly from the striation spacings measured, except for small load spectra which gave unresolvably small striation spacings.

キー・ワード：疲労，実働荷重，き裂伝ば，フラクトグラフィ，SUS 304

1 緒 言

構造物のき裂損傷事故原因として最も多い疲労破壊において，破面に残されるストライエーションは，破壊に至る過程を示す直接的な情報である．これを基に損傷時に加わった荷重の大きさを推定することは，事故再発防止の意味からも重要である^{1)~3)}．著者らは一定の平均荷重下で，種々の繰返し荷重が重畳する疲労破壊において，破面のストライエーション間隔から負荷荷重を推定する方法について検討してきた⁴⁾．

本報告ではさらに一般的な場合として，平均荷重も荷重振幅も変動するような各種疲労試験を行い，その破面観察より負荷荷重を推定する方法を検討した．

2 実験方法

所定の溶体化熱処理を施した市販のSUS 304板材を供試材とした．供試材料の化学組成は，C：0.056，Si：0.79，Mn：1.39，P：0.015，S：0.007，Ni：8.21，Cr：18.11 wt%である．室温の機械的性質は，引張強さ：670 MPa，0.2%耐力：250 MPa，伸び：72%，絞り：80%である．疲労試験は前回と同様⁴⁾，板厚 20 mm のCT 試験片を用い，電気油圧式閉ループ試験機

にて行った．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．巨視的な疲労き裂伝ば速度を，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．

今回の試験では Table I に示す 10 本の試験片を作成した．SN-1~SN-6 は最小荷重を一定としたブロック波であり，それぞれ負荷の順序の影響をみるために，荷重ステップを 4 または 5 段階に分けたブロック波荷

Table I. Load condition of test specimen

Specimen No.	Load condition		Applied load (kgf) {kN}		Loading	Remarks
	Mode	Number of load steps in a block	Number of cycles in a load step	Maximum load amplitude ΔP	Minimum load P_{min}	
SN-1		4	1	1800 (17.7)	0	Block loading Rate of load amplitude in a block Step Rate 1 1 2 5/6 3 2/3 4 1/2 5 1/3 Average load: 500~1500 kgf (4.9~14.7 kN)
SN-2		5	10	1600 (15.7)	0	
SN-3		4	1	1600 (15.7)	0	
SN-4		5	10	1500 (14.7)	0	
SN-5		10	1	1600 (15.7)	0	
SN-6		10	10	1600 (15.7)	0	
SN-7		4	10	1000 (9.8)	0	Constant amplitude Random loading (Rayleigh distribution)
SN-8		1	—	1200 (11.8)	0	
SN-9		—	—	2200 (21.6)	100 (0.98)	
SN-10		—	—	2000 (19.6)	100 (0.98)	

† 原稿受理 昭和59年8月20日 Received Aug. 20, 1984

* 日立造船(株)技術研究所 堺市築港新町, Technical Research Institute, Hitachi Zosen Corp., Shimmachi, Chikkou, Sakai

** 日立造船(株)技術研究所 大阪市此花区桜島, Technical Research Institute, Hitachi Zosen Corp., Sakurajima, Konohana-ku, Osaka

*** 正会員 日立造船(株)技術研究所 大阪市此花区桜島, Technical Research Institute, Hitachi Zosen Corp., Sakurajima, Konohana-ku, Osaka

重を负荷した。各ステップの応力振幅の比率は Table I に r_i (i ステップの応力振幅/最大応力振幅) として示すように、いずれの試験片とも同一の値とし、负荷順序と 1 ステップ中の负荷回数をかえてその効果を検討した。SN-7 は荷重振幅を一定とし、平均荷重のみを変動させたブロック波である。また SN-8 は一定荷重振幅の標準試験である。SN-9, SN-10 は、ブロック波同様最小荷重を一定に保ち、荷重振幅が Rayleigh 分布に従うようなランダム荷重を加えた。これらの実験による破面観察において各ブロック波のストライエーション間隔 (以下 SS と略す) を Fig. 1 のように定義した。ここで、それぞれ 1 ブロックの负荷を A で示し、1 ブロック中の各ステップを振幅の大きい順に B, C, D, E, F で示している。なお SN-7 では平均荷

重の大きい順に示している。この负荷に対応する SS は、それぞれ添字を用いて SS_A, SS_B 等と表した。

3 実験結果および考察

3.1 ブロック荷重下の破面

試験片 SN-1~SN-7 のブロック波疲労試験を行い、試験後試験片破面の SEM 観察を行った。その結果を Fig. 2~5 に示す。各図で、 a_c は機械切欠き底からのき裂長さ、 ΔK_I は最大応力振幅範囲 (すなわち B) に対応する ΔK 値を示している。荷重漸増タイプの荷重波形を负荷した SN-1 の場合、き裂が比較的短い部分でも、Fig. 2 (a) に示すように SS_A は明りょうに観察される。き裂が深くなると同図(b)に示すように SS_B, SS_C が区別して計測できる。SN-4, SN-5 の場合も同様に、Fig. 3, 4 に示すようにそれぞれの荷重ブロックに対応した SS が明りょうに観察される。ただし荷重振幅の小さい E, F に対応する SS_E, SS_F はき裂が長い部分でも明りょうには区別できない。SN-7 は荷重振幅が一定で平均荷重が変動するブロック波であるが、破面には Fig. 5 に示すように、一つのブロックに対応したなだらかな凹凸が観察される。その一部分には明りょうな SS が認められるが、その間隔は一定していない。これらの観察結果に基づいて SS の特性を検討する。

Fig. 6 は、1 ブロックのき裂成長量を巨視的な計測値と SS_A とで比較した例であるが、両者はよく一致

Note: Striation spacings corresponding to load A, B, C..... are expressed as SS_A, SS_B, SS_C, respectively.

Fig. 1. Profiles of block load.

(a) $a_c = 10 \text{ mm}$ ($\Delta K_I = 168 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ {52 MPa $\sqrt{\text{m}}$ })

(b) $a_c = 15 \text{ mm}$ ($\Delta K_I = 262 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ {81 MPa $\sqrt{\text{m}}$ })

Note: Crack propagation direction is from left to right in all the photographs.
 a_c : Crack length, K_I : ΔK corresponding to the maximum load amplitude.

Fig. 2. Fractograph of specimen SN-1.

(a) $a_c = 10 \text{ mm}$ ($\Delta K_I = 150 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ {47 MPa $\sqrt{\text{m}}$ })

(b) $a_c = 15 \text{ mm}$ ($\Delta K_I = 228 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ {71 MPa $\sqrt{\text{m}}$ })

Fig. 3. Fractograph of specimen SN-5.

(a) $a_c = 10 \text{ mm}$ ($\Delta K_I = 139 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-3/2}$
{ $43 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ })

(b) Enlarged sight of (a)

Fig. 4. Fractograph of specimen SN-4.

(a) $a_c = 6 \text{ mm}$ ($\Delta K_I = 71 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-3/2}$
{ $22 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ })

(b) $a_c = 10 \text{ mm}$ ($\Delta K_I = 93 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-3/2}$
{ $29 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ })

Fig. 5. Fractograph of specimen SN-7.

Fig. 6. Macroscopic crack propagation rate and striation spacing.

Fig. 7. Striation spacings as a function of crack length for specimens SN-3 and SN-5.

している。Fig.7は、1ブロック内の各ステップのSSをき裂位置に対して示したものである。これら各ステ

Fig. 8. Normalized crack propagation rate for load steps in a block.

ップの関係を明確にするため、Fig.8では計測されたそれぞれのSSを1ブロックのき裂成長量で無次元化して示した。図中の直線は計算によるものであり、加速遅延効果のない場合の関係式〔式(1)〕より導いた式(2)に基づいている。

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \frac{1+R}{1-R} \cdot \Delta K^m \quad (1)$$

$$\frac{SS_i}{SS_A} = \frac{r_i^m}{\sum r_i^m}; (R=0) \quad (2)$$

ここで r_i は Table I に示した i 応力ステップの比率である。C, m 値は, Paris 則に従う C, m であり, SN-8 の結果より $C=3.164 \times 10^{-8}$, $m=3.44$ (AK : $\text{kgf} \cdot \text{mm}^{-3/2}$, き裂伝ば速度: $\mu\text{m}/\text{cycle}$) となった。R は応力比であり, SN-1~SN-6 の条件である $R=0$ として式(2)を導いている。Fig. 8 の実験データを結んだ破線の傾きは, 実線 (計算値) の傾きよりも, 最大荷重範囲 B ステップでは大きくなっているが, その他のステップでは小さい傾きとなっている。このことは一つのブロック内の小さな荷重範囲のステップのき裂伝ば量の比率が小さく, き裂伝ばが遅延していることを示していると思われる。前回の平均荷重一定下の試験結果を同じ方法で整理したものではこの傾向が少なく, 今回の方が遅延効果が大きいものと思われる。遅延効果は最大応力に直接関係している塑性域寸法に関連していることから考えると, 平均荷重一定の場合より, 最少荷重一定の本研究の場合の方が, 各ステップの最大応力の変化の度合いが大きくなるため, 遅延効果が大きくなるものと推定される。

つぎに, 平均荷重だけが変動する SN-7 について検討する。Fig. 9 は 3 箇所の観察位置における SS の分布を示している。き裂の成長量が式(1)に従うと考えた場合, 本試験の 1 ブロックの平均成長量 $\bar{da}/dN$ を求めると式(3)が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{\bar{da}}{dN} &= C \cdot AK^m \cdot \sum_{i=1}^{J \cdot j} \left\{ \left(\frac{1+R_i}{1-R_i} \right) / (J \cdot j) \right\} \\ &= 2.014 \times C \cdot AK^m = 2.014 \times \left(\frac{da}{dN} \right)_{R=0} \end{aligned} \quad (3)$$

結局, 平均応力が変化しない ($R=0$) 場合の伝ば速度

Fig. 9. Striation spacings of specimen SN-7.

の約 2 倍の成長量が見込まれることになる。また, 同様の方法で最大平均応力ステップの伝ば速度を求めると, $R=0$ の場合に比べて 3 倍の速度となる。これらは, それぞれ Fig. 9 中に 1 点鎖線と 2 点鎖線で示してある。SS の大きな値 10 本の平均値と 1 点鎖線を比較すると, 計算値の方が大きく, SS での最大値にほぼ一致している。これは過渡的な変動状態では, 連続した状態より低い値になることを意味している。1 ブロックの平均値で比較すると, 両者は近い値を示しており, 平均荷重のみが変動する荷重スペクトラムでは加速遅延効果が丸められているようである。

最大荷重振幅 (B ステップ) 以外の荷重ステップでは, Fig. 8 で示したように, 1 ブロック内で遅延効果が認められる。そこで SS_B を各ブロックで比較すると Fig. 10 に示すように, SN-1~SN-6 の各データはほぼ同じ値を示しており, かつ SN-8 と同じ値であるため, 負荷順序による加速遅延効果はないと考えることができる。

Fig. 10. Relationship between AK and SS_B .

巨視的なき裂伝ば挙動を評価するために, 各応力ステップの m 乗平均値をとり, AK 値の m 乗平均値 ($AK_{eq}(m)$) で整理し Fig. 11 に示す。この値は式(4)より求める。

$$AK_{eq}(m) = \left(\frac{\sum_{i=1}^{J \cdot j} AK_i^m}{J \cdot j} \right)^{1/m} = \left(\frac{AK_1^m}{J \cdot j \sum_{i=1}^{J \cdot j} r_i^m} \right)^{1/m} \quad (4)$$

ここで AK_1 は最大応力振幅に対する AK 値であり, J, j は Table I に示す通りそれぞれ応力ステップ数と 1 ステップ中の波数を表す。いずれの結果もほぼ同じ値を示しており, SN-8 の結果は m 乗平均値で整理した値のほぼ上限を与えているとみることができる。

Fig. 11. Relationship between macroscopic crack propagation rate and $\Delta K_{eq}(m)$.

これは最大応力振幅 B 以外の応力振幅では遅延効果が認められたことに起因していると思われる。遅延の程度はブロック波の形によって異なるが大きな差はなく、 m 乗平均値で評価する場合は、一定荷重振幅試験の結果を設計線図として用いれば安全側の値を与えられ。

3・2 ランダム荷重下の破面

ランダム疲労破面の一例を Fig. 12 に示す。黒い線分で示したように SS を読取った。Fig. 13 には、(a) に SN-10 の応力スペクトラムを10階差で示しており、(b) にそれぞれの荷重振幅で伝ばしたき裂伝ば量の、全体の伝ば量に対する割合を式(1)を基に求めた結果で示している。この図より、高い荷重振幅部は頻度は少な

(a) $Q_c = 9$ mm

(b) $Q_c = 15$ mm

Fig. 12. Fractograph of specimen SN-10.

Fig. 13. Load histogram and crack propagation rate in specimen SN-10.

Fig. 14. Comparison of striation spacing with evaluated crack propagation rate in specimen SN-10.

いなき裂伝ば量の割合が大きく、破面形成に支配的なことがうかがえる。つぎに計測された SS の分布より、どの程度負荷荷重スペクトラムを推定できるかを検討する。Fig. 14 はその一例であり、SS を対数正規分布として示している。図中実線は式(1)と負荷応力スペクトラムより計算した値である。計算値は計測された SS の下限値（ここでは $0.11\mu\text{m}$ ）以上の母集団を用いて推定したものである。計測値の方がやや小さい SS の値を示している。この図の場合、計測された SS の下限値に対応する負荷は約 $1000\text{ kgf}\{9.8\text{ kN}\}$ であり、Fig. 13 (b) より推定すると全 SS の内、約41%を推定できたことになる。この結果より SEM 観察では、大きい側の荷重推定には有効であるが、小さい荷重振幅は推定できない場合が多いことに留意する必要がある。このため別の方法で、計測できない小さい SS に対応する荷重を推定する必要がある。

巨視的な観点から、データを m 乗平均値で整理した結果を Fig. 15 に示す。この場合も、2 種の実験結果は一定荷重振幅試験とほぼ同じ値を与えている。なお

Fig. 15. Macroscopic crack propagation rate of specimens SN-9 and SN-10.

ランダム波の場合の $\Delta K_{eq}(m)$ 値は式(5)より求めた.

$$\Delta K_{eq}(m) = \left\{ \int_0^{S_t} f(s) \cdot K(s)^m ds \right\}^{1/m} \quad (5)$$

ここで, $f(s)$ は応力振幅 S における確率密度, S_t は負荷スペクトラムの最大値, $K(s)$ は S の関数としての K 値で, 積分範囲ではき裂長は一定と考えている.

4 結 言

最小応力を一定に保ったブロック波およびランダム波を中心とする疲労破面の検討より以下のことが明らかとなった.

- (1) ブロック波において, 最大応力振幅の SS は, 一定荷重振幅試験のそれと同等である.
- (2) 最大応力振幅以外の SS は, 遅延効果が認められる.
- (3) m 乗平均 ΔK 値を用いれば, 本実験で用いたすべてのブロック波, ランダム波ともよく整理でき, 一定荷重振幅試験の結果を設計線図として用い得る.
- (4) 平均応力の変動により, 破面になだらかな凹凸が観察される.
- (5) SS の観察に基づいて推定されたランダム荷重はほぼ正確であるが, 測定できない小さい SS に対応する荷重スペクトラムは別途検討する必要がある.

(昭和59年6月29日 第4回フラクロ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) 北川英夫, 福田収一, 西山晟人, 日本機械学会論文集 (第1部), **43**, 2439 (1977).
- 4) 岡本太郎, 福島正治, 上田実彦, 材料, **32**, 406 (1983).
- 5) 金沢 武, 町田 進, 糸賀興右, 日本造船学会論文集, **136**, 207 (1974).