

膜圧式疲労試験による等二軸応力下での微小疲労き裂進展評価

Evaluation of Micro Fatigue Crack Growth under Equi-biaxial Stress by Membranous Pressure Fatigue Test

大阪大学	飯田 智	Satoshi IIDA	Non Member
大阪大学	阿部 茂樹	Shigeki ABE	Non Member
大阪大学	中村 隆夫	Takao NAKAMURA	Member
原子力安全システム 研究所	釜谷 昌幸	Masayuki KAMAYA	Non Member

For preventing nuclear power plant (NPP) accidents, NPPs are required to ensure system safety in long term safe operation under aging degradation. Now, fatigue accumulation is one of major ageing phenomena and are evaluated to ensure safety by design fatigue curve that are based on the results of uniaxial fatigue tests. On the other hand, thermal stress that occurs in piping of actual components is not uniaxial but equi-biaxial. For accurate evaluation, it is required to conform real circumstance. In this study, membranous pressure fatigue test was conducted to simulated equi-biaxial stress. Crack initiation and crack growth were examined by replica investigation. Calculation result of equivalent stress intensity factor shows crack growth under equi-biaxial stress is faster than under uniaxial stress. It is concluded that equi-biaxial fatigue behavior should be considered in the evaluation of fatigue crack initiation and crack growth.

Keywords: equi-biaxial fatigue, thermal stress, membranous pressure fatigue test, stress intensity factor

1. はじめに

現在、原子力発電所においては経年劣化による設備の機能喪失を防ぐため保全活動が行われている。プラント機器の保全において疲労の累積を予測し損傷の防止を図ることは事故防止につながる重要な活動である。疲労累積評価は単軸試験で得たデータを基にして作成された設計疲労曲線を用いて行われている。設計疲労曲線による評価はもともと機器の設計に用いる目的で作られているため、運転中の機器の実際の疲労累積状態や余寿命の評価が難しいという課題がある。

そこで、実機の疲労累積状態を仮想的なき裂の長さに置き換えることで評価する「き裂進展予測モデル」の導入が現在検討されている^{[1][2]}。この評価で必要となるのは、疲労による微小き裂の進展状況を把握することであるが、き裂進展の予測を行うためには、実機が置かれている条件を考慮する必要がある。実機における代表的な疲労の一つに配管部における熱疲労があるが、配管内を流れる流水の温度変化により配管表面では等二軸応力が発生する。

配管の合流部や分岐部では、流体振動による水の流れの揺らぎにより、配管壁が局所的に高(低)温となり応力が加わる。この揺らぎは時間とともに繰り返されるため、繰返し応力が発生する。等二軸応力が疲労寿命に与える影響については過去に注目されてきたが、き裂の進展に与える影響については報告されていない。そこで本研究では等二軸応力下でのき裂の進展挙動に注目し単軸応力下でのき裂進展挙動と比較・検討することによりその違いを明らかとすることを目的とした。

2. 記号説明

a : き裂深さ(mm)	E : ヤング率(MPa)
c : 表面き裂長さ(mm)	W : 試験片直径(mm)
t : 試験片厚み(mm)	ϕ : き裂進展方向($^{\circ}$)
da/dN : 進展速度(m/cycle)	ν : ポアソン比
$\Delta\epsilon$: ひずみ範囲($\%$)	

連絡先: 飯田智

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2番1号

大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻

E-mail:s-iida@ne.see.eng.osaka-u.ac.jp

3. 試験方法

3. 1 膜圧式疲労試験機

本研究では膜圧式疲労試験機^[3]を用いて等二軸応力下での疲労試験を実施した。膜圧式疲労試験機の模式図をFig.1に示す。この試験機の上下の空気室に交互に空気を注入・排気することでFig.2に示す円盤状試験片の中心部に等二軸繰り返し応力を発生させることができる。また試験片として原子力発電所の配管部を想定し、ステンレス鋼(SUS316)を用いた。試験片の化学組成と機械的性質をTable.1,^[4]に示す。

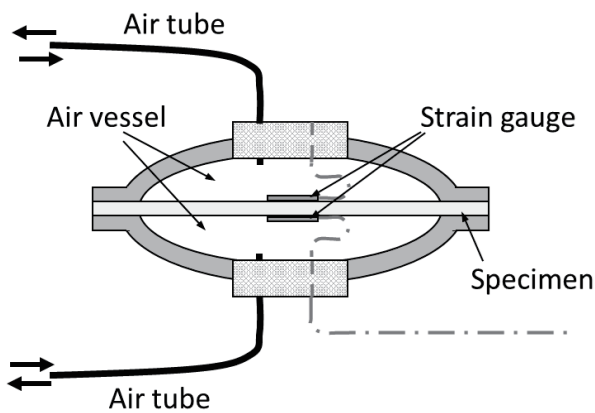


Fig.1 Schema of fatigue test machine.

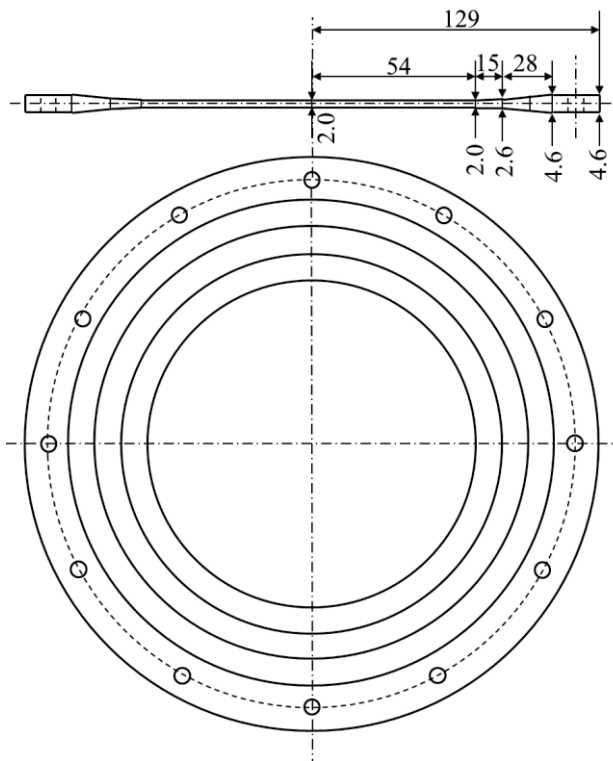


Fig.2 Geometries of test specimen in membranous pressure fatigue test.

Table.1 Chemical content of test material (mass %).

Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Bal.	0.05	0.41	0.84	0.026	0.001	10.20	16.10	2.11

Table.2 Mechanical properties of the test material.

	Longitudinal direction	Transverse direction
0.2% proof strength(MPa)	264	270
Tensile strength(MPa)	595	595
Elongation (%)	58.5	58.8
Reduction in area (%)	85.4	80.7
Young's modulus(GPa)	205	213

3. 2 試験条件

本研究ではき裂の成長に着目しているため、疲労試験の途中5000サイクルごとに試験機を止めレプリカ法を用いてき裂長さを測定した。また、ひずみゲージを用いて試験片中心部におけるひずみ範囲の値を測定し、圧力計を用いて試験片に加わる駆動空気圧を測定した。試験片への加圧周期は0.5Hzとした。

き裂発生に対する試験片表面粗さの影響を排除するため、き裂が発生する中心部付近を1200番のエメリー紙で研磨の後、バフ仕上げを行った。

4. 試験結果

4. 1 疲労試験結果

疲労試験中、ひずみ範囲の実測値は0.4~0.5%で、約77500サイクルで破断した。試験片の両面から進展したき裂が、試験片を貫通した時点を破断と定義した。き裂が試験片を貫通し空気が漏れると、試験片に加わる応力の低下により、ひずみ範囲の測定値が低下する。この変化を検出することで、破断繰り返し数を同定した。き裂は試験片の両面からほぼ同じ深さ(両面からの深さは測定できていない)進展しており、破断時のき裂の進展深さはおよそ1mmであった。

試験中の駆動空気圧とひずみ範囲の変化を Fig.3,4 に示す。駆動空気圧は多少の変動はあるが平均して1 MPaであった。ひずみ範囲は繰返し数とともに増加した。破断サイクル付近での値の急上昇は、き裂の発生によりき裂開口変位がひずみとして検出されたためと推定される。

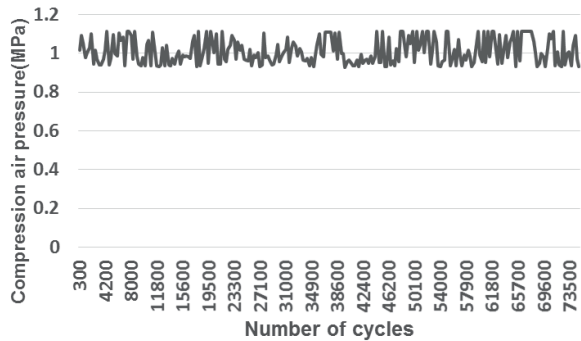


Fig.3 Driving air pressure.

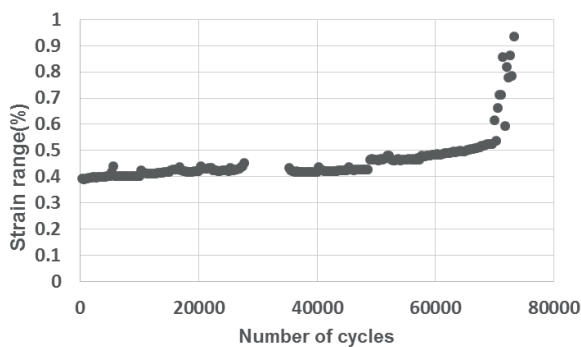


Fig.4 Strain range.

4. 2 微小き裂の発生と進展

レプリカ法によって試験片中心部付近の表面をフィルムに転写し、光学顕微鏡により観察した。表面では微小なき裂が発生し、進展する様子が確認された。また、75000サイクルにおいては、き裂の分岐が観察された。試験初期(~45000サイクル)におけるき裂長さを Fig.5 に示す。Fig.6,7 にき裂の発生と進展を示す画像を、Fig.8 にき裂の分岐画像を示す。き裂の分岐は等二軸疲労に特徴的であり、き裂進展に少なからず影響を与えらる。

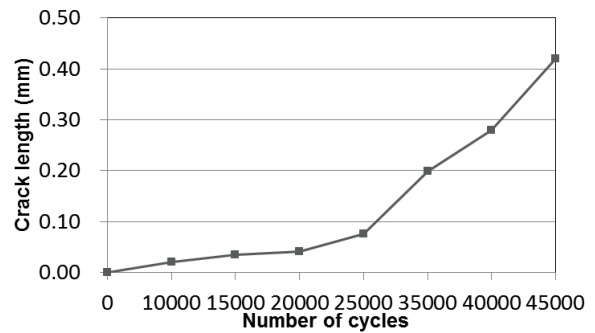


Fig.5 Crack propagation in experiment.

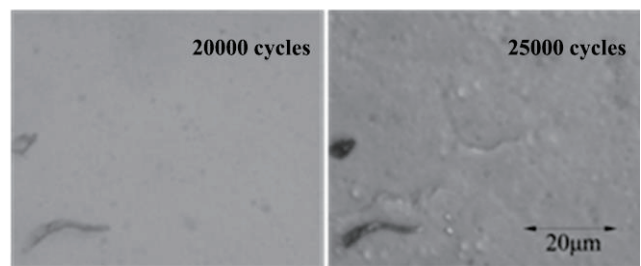


Fig.6 Initiation of crack.

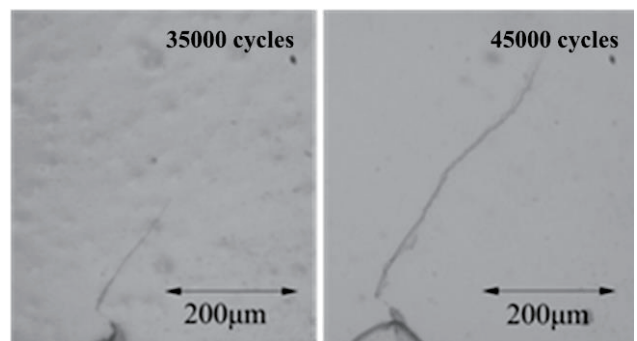


Fig.7 Propagation of crack.

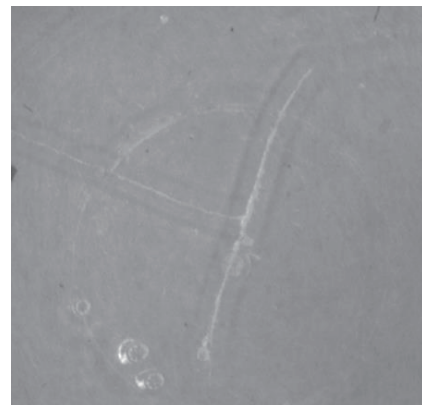


Fig.8 Branching of crack.

4. 3 き裂のアスペクト比

表面観察からはき裂の深さ方向の進展は測定できないので、破断した試験片の断面を観察した。試験後にき裂が貫通した部分を切り出し、貫通部分が観察できるように、疲労負荷にて破断させた。破面のSEM画像をFig.9に示す。破面にはレプリカ採取のため途中止めを行った影響により発生したと思われるビーチマークが観察された。左側がオリジナルの画像であり、右側はビーチマークをわかりやすいように縁取りしたものである。破面図のビーチマークから同定されたアスペクト比は約0.5であった。本研究では、き裂発生から破断まで、アスペクト比が0.5であったと仮定して、表面長さから深さを推定した。そして、以下で説明する等価応力拡大係数や、深さ方向のき裂進展速度を算出した。

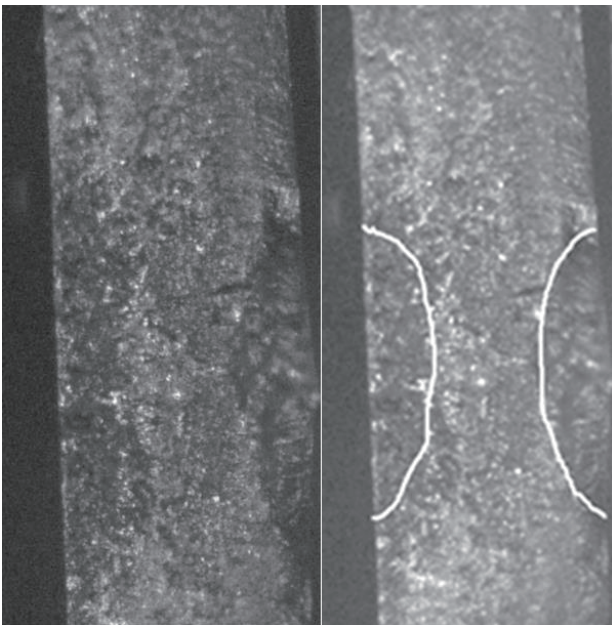


Fig.9 Crossection of fracture surface.

5. き裂進展評価

5. 1 等価応力拡大係数の算出

測定したひずみ範囲・表面き裂長さ・アスペクト比を基に等価応力拡大係数を算出した。等価応力拡大係数は、高サイクル疲労ばかりでなく、低サイクル疲労に対しても、き裂進展速度と良い相関を有することが報告されている。式(1)において f は、応力拡大係数で定義される形状係数に相当する。本研究では、き裂が無限平板中の半楕円の表面き裂であると見なし、Raju-Newman の式 (補足参照) を用いて算出した。なお、幅 W はき裂長さに対して十分長いものとした。等価応力拡大係数とき裂進展

速度 da/dN の関係を両対数で Fig.10 に示す。等価応力拡大係数とき裂進展速度の関係は両対数グラフ上で直線で近似できた。

$$\Delta K_{eq} = f \Delta \varepsilon E \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

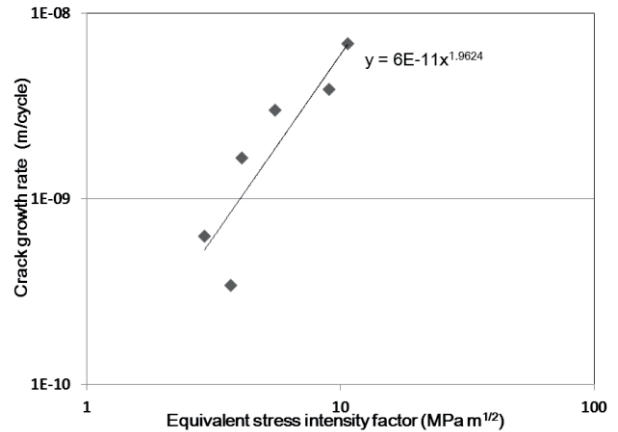


Fig.10 Relationship between crack growth rate and equivalent stress intensity factor.

5. 2 単軸疲労試験との比較

過去に得られた単軸疲労試験^[1]との比較を行った。等価応力拡大係数と進展速度の関係について、過去に採取された丸棒試験片、平板試験片、CT試験片の試験データを用いた結果の近似線と比較したものを Fig.11 に示す。本試験結果は単軸のき裂進展結果とよく対応しているが、等二軸疲労下での進展速度は、単軸疲労の速度と比べて相対的に速い傾向にある。

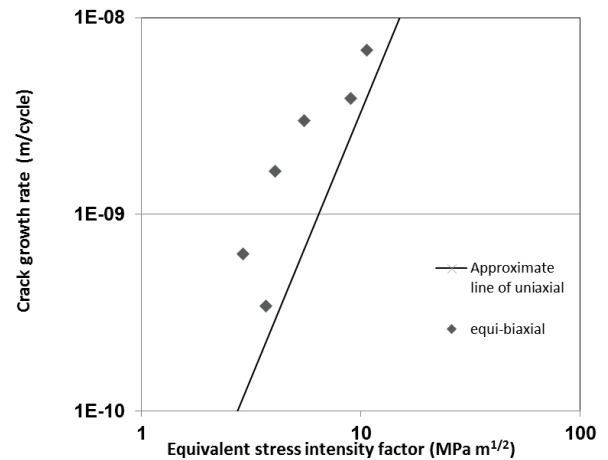


Fig.11 Comparison between equi-biaxial fatigue and uniaxial fatigue.

6. 考察

6. 1 疲労寿命との対応

過去の膜厚式疲労試験機を用いた研究では、等 2 軸疲労下での疲労寿命は、主ひずみを用いて評価を行った際、単軸疲労より短くなるという結果が報告されている。Fig.5 に示したように、試験直後から微小なき裂が発生しており、疲労寿命は微小なき裂が試験片を貫通するまでの繰返し数と見なすことができる。そして、本研究で得られた等二軸応力下での進展速度が単軸応力よりも速いという結果は、疲労寿命が短いという過去の研究結果と一致している。つまり、等 2 軸応力下では、き裂成長が加速されるために疲労寿命が低下したと考えられる。

6. 2 相当ひずみによる評価

等価応力拡大係数の算出には主ひずみを用いたが、これを相当ひずみに置き換えることを検討した。ポアソン比 ν を用いて主ひずみを $(1-\nu)$ で除することにより、主ひずみから相当ひずみに変換できる。Fig.11 の結果を相当ひずみに変換して再プロットしたものを Fig.12 に示す。ここでポアソン比は 0.3 とした。相当ひずみに変換することにより単軸試験での近似線に近づく結果が得られた。

6. 3 試験における問題点

本研究ではひずみゲージを中心に固定し測定を行ったが、中心に応力が集中するよう試験片を設計したためき裂の成長によりき裂が中心部から外れていくにつれて、ひずみの値が変動した可能性がある。き裂先端でのひずみを測定するために画像相関法を用いることで、試験片全体のひずみの把握を行うことができると考えられる。また、本研究では考慮しなかったき裂の分岐についても同様に評価できる可能性がある。

6. 4 アスペクト比の変化の影響

試験片のき裂貫通(き裂深さ 1mm)に至った際、表面き裂長さは 10mm であったことから、き裂の成長とともにアスペクト比は変化することが考えられる。アスペクト比の変化を考慮することにより、より正確に疲労損傷状態の評価が行えると考えられる。

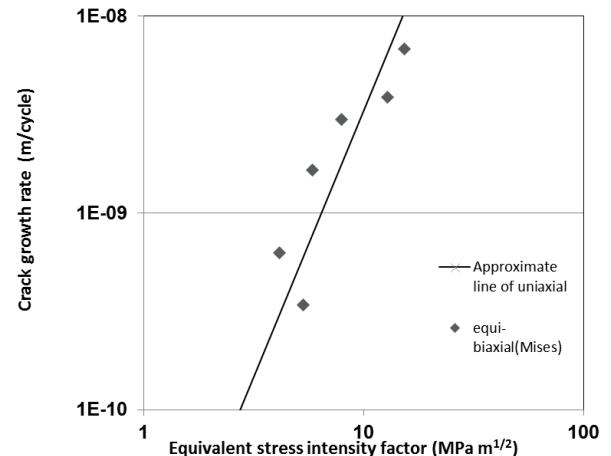


Fig.12 Comparison between equi-biaxial fatigue (Mises) and uniaxial fatigue.

7. 結論

本研究では膜厚式疲労試験機を用いて等二軸応力下における微小なき裂の長さ測定、及び等価応力拡大係数を用いた進展評価を行った。その結果、単軸応力下と比べてき裂の進展速度が速いという結果が得られた。この結果は過去に得られた疲労寿命の結果と傾向が一致している。

今後も継続して等二軸疲労試験を行い試験データを収集し、等二軸疲労によるき裂の進展挙動において単軸疲労との違いを考慮することにより、疲労寿命の評価を行うことができると考えられる。

謝辞

本研究は、原子力規制委員会、原子力規制庁からの受託研究である、「高経年化技術評価高度化事業」の一部として実施した成果である。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 釜谷昌幸、川久保政洋、“き裂成長予測による低サイクル疲労の損傷評価 (成長予測評価モデルの構築とその適用例)”, 日本機械学会論文集 (A 編) 78 巻 795 号, 2012
- [2] 釜谷昌幸、中村隆夫, ”き裂成長予測に基づく疲労評価法の検討”, 日本保全学会第 10 回学術講演会、大阪、2013、pp239-244
- [3] 辻峰史, “等二軸疲労試験のための膜厚式疲労試験装置の開発”, 学術講演会講演論文集 60, 2011; pp131-132

- [4] Masayuki Kamaya, Takashi Tsuji , “Evaluation of equi-biaxial fatigue of stainless steel by the pressurized disc fatigue test” , International Journal of Fatigue Volume 61, 2014, Pages 107–115

補足

論文中に示した Raju-Newman の式による定数 f は以下のように算出した。

$$f = \sqrt{\frac{1}{Q}} F\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \frac{c}{W}, \phi\right) \quad (2)$$

$$Q = 1 + 1.464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65} \quad (3)$$

$$F = \left[M_1 + M_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{t}\right)^4 \right] f_\phi f_w g \quad (4)$$

$$M_1 = 1.13 - 0.09 \left(\frac{a}{c}\right) \quad (5)$$

$$M_2 = -0.54 + \frac{0.89}{0.2 + \frac{a}{c}} \quad (6)$$

$$M_3 = 0.5 - \frac{1.0}{0.65 + \frac{a}{c}} + 14 \left(1.0 - \frac{a}{c}\right)^{24} \quad (7)$$

$$f_\phi = \left[\left(\frac{a}{c}\right)^2 \cos^2 \phi + \sin^2 \phi \right]^{1/4} \quad (8)$$

$$f_w = \left[\sec \left(\frac{\pi c}{2W} \sqrt{\frac{a}{t}} \right) \right]^{-1/2} \quad (9)$$

$$g = 1 + \left[0.1 + 0.35 \left(\frac{a}{t}\right)^2 \right] (1 - \sin \phi)^2 \quad (10)$$

(平成 26 年 6 月 26 日)