重畳応力下における Cr-Mo 鋳鋼の疲労破面の観察[†]

三浦 健蔵* 熊田 誠**

Observation of Fracture Surface of Cr-Mo Cast Steel
under Superposed Stress

by

Kenzo MIURA* and Makoto KUMADA**

Fatigue crack propagation behavior and the corrosion inhibition effect of sodium nitrite inhibitor were investigated from the observation of fracture surface of Cr-Mo cast steel under superposed stress both in air and in fresh water containing NaNO_2 at 80°C .

Under zero-tension loading of single wave, the change of crack front profile, a/c (aspect ratio) and the relation between the crack growth rate, da/dN and stress intensity factor, ΔK were represented by the following equations.

$$a/c = 0.90 - 3.98 \times 10^{-1} (a/D), \quad D: \text{Diameter of specimen.}$$

$$da/dN = 1.04 \times 10^{-10} (\Delta K)^{4.06}$$

Beach mark spacings coincided well with the block of superposed waves, Z_p , and they were affected by the stress ratio, m . The beach marks were observed clearly at $m=0.3$, but not $m=0.4$ nor 0.5 . The change of crack front profile was classified into two types. One was that where the crack propagated with $a \approx c$ in a semi-circular or semi-elliptical form. The other was that where the crack propagated with $a < c$, and afterwards propagated in a semi-elliptical form. The initial cracks always propagated with $a < c$ in fresh water containing NaNO_2 at 80°C . The fracture patterns influenced by corrosion were observed at the initial crack propagation region.

キー・ワード：重畳疲労，腐食疲労，インヒビター，破面観察

1 ま え が き

船用ディーゼル機関のピストンクランクやシリンダカバーなど燃焼室構成部材には，機関の発停によって生ずる熱応力に燃焼ガス爆発の繰返し応力が重畳して負荷される．このような変動荷重に対して，実機破面にはき裂進展速度の変化によるビーチマークが現れ，ビーチマークの解析からき裂の進展挙動やき裂進展速度を推定することが提案されている¹⁾．

本研究では，大気中および亜硝酸塩系インヒビターを添加した腐食水中で2重重畳疲労試験を実施し，試験片破面に生じたビーチマークから疲労き裂進展挙動について検討した．また疲労き裂進展形状と破面のフラクトグラフィから亜硝酸塩系インヒビターの防食効果についても検討した．

2 実 験 方 法

2・1 供試材および試験溶液

船用ディーゼル機関燃焼室構成部材に用いられている Cr-Mo 鋳鋼を供試材とし， 1050°C ，2時間保持油焼入れ後， 690°C ，2時間焼もどしの熱処理を施した．供試材の化学組成と機械的性質を Table I, II に示す．

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

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.17	0.54	0.81	0.012	0.008	0.72	0.38

Table II. Mechanical properties of specimen.

Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	True strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Brinell hardness
471	618	1059	25	60	187

す．試験溶液は亜硝酸塩系インヒビター（以下， NaNO_2 と記す）を 3 000 ppm 添加した 80°C ，ASTM 腐食水である．

2・2 試験方法

疲労試験片は試験部の径が $\phi 50\text{ mm}$ の砂時計型試験片で，試験片形状，疲労試験機および腐食水と腐食水循環系は前報²⁾と同じである．今回用いた応力波形を Fig.1 に示す．Fig.1 (a)は完全片振り（最大応力に対する最小応力の比 $R=0$ ）正弦波の単独波で，繰返し速度は 10 Hz である．Fig.1 (b)は熱応力に相当する

[†] 原稿受理 昭和59年11月7日 Received Nov. 7, 1984

* 正 会 員 三井造船(株)玉野研究所 玉野市玉原, Tamano Laboratory, Mitsui Engineering and Shipbuilding Co. Ltd., Tamahara, Tamano

** 三井造船(株)玉野研究所 玉野市玉原, Tamano Laboratory, Mitsui Engineering and Shipbuilding Co. Ltd., Tamahara, Tamano

Fig. 1. Stress wave.

両振台形波を1次波とし、ガス圧応力に相当する正弦波を2次波とする重畳波である。1次波応力の上昇時間 T_U および下降時間 T_D はともに20秒、圧縮側の保持時間 T_H は30秒で、2次波の重畳山数 n は、 $n=10^4$ cycles、繰返し速度は10 Hzである。1次波応力振幅 σ_{a1} と2次波応力振幅 σ_{a2} との和を最大応力振幅 $\sigma_{max}(=\sigma_{a1}+\sigma_{a2})$ 、最大応力振幅 σ_{max} に対する2次波応力振幅 σ_{a2} の割合を応力比 $m(=\sigma_{a2}/\sigma_{max})$ と定義する。

大気中の疲労試験片については、試験期間中適時試験片表面を観察し、き裂発生の有無を調べた。表面き裂が試験片軸方向に直角に発生した一部の試験片について、ルーペおよびレプリカ法によってき裂を追跡した。疲労試験後、実体光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡(日立製作所(株)製 HSM-2A 型)を用いて試験片破面を観察した。なお大気中片振り(最大応力に対する最小応力の比 $R \approx 0$)、単独波の疲労き裂進展については、別途作製した同種のCr-Mo 鋳鋼($\sigma_B=588$ MPa)を用いた。き裂進展形状を調べるため、試験期間中人為的にピーチマークを導入した。ピーチマークの導入方法は疲労き裂発生後、繰返し数 $10^4 \sim 5 \times 10^4$ cycles ごとに負荷応力の最小値($\sigma_{min} \approx 0$)を最大値($\sigma_{max}=2\sigma_a$)の1/2だけ高め、 $10^3 \sim 5 \times 10^3$ cycles 繰返して表面き裂の進展を確認した。

3 実験結果

3.1 単独波疲労破面の観察

Fig. 2 は大気中片振り($R \approx 0$)、単独波によるCr-Mo 鋳鋼($\sigma_B=588$ MPa)疲労試験片の破面外観で、応力振幅 $\sigma_a=162$ MPa、破断繰返し数 $N_f=9.18 \times 10^5$ cycles である。破面には、き裂進展形状に対応した明りょうな半円状のピーチマークが観察された。ピーチマークから、き裂進展形状を示す二つのパラメータである表面き裂長さ $2c$ とき裂深さ a を測定し、アスペクトレシオ a/c と a/D (D : 試験片直径 $=\phi 50$ mm) との関係を求め、Fig. 3 に示した。Fig. 3 から a/c

Fig. 2. Fracture surface under zero-tension ($R \approx 0$) in air ($\sigma_a=162$ MPa, $N_f=9.48 \times 10^5$ cycles). Fig. 3. Relation between aspect ratio, a/c and a/D ($R \approx 0$; $\sigma_a=162$ MPa, $N_f=9.48 \times 10^5$ cycles).

と a/D との間に直線関係が成立し、次式のように表すことができる。

$$a/c = 0.90 - 0.40(a/D) \quad (1)$$

繰返し数 $N=6.01 \times 10^5$ cycles では、試験片表面にき裂は認められなかったが、 $N=7.13 \times 10^5$ cycles では、表面長さ $2c=4.8$ mm の微小き裂が検出された。破断繰返し数 N_f (N_f は $2c > 30$ mm になり、疲労き裂が試験片断面の40%以上進展して試験機が停止したときの繰返し数)に対する微小き裂の進展に要する繰返し数 N_p の割合 N_p/N_f は約22%であった。

微小な表面き裂の進展過程の解析については、次式で示す Kobayashi⁵⁾ らによる半円表面き裂に対する応力拡大係数 K の算出式を適用した。

$$K = M_B \sigma_B \frac{\sqrt{\pi a}}{E(k)} \quad (2)$$

M_B : 曲げの平板上半円き裂に対する補正因子

σ_B : 最大曲げ応力

$E(k)$: 第2種完全円積分

深さ方向の疲労き裂進展速度 da/dN と $4K$ との関係を Fig. 4 に示す。Paris 則を適用すると、疲労き裂に対する4乗則が成立し、 da/dN と $4K$ との関係式の定数 C 、 n は従来報告されている実験結果と一致することが確認された。

$$\frac{da}{dN} = C(4K)^n \quad (3)$$

$$C = 1.04 \times 10^{-10}, n = 4.06 \quad (4)$$

Fig. 4. Relation between crack growth rate, da/dN and stress intensity factor, ΔK ($R \approx 0$; $\sigma_a = 162$ MPa, $N_f = 9.48 \times 10^5$ cycles).

3・2 重畳疲労破面の観察

Fig. 5 に大気中における重畳疲労試験片の破面外観を示す。Fig. 5 (a)は最大応力 $\sigma_{\max} = 432$ MPa, 応力比 $m = 0.5$, 破断繰返し数 $N_f = 1.388 \times 10^6$ cycles, Fig. 5 (b)は $\sigma_{\max} = 510$ MPa, $m = 0.4$, $N_f = 1.139 \times 10^6$ cycles, Fig. 5 (c)は $\sigma_{\max} = 588$ MPa, $m = 0.3$, $N_f = 1.558 \times 10^6$ cycles, Fig. 5 (d)は $\sigma_{\max} = 432$ MPa, $m = 0.3$, $N_f = 9.317 \times 10^5$ cycles の破面である。レプリカ法による表面き裂長ささと破断後の破面とを比較したところ、破面上のビーチマーク間隔は重畳波のブロック Z_b に対応していた。ビーチマークは疲労き裂進展速度の変化によって生じるもので、応力比 $m = 0.5$, 0.4 の場合 (Fig. 5 (a), (b)) には不明りようであった

が、 $m = 0.3$ の場合 (Fig. 5 (c), (d)) には明りょうなビーチマークが観察され、応力比 m の影響を受けることが分った。

試験片の破面観察結果からき裂の発生箇所は一箇所、 $\sigma_{\max} = 588, 549, 471, 432$ MPa, $m = 0.3$ の試験片について、き裂は試験片の軸方向にほぼ垂直に進展していた。

Fig. 6 は $\sigma_{\max} = 588, 549, 471, 432$ MPa, $m = 0.3$ の試験片について、破面上のビーチマークから表面き裂長さ $2c$ とき裂深さ a を測定し、 a/c と a/D との関係を示したものである。き裂進展形状を示すアスペクトレシオ a/c の変化は、大別して次の2種類に分類される⁴⁾。一つは表面の点状欠陥からき裂が発生し、き裂進展初期には $a \approx c$ で半円状から半だ円状に進展するもので、 $\sigma_{\max} = 588, 549$ MPa, $m = 0.3$ の場合に相当する。 $\sigma_{\max} = 588$ MPa, $m = 0.3$ についての

Fig. 6. Relation between aspect ratio, a/c and a/D in air.

(a) $\sigma_{\max} = 432$ MPa, $m = 0.5$, $N_f = 1.388 \times 10^6$ cycles.
 (b) $\sigma_{\max} = 510$ MPa, $m = 0.4$, $N_f = 1.139 \times 10^6$ cycles.
 (c) $\sigma_{\max} = 588$ MPa, $m = 0.3$, $N_f = 1.558 \times 10^6$ cycles.
 (d) $\sigma_{\max} = 432$ MPa, $m = 0.3$, $N_f = 9.317 \times 10^5$ cycles.

Fig. 5. Fracture surfaces under superposed stress in air.

a/c の変化を図中に破線で示した。他の一つはき裂発生後 $a < c$ で、初期にはき裂が表面に沿って成長し、その後半円状に進展するもので、 $\sigma_{\max}=471, 432$ MPa, $m=0.3$ の場合に相当する。

$m=0.3$ の重畳波における a/c は、実線で示した片振り ($R \approx 0$)、単独波の結果に比べると低く、き裂が十分進展した $a/D \geq 0.15$ の領域では直線関係からはずれ大きく低下した。 $m=0.3$ の重畳波は応力比 $R = -0.7$ の矩形波と高周波成分である応力比 $R=0.4$ の正弦波に分解される。重畳山数 $n=10^4$ cycles の2次波による疲労損傷に対して1次波による損傷は比較的小さい。 $m=0.3$ の重畳波を $R=0.4$ の単独波と仮定すると、 a/c は応力比の影響を受けることになるが、き裂の試験片表面および内部におけるき裂開口量は不明であり、応力拡大係数の正確な評価ができないため、詳細については不明である。

疲労試験期間中の試験片の表面観察から、微小き裂が検出された $\sigma_{\max}=588$ MPa, $m=0.3$ について、き裂進展状況を追跡した。2次波の繰返し数 $N=1.13 \times 10^6$ cycles では試験片表面にき裂は認められなかったが、 $N=1.20 \times 10^6$ cycles で表面長さ $2c=3.9$ mm の微小き裂が発生していた。破断繰返し数 $N_f(2c > 30$ mm) は $N_f=1.50 \times 10^6$ cycles で、き裂進展に要する繰返し数 N_p に対する N_f の割合 N_p/N_f は約20%となり、片振り ($R \approx 0$)、単独波の結果 ($\sigma_a=162$ MPa) に比べると若干短くなった。

片振り ($R \approx 0$)、単独波についての解析結果と同様、き裂進展形状から AK を算出し、深さ方向の疲労き裂進展速度 da/dN との関係求めた。その結果を Fig. 7 に示す。 $\sigma_{\max}=588$ MPa, $m=0.3$ のき裂進展速度は、進展速度の小さな領域 $da/dN \leq 2 \times 10^{-5}$ mm/cycles でばらつきが大きい。実線で示した片振り ($R \approx 0$)、

Fig. 7. Relation between crack growth rate, da/dN and stress intensity factor, ΔK in air ($\sigma_{\max}=588$ MPa, $m=0.3$, $N_f=1.558 \times 10^6$ cycles).

単独波の結果に比べると加速していることが分る。き裂進展速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK との関係式の定数 n は、 $n=2 \sim 3$ である。

Fig. 8 に NaNO_2 添加80℃, ASTM 腐食水中における重量疲労試験片の破面外観を示す。Fig. 8 (a), (b), (c)はそれぞれ、 $\sigma_{\max}=588$ MPa, $m=0.3$, $N_f=9.40 \times 10^5$ cycles, $\sigma_{\max}=549$ MPa, $m=0.3$, $N_f=1.711 \times 10^6$ cycles, $\sigma_{\max}=510$ MPa, $m=0.3$, $N_f=2.280 \times 10^6$ cycles である。 $m=0.5, 0.4$ の場合、ビーチマークは不明りょうであったが、 $m=0.3$ の場合には比較的明りょうなビーチマークが観察された。破面上のビー

(a) $\sigma_{\max}=588$ MPa, $m=0.3$, $N_f=9.40 \times 10^5$ cycles.
(b) $\sigma_{\max}=549$ MPa, $m=0.3$, $N_f=1.711 \times 10^6$ cycles.
(c) $\sigma_{\max}=510$ MPa, $m=0.3$, $N_f=2.280 \times 10^6$ cycles.

Fig. 8. Fracture surfaces under superposed stress in ASTM solution containing NaNO_2 at 80°C.

チマークからき裂表面長さ $2c$ とき裂深さ a を測定し、 a/c と a/D との関係を Fig. 9 に示した。初期のき裂進展領域で、 a/D が低い場合、 a/c はいずれも破線で示した大気中の結果に比べ著しく低下した。 a/c の結果から、初期のき裂進展領域では、試験片内部方向へのき裂進展速度が抑制されたものと考えられる。き裂が進展して a/D が増加すると、 a/c は破線で示した大気中の結果に一致した。

Fig. 10, 11 は走査型電子顕微鏡 (SEM) による破

Fig. 9. Relation between aspect ratio, a/c and a/D in ASTM solution containing NaNO_2 at 80°C .

面観察の一例を示したもので、それぞれ大気中、 $\sigma_{\max}=588\text{ MPa}$, $m=0.3$, $N_f=1.588\times 10^6\text{ cycles}$ と NaNO_2 添加 80°C , ASTM 腐食水中、 $\sigma_{\max}=588\text{ MPa}$, $m=0.3$, $N_f=9.40\times 10^5\text{ cycles}$ の結果である。Fig. 10 (a), Fig. 11 (a) はき裂起点部の破面様相を示したもので、き裂はすべりから発生し、腐食ピットはいずれも観察されなかった。Fig. 10 (b) はき裂起点から 0.3 mm 進展した領域の破面で、明りょうなストライエーションが観察された。Fig. 11 (b) はき裂起点から 0.2 mm 進展した破面で、大気中の結果に比べややぜい性的であり、一部にすべりに沿った 2 次き裂が観察された。大気中の結果と同様ストライエーションは観察されたが、不明りょうである。 NaNO_2 添加 80°C , ASTM 腐食水中の片振疲労破面についても、腐食が関与した

Fig. 10. SEM photographs of fracture surfaces under superposed stress in air ($\sigma_{\max}=588\text{ MPa}$, $m=0.3$, $N_f=1.558\times 10^6\text{ cycles}$).

Fig. 11. SEM photographs of fracture surfaces under superposed stress in ASTM solution containing NaNO_2 at 80°C ($\sigma_{\max}=588\text{ MPa}$, $m=0.3$, $N_f=9.40\times 10^5\text{ cycles}$).

ぜい性的な破面が観察された³⁾。すなわち、初期のき裂進展領域ではき裂開口量がわずかなため、き裂面への溶液の流入は妨げられる。き裂進展初期のき裂面がすぎ間となり酸素濃淡電池が形成されると、き裂面ですぎ間腐食が発生する。試験片表面近傍のき裂面では、腐食生成物が残存するため、くさび効果²⁾によって内部方向のき裂進展速度が抑制され、 a/c が低下したものと考えられる。き裂が進展してき裂進展速度が上昇し、き裂開口量が增大すると、 NaNO_2 の良好な防食効果が認められ、 a/c は破線で示した大気中の結果に一致した。

4 結 言

大気中と NaNO_2 添加 80°C , ASTM 腐食水中で重畳疲労試験を実施した試験片の破面観察から、疲労き裂進展挙動および NaNO_2 の防食効果について検討した。得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1) 片振り ($R\approx 0$), 単独波におけるき裂進展形状 a/c の変化、およびき裂進展速度は次式のように表される。

$$\begin{aligned} a/c &= 0.90 - 0.40(a/D) \\ da/dN &= C(\Delta K)^n \\ C &= 1.04 \times 10^{-10}, n = 4.06 \end{aligned}$$

(2) 重畳疲労試験片破面のビーチマーク間隔は、重畳波のブロック Z_p に対応している。また応力比 m の影響を受け、 $m=0.5, 0.4$ に比べ $m=0.3$ の場合、明りょうなビーチマークが観察される。

(3) き裂進展形状 a/c は2種類に分類される。一つは $a \simeq c$ で半円状から半だ円状に進展するもの、他の一つは $a < c$ でき裂が試験片表面に沿って成長し、その後半だ円状に進展するものである。

(4) NaNO_2 添加 80℃, ASTM 腐食水中ではいずれも $a < c$ で、試験片表面のき裂進展速度に比べ、内部方向の進展速度は抑制されたと考えられる。初期のき裂進展領域ではストライエーションが不明りょうで、腐食が関与した破面様相が観察される。

本研究の一部が日本造船研究協会第164研究部会の研究として行われたことを付記し、関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 山田敏郎, 構造物の疲れ寿命推定法資料, p.61 (1978)

日本機械学会関西支部.

- 2) 三浦健蔵, 熊田 誠, 大井利継, 材料, **34**, 429 (1985).
- 3) 三浦健蔵, 熊田 誠, 大井利継, 材料, **33**, 1506 (1984).
- 4) 川原正言, 栗原正好, 日本造船学会論文集第137号, 297 (1975).
- 5) R. C. Shah and A. S. Kobayashi, Proc. Com. CAM Symposium on the Surface Flow, p. 79 (1972) Appl. Mech. Division of ASME.
- 6) P. C. Paris and F. Erdogan, Trans, ASME, Ser. D., **85**, 528 (1963).
- 7) 北川英夫, 材料, **21**, 710 (1972).
- 8) 金材技研ニュース, No. 1, p. 3 (1976) 金材技研.
- 9) 遠藤吉郎, 駒井謙治郎, 大西一男, 材料, **17**, 160 (1968).
- 10) 駒井謙治郎, 鉄鋼の海洋環境強度第1回シンポジウム前刷集, p. 1 (1983) 日本鉄鋼協会.

書 評

材料テクノロジー [16]

“ポリマー材料”

堂山昌男, 山本良一 (編)

(1984年, 東京大学出版会発刊, A 5 判, 210ページ, 2400円)

合成高分子材料は歴史が比較的短いにもかかわらず、生活の隅々にまで入り込んでいる。特にその多様な機能性——分離能、触媒能、光学および生化学的機能——をもつ点に大きな特長がある。本書はこのような高分子材料の機能特性に焦点をあててわかりやすく解説している高分子材料の書である。高分子科学の歴史に関する小部分を除くと、本書の主部分は三つの部分より構成されており、第2章の高分子の基礎的性質、第3章の合成および加工技術、第4章の機能性高分子の部分にわけられる。

第2章の高分子の基礎的性質の所では高分子の基礎物性が溶液から固体まで簡単に解説しており、第3章では高分子の合成と高分子系の反応について簡単に述べられている。第4章には、最近話題の各種の機能性高分子の製法から機能発現の原理にいたるまで、わかりやすく解説されていると同時に要領よくまとめられている。要するに、本書は機能性高分子材料を中心として、ダイジェスト的に高分子材料、機能発現の原理、そのコントロール法が記されていると思えばよい。特に、最新の知識をとりいそぐ人に向いているのではなかろうか。

(京都大学工学部 浅田忠裕)