高張力鋼の腐食疲労とフラクトグラフィ†

西 田 新 一* 浦 島 親 行**

Corrosion Fatigue Strength of High Tensile Steels and Its Fractographic Study

by

Shin-ichi NISHIDA* and Chikayuki URASHIMA**

Considering that the corrosion fatigue is especially time-dependent, it is necessary to confirm the long-life fatigue properties of structural steels to be adoptable to the practical design curve. Fatigue tests have been performed on three kinds of high tensile steels for offshore structures in air or by dropping fresh water and sea water to the midsection of each specimen under rotating bending load at various cyclic speeds including lower frequencies. In addition, fractographic observation has been carried out on the crack initiation and fracture surface of each specimen.

The main results obtained on the basis of the long-time corrosion fatigue tests (maximum period; 1.45 years/specimen) are as follows:

(1) The fatigue strength decreases with higher cyclic numbers and lower frequencies. There exists a good linear relation between stress amplitude and cyclic frequency. The relation can be expressed by a linear logarithmic equation.

(2) The effect of corrosion liquid on fatigue strength is remarkable in long period tests and the fatigue strength in sea water becomes lower than that in fresh water in the frequency range between 1500 and 4 rpm.

(3) The fatigue strength is a little dependent on tensile strength in the low cycle region and the difference in fatigue strength among high tensile steels becomes reversed in the high cycle region. This phenomenon appears not only in fresh water but also in sea water.

(4) The crack initiates from pits and propagates mainly by transgranular fracture. Both quasi-cleavage fracture and intergranular fracture are observed in the heat-treated steels under low cyclic frequencies in the high cycle region. These fracture patterns would be caused by corrosive effect and accelerate the crack propagation rate of the heat-treated steels.

Key words: Fatigue strength, Corrosion fatigue, Fractography, Corrosion pits, High tensile steels, SEM observation, Rotating bending

1 緒 言

鋼構造物部材に繰返し応力が加わっているような場合、多かれ少なかれ腐食疲労強度が問題となる。まして、石油掘削リグなどの海洋構造物の場合は、腐食疲労強度特性を抜きにして安全性を議論することは困難であろう。それゆえ、これまでにとくに海水中腐食疲労特性を中心に盛んに研究されてきた。これらの資料に基づいて、大気中疲労と海水中腐食疲労特性の主なマクロ的な相違点を挙げると、以下のごとくなる。(1) 大気中において認められる明瞭な疲労限が存在しない。(2) 海水中では繰返し速度効果が顕著である。(3) 海水中腐食疲労強度は、必ずしもその静的強度には単純に依存しない。

以上のことなどから、腐食疲労強度はとりわけ応力繰返し速度の影響が著しいことが明らかになってはい

るが、そのメカニズム等未解明な点も多く、その重要性は依然として高いと考えられる。

本論文では、3種類の高張力鋼を使用し、その腐食疲労強度に及ぼす①繰返し速度、②腐食液および③鋼種の影響について、最長 1.45 年/試験片に及ぶ長時間腐食疲労試験結果に基づき、とくにフラクトグラフィ的観点から検討した。

2 実験方法

2・1 使用材料

使用材料は、500 から 800 MPa 級高張力鋼（3 種類）である。Table I に、その化学成分および機械的性質を示す。この表から分かるように、SM50 が圧延ままで、他の 2 鋼種は熱処理をしている。また、Fig. 1 に、上記 3 鋼種の光学顕微鏡組織写真を、それぞれ示す。

† 原稿受理 平成 5 年 8 月 16 日 Received Aug. 16, 1993

* 正 会 員 佐賀大学理工学部生産機械工学科 〒840 佐賀市本庄町, Dept. of Mech. Eng., Saga Univ., Honjyo-machi, Saga, 840

** 正 会 員 新日鐵(株)八幡技術研究部 〒804 北九州市戸畑区飛幡町, Yawata R&D Lab., Nippon Steel Corp., Tobata-ku, Kitakyushu, 804

Table I. Chemical composition and mechanical properties of high tensile steels.

Steels	Thickness of steels (mm)	Chemical composition (%)									Mechanical properties				Heat-treatment
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	σ_{ps} (MPa)	σ_u (MPa)	δ (%)	ϕ (%)	
SM50	25.0	0.15	0.46	1.38	0.023	0.016	—	—	—	—	384	555	25.0	60.0	As-rolled
HT60	25.0	0.14	0.43	1.24	0.017	0.014	—	0.22	—	0.02	549	637	31.0	68.0	900°C Quenched 650°C Tempered
HT80	25.0	0.14	0.26	0.83	0.012	0.008	1.06	0.61	0.45	0.05	784	823	25.0	68.2	◇

Table II. Chemical analysis of corrosive liquids.

Items	pH	Desolved oxygen (ppm)	Oxygen demand (ppm)	CaO (ppm)	MgO (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	SO ₄ ⁻ (ppm)	SiO ₂ (ppm)	NO ₂ ⁻ (ppm)	NO ₃ ⁻ (ppm)	NH ₄ ⁺ (ppm)	Fe (ppm)	Electric conductivity (μV/cm)	M-alkalinity as CaCO ₃ (ppm)
Fresh water	7.4	7.80	0.8	40.9	10.5	17.5	40.3	7.70	0.00	1.00	0.00	0.10	320	61
Sea water	8.1	6.52	3.7	504	2216	19000	2650	0.58	0.09	5.80	0.05	0.05	52200	115

Fig. 1. Optical micro-structure of test specimens.

2・2 試験片，試験機および実験条件

Fig. 2 に，試験片形状を示す。試験機は小野式回転曲げ疲労試験機（容量 98 N・m）を使用し，その繰返

Fig. 2. Dimensions of test specimen.

し速度は 1500, 500（一部），150, 50 および 4 rpm の 5 種類であり，繰返し速度効果について検討した。腐食液は，水道水および天然海水（北九州市戸畑区の臨海実験場で採取）の 2 種類である。Table II に，腐

食液の分析結果を示す。試験中は，おのこの腐食液を温度制御付きタンク（容量 250 ℓ）に貯め，流量約 70 cc/min を試験片表面に滴下した後廃液とした（連休中は予備タンクも使用）。液温は，年間を通じて一定の温度（24°C 前後）に保った。

破断または試験終了後の試験片は，乾燥させた後に防錆ペイントを塗布してデシケータ内に保管し，試験片表面および破面観察に使用した。

3 実験結果および考察

3・1 腐食疲労強度

まず 3 鋼種の高張力鋼（SM50, HT60 および HT80）について，繰返し速度を変えて，水道水および海水中で疲労試験を行い，S-N 曲線を求めた。つぎに，その S-N 曲線を基に，10⁶, 5×10⁶ および 10⁷ 回の時間強度を求めた。その結果を，Table III に示す。Table III に基づいて，横軸に繰返し速度，縦軸に応力振幅をとって，鋼種ごとに図示した結果を，Fig. 3, 4 および Fig. 5 に示す。これらの図から分かるように，繰返し速度と応力振幅との間に良い直線関係が認めら

Table III. Corrosion fatigue strength at $N_F=10^6, 5 \times 10^6$ and 10^7 cycles.

Steels	N_F Corrosive liquids F	10 ⁶				5×10 ⁶				10 ⁷		
		1500	150	50	4	1500	150	50	4	1500	150	50
SM50	Fresh water	245	210	181	—	172	142	152	—	152	—	137
	Sea water	210	180	176	150	127	103	—	83	108	80	70
HT60	Fresh water	245	221	186	172	176	147	137	127	167	123	120
	Sea water	181	157	152	123	123	98	75	—	93	69	59
HT80	Fresh water	245	186	172	127	181	142	113	—	176	127	108
	Sea water	235	176	147	—	142	95	59	—	98	69	59

σ_a : Stress amplitude MPa, N_F : Cycles to failure,
F: Cyclic frequency rpm.

Fig. 3. Stress-cyclic frequency (S-F) curves (SM50).

Fig. 4. Stress-cyclic frequency (S-F) curves (HT60).

Fig. 5. Stress-cyclic frequency (S-F) curves (HT80).

れ、次式で表すことができる。

$$\sigma_a = a(F)^b \quad (1)$$

σ_a : 応力振幅, F : 繰返し速度

a, b : 定数

a および b を最小自乗法で求めた結果を, Table IV に示す。

上記の Table III および Table IV と Fig. 3, 4 および Fig. 5 から分かるように, 腐食疲労強度に及ぼす繰返し速度の影響は, 鋼種によって異なるが, すべての場合について繰返し速度が遅くなるに従って, 疲労強度は低下している。また, いずれの場合も水道水よりも海水の場合の方が疲労強度が低くなっており, 両者の差は 10^6 回時間強度よりも 10^7 回時間強度の方がより顕著となっている。

腐食疲労強度に及ぼす鋼種の影響は, それ程顕著ではないが, 大気中の場合のように静的引張強さに依存しない。むしろ, SM50 と HT80 とを比較した場合, 静的引張強度の高い HT80 の方が低繰返し速度・長寿命域でやや疲労強度が低くなる傾向が認められる。これは, 低繰返し速度・長寿命領域で擬へき開破面が

Table IV. Empirical equations between stress amplitude σ_a and cyclic frequency F .

Steels	N_f	Corrosive Liquids	Empirical equation $\sigma_a = a \cdot (F)^b$	
			a	b
SM50	10^6	Fresh water	139.5	0.076
		Sea water	139.0	0.054
	10^7	Fresh water	119.5	0.030
		Sea water	43.5	0.118
HT60	10^6	Fresh water	151.0	0.069
		Sea water	117.0	0.061
	10^7	Fresh water	77.0	0.104
		Sea water	35.0	0.133
HT80	10^6	Fresh water	108.5	0.109
		Sea water	83.0	0.135
	10^7	Fresh water	59.0	0.151
		Sea water	33.0	0.147

a, b : Constants.

認められることに関係し, これが現れることによって疲労き裂進展速度を加速していることに関係していると考えられる (Fig. 11 参照)。

3・2 腐食疲労き裂の発生および進展

Fig. 6 に, 腐食ピットとき裂発生の観察結果例を示す。この図で, a-1), b-1), c-1), d-1) および e-1)

a-1) Appearance of the specimen

a-2) Vertical section 0.1mm

a-3) Surface state
(a) $N = 2 \times 10^4$ cycles

Fig. 6. Observation of pits and crack initiation (HT60, sea water, 150 rpm, $\sigma_a=147$ MPa, $N_F=165 \times 10^4$ cycles).

は、試験片表面の腐食面積の変化を、a-2), b-2), c-2), d-2) および e-2) は、それらの試験片の縦断面観察結果で、a-3), b-3), c-3), d-3) および e-3) は試験片表面のミクロ観察結果である。Fig. 6 の c-3) および d-3) のコーナーにはその拡大写真も併せて示す。これらの写真から分かるように、まず腐食ピットが繰返し寿命比 12% 以下の比較的早い時期に形成され、つぎにそれらのピット底に繰返し寿命比 25% 以下で荷重方向に垂直に疲労き裂が発生し、さらに一部のき裂は合体したりして伝ば過程をたどる。そして、腐食ピットの大きいものやこれが連なっているものに、まずき裂が発生しやすい傾向がうかがわれる。

Fig. 7 および Fig. 8 に、繰返し速度を変えて水道水と海水中腐食疲労試験片の縦断面図例を示す。試験片表面の腐食状況は、腐食液および繰返し速度によって異なるが、海水の方が腐食ピットが形成されやすく、低繰返し速度になる程表面腐食が顕著となっている。

Fig. 9 に、上記 3 鋼種について、それぞれの疲労き

Fig. 7. Vertical section of specimens
(HT60, fresh water).

Fig. 8. Vertical section of specimens
(HT60, sea water).

裂発生点近傍の破面写真例を示す。疲労き裂の発生は、いずれも腐食ピットを起点にしていると判断できる。しかし、破面の鋼種および繰返し速度による相違は、これらの写真からだけでは認められない。

Fig. 10 および Fig. 11 に、疲労き裂発生点および発生点から 3 mm 離れた箇所の SEM 観察例を示す。高繰返し速度の場合、介在物やすべり帯を起点とした破壊例が認められるが、低繰返し速度の場合、腐食ピットを起点にしている (Fig. 6 参照)。また、SM50 の場合は繰返し速度による破壊面の差はほとんど認められないが、HT60 および 80 の場合低繰返し速度で長寿命領域で擬へき開破壊面の混在が認められる (Fig. 11 参照)。

Fig. 12 に、腐食環境 (水道水) 中での疲労破面に認められたストライエーションの例を示す。このように安定した疲労き裂伝ば領域では、明瞭なストライエーションが認められるのはそれ程珍しいことではない。ただし、大気中の場合と異なる点は、この Fig. 12 にもとところろに観察することができるように、破面に腐食ピットの存在が認められることである。また、場合によっては破面に粒界破面が認められ、その面積率が大気中の場合に比較して、かなり高い値となっていることである。

Fig. 9. Fractograph of crack initiation point (sea water).

Fig. 10. An example of fracture surface initiated from inclusion (HT80, fresh water, 1500 rpm, $\sigma_a = 392 \text{ MPa}$, $N_f = 18.2 \times 10^4 \text{ cycles}$).

4 結 論

最長 1.45 年/試験片に及ぶ腐食疲労試験結果に基づいて、得られた主な結論をまとめると、以下のごとく総括できる。

(1) 繰返し速度と応力振幅の間には良い直線関係が認められ、次式で表される。

$$\sigma_a = a(F)^b$$

ただし、 a , b ; 定数, σ_a ; 応力振幅, F ; 繰返し速度。

(2) 腐食疲労強度に及ばず繰返し速度の影響は顕著で、繰返し速度が遅くなるに従って疲労強度は低下する。いずれの場合も、水道水よりも海水の方が疲労強度の低下が著しい。

(3) 腐食疲労き裂の発生状態の観察結果、まず腐食ピットが繰返し寿命比 12% 以下の比較的早い時期に

(a)

(b) Magnified (a).

Fig. 11. An example of fracture surface initiated from inclusion (HT80, fresh water, 4 rpm, $\sigma_a = 108$ MPa, $N_F = 132.3 \times 10^4$ cycles, at 3 mm from crack initiation point).

Fig. 12. An example of observed striation in corrosion liquid (HT80, fresh water, 50 rpm, $\sigma_a = 118$ MPa, $N_F = 370.7 \times 10^4$ cycles).

形成され、つぎにそれらのピット底に繰返し寿命比 25% 以下で疲労き裂が発生し、さらに一部のき裂は合体したりして、伝ば過程をたどる。

(4) HT60 および HT80 の場合、低繰返し速度・長寿命領域で擬へき開破壊面が認められる。このことは、静的引張強さが高いにも関わらず、腐食疲労強度がやや低くなっていることに起因していると考えられる。

(平成 5 年 6 月 25 日 日本材料学会第 8 回フラクトグラフィシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) たとえば、日本機械学会，“金属材料の疲れ強さの設計 試料Ⅲ，環境効果”（1974）。
- 2) 遠藤吉郎，駒井謙治郎，“金属の腐食疲労と強度設計”（1982）養賢堂
- 3) 江原隆一郎，“第 6 回疲労講座金属疲労の基礎と破壊の防止”テキスト，26（昭和 59 年 11 月）日本材料学会
- 4) 鉄鋼の環境強度部会，鉄鋼の海洋環境強度データベース，Vol. 1（1983），Vol. 2（1987）
- 5) 鉄鋼の環境強度部会，第 3 回シンポジウム前刷集（1987）。
- 6) 鉄鋼の環境強度部会，材料の海水中腐食疲労・応力腐食割れデータ集，Vol. 1 および 2（1986）。
- 7) 鉄鋼の環境強度部会，鉄鋼の海洋環境破壊面写真集，Vol. 1 および 2（1987）。
- 8) S. Nishida and C. Urashima, Proc. of the Second Int. Conf. on Fatigue and Fatigue Thresholds, (Fatigue '84), 1485 (1984).