半楕円斜め表面き裂のき裂面部分弾性接触シミュレーションによる 残留応力下の疲労き裂伝ば挙動の予測*

辻 昌宏^{*1}, 徳増裕之^{*2}, 久保司郎^{*3}

Predictions of Propagation Behavior of Semi-Elliptical Slant Surface Cracks in Residual Stress Fields Based on Simulations of the Partial Elastic Contact of Crack Surfaces

Masahiro TSUJI^{*4}, Hiroyuki TOKUMASU and Shiro KUBO

^{**} Department of Mechanical Engineering, Osaka University,
2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

In residual stress fields, the so-called partial elastic contact of crack surfaces sometimes occurs, where a fatigue crack is closed at the crack mouth while it is open at the crack tip. The partial elastic contact has a significant effect on the lives of fatigue cracks. However there are few studies on the partial elastic contact of crack surfaces for three-dimensional cracks. In this paper, the propagation paths and lives of semi-elliptical slant surface fatigue cracks are predicted. The finite element method was employed for these simulations. The residual stress was introduced by applying an equivalent nodal force in correspondence to an initial strain to each finite element. The results of the propagation paths and lives of simulations considering the partial elastic contact of crack surfaces differed from those without the consideration of the elastic contact. Especially the estimated results of crack propagation rate sometimes brought one-order difference. These results demonstrate the necessity of simulation considering the partial elastic contact of crack surfaces.

Key Words: Simulation, Semi-Elliptical Slant Surface Crack, Partial Elastic Contact, Fatigue Crack Propagation Path, Life Prediction, Residual Stress, Finite Element Method

1. 緒 言

三次元き裂の伝ば挙動⁽¹⁾⁽²⁾を詳細に調べることは、実際の機械・構造物中において存在する傷や欠陥が三次元的であり、またそれらの健全性、寿命延伸、コスト削減等のことを考慮すれば、必要なことである。そのため、それら三次元疲労き裂の伝ば寿命推定に対する研究が行われてきたが、三次元き裂の持つ複雑性のため、そのき裂が荷重軸に対して垂直に伝ばする場合が多く扱われてきた^{(3)~(6)}。しかしながら、実際の構造物中に存在するき裂では、荷重軸に対し斜めとなっている場合が多々存在する。このような三次元斜めき裂⁽¹⁾⁽²⁾では、き裂伝ば挙動は複雑なものとなることが予想され、き裂の伝ば方向をも含めた寿命推定を行う必要も生じる。

また、これら三次元き裂に、傷やき裂等の欠陥と同様に、通常構造物中に存在すると考えられる残留応力

が重畳した場合には、さらに複雑な現象が発生すると考えられる。すなわち、き裂先端の塑性域が試験片寸法に比べて十分に小さい小規模降伏条件下において、き裂がその先端で開口し、後方で閉口する「き裂面の部分弾性接触」⁽⁷⁾が生じることが考えられる。このき裂面の部分弾性接触が、疲労き裂の寿命推定および疲労き裂の伝ば経路に大きな影響を及ぼす可能性がある。そのため、二次元き裂のき裂面の部分弾性接触に関する研究が、すでにいくつかなされている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。ことに三次元き裂では、き裂面各部の部分弾性接触の相互作用が生じ、現象がより複雑になるものと考えられる。これらの複雑な状況下における三次元き裂の伝ば挙動に関する研究は、非常に困難であるため、まったく行われていない。このため、三次元斜めき裂のき裂面部分弾性接触を考慮に入れた複合した状況下における詳細な研究が必要であると思われる。

そこで、本研究では、一般によく遭遇すると考えられる半楕円斜め表面き裂に対して検討を行う。すなわち、き裂面の部分弾性接触が容易に生じると考えられる分布型を持った残留応力場に存在する半楕円斜め表

* 原稿受付 2007年3月26日。

^{*1} 正員、大阪大学大学院工学研究科(☎565-0871 吹田市山田丘2-1)。

^{*2} 正員、三菱重工業(株)高砂製作所(☎676-8686 高砂市荒井町新浜2-1-1)。

^{*3} 正員、フェロー、大阪大学大学院工学研究科。

E-mail: mtsuji@mech.eng.osaka-u.ac.jp

面き裂に対し、き裂面の部分弾性接触を考慮に入れた疲労き裂伝ばシミュレーションを有限要素法を用いて行い、部分弾性接触が疲労き裂伝ば挙動に及ぼす影響について調べる。同時に、著者らが以前に提案した塑性等によるき裂先端の開閉口挙動を、き裂開口比 U と実効応力比 R との関係を用いることにより考慮した「 U 予測による寿命推定法」⁽⁹⁾ と「 $\Delta \sigma_\theta$ 最大説」⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ とを組み合わせることにより、三次元的に複雑な伝ば経路を示すき裂形状の推定をも試みる。

2. き裂面での部分弾性接触とシミュレーション方法

き裂が圧縮残留応力場から引張残留応力場へと伝ばするような場合、圧縮残留応力の大きさによっては、図 1 に示すように、き裂がその先端で開口し、後方付近で閉口する「き裂面の部分弾性接触」⁽⁷⁾ が生じることがある。この場合、き裂面後方では接触の発生した面から接触抗力を受けることになり、接触を考慮に入れない場合と比較して、接触を考慮に入れた場合のき裂先端近傍の応力拡大係数は大きくなると考えられる。このため、有限要素解析においてき裂面部分弾性接触を考慮に入れ、モード I の応力拡大係数 K の値が負とならないような数値シミュレーションを行うことがより現実的である。

そこで本研究では、繰返し荷重の除荷途中において、互いに向かい合うき裂面間の荷重軸方向の相対変位が負となった場合、そのき裂面上の節点を互いに固着させる弾性接触シミュレーションを行った。き裂面上の節点を互いに固着させる弾性接触シミュレーションで

は、その影響のため、解析に誤差を生じる可能性も考えられた。そこで、その拘束を解放した解析も一部行ったが、本研究の範囲では、固着後解放した際のすべりの量は比較的小さく、結果として、固着した場合と固着後解放した場合とで、伝ば経路の差は認められなかった。また、二次元き裂ではあるが、著者らが過去において行った実験の結果と、固着した場合および固着後解放した場合のシミュレーション結果との比較⁽¹²⁾の結果も、伝ば経路に顕著な差異は認められなかった。

3. 部分弾性接触を考慮に入れた応力拡大係数の具体的算出方法

き裂面の部分弾性接触が生じる場合、数値計算上、図 1(a)中に示したように、き裂面の上面と下面が部分的に重なり、応力拡大係数 K および実効応力比 R ($= K_{\min}/K_{\max}$) が負となる場合も存在する。そこで、負のモード I の K 値が生じないように応力拡大係数 K を算出した。以下に、簡単に手順を示す。

- (1) 初期残留応力分布を初期ひずみによる等価節点力として有限要素弾性解析に導入⁽¹¹⁾し、負荷応力 $\sigma_{ap} = \sigma_{\max}$ として有限要素解析を行い、最大応力拡大係数 $K_{\max}$ を求める。
- (2) 負荷応力 $\sigma_{ap} = \sigma_1$ および $\sigma_{ap} = \sigma_1 - C$ (MPa) で有限要素解析を行い、き裂面上の節点 i と、それと向かい合うもう一方のき裂面上の節点との、荷重軸方向の負荷応力 σ_1 の場合の相対変位 u_{1i} および負荷応力 $\sigma_1 - C$ の場合の相対変位 u_{2i} を求める。ただし、 C は定数であり、本研究では経験的に $C=100$ (MPa) とした。
- (3) 手順(2)で求めた二つの相対変位 u_{1i} および u_{2i} を用いて、節点 i における相対変位が 0 となるような負荷応力 $\sigma_{tch,i}$ を、次式により求める。

$$\sigma_{tch,i} = \sigma_{ap} - \frac{C \cdot u_{1i}}{u_{1i} - u_{2i}} \quad (1)$$

次に、それらの値を大きい順に並べ、その n 番目の値を新たな負荷応力 σ_{ap} とする。すなわち、ここで求めた負荷応力 σ_{ap} においては、新たに n 個のき裂面上の節点で接触が生じることになる。本研究では、 n の最大値については、経験的に 20 とした。

- (4) 手順(3)で求めた n 個の節点について、き裂面上の節点を互いに固着させる。
- (5) 手順(3)で求めた負荷応力 σ_{ap} が最小負荷応力 $\sigma_{\min}$ 以下になるまで手順(2)から手順(4)を繰り返し、 $\sigma_{\min}$ 以下の値となった場合、 $\sigma_{tch,i}$ が $\sigma_{\min}$ 以上の値をもつ節

Fig. 1 Partial elastic contact of crack surfaces

点を固着させ、負荷応力を $\sigma_{\min}$ として有限要素弾性解析を行い、その際の応力拡大係数を $K_{\min}$ とする。

以後、モードⅠの K 値が負とならないように上記の手順にしたがって応力拡大係数 K を求めた場合を、「き裂面の部分弾性接触を考慮に入れた場合」と呼び、上記の計算を行わず、従来通り負の K 値を許容して計算した場合を、「き裂面の部分弾性接触を考慮に入れない場合」と呼ぶことにする。

三次元弾性解析で用いる有限要素としては、二次の形状関数をもつ6面体20節点アイソパラメトリック要素⁽¹³⁾を用い、き裂先端近傍には Barsoum⁽¹⁴⁾の特異要素を配置した。また、初期残留応力を初期ひずみによる等価節点力として有限要素法に組み込んだ⁽¹¹⁾。き裂先端の応力拡大係数の評価には、変位法⁽¹⁵⁾を用いた。以上のように、き裂面の部分弾性接触を考慮に入れた最大応力拡大係数 $K_{\max}$ および最小応力拡大係数 $K_{\min}$ を算出し、これらの値を「 U 予測による寿命推定法」⁽⁹⁾および「 $\Delta\sigma_\theta$ 最大説」⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾に適用した。

4. 三次元斜めき裂の疲労き裂伝ば寿命推定

4・1 U 予測による寿命推定法⁽⁹⁾の概略 「 U 予測による寿命推定法」⁽⁹⁾は、モードⅠにおけるき裂伝ば^{(3)~(6)}を対象としている。本研究のようにき裂がわん曲するような場合においては、き裂先端のモードは、モードⅠ、モードⅡ、およびモードⅢの各成分が存在する混合モードとなる。したがって、寿命を推定する際にどのようなモードの K 値を採用するかが問題となる。「 $\Delta\sigma_\theta$ 最大説」⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾によれば、わん曲しながら伝ばする疲労き裂の場合においても、き裂は常に $\Delta\sigma_\theta$ が最大となる方向を選択しつつ伝ばする。それゆえ、き裂伝ば速度を支配するパラメータは、モードⅠの応力拡大係数であると考えられる。したがって、き裂伝ば速度は、繰返し荷重による ΔK_I および最大荷重時の実効応力拡大係数 $K_{I\max}$ によって支配されるものと考えられる。本研究では、以上の考えのもとに、 ΔK_I および $K_{I\max}$ を、三次元き裂前縁各点の各時点におけるき裂伝ば速度推定のパラメータとして用いた。具体的な手順を簡単に以下に述べる。

(1) 初期残留応力分布を初期ひずみによる等価節点力として有限要素法に組み込み⁽¹¹⁾、前章で説明したき裂面部分弾性接触を考慮に入れた応力拡大係数算出方法にしたがって、き裂前縁各点におけるモードⅠおよびモードⅡの最大応力拡大係数 $K_{I\max}$ および $K_{II\max}$ を算出する。また同様に、最小応力拡大係数 $K_{I\min}$ および $K_{II\min}$ をそれぞれ算出する。なお、ここで用いた有限

要素解析は、小規模降伏状態を前提とした弾性解析である。求めた $K_{I\max}$ および $K_{I\min}$ の値を次式に代入し、

$$R = \frac{K_{I\min}}{K_{I\max}} \quad (2)$$

き裂前縁各点における実効応力比 R を求める。

(2) 初期残留応力が存在しない二次元き裂試験片を用いた、疲労き裂伝ば実験の結果より、き裂開口比 U と実効応力比 R の関係を求め、この関係と実効応力比 R よりき裂開口比 U を推定する。また、次式により応力

$$\begin{cases} \Delta K_I = K_{I\max} - K_{I\min} \\ \Delta K_{II} = K_{II\max} - K_{II\min} \end{cases} \quad (3)$$

拡大係数範囲 ΔK_I および ΔK_{II} を求め、このうちの ΔK_I とき裂開口比 U から有効応力拡大係数範囲 $\Delta K_{I\text{eff}} (= U \cdot \Delta K_I)$ を推定する。

(3) 手順(2)で求めた有効応力拡大係数範囲 $\Delta K_{I\text{eff}}$ と、先の初期残留応力が存在しない二次元き裂試験片を用いた疲労き裂伝ば実験の結果より得られた、き裂伝ば速度 da/dN と $\Delta K_{I\text{eff}}$ との関係より、き裂前縁各点でのき裂伝ば速度を求める。このき裂伝ば速度から、き裂前縁各点におけるその時のき裂の伝ば増分量を決定する。

(4) 応力拡大係数範囲 ΔK_I および ΔK_{II} を用いて、「 $\Delta\sigma_\theta$ 最大説」⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾により伝ば方向を決定する。き裂前縁各点において、その求められた伝ば方向に沿って、き裂を、先ほど求めた伝ば増分量だけ伝ばさせることにより、新しいき裂前縁形状を決定する。

なお、本研究においては、モードⅢ成分も存在し、この成分がき裂伝ば方向に影響を与える可能性も考えられる。しかしながら、モードⅢ成分の寄与は小さいことと、計算の複雑さからモードⅢ成分については考慮に入れなかった⁽²⁾。

以上の一連の手順、すなわち、疲労き裂伝ばシミュレーションを繰り返すことにより、残留応力場における三次元斜め疲労き裂の伝ば経路および寿命を予測することができる。

なお、「 U 予測による寿命推定法」⁽⁹⁾を用いた疲労き裂伝ばシミュレーションには、無残留応力試験片に対するき裂開口比 U と実効応力比 R との関係、およびき裂伝ば速度 da/dN と有効応力拡大係数範囲 $\Delta K_{I\text{eff}}$ との関係が必要である。本研究では、材料として S35C 材を想定し、過去に発表したデータ⁽⁹⁾を基に、以下の式を用いた。

・き裂開口比 U と実効応力比 R との関係

$$\left. \begin{aligned} U &= \frac{1}{1.3897 - 0.8742R + 0.2397R^2} & (R < 0.52) \\ U &= 1.0 & (R \geq 0.52) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

・き裂伝ば速度 da/dN と有効応力拡大係数範囲 $\Delta K_{I\text{eff}}$ との関係

$$\begin{aligned} da/dN &= 6.13 \times 10^{-12} (\Delta K_{I\text{eff}})^{3.40} \\ (da/dN: \text{m/cycle}, \Delta K_{I\text{eff}}: \text{MPa}\sqrt{\text{m}}) \end{aligned} \quad (5)$$

4・2 疲労き裂伝ば経路を与える $\Delta\sigma_\theta$ 最大説⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ の概略 き裂伝ば方向を与えるクライトリオンとして種々のものが発表されているが、本研究においては、現在のところ、比較的物理的意味が明確と考えられ、大路ら⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾、西谷ら⁽¹⁸⁾、および田中ら⁽¹⁹⁾によって有力であることが示された「 $\Delta\sigma_\theta$ 最大説⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾」を採用した。この説に従えば、き裂は $\Delta\sigma_\theta$ が最大となる方向に伝ばする。すなわち、き裂の延長線方向からの伝ば方向のずれ θ_0 は、次式で与えられる。

$$\theta_0 = 2 \tan^{-1} \left(\frac{1 \pm \sqrt{1 + 8r'^2}}{4r'} \right) \quad (6)$$

ここで

$$r' = \frac{\Delta K_{II}}{\Delta K_I} \quad (7)$$

である。式(6)より得られる 2 根の内、大きな $\Delta\sigma_\theta$ を与える根が求めるき裂の伝ば方向を与える。ここで、 $\Delta\sigma_\theta$ は次式により与えられる。

$$\Delta\sigma_\theta = \cos\left(\frac{\theta_0}{2}\right) \cdot \left(\Delta K_I \cdot \cos^2\left(\frac{\theta_0}{2}\right) - 3 \cdot \Delta K_{II} \cdot \frac{\sin\theta_0}{2} \right) \quad (8)$$

5. 部分弾性接触を考慮に入れたき裂開閉口シミュレーション

残留応力下の斜め表面き裂の開閉口挙動に及ぼす部分弾性接触の影響を調べるため、き裂開閉口シミュレーションを行った。

5・1 解析対象および解析条件 図 2 に示した半楕円斜め表面き裂を有する平板を解析対象とした。解析対象中央部の、 $Y-Z$ 面に関して対称性があるものとし、解析対象の上下端で一様引張り荷重が作用しているものとした。図中に示したように、き裂の深さ方向

Fig. 2 Model with slant surface crack used for analysis Fig. 3 An example of finite element discretization

(Z 方向)に対してき裂がもつ角度を θ_a で表した。また、き裂の深さ方向寸法を a 、き裂の表面方向寸法を $2c$ とした。本報中では簡単のために、以後、 a をき裂深さ、および c をき裂表面長さと呼ぶことにする。

本研究では、対称性を利用して、解析対象全体の 1/2 の部分に対して三次元有限要素弾性解析を行った。解析条件を表 1 に示す。また、解析において要素分割を行うにあたり、解析対象の各方向における要素分割数および分割方法に関して与えた条件を表 2 に示す。さらに、要素分割の一例を図 3 に示す。なお、本研究において用いた「 U 予測による寿命推定法⁽⁹⁾」では、き裂先端近傍の開閉口を、き裂開口比 U と実効応力比 R との関係で考慮しているため、図 3 に示すような比較的粗いメッシュを用いても、き裂伝ばの傾向を調べることができる。

また、本研究では、材料として S35C 材⁽⁹⁾を想定した。「 U 予測による寿命推定法⁽⁹⁾」を用いた疲労き裂伝ばシミュレーションに必要な、無残留応力試験片に対するき裂開口比 U と実効応力比 R との関係式、およびき裂伝ば速度 da/dN と有効応力拡大係数範囲 $\Delta K_{I\text{eff}}$

Table 1 Conditions of analysis

Configuration of plate model	Thickness : t	20.0 (mm)
	Half width : W	20.0 (mm)
	Half length : h	80.0 (mm)
Initial crack configuration	Depth : a	6.0 (mm)
	Length : c	6.0 (mm)
	Angle : θ_a	30°
Material constants	Young's modulus : E	206.0 (GPa)
	Poisson's ratio : ν	0.3

Table 2 Conditions of finite element discretization

Number of divisions	Radial direction	8
	Longitudinal direction	6
	Circumferential direction	4
Total number of elements		240

Fig. 4 Initial residual stress distribution in Y-direction

Fig. 5 Shape of crack front

 Table 3 Ratio $r_{da/dN}$ of $da/dN_{w.o. contact}$ with consideration of elastic contact and $da/dN_{w.o. contact}$ without consideration of elastic contact ($a/t=0.3, c/W=0.3$)

$r_{da/dN}$		σ_{max} (MPa)				
		120	150	180	210	240
$\sigma_{min} / \sigma_{max}$	0.6	0.093	0.11	0.22	0.46	0.72
	0.4	0.12	0.14	0.20	0.36	0.52
	0.2	0.20	0.19	0.28	0.43	0.53
	0.0	0.27	0.32	0.37	0.46	0.53

との間の関係式としては、4・1節で示した式(4)および(5)を用いた。

本研究で用いたY方向初期残留応力のZ軸方向の分布を図4に示す。計算を簡単にするため、き裂面内にはY方向の初期残留応力分布のみが存在するものと仮定した。図4中に示した初期残留応力分布は、3枚の平板を貼り合わせる際等に発生することが予想される分布形⁽⁵⁾であり、き裂面の部分弾性接触の影響が比較的良く現れる分布形となっている。

5・2 解析結果 図5に、X-Z面へ投影したき裂前縁形状を示す。表3にき裂深さ $a/t=0.3$ 、およびき裂表面長さ $c/W=0.3$ の場合の、図5中に示したき裂前縁上の点Aにおける伝ば速度 da/dN の解析結果を示す。表中の最上段の数値は、最大負荷応力 σ_{max} を表し、最左列の数値は、最大負荷応力に対する最小負荷応力の比 $\sigma_{min}/\sigma_{max}$ を表している。また、表中の値は、次式

$$r_{da/dN} = \frac{da/dN_{w.o. contact}}{da/dN_{w.o. contact}} \quad (9)$$

に示す接触を考慮に入れない場合の伝ば速度 $da/dN_{w.o. contact}$ に対する、接触を考慮に入れた場合の伝ば速度 $da/dN_{w.o. contact}$ の比 $r_{da/dN}$ を示している。表3中に示す荷重範囲においては、き裂面の部分弾性接触が生じている。その一例として、 $\sigma_{max}=180\text{MPa}$ および $\sigma_{min}/\sigma_{max}=0.0$ の場合におけるき裂面の接触状態を

 (i) $\sigma / \sigma_{max} = 1.0$

 (ii) $\sigma / \sigma_{max} = 0.92$

 (iii) $\sigma / \sigma_{max} = 0.84$

 (iv) $\sigma / \sigma_{max} = 0.0$

 Fig. 6 Contact steps of fracture surfaces in $a/t=c/W=0.3$ ($\sigma_{max}=180\text{MPa}, \sigma_{min}/\sigma_{max}=0.0$; ○:open, ●:contact)

図6に示す。図中の中空印(○)は開口している節点を、中実印(●)は閉口している節点を表している。図6より、負荷荷重が減少するにしたがい、き裂表面部からき裂深さ方向にき裂面が閉じていく様子がわかる。最小応力荷重時にも、き裂表面方向(X方向)の先端部(図5中のき裂前縁上の点A)は開口しており、き裂面の部分弾性接触が生じていることがわかる。

また、表3より、き裂面の部分弾性接触が生じている状況下においては、接触を考慮に入れて解析を行った場合と接触を考慮に入らずに解析を行った場合とで、き裂先端点Aにおける伝ば速度 da/dN の値に1/10程度の大きな差が存在していることがわかる。さらに、負荷応力 σ_{max} が小さい程、その差は大きなものとなっていることがわかる。

6. 部分弾性接触を考慮に入れた疲労き裂伝ばシミュレーション

部分弾性接触が半楕円斜めき裂の伝ば挙動に及ぼす影響を調べるため、部分弾性接触を考慮に入れて得られるき裂先端各点のき裂開口比 U と応力拡大係数 K から伝ば速度 da/dN を計算し、これに合わせて逐次き裂を伝ばさせる疲労き裂伝ばシミュレーションを行った。

6・1 シミュレーション条件および方法 解析条件を表4に示す。疲労き裂伝ばシミュレーションにおける初期き裂寸法を、き裂深さ $a/t=0.20$ およびき裂表

Table 4 Conditions of analysis

Configuration of plate model	Thickness : t	20.0 (mm)
	Half width : W	20.0 (mm)
	Half length : h	80.0 (mm)
Initial crack configuration	Depth : a	4.0 (mm)
	Length : c	4.0 (mm)
	Angle : θ_a	30°
Material constants	Young's modulus : E	206.0 (GPa)
	Poisson's ratio : ν	0.3

Table 5 Conditions of finite element discretization

Number of divisions	Radial direction	14
	Longitudinal direction	6
	Circumferential direction	4
Total number of elements		384

面長さ $c/t = 0.20$ とした. 荷重条件を, $\sigma_{\max} = 210$ MPa および $\sigma_{\min} = 0$ MPa とした. 初期き裂角度を, $\theta_a = 30^\circ$ とした. また, 対称性を利用して, 解析対象全体の 1/2 の部分に対して三次元有限要素弾性解析を行った. 解析において要素分割を行うにあたり, 解析対象の各方向における要素分割数および分割方法に関して与えた条件を表 5 に示す.

なお, 本研究で用いた Y 方向初期残留応力の Z 軸方向の分布は, 図 4⁽⁵⁾ と同じ分布型である. ただし, 最大値および最小値は, おおの 120 MPa および -120 MPa とした.

6.2 伝ば速度の推定結果 き裂前縁に沿う, 伝ば速度 da/dN の分布を図 7 に示す. 図中の横軸は, 図 5 中に示したき裂前縁形状を表す角度 ϕ を無次元化したものである. すなわち, $2\phi/\pi = 0$ はき裂最深部に対応し, $2\phi/\pi = -1$ および 1 はき裂表面部に対応している. 図 7 中では, き裂形状の対称性により $0 \leq 2\phi/\pi \leq 1$ の範囲のみを示した. 図 7 中の中実印 (▲, ■, および●) は, き裂面の部分弾性接触を考慮に入れない

Fig. 7 Crack propagation rates along crack fronts

(a) Without considering contact

(b) With considering contact

Fig. 8 Estimated crack front shapes

い場合の解析結果を, 中空印 (△, □, および○) は, 接触を考慮に入れた場合の解析結果を表している. 図より, $a/t = 0.27$ の場合 (●, および○), $2\phi/\pi = 0$ の点, すなわち, き裂最深部においては, 接触を考慮に入れた場合の伝ば速度 da/dN の値が, 接触を考慮に入れない場合の da/dN の値に比べて, 5 分の 2 程度の大きくなっており, 両者の結果に差が生じていることがわかる.

6.3 伝ば経路の推定結果 図 8 に, 伝ば経路の推定結果を示す. 図 8 (a) は残留応力が存在し, き裂面の部分弾性接触を考慮に入れない場合, (b) は残留応力が存在し, き裂面の部分弾性接触を考慮に入れた場合の解析結果をそれぞれ示している. なお, き裂形状の対称性より, 解析対象の 1/2 の部分に対してのみ解析を行ったが, 図 8 中には, 対称性を用いてき裂全体を描いた. 図より, き裂最深部周辺の伝ば速度の差の影響のため, き裂面の部分弾性接触を考慮に入れない場合と, 考慮に入れた場合とで, き裂前縁形状に差異が生じているのがわかる.

また, 図 9 に図 8 におけるき裂中央部の深さ方向 (Z 方向: 図 9 (a)) および表面方向 (X 方向: 図 9 (b)) へのき裂伝ば経路を, 各方向について, き裂面の部分弾性接触を考慮に入れない場合と, 考慮に入れた場合と比較したものを示す. 図より, き裂中央部の深さ方向に対しては, き裂面の部分弾性接触を考慮に入れない場合

Fig. 9 Estimated crack propagation path of each direction

と入れた場合とで、わずかではあるが、両者に差が生じているのがわかる。一方、表面方向のき裂伝ば経路に対しては、両者の差はほとんど認められない。

7. 結 言

三次元斜めき裂を有する解析対象に対して、き裂面の部分弾性接触を考慮に入れた疲労き裂伝ばシミュレーションを行った。同時に、部分弾性接触を考慮に入れない疲労き裂伝ばシミュレーションも行い、両者の結果を比較・検討することにより、き裂面の部分弾性接触が疲労き裂の伝ば寿命および伝ば経路の予測におよぼす影響について調べた。得られた結果を、以下にまとめて示す。

- (1) 初期残留応力および負荷応力の大きさによっては、き裂面の部分弾性接触を考慮に入れた場合の伝ば速度の推定結果は、接触を考慮に入れない場合の推定結果に比べて、10分の1程度になる場合も存在し、き裂面の部分弾性接触が伝ば速度の推定に大きな影響を及ぼす場合が存在することがわかった。
- (2) 半楕円斜め表面き裂において、き裂面の部分弾性接触を考慮に入れない場合と入れた場合とで、き裂前縁形状およびき裂伝ば経路が異なる場合が存在する可能性が示された。

謝 辞

本研究は、学術振興会科学研究費補助金基盤研究(C)の援助を得て行われたものである。記して謝意を表す。

文 献

- (1) K. Tohgo, *Zairyou-Kyoudo Kaiseki-Gaku* (in Japanese), (2004), pp. 161-191, Uchida Roukakuho.
- (2) Y. Mi, *Three-Dimensional Analysis of Crack Growth*, (1996), Computational Mechanics Publications.
- (3) M. Tsuji, M. Togami, K. Ohji, and S. Kubo, Prediction of Propagation Behavior of A Quarter-Elliptical Corner Fatigue Crack in Clad Steel with Residual Stresses, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.62, (1996), pp.1152-1157.
- (4) K. Ohji, S. Kubo, and M. Tsuji, *Mechanical Behavior of Materials VI*, Vol.2, (1991), pp.233-239, Pergamon Press.
- (5) M. Tsuji, K. Ohji, S. Kubo, M. Togami and T. Kanazawa, Life Prediction and Observations of Crack Closure Behavior of Surface Fatigue Cracks in PMMA with Residual Stresses, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.63, (1997), pp.2290-2297.
- (6) M. Tsuji, K. Ohji and S. Kubo, *Fatigue, Fracture, and High Temperature Design Methods in Pressure Vessels and Piping*, PVP-Vol.365, (1998), pp.353-362, The American Society of Mechanical Engineers.
- (7) Y. Mukai, M. Murata and E. Kim, A proposal for Stress Intensity Factor Range Calculation Method by Partial Opening Model of Fatigue Crack Under Weld Residual Stress Field and Prediction of the Crack Propagation Behavior, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, Vol.5, (1987), pp.269-272.
- (8) A. Todoroki, H. Kobayashi and H. Nakamura, Prediction of Fatigue Crack Growth Rate in Residual Stress Field, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.54, (1988), pp.205-211.
- (9) K. Ohji, S. Kubo, M. Tsuji, H. Ogawa and K. Sakurada, Methods of Predicting Fatigue Crack Growth Lives in Residual Stress Fields, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.53, (1987), pp.1516-1524.
- (10) H. Kitagawa, R. Yuuki and K. Tohgo, K_I to K_{II} no Kongou-Mohdo-Kiretsu Karano Hirou-Kiretsu-Seichou Kyodou, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.47, (1981), pp.1283-1292.
- (11) K. Ohji, M. Tsuji, S. Kubo, Y. Ono, A. Yahata and K. Umei, Prediction of Fatigue Crack Propagation Path and Life of High-Tension Steel in Residual Stress Fields, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.59, (1993), pp.1429-1436.
- (12) M. Tsuji, S. Kubo and M. Murayama, Propagation simulations of curved fatigue cracks in residual stress fields with considering the elastic contact, *Proceedings of the 44th Japan Congress on Materials Research*, (2000-9), pp.139-140.
- (13) T. Miyoshi, *Yuugen-Youso-Hou ~Kouzou-Youso no Henkei ~Hakai-Kyodo no Kaiseki~* (in Japanese), (1976), Jikkou Shuppan.
- (14) R. S. Barsoum, On the Use of Isoparametric Finite Elements in Linear Fracture Mechanics, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.10, (1976), pp.25-37.
- (15) C. F. Shih, H. G. deLorenzi and M.D. German, Crack Extension Modeling with Singular Quadratic Isoparametric Elements, *International Journal of Fracture*, Vol.12, (1976), pp.647-649.
- (16) K. Ohji, S. Kubo, and M. Tsuji, *Residual Stress - III*, Science and Technology, Vol.1, (1992), pp.476-481,

Elsevier Science Publishers Ltd.

- (17) K. Ohji, T. Tsujikami and K. Hiraoka, Experimental Simulation of Propagating Paths of Fatigue Cracks Near or Across the Interface of Bonded Dissimilar Materials by Using the Proposed Equivalent Specimens, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.49, No.1, (2000), pp.879-884.
- (18) H. Nisitani, T. Takeno, K. Fukuyama, N. Tatibana and A. Saimoto, Fatigue Crack Propagating Behavior in A Strip and Its Simulation Analysis, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.49, (2000), pp.879-884.
- (19) K. Tanaka, Y. Akiniwa, T. Kato and H. Takahashi, Prediction of Fatigue Crack Propagation Path from A Pre-Crack Under Combined Torsional and Axial Loading, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.71, (2005), pp.607-614.