海洋実環境下での疲労き裂進展挙動の解析と 室内試験結果との比較†

岩 館 忠 雄* 阿 部 敏 広**

Analysis of Fatigue Crack Growth Behavior in Sea Field and Its Comparison with Indoor Test Results

by

Tadao IWADATE* and Toshihiro ABE**

In order to study life prediction method of structural material for sea environment use, the field testing facility to measure the fatigue crack growth rate of the materials due to sea wave was developed. The tests of fatigue crack growth rate measurements using 3.5% Ni-Cr-Mo-V structural steels were performed in cathodic protection and free corrosion environments.

The field test data were analyzed using the rainflow method and equivalent load (P_{eq}) equation. When the yield strength and the stress ratio increase, the fatigue crack growth rate increases. The fatigue crack growth rate of field test results was little different from indoor test results obtained using ASTM sea water. This difference may be caused by the change of stress ratio and frequency conditions. The crack growth rate of indoor test using field test conditions coincided well with the field test results. In observation of fracture surface of the specimens, fatigue crack containing intergranular fracture was observed. The higher yield strength material showed larger amount of intergranular fracture.

This study demonstrates that the fatigue crack growth behavior in actual sea field environment can be obtained using indoor test data.

Key words : Sea field test, Fatigue crack growth rate, Corrosion fatigue, SCC, Cathodic protection, Ni-Cr-Mo-V steel

1 緒 言

海底油田掘削用プラットフォームなどの海洋構造物部材では、その使用環境条件が厳しいことから使用部材に対して高い信頼性が要求されている。ここで、深海油田掘削用のプラットフォームを考えると、テンション・レグ型の脚部には、海上のプラットフォーム部の浮力による高い引張応力と波や潮流による変動応力が疊重される。そのため材料には十分な疲労強度と高いじん性が要求される。

本研究では、このような海洋環境下で使用される構造物材料の腐食疲労、応力腐食割れ (SCC) 相乗作用下での寿命評価技術の確立を目的として、海洋実環境下での波浪や潮流による実働荷重を試験片に負荷できる実環境試験装置を開発し、材料の疲労き裂進展速度の測定を行なった。使用した材料は、テンション・レグ材として実績のある 3.5 % Ni-Cr-Mo-V 鋼である。得られた結果と、室内試験との比較・解析を行ない、室内試験結果からの実環境条件下での疲労き裂進展速度の予測方法について検討した。

2 実環境試験装置の製作

Fig. 1 は、製作した実環境試験装置の概観を示したものである。この装置は、実際の海洋実環境下での波浪や潮流による変動荷重を試験片に伝達し、材料の疲労き裂進展挙動を測定するために開発されたものである。装置の特性は以下のごとくである。

(1) 波浪や潮流による変動荷重や一定の引張荷重は上下 2 段のウキによって試験片に伝達される。すなわち、水中にある大きなウキ (浮力 80 kg) によって一定の引張荷重を試験片に負荷し、水面の小さなウキ (浮力 30 kg) によって波による変動荷重を試験片に伝達するしくみになっている。これらのウキの大きさを調節し、応力比 ($R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$) は、実機のテンション・レグを想定して、0.7 以上に設定した。

(2) 試験装置の本体部分は、主フロート (0.6×3.5×0.6 m) の重さと、2 段のウキの浮力とがバランスを保つように設計されており、潮位が変化しても水面に対してウキの位置が常に一定になるように、主フロートは、その胴部を貫通している 2 本の支柱にそって

† 原稿受理 平成元年11月6日 Received Nov. 6, 1989

* 正 会 員 (株)日本製鋼所室蘭研究所 室蘭市茶津町, Muroran Research Laboratory, The Japan Steel Works, Ltd., Chatsu-machi, Muroran

** (株)日本製鋼所室蘭研究所 室蘭市茶津町, Muroran Research Laboratory, The Japan Steel Works, Ltd., Chatsu-machi, Muroran

Fig. 1. Field testing facility developed.

上下動できるようになっている。

(3) ウキによる荷重は、アームの先端で受け、てこの原理により力は約 10 倍に拡大され、試験片に引裂き力として伝達される。

(4) ウキの直下のアームの先端にはロードセルが取り付けられており、これにより波浪や潮流による実働荷重の波形が計測され、海上でモニターできるようになっている。

(5) 試験中の試験片の荷重とひずみの変動波形の信号は、海上で磁気テープ式データレコーダー（株）ミネベア社製 RCD-928H）に定期的に記録される。記録されたデータは荷重履歴の解析やき裂長さの計算に使用される。

(6) この装置は、1 回の試験で 10 個の試験片を同時に取付けることができる。

3 試験材および試験方法

海洋環境下での疲労き裂進展挙動の測定は 2 章に示した実環境試験装置を用い、室内試験は ASTM 人工海水を用いて一定振幅荷重による試験を行なった。

Table I. Chemical compositions of the material used. (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
0.25	0.05	0.22	0.005	0.004	3.73	1.72	0.41	0.12

Table II. Tensile and toughness properties of the materials used.

0.2% offset strength MPa	Tensile strength MPa	Elongation %	Reduction of area %	Charpy V notch	
				Upper shelf energy J	FATT °C
850	952	23.5	71.4	152	-100
1020	1137	16.2	69.0	140	-97
1150	1307	15.0	63.5	65	-40

Fig. 2. Compact tension (1T-CT) specimen used.

3・1 試験材

試験材はテンション・レグ材として実績のある 3.5 % Ni-Cr-Mo-V 鋼を用いた。Table I にその化学成分を示す。ここで、疲労き裂進展挙動に及ぼす材料の降伏強度の影響を検討するために、熱処理によって Table II に示すように降伏強度を 850, 1020, 1150 MPa の 3 種類に変えた試験材を使用した。

3・2 実環境試験

実環境試験に使用した試験片は、Fig. 2 に示すごとく ASTM E647 に準拠した厚さ 12.5 mm のコンパクトテンション (1T-CT) 試験片である。試験片の背面には、ひずみゲージを貼り防水コーティングを施して、水中での試験片にかかるひずみの変化を測定できるようにした。また試験片と試験片固定用治具およびピンとの間を絶縁するために、試験片のピン穴にテフロンリングをはめ込んだ (Fig. 2)。個々の試験片にかかる初期の応力拡大係数 K_I は、試験装置のアームの長さで試験片の予き裂長さを調整することによって設定した。

試験条件としては、陰極防食条件下 (-1050 mV vs. AgCl) と自然腐食条件下の 2 種類で行なった。ここで、陰極防食は、Al 合金の犠牲陽極材を試験片に接続して行なった。き裂の長さの測定は、定期的に装置を引き上げ、卓上顕微鏡を用いて試験片表面でのき裂進展量を測定する方法および記録した荷重とひずみの変動波形を用いてコンプライアンス法からき裂長さを求める方法の両方を併用した。

3・3 室内試験

室内での疲労き裂進展挙動の測定は、電気油圧式疲労試験機を用いて一定振幅の応力波形で行なった。試験片は、実環境試験と同様の 1T-CT 試験片を用いた。試験環境としては、ASTM 人工海水を用い、陰極防食はポテンショスタットを用いて -1050 mV の電圧を試験片に与えた。き裂の進展量は試験片の背面に貼ったひずみゲージからコンプライアンス法によって求めた。繰返し周波数は、 0.167 Hz および 2.5 Hz で行ない、応力比はテンション・レグ材の実際の使用条件をもとに、 0.7 以上で行なった¹⁾。

4 実験結果

実環境試験は、室蘭港の埠頭で実施した。試験期間は昭和 62 年の 6 月から 9 月にかけてである。Fig. 3 は、データレコーダに記録した荷重の変動波形の一例である。これを見ると、得られた大小の波が複合した形態を示している。このような波形群を解析するために、波形の高速フーリエ変換 (FFT) を用いた周波数解析や、レインフロー法を用いて単位波形までの分解を行なった。

Fig. 4 は、FFT により波形の周波数帯域のパワースペクトル分布を調べたものである。Fig. 4(a) は比較的波の穏やかな風の時の波形の周波数分布であり、Fig. 4(b) は最も波の高い嵐の時の周波数分布である。これを見ると、波の穏やかな時期は、ほとんどの波形は 1 Hz 以下に集中しているが、波の高い時期は約 10 Hz まで広範囲に分布していることがわかる。

Fig. 5 および Fig. 6 は、試験期間中に定期的に採取した波形データを総合したもので、分解した単位波形の頻度分布を示したものである。すなわち、Fig. 5 は、変動荷重波形の振幅の頻度分布を示したものであり、Fig. 6 は、変動荷重波形の平均値の頻度分布を示したものである。

Fig. 7 は、試験の経過日数と計測された疲労き裂の

Fig. 3. A record of load wave monitored.

(a) Calm day.

(b) Stormy day.

Fig. 4. The power spectrums obtained by the frequency analysis using fast fourier transform (FFT).

Fig. 5. Frequency distribution of load amplitude measured during 70 days test.

Fig. 6. Frequency distribution of mean load measured during 70 days test.

進展量ならびに荷重振幅と応力比の変化を示したものである。ここで、変動荷重は日々の平均を示したが、荷重振幅は Fig. 5 のような分布を示していることから、式 (1) を用いて等価平均荷重 P_{eq} を求め^{2),3)}、それを平均荷重とした。

$$\Delta P_{eq} = [1/N \sum_{i=1}^N (\Delta P_i)^m]^{1/m} \quad (1)$$

N は総サイクル数、 m は室内試験の疲労き裂の進展速度式の指数 ($=3.15$) である。ここで、ノイズ成分を考慮して、 ΔP の最大値の 5% 以上の波形を有効荷重とし、それ以下の波形は除外した。

Fig. 7 をみると、き裂の進展量が大い時期は荷重の変動も大きい時期と一致している。また応力比は、全体的にみると 0.9 以上であるが、振幅の大きい時期は応力比は多少小さい傾向にある。

Fig. 8 および Fig. 9 は、周波数が 0.167 Hz の一定振幅荷重による室内試験によって得られた疲労き裂進展速度 da/dN を有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} との関係で示したものである。Fig. 8 をみると、同じ降伏強度

Fig. 7. Fatigue crack growth extension, load amplitude and stress ratio during 70 days test.

Fig. 8. Fatigue crack growth rate as a function of ΔK_{eff} obtained by indoor tests.

の材料でも海水中の疲労き裂進展速度は大気中の場合よりも大きく、自然腐食下よりも陰極防食下の場合の方が疲労き裂進展速度は大きい結果を示している。また、Fig. 9 をみると、材料の降伏強度が高い材料ほど疲労き裂進展速度は大きく、加速するしきい値の ΔK_{eff} も小さくなっている。その傾向は応力比が大きくなるにつれて顕著になり、同じ降伏強度材でも応力比が大きいくほど疲労き裂進展速度は大きくなっている。

Fig. 10 は、実環境試験の結果から求めた疲労き裂進展速度を示したものである。ここで、き裂進展速度の計算に用いた繰返し数は6時間ごとにサンプリング

Fig. 9. Effect of the stress ratio on fatigue crack growth rate in indoor test.

Fig. 10. Fatigue crack growth rate obtained by field tests.

した時間を有効荷重の波形数で割った値を使用した。図中には室内試験の結果も併せて示した。いま海洋実環境試験の結果と室内試験の結果を比較すると、実環境試験の疲労き裂進展速度は室内試験の結果よりも小さな値を示しており、室内試験の応力比が0.7の自然腐食下での結果に一致するようにみえる。しかし、実環境試験の条件をみると、Fig. 7 から明らかなように応力比は平均的には0.9以上であり、室内試験の応力比0.7よりも大きい。したがって、実環境試験で得られた平均的な周波数2.5 Hz および平均的な応力比0.92に一致させ、再度室内試験を行なった。Fig. 11 は、得られた疲労き裂進展速度の結果を示したものである。○印は、降伏強度が1120 MPaの材料の実環境条件に一致させた室内試験の結果であり、△印は、同一材料の実環境試験の結果である。この結果をみる

Fig. 11. Comparison of fatigue crack growth rate obtained by field tests and indoor tests using field test conditions.

Fig. 12. Examples of fracture surfaces tested.

と、室内試験の結果は、0.167 Hz の疲労き裂進展速度よりも 1 オーダー小さい値を示し、実環境試験のき裂進展速度とほぼ一致していることがわかる。このことから、レインフロー法による波形解析を行ない、等

Fig. 13. SEM fractographs of the specimens tested.

価応力による整理方法等によって得られた実働応力条件を用いることによって、室内試験の結果から海洋実環境下での疲労き裂進展速度の予測が可能であることがわかる。

Fig. 12 は、室内試験と実環境試験の陰極防食を施した試験片の破面を観察したものである。ここで、室内試験の試験片破面は、0.167 Hz の条件で行なったものである。自然腐食の試験片の破面は、ピットが多く著しく腐食されており、破面形態を観察することは困難であったが、陰極防食を施した試験片はほとんど腐食されておらず、破面観察を行なうことができた。試験片には、荷重振幅の変動を示すビーチマークが観察され、Fig. 13 に示した SEM 写真をみると室内試験と実環境試験の両方とも顕著な粒界割れが観察される。ここで、同一強度の材料を比較すると、実環境試験の破面は室内試験の破面よりも粒界割れの割合が小さい結果を示していた。このことは Fig. 10 の実環境試験における疲労き裂進展速度が室内試験の結果よりも小さいことの理由の一つと思われる。ここで、降伏強度の高い材料をみると、粒界割れの割合が大きくなる傾向を示している。特に 1150 MPa の材料では Fig. 14 から明らかなように表面近傍で粒界割れの割合が大きく、表面近傍のき裂が優先的に進展した様相

Fig. 14. SEM fractographs of 1150 MPa yield strength specimen.

を示している。これは表面近傍において陰極防食によって外部電流による水素の侵入が大きくなったためと考えられる。

5 結 言

海洋実環境下での寿命予測技術の確立を目的に、実環境試験装置を製作し、深海油田掘削用テンション・レグ材として実績のある 3.5 % Ni-Cr-Mo-V 鋼を用いて、疲労き裂進展速度の測定を行なった。また室内試験による一定振幅荷重条件下での疲労き裂進展速度の測定を行ない、実環境試験の結果と比較・解析を行ない、次のような結果を得た。

(1) 実環境試験での周波数は 0.167 Hz よりも大きく、特に嵐の時には 10 Hz 付近まで広範囲に周波数が計測された。

(2) 疲労き裂進展速度は、大気中よりも海水中で大きく、自然腐食下よりも陰極防食下で大きい結果を示した。また降伏強度が大きくなるにつれて、疲労き裂進展速度は大きく、加速するしきい値の ΔK_{eff} も小さくなる。その傾向は応力比が大きくなるにつれて顕著になり、同じ降伏強度でも応力比が大きいほどき裂進展速度は大きくなる。

(3) 海洋での複雑な実働波形の環境下においても、レインフロー法による波形解析や等価応力による整理方法等を用いることによって、室内試験の結果から海

洋環境下での疲労き裂進展速度を予測することが可能である。

(4) すなわち、実環境下で得られた平均的な周波数 2.5 Hz および平均的な応力比 0.92 に一致させた室内試験を行なった結果、実環境試験の結果とよく一致した。

(5) 破面観察の結果、陰極防食下では、降伏強度が大きくなるにつれて水素の侵入による粒界割れの割合が大きくなり、き裂進展速度は大きくなる。

本研究は昭和62年度科学技術庁科学技術振興調整費によるものである。また本研究の実験、解析にご助力を頂いた京都大学工学部駒井謙治郎教授、箕島弘二助教授に深く謝意を表わしたい。

(平成元年9月27日 第5回破壊力学シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) T. Iwadate, Y. Tanaka, T. Kabutomori, N. Kanno and M. Nakamura, OTC'84, 2, 21 (1984).
- 2) 駒井謙治郎, 箕島弘二, 金 貴植, 日本機械学会論文集, 55, 1512 (1989).
- 3) J. M. Barsom, ASTM STP536, 147 (1973).
- 4) 岩館忠雄, 田中泰彦, 阿部敏広, 日本鉄鋼協会講演概要集(II), 72, 274 (1986).