

腐食環境下における微細粒圧延鋼および溶接構造用圧延鋼の回転曲げ疲労強度

生水 雅之¹・大平 淳喜²・安達 晃一³・広瀬 幸雄⁴

要旨：本研究においては、結晶粒微細化熱延鋼板(NFG)およびその鋼材開発の際ベース材となった溶接構造用圧延鋼板(SM)の両鋼に着目し、3.5%NaCl水溶液を滴下した腐食環境下で回転曲げ疲労試験を実施し、試験片に発生した腐食ピットが疲労強度におよぼす影響について検討を行った。得られた結果は、以下のようにまとめられる。(1)破断までの繰返し回数 N_f が 2.0×10^5 を越える範囲では、腐食環境下の時間強度は大気中のそれと比較して、両鋼ともに N_f の増加とともに低下した。また疲労限度はSM鋼では50MPaであったが、NFG鋼では明瞭な疲労限度は認められなかった。(2)応力拡大係数範囲 ΔK は両鋼ともに破断までの繰返し回数 N_f の増大とともに低下し、特にNFG鋼では明瞭な収束値は認められなかった。(3)累積分布関数 $F = 99.97\%$ において、NFG鋼およびSM鋼の最大ピット寸法 $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ はそれぞれ185 μm 、135 μm と推定できた。

キーワード：結晶粒微細化熱延鋼板、溶接構造用圧延鋼板、回転曲げ疲労試験、腐食ピット、時間強度、疲労限度、応力拡大係数範囲、極値統計法

1. はじめに

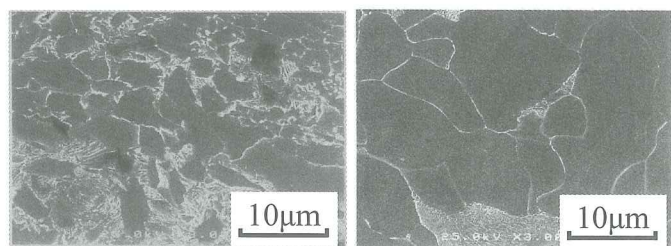
機械・構造物の破壊強度は使用環境に左右されやすく、なかでも腐食疲労に起因した破壊が多いことが知られている¹⁾。この腐食疲労現象は、き裂発生メカニズムが不活性環境下とは異なり、材料と環境の相互作用を伴う独特なプロセスに依拠しているものと考えられている²⁾。また耐食性に優れた一部のステンレス鋼を除き、腐食性環境下におかれた金属材料の表面には、腐食ピットが発生しやすく、それらの腐食ピットから発生したき裂が進展し合体して破壊に至るケースが多い³⁾。そのため、腐食ピットの発生・成長およびき裂への成長過程を明らかにすることは、機械・構造物の安全性を評価する上で重要である^{4)~6)}。省資源、省エネルギーの観点から、構造材料の高強度化による軽量化が様々な分野で取り組まれている⁷⁾。そのような中で微細粒鋼は鉄鋼の結晶粒を微細化することにより高強度化を実現した材料であり、高強度・高靱性および高い疲労特性を有し被加工性にも優れており、幅広い分野での使用が期待されている。しかし腐食環境下では、微細粒鋼であってもその表面に腐食ピットの発生を招き、その底部への応力集中により疲労強度の低下を招くことが考えられる。本研究では結晶粒微細化組織を有する溶接構造用熱延鋼および市販の溶接構造用耐侯性熱間圧延鋼に対し、一定時間間隔で3.5%NaCl

水溶液を滴下させた腐食環境下で回転曲げ疲労試験を行い、実験中に発生した腐食ピットが疲労強度におよぼす影響について、破壊力学および極値統計法の観点より評価を行った。また実体顕微鏡および走査電子顕微鏡による破面観察も併せて行い、き裂発生点近傍の詳細な検討も行った。

2. 実験方法

2.1 供試材および試験片

供試材は(株)中山製鋼所製の結晶粒微細化組織を有する溶接構造用高強度熱延鋼板 NFG600W (以下NFGと略記)および比較材としてNFG開発の際に元材となった溶接構造用圧延鋼 SM490A(以下SMと略記)を用いた。Fig.1(a)および(b)にNFGおよびSMの組織写真を示す。平均フェライト粒径 d は前者で4 μm 、後者で12 μm であった。NFGにおいてフェライト粒径の微細化が見られる。Table 1に両材の化学成分を、また機械的性質をTable 2に示す。試験片は両材ともにFig.2に示す砂時計型の形状に機械加工を行い、さらに85%リン酸水溶液中で電解研磨処理



(a) NFG600W (b) SM490A
Fig.1 Microstructures of NFG600W and SM490A.

1 舞鶴工業高等専門学校 機械工学科 教授
2 舞鶴高専学生(現 三菱重工業(株)高砂製作所)
3 舞鶴高専専攻科学生(現 京都工芸繊維大学院生)
4 金沢大学大学院自然科学研究科 特任教授

Table 1 Chemical compositions of the material (wt. %).

	C	Si	Mn	P	S
NFG600W	0.17	0.36	1.30	0.011	0.007
SM490A	0.16	0.33	1.43	0.021	0.007

Table 2 Mechanical properties.

	Yield stress σ_Y , MPa	Tensile strength σ_B , MPa	Elongation ϵ_l , %	Vickers hardness HV
NFG600W	430	577	30.2	178
SM490A	346	541	30.0	162

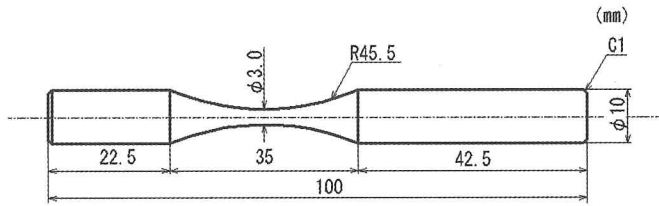


Fig.2 Shape and dimensions of specimen.

を施し表層を 0.1 mm 以上除去した後, 実験に供した.

2. 2 疲労試験および破面観察

疲労試験には4連式片持ち回転曲げ疲労試験機(応力比 $R=-1$, 周波数 $f=52.5\text{Hz}$)を用い, 室温・大気圧下において3.5%NaCl水溶液を試験片最小断面部に5ml/min滴下し実験を行った. また破断後の試験片に対し, 実体顕微鏡(OM)および走査電子顕微鏡(SEM)を用いて破面観察を行った.

3. 実験結果および考察

3. 1 S-N 線図

Fig.3 に S-N 曲線を示す. 図において右矢印(\rightarrow)の付されたプロットは, 破断までの負荷繰返し数 $N_f=2 \times 10^7$ を越えても破断しなかった試験片であり疲労限度 σ_w を示している. 腐食環境下における疲労特性は, 繰返し回数 $N_f=1.5 \times 10^5$ 付近までは大気中のそ

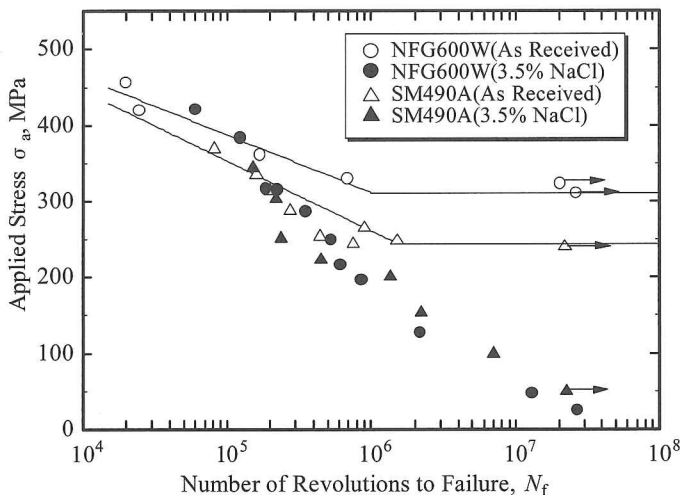
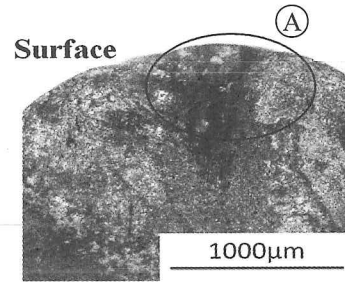


Fig.3 S-N diagrams.

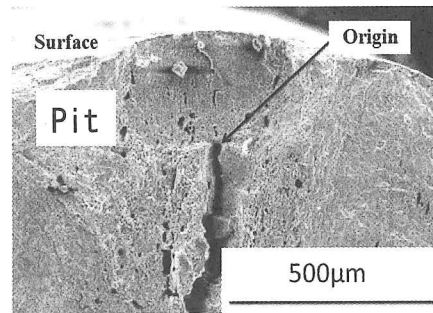
れとほぼ同様な挙動を示している. しかし, $N_f=2.0 \times 10^5$ 以上においては両材共に時間強度が大幅に低下し, NFG においては明瞭な疲労限度が認められない. また SM より NFG の方が時間強度の低下幅が大きく, 微細粒鋼は腐食作用に対する感受性が高いことを示している.

3. 2 破面観察

Fig.4(a),(b)にNFGの破面のマクロおよびミクロ写真の一例を, 同様にFig.5(a),(b)にSMの一例を示す.

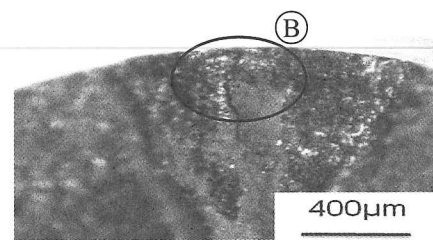


(a) Macrograph of fracture surface

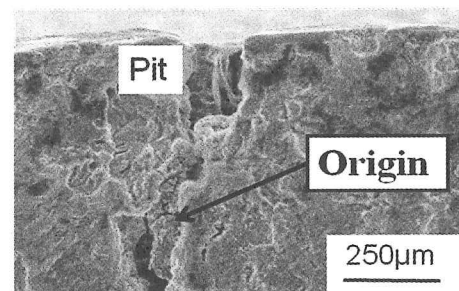


(b) Detail of (A) by SEM

Fig.4 Fracture surface of NFG600W under corrosive environment. ($\sigma_a=48\text{MPa}$, $N_f=1.3 \times 10^7$).



(a) Macrograph of fracture surface



(b) Detail of (B) by SEM

Fig.5 Fracture surface of SM490A under corrosive environment. ($\sigma_a=102\text{MPa}$, $N_f=7.3 \times 10^6$).

$N_f > 10^6$ で破断した試験片表面にはNFGおよびSMともに腐食ピットが多数観察された。さらにそのピット底部より発生したき裂が試験片断面方向に合体・進展し最終破断に至っている様子が観察された。その一例をFig.3(b)およびFig.4(b)に示す。

3. 3 応力拡大係数範囲による整理

両鋼の腐食環境下での疲労寿命は、試験片表面に発生したピット底部での応力・ひずみ場に依存すると考えられ、このことを考慮した整理が必要となる。破断の起点となった腐食ピットを半楕円の微小欠陥と見なし応力拡大係数範囲 ΔK を用いることにより、ピット形状および寸法の違いを考慮した統一的な整理が可能となる。ピット形状の測定は以下の手順で行った。まず形状は SEM 観察により断面写真を取得し、Fig.6 の破線で示すようにピット凹部を無くすように凸部を滑らかに結び半楕円で近似した。次に寸法はピットの円周方向の直径を $2a$ とし、ピット深さを b とした。以上より半楕円形状を有する腐食ピットに対する応力拡大係数範囲 ΔK は式(1)に示す Y.Murakami ら⁸⁾の式より決定できる。ここで d は試験片最小断面直径である。

$$\Delta K = F_{1,3}^B \times \sigma_0 \sqrt{\pi b} \quad \dots (1)$$

σ_B : 曲げ応力, $F_{1,3}^B$: a, b, d に関する定数.

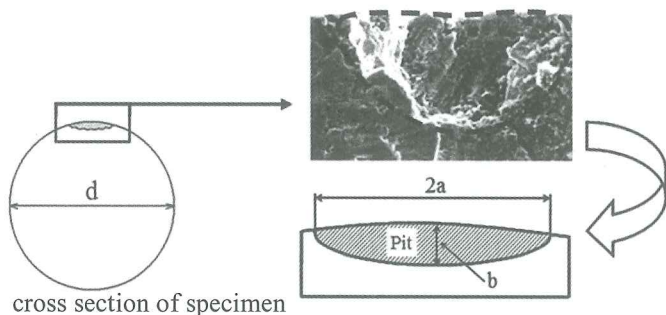


Fig.6 Evaluation of artificial pit by SEM.

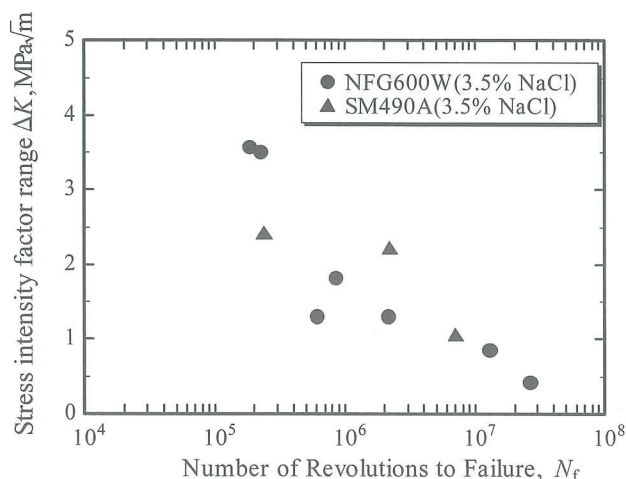


Fig.7 Relation between stress intensity factor range and number of revolutions to failure.

Fig.7に応力拡大係数範囲 ΔK と破断までの繰返し回数 N_f の関係を示す。NFGおよびSMともに繰返し回数の増加に伴って ΔK は減少する傾向が見られる。またNFGにおける応力拡大係数範囲の明瞭な収束値は認められず、 $\Delta K = 0.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ においてもき裂進展が認められる。

3. 4 極値統計法による最大ピット寸法の推定

腐食環境下での NFG および SM の時間強度の大幅な低下は、試験片表面に発生した多数の腐食ピットへの応力集中によるものと考えられる。そこでこのピットを微小き裂と等価と考え、極値統計法を用いた整理を行った。その際ピット形状および寸法の決定は前節の手法に従い、ピットの抽出はTable 3に示す条件で、引張方向垂直断面を対象とした。以上より得られた結果をFig.8に示す。同図はTable 3の条件より得られたピットの最大寸法 $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ の累積分布関数を示している。 $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ の各値は極値確率紙上で直線関係を示しており、ピットの $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ は極値分布に従っているとみなすことができる。なお、本研究では1本の試験片より得たデータから100本の試験を行った場合に得られる最大ピット寸法 $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ の推定を行った。累積分布関数 $F=99.97\%$ において、NFGおよびSMの $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ はそれぞれ $185 \mu\text{m}$ 、 $135 \mu\text{m}$ と推定でき、微細粒鋼の方が腐食環境に対して感受性が高いことを示している。

Table 3 Test condition for each material.

Area, mm ²	10
Number	21
Volume, mm ³	23

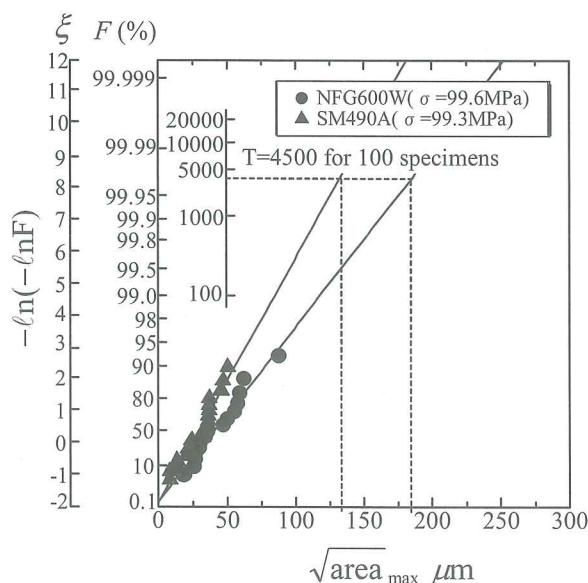


Fig.8 Statistical distribution of corrosion pit at fracture origin.

4. 結言

本研究では結晶粒微細化組織を有する溶接構造用熱延鋼 NFG600W および市販の溶接構造用耐候性熱間圧延鋼 SM490A に対し, 一定時間間隔で 3.5%NaCl 水溶液を滴下させた腐食環境下で回転曲げ疲労試験を行い, 発生した腐食ピットが疲労強度におよぼす影響について, 破壊力学および極値統計法の観点より評価を行った. 得られた結果は以下のようにまとめられる.

- (1) 破断までの繰返し回数が 2.0×10^5 を越える範囲では, 腐食環境下の時間強度は大気中のそれと比較して, 両鋼ともに低下した. また疲労限度は SM490A では 50MPa であったが, NFG600W では明瞭な疲労限度は認められなかった.
- (2) 応力拡大係数範囲は両鋼ともに破断までの繰返し回数の増大とともに低下し, 特に NFG600W では明瞭な収束値は認められなかった.
- (3) 累積分布関数 99.97%において, NFG600W および SM490A の最大ピット寸法はそれぞれ $185 \mu\text{m}$, $135 \mu\text{m}$ と推定できた.

謝辞: 本研究の一部は, 平成 22 年度舞鶴工業高等専門学校機械工学科研究経費の配分を受けて行われた

ことを記し, 関係各位に謝意を表す. さらに結晶粒微細化組織を有する溶接構造用高強度熱延鋼板 NFG600W は株式会社中山製鋼所よりご提供いただいた. 関係各位に謝意を表す.

参考文献

- 1) 穂田竹男, 生水雅之, 広瀬幸雄, 日本材料強度学会誌, Vol.43-1(2009)11-17.
- 2) 近藤良之, 菩提優, 日本機械学会論文集, A, 60-580, (1994)2690-2694.
- 3) 中島正貴, 戸梶恵郎, 日本機械学会論文集, A, 59-565, (1993)2089-2094.
- 4) 近藤良之, 日本機械学会論文集, A, 57-537, (1991)1057-1061.
- 5) 天野和雄, 林眞琴, 鈴木秀人, 西野創一郎, 片平和俊, 日本機械学会論文集, A, 64-623, (1998)1831-1836.
- 6) 誉田登, 外山和雄, 材料, 40-458(1991)1466-1471.
- 7) 村上敬宜, 長田淳治, 日本機械学会論文集, A, 72-720, (2006)1123-1130.
- 8) Y.Murakami, STRESS INTENSITY FACTOR HANDBOOK, Vol.2, 1987, Pergamon Press, pp.657-658. (2011. 1. 7 受付)

ROTATING BENDING FATIGUE STRENGTH ON FINE GRAIN STEEL AT NEW HOT STRIP MILL AND ROLLED STEEL FOR WELDED STRUCTURE UNDER CORROSIVE ENVIRONMENT

Masayuki SHOZU, Atsuki OHIRA, Kouichi ANDATSU and Yukio HIROSE

ABSTRACT : In this study, the rotating bending fatigue test was carried out in a corrosive environment of 3.5% NaCl solution being dropped onto specimens of fine-grained steel at a new hot strip mill (NFG) and rolled steel for a welded structure (SM), the base material used in the development of NFG. The effect of the corrosion pit formed on the specimen on the fatigue strength of the specimen was examined. The following results were obtained.

(1) When the number of revolutions to failure, N_f , exceeds 2.0×10^5 , the strengths of NFG and SM at N cycles in the corrosive environment decreased with increasing N_f compared with those in atmosphere. The fatigue limit of SM was 50 MPa, but no obvious fatigue limit was observed for NFG. (2) The stress intensity factor ranges, ΔK , for NFG and SM decreased with increasing N_f ; however, no clear convergence value was observed for NFG. (3) The maximum pit areas, $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$, of the NFG and SM were estimated to be $185 \mu\text{m}$ and $135 \mu\text{m}$ at a cumulative distribution function of $F = 99.97\%$ respectively.

Key Words : Fine grain steel at new hot strip mill, Rolled steel for welded structure, Rotating bending fatigue test, Corrosion pit, Strength at N cycles, Fatigue limit, Stress intensity factor range, Statistics of extreme value