発電水車用ステンレス鋳鋼の疲労き裂進展挙動の解明

Study on the fatigue crack propagation behavior in stainless cast steel
of the turbine for hydraulic power generation.

夏目 雅彦・広島大学大学院工学研究科

Masahiko Natsume, Mech.Sys.Eng. Hiroshima University

曙 紘之・広島大学工学部

Hiroyuki Akebono, Mech.Sys.Eng.Hiroshima University

林 義一郎・電源開発株式会社

Yoshiichirou Hayashi, Electric Power Development Co., Ltd.

加藤 昌彦・広島大学工学部

Masahiko Kato, Mech.Sys.Eng.Hiroshima University

菅田 淳・広島大学工学部

Atsushi Sugeta, Mech.Sys.Eng.Hiroshima University

Key Words: Fatigue, Stainless cast steel, Unloading Elastic Compliance Method

1. 緒言

現在、水力発電用水車ランナ材として高強度、高じん性、優れた耐食性を有するマルテンサイト系ステンレス鋳鋼（SCS1）が広く使用されている。発電施設の維持に関して、水車ランナの予期せぬ損傷による発電施設の停止は多大な損害をもたらす、水車ランナの交換に伴う費用も莫大なことから、定期的なメンテナンスにより水車ランナの寿命を的確に予測し、許容寿命限界まで使用するという効率的なメンテナンス方法が求められている。そのためにはマルテンサイト系ステンレス鋳鋼の疲労特性、き裂進展特性に関する詳細な知見を得ることが重要であるが、これに関する研究報告例は僅少である。さらに、水力発電所における水車ランナの応力状態は、稼働中の高応力比状態、起動停止のような低応力比状態が混在しており、疲労き裂の開閉挙動は水車ランナの疲労特性評価に必要な要素であると考えられる。そこで本研究では、実際に約40年間使用されたステンレス鋳鋼製水車ランナより試験片を切り出し、除荷弾性コンプライアンス法を用いて求められる有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} とき裂進展速度 da/dN の関係から、発電水車用ステンレス鋳鋼の疲労き裂進展挙動の解明を行った。

2. 実験

2-1. 供試材料および実験方法

本研究では、供試材料として実際に長期間使用された水力発電用水車ランナより切り出したステンレス鋳鋼（SCS1）を使用した。SCS1の組成をTable1に示す。また、同材をASTM規格に準拠したCT試験片形状に機械加工し供試状態とした。

疲労試験には島津製油圧式サーボパルサを使用し、荷重波形は正弦波、応力比 $R=0.05$ とし、漸増率 $C=0.1$ ($C=(dK/da)/K$)の漸増試験、漸減率 $C=-0.08$ ($C=(dK/da)/K$)の漸減試験を行った。き裂先端の応力拡大係数範囲 ΔK の算出はASTM規格に準拠した式より算出した。さらに本研究では、作成した引き算回路により、試験片背面、およびジグに貼付したひずみゲージ

より出力される変位信号、および荷重信号の演算を行い除荷弾性部分をゼロにする除荷弾性コンプライアンス法により、き裂開口点と平均き裂長さを測定し ΔK_{eff} と da/dN を求めた。

2-2. 平均き裂長さ

上述した除荷弾性コンプライアンス法によるき裂長さの測定には、予め引き算回路に設けたポテンシオメータの値と平均き裂長さの関係を求める必要がある。これには、一定量のき裂進展後、荷重制御により進展速度を極端に小さくすることで破面上にビーチマークを形成させ、その際のポテンシオメータの値と、破面から求めたき裂進展面積を試験片の板厚で除した値を平均き裂長さとし、それらの関係から得られた近似曲線を利用した。この近似曲線により平均き裂長さの連続観察を行った。

3. 実験結果

3-1. き裂進展速度

Fig.1に本実験で得られた ΔK および ΔK_{eff} とき裂進展速度 da/dN の関係を示す。同図より、今回得られた ΔK および ΔK_{eff}

Fig. 1 Relationship between da/dN and $\Delta K, \Delta K_{eff}$.

Table1 Chemical compositions of SCS1 (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	Al	Ca	O
0.11	0.40	0.67	0.021	0.009	0.08	12.68	0.017	0.004	< 0.0005	0.011

の範囲内では比較的整理されたき裂進展速度が得られた。また、漸減法により求められた下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} は、 $\Delta K : \Delta K_{th} = 6.95 [MPa \cdot m^{1/2}]$, $\Delta K_{eff} : \Delta K_{th} = 4.95 [MPa \cdot m^{1/2}]$ であった。さらに $8 \leq \Delta K \leq 56 [MPa \cdot m^{1/2}]$, $7 \leq \Delta K_{eff} \leq 56 [MPa \cdot m^{1/2}]$ において Paris 則 (式(1)) が成り立ち、式(1)の実験定数 C , m はそれぞれ $\Delta K : C = 2.0 \times 10^{-12}$, $m = 3.13$, $\Delta K_{eff} : C = 1.0 \times 10^{-11}$, $m = 2.79$ となった。

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

また、Fig.1 を見ると $\Delta K = 56 [MPa \cdot m^{1/2}]$ (Fig.1 中の破線) 付近から da/dN の傾きが急になっているのが確認できる。ここで、式(2)に小規模降伏の条件式を示す。今回の実験では $\Delta K = 56 [MPa \cdot m^{1/2}]$ でこの条件式を満たさなくなり、小規模降伏状態から大規模降伏状態に移行したと考えられる。そのためき裂進展速度が大きくなったと考えられる。

$$W - a \geq 2.5 \left(\frac{K_{max}}{\sigma_y} \right)^2 \quad (2)$$

3-2. き裂開閉口挙動

Fig.2 に試験中のオシロスコープ画像の代表例を示す。図中の A がき裂開口点であり、き裂開口点が明瞭に観測されることがわかる。

さらに、Fig.3 に K_{max} と K_{op} の関係を示す。これによると K_{op} は低い値で推移しており、 $20 \leq K_{max} \leq 50 [MPa \cdot m^{1/2}]$, $K_{max} = 12$ 付近においてわずかながら上昇、下降することがわかる。このとき、疲労破面上に Fig.4 に示すような铸造欠陥が観察された。これは铸造欠陥の影響により、き裂前縁が湾曲したことが K_{op} に影響を与えたものと考えられるが、今

Fig.2 Load-Differential displacement hysteresis.

Fig.4 Casting defect.

Fig.3 Relationship between K_{op} and K_{max} .

後さらなる検討が必要である。さらに図中に示した一点鎖線は式(2)で求めた大規模降伏への移行値 $\Delta K = 56 [MPa \cdot m^{1/2}]$ に対応した値 $K_{max} = 59 [MPa \cdot m^{1/2}]$ であり、この付近から全荷重範囲でき裂が開いていることがわかる。

3-3. 破面観察

Fig.5 に漸増法による疲労破面の詳細観察結果を示す。(a)は $\Delta K = 30 [MPa \cdot m^{1/2}]$ であり、この(a)のような比較的規則性のない破面が漸増法による試験のほぼ全域にわたり観察された。また(b), (c)は $\Delta K = 18 [MPa \cdot m^{1/2}]$ であり、(b)中の黒い斑点の様に観察される部分を拡大したのが(c)である。(c)はき裂が結晶粒界を進展したために、この様な破面が観察されたと考えられる。(d)は $\Delta K = 50 [MPa \cdot m^{1/2}]$ であり、き裂進展方向に垂直な割れが観察された。

Fig.5 Fatigue fracture in increasing test.

Fig.6 に漸減法による疲労破面の SEM 観察結果を示す。今回の漸減法による ΔK の範囲では(a)に示したような、黒い斑点が所々に点在する破面がほぼ全域にわたって観察された。(b), (c)は(a)の詳細を示したものである。(a)は不規則な破面である(c)と、粒界をき裂が進展したと思われる(b)とで構成されていた。(結言および参考文献：省略)

Fig.6 Fatigue fracture in decreasing test.