798. 複数表面欠陥からの疲労亀裂伝播挙動評価法, (I)*

表面欠陥付 SUS 304 L 鋼製平板試験片の 亀裂伝播試験結果と伝播評価法

柴田 勝之**, 横山 憲夫**,
大場 敏弘**, 川村 隆一**, 宮園 昭八郎**

(1984年 5月10日 受理)

Growth Evaluation of Fatigue Cracks from Multiple Surface Flaws, (I)

Fatigue Behavior of Flat Plate Specimen of Type 304L Stainless Steel with Surface Cracks and Evaluation of Crack Growth Behavior

By Katsuyuki SHIBATA, Norio YOKOYAMA,
Toshihiro OHBA, Takaichi KAWAMURA and Shohachiro MIYAZONO

Many studies on the growth of multiple surface cracks have been performed for the reason that this subject is of practical importance in assessing the fatigue life of structural components with flaws. However, the effect of the front free surface and the effect of interaction of multiple surface cracks on the fatigue crack growth behavior are not clear enough. In this study, the flat plate specimens of Type 304L stainless steel with multiple surface cracks were used to investigate experimentally these effects.

The empirical expressions on these effects were obtained from the fatigue test results and a method for evaluating the growth of multiple surface cracks is proposed based on these expressions. The crack growth behaviors obtained from the fatigue test were compared with the analytical results predicted by three methods, in which the proposed method is included.

KEYWORDS: *fatigue, surface cracks, flat plate, coalescence, multiple cracks, interaction, front free surface, Type 304 L stainless steel, fatigue test, crack propagation*

1. ま え が き

構造機器の非破壊検査において最も検出頻度の高い欠陥は表面欠陥であり、そのため、表面亀裂の伝播に関して実用上の重要性が強く認識され、従来多くの試験研究が行われてきた。

一方、ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. XI⁽¹⁾には、非破壊検査により発見された欠陥のプラント寿命中における伝播を考慮した欠陥許容基準が1974年版から採用されているが、表面亀裂の伝播に関する研究結果から、亀裂形状変化や複数亀裂の干渉効果について以下に述べる問題点が指摘されている。

Sec. XI では、亀裂は相似形状を保持しながら伝播するという仮定のもとに、深さ方向にのみ Paris 則⁽²⁾を適用して伝播解析を行う方法が採用されているが、一般に、表面亀裂は応力成分比や板厚に依存して形状変化することが知られている^{(3)~(5)}。したがって、信頼性の高い表面亀裂の伝播評価を行うには、形状変化も考慮する必要がある。この考えから、亀裂形状変化も含め

* 本報は、電源開発促進対策特別会計法に基づき、科学技術庁からの日本原子力研究所への委託研究「配管信頼性実証試験」のうち平板試験体の疲労試験結果をまとめたものである。

** 日本原子力研究所 (Japan At. Energy Res. Inst.)

た表面亀裂伝播予測法が川原ら⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁷⁾, Iidaら⁽⁸⁾, 飯田ら⁽⁹⁾, 安藤ら⁽¹⁰⁾によって提案されている。これらの表面亀裂伝播予測法では、深さ方向への伝播にはParis則を適用し、表面方向への伝播には実験から得られた亀裂形状変化式を用いて伝播評価を行うのが特徴である。

一方、Paris 則を表面亀裂の深さ方向と表面方向に適用することによっても、形状変化を含めた伝播予測が可能であるが、亀裂前面の自由表面の影響により良好な形状予測結果が得られない⁽¹¹⁾。この場合自由表面効果を補正する必要がある。この立場から、Newman と Raju⁽¹¹⁾は表面亀裂伝播においては表面効果により表面付近において10%程度応力拡大係数が低下すると推定して、亀裂形状変化を検討している。

他方、複数表面亀裂の伝播では亀裂の干渉効果が発生し、単一亀裂とは異なる挙動を示す。Sec.Ⅱでは、複数欠陥は深さの2倍までの接近をもって合体した単一欠陥とみなし、干渉効果もこの合体判定基準に含めている。しかし、複数亀裂の伝播を検討した上記の研究結果⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾や新井ら⁽¹²⁾による研究結果から、伝播寿命に及ぼす亀裂干渉効果は小さく、Sec.Ⅱの合体判定基準は安全裕度が大きすぎることが明らかにされている。複数表面亀裂の干渉効果について、これまで新井ら⁽¹²⁾による実験的検討、宮田ら⁽¹³⁾による有限要素法

解析例、および村上ら⁽¹⁴⁾による体積法による解析例が発表されているが、これらの結果を踏まえて合理的な干渉効果の評価基準や合体判定基準を確立していく必要がある。

そこで本研究では、複数表面亀裂の伝播における自由表面効果および亀裂干渉効果を実験により定量的に把握するとともに、これらを考慮した表面亀裂の伝播予測法を検討することを目的として、複数表面欠陥付平板試験片の亀裂伝播試験を実施した。

以下では、1個または2個の初期欠陥付平板試験片により行なった3ケースの亀裂伝播試験結果について述べ、自由表面効果および複数表面亀裂干渉効果を検討する。また得られた評価式を基に、形状変化を含めた複数表面亀裂の伝播予測法を提案するとともに試験結果との比較も行う。さらに、提案した予測法を用いて応力成分比と形状変化との関係および非合体隣接亀裂判定法を検討する。

Ⅱ. 試験方法

平板試験片の疲労試験は、1個または2個の人工欠陥を加工した SUS 304 L ステンレス鋼製試験片を用いて行なった。供試材の化学成分および機械的性質を Table 1 に、試験片形状を Fig. 1 に示す。

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of tested SUS 304L stainless steel plate

Chemical compositions								Mechanical properties†		
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	0.2% YS	UTS	Elong.
max	max	max	max	max	18.00~	8.00~	max	min	min	min
0.02	1.00	2.0	0.04	0.03	20.00	12.00	0.12	206 MPa	520 MPa	30%
0.010	0.45	1.50	0.026	0.008	18.41	10.33	0.10	234	564	73.0

† Mean value of two specimens, $GL=56$ mm, $d=10$ mm

Fig. 1 Geometry of flat plate specimen

疲労試験は容量1,000 kNの油圧式疲労試験機を用いて、応力範囲 $\Delta\sigma=137.3$ MPa、応力比 $R=0.05$ の軸力繰返し荷重により、室温、大気中で行なった。試験条

件、人工欠陥位置、間隔を Table 2 に示す。Table 2 のように、欠陥数と間隔を変えた試験を3ケース行なった。疲労試験においては、顕微鏡による表面方向の亀裂長さ測定を行うとともに、亀裂深さおよび亀裂形状を把握するため、ビーチマーク法による亀裂伝播測定を各試験片とも10回程度行なった。各ケースについて同一条件の試験を2回ずつ実施した。

疲労試験は亀裂が板厚を貫通するまで行い、その後疲労破面を切り出してビーチマーク観察を行なった。

Photo. 1 に疲労破面を示す。これらの破面写真からわかるようにほぼ良好なビーチマーク模様を得られている。測定結果から深さ方向および表面方向について亀裂伝播挙動を良好に把握できた。

Table 2 Test conditions of flat plate specimens

Case No. (Specimen No.)	Case 1 (FL-1, FL-2)	Case 2 (FL-3, FL-4)	Case 3 (FL-5, FL-6)
Items			
Number of cracks and Crack interval
Stress range	$\Delta\sigma = 137 \text{ MPa}$		
Stress ratio	$R = 0.05$		
Geometry of test section	24 mm t $\times$ 200 mm W		
Geometry of EDM defect	5 mm depth $\times$ 12 mm length		
Cyclic rate	$f = 7 \text{ Hz}$		

Ⅲ. 試験結果

1. 自由表面の影響の検討

軸力荷重下における半円表面亀裂表面点における応力拡大係数解は最深部より10%程度高く得られるのが普通であるが⁽¹¹⁾⁽¹⁵⁾、このことは、亀裂伝播速度は応力拡大係数によって一義的に定まるという従来の研究結果を前提にすれば、表面亀裂は1.0以下のアスペクト比へと均衡して成長しなければならないことを示している。

しかし、後に示すように平板試験から得られた亀裂のアスペクト比は、表面において遅れが生じるため1.0を越える部分があり、上記のことに矛盾する。このことは、亀裂前面における自由表面効果によると考えられる。すなわち、亀裂前面では自由表面があるため平面応力状態であり、内部へ行くに従って拘束が大きくなり平面歪状態となってくる。そのため、表面付近では内部より塑性変形が生じ易くなる。

自由表面付近で亀裂伝播が遅れる理由は、以上のような事情によると考えられるが、この亀裂前面における効果は、これまでに得られている応力拡大係数解析結果には考慮されていない。そこで、ここでは平板試験結果に基づき次の方法で表面効果補正係数を導く。

Fig. 2は、各試験結果について表面および最深部の亀裂伝播速度と応力拡大係数範囲との関係を示したものである。応力拡大係数は、NewmanとRaju⁽¹¹⁾によって得られた解を用いた。同図には、後述する中央亀裂試験

片の亀裂伝播試験結果についても破線で示す。

同図から明らかなように、応力拡大係数範囲と亀裂伝播速度との関係は最深部と表面で異なり、表面の方が伝播速度が低くなっている。表面における db/dN vs. ΔK_B 曲線は最深部における da/dN vs. ΔK_A 曲線

Fig. 2 Relationship between crack growth rate and range of stress intensity factor in thickness and surface direction

Photo. 1 Appearance of fatigue cracked surface

に対して大略平行である。また、 da/dN vs. ΔK_A 曲線は、材料の亀裂伝播特性である中央亀裂試験片の試験結果に大略一致している。以上のことから、表面における伝播速度 db/dN を評価するための補正として、Fig. 2における db/dN vs. ΔK_B 曲線を平行移動した $\Delta K_{eff, B} = C_{f, B} \Delta K_B$ の補正が近似的に可能であると判断される。Fig. 2から次の補正係数が得られる。

$$C_{f, B} = \Delta K_{B, eff} / \Delta K_B = 0.824 \quad (1)$$

2. 隣接亀裂の干渉効果の検討

試験結果から得られた亀裂伝播曲線において、貫通までの寿命の大半は亀裂が小さい期間で占められているので、隣接亀裂の干渉効果は、亀裂伝播寿命の全体には余り影響を及ぼさない。しかし、Photo. 1におけるピーチマーク破面からわかるように、隣接亀裂内側への伝播長さは外側への伝播長さに比べ大きくなっており、亀裂の干渉が内側においてより大きく生じていることを示している。

Fig. 3は表面での伝播速度について内側と外側の伝播速度比 α と亀裂の接近度 λ との関係を示したものである。ただし、FL-4のデータについては左右の亀裂がアンバランスに進展し、正しく評価できないので除外した。同図において、亀裂が合体点($\lambda=1$)に近づく

につれて α が大きくなり干渉効果が生じていることが明らかである。

図における α は、主に亀裂接近度 λ に依存し、またアスペクト比 β にも依存すると考えられるが、以下、同図をもとに亀裂干渉効果を検討する。

2個の隣接表面亀裂の内側表面点に対する干渉効果 $C_{it} = (K_{B, inside})_{two-crack} / (K_B)_{single-crack}$ は、次のように考えられる。すなわち、亀裂が接近すると干渉効果が大きくなり ($C_{it} \rightarrow \infty$)、遠ざかる場合には次第に消失する ($C_{it} \rightarrow 1$)。また、亀裂長さおよび亀裂間隔が同一であっても、 β が大きく深い亀裂に対して干渉効果はより大きく、この場合 β の増加に従って2個の貫通亀裂の干渉効果に漸近し、逆に β がゼロに近づく場合は干渉効果はなくなる ($C_{it} \rightarrow 1$) と考えられる。

一方、外側表面点に対する干渉効果 $C_{eo} = (K_{B, outside})_{two-crack} / (K_B)_{single-crack}$ は、内側と同様の傾向であるが内側よりかなり小さく、合体位置において有限値となる。また、 C_{eo} の上限も等長貫通亀裂の外側の干渉効果 C_{eo} に漸近すると考えられる。 C_{eo} の値は、 $\lambda=0.9$ で1.12、合体点($\lambda=1.0$)において $\sqrt{2}$ であり⁽¹⁶⁾、表面亀裂の場合はそれよりさらに小さくなるので、 β が大きくない場合は、外側表面点に対する干渉効果は無視しても問題はないと考えられる。

Fig. 3 Influence of adjacent crack on crack growth rate of surface direction db/dN in inside of two cracks

以上の考察から、Fig. 3 の α は近似的に単一欠陥との伝播速度比としても大きな誤差はない。すなわち、

$$\alpha = \frac{(db/dN)_{\text{inside}}}{(db/dN)_{\text{outside}}} = \frac{(db/dN)_{\text{inside}}}{(db/dN)_{\text{single}}} \quad (2)$$

一方、2 個の等長貫通亀裂の応力拡大係数は石田⁽¹⁶⁾により解が得られており、この解から得られる内側の干渉効果 C_{it} は次の通りである。

$$C_{it} = K_{\text{inside}} / K_{\text{single}} = \frac{(1+\lambda)^2 E(\phi) / K(\phi) - (1-\lambda)^2}{2\lambda\sqrt{1-\lambda}} \quad (3)$$

ここで、 $\phi = 2\sqrt{\lambda} / (1+\lambda)$

亀裂伝播則に Paris 則を適用すれば、2 個の等長貫通亀裂と単一亀裂との伝播速度比 α_i は次の通りである。

$$\alpha_i = \left\{ \frac{(1+\lambda)^2 E(\phi) / K(\phi) - (1-\lambda)^2}{2\lambda\sqrt{1-\lambda}} \right\}^m \quad (4)$$

ここで、表面亀裂の干渉効果の上限が貫通亀裂の干渉効果に一致することを考慮すると、 $\beta \rightarrow \infty$ で $\alpha \rightarrow \alpha_i$ 、 $\beta \rightarrow 0$ で $\alpha \rightarrow 1.0$ となるので、この関数形を次のように仮定する。

$$\alpha = \alpha_i \frac{\beta^n}{A + \beta^n} \quad (5)$$

Fig. 3 に示す実験データを基に、 A および n の最適値を求めた結果 $A=0.46$ 、 $n=2.1$ が得られた。

(4)、(5)式から表面亀裂の内側表面点での干渉効果について次式が得られる。

$$C_{it} = \alpha^{1/n} = \left\{ \frac{(1+\lambda)^2 E(\phi) / K(\phi) - (1-\lambda)^2}{2\lambda\sqrt{1-\lambda}} \right\}^{\beta^{2.1} / (0.46 + \beta^{2.1})} \quad (6)$$

Fig. 3 における実線は、 $\beta=0.9$ として(5)式を用いて描いたものであり、また各実験点は β が 0.9 以上のものと 0.9 以下のものに区別してプロットしたものである。データにはバラツキがあるが、アスペクト比依存性が認められる。Fig. 4 は、村上、西谷⁽¹⁴⁾によって求められた等大半楕円亀裂の干渉効果の計算結果、および新井、井野ら⁽¹²⁾によって得られた実験式と(6)式とを比較したものである。新井らの実験式にはアスペクト比の効果は考慮されていないが、この式はほぼ貫通亀裂の干渉効果に一致し、若干大きな値を与えると思われる。(6)式は村上らの解析結果と比較し、 $\beta=1.0$ では若干大きな値を与え、 $\beta=0.5$ では逆の傾向を示しているがほぼ妥当と思われる。したがって、アスペクト比依存性については(6)式により良好に評価されると思われる。

表面亀裂の干渉効果は、最深部に対しても存在する

が、村上らの結果からもわかるように無視しても問題はないと考えられる。

Fig. 4 Comparison of crack interaction effect of surface cracks

上記の試験結果から得られた表面効果係数および干渉効果係数の実験式を用いることにより、次に示す手順で、これらを考慮した複数表面亀裂の伝播予測を行うことができる。

- (1) 亀裂形状は、ASME Code Sec. II と同様に半楕円形状にモデル化する。
- (2) 荷重条件から断面における $\Delta\sigma_m$ 、 $\Delta\sigma_s$ を求め、これと亀裂形状から Newman と Raju⁽¹¹⁾ の解を用いて、最深部の応力拡大係数範囲 ΔK_A および表面の応力拡大係数範囲 ΔK_B を求める。

さらに、 ΔK_B については(1)、(6)式を用いて次のように補正する。

$$\Delta K_{B, \text{eff}} = C_{fs} C_{it} \Delta K_B$$

ただし、左右の亀裂寸法が異なる場合は、亀裂間のリガメントを同一寸法とし、深さおよび長さ大きい方の値を持つ、等大半楕円亀裂に置き換えて C_{it} を評価するものとする。

- (3) 得られた ΔK_A 、 $\Delta K_{B, \text{eff}}$ を基に、材料の亀裂伝播特性 (da/dN vs. ΔK 曲線) を用いて、1 サイクル当りの Δa 、 Δb を求める。
- (4) $a = a + \Delta a$ 、 $b = b + \Delta b$ として次のステップの計算を行う。ただし、亀裂の合体は隣接亀裂が接した時に生ずると仮定し、合体後は新たに最深部と長さ最大を両軸の半径とする単一の半楕円亀裂になると仮定して亀裂形状を更新する。

Table 3 に、ASME Code Sec. II の方法と本法との比較を示す。この比較からわかるように、本法は次の点が特徴となっている。

- (1) 表面亀裂の伝播における表面効果および隣接亀裂の干渉効果が予測中に含まれている。

Table 3 Comparison of two analytical procedures

Method Items	Method I (ASME Code Sec. XI)	Method II (Present study)
Model for analysis	Flat plate with single or multiple semi-elliptical cracks subjected to membrane and bending stresses	
Criteria for crack coalescence	Coalescence: $s = 2a_1$, $a_{coal} = a_1$ $b_{coal} = b_1 + b_2 + S/2$	Coalescence: $s = 0$, $a_{coal} = a_1$ $b_{coal} = b_1 + b_2$
Interaction of adjacent cracks	Included in the crack coalescence criteria	$C_{si} = \left(\frac{(1+\lambda)^2 E(\phi)/k(\phi) - (1-\lambda)^2}{2\lambda\sqrt{1-\lambda}} \right)^{\frac{\beta^{2.1}}{0.46+\beta^{2.1}}}$ $k_{Beff} = C_{si} k_B$
Influence of front free surface	Neglected	$C_{fs} = 0.824$, $k_{Beff} = C_{fs} k_B$
Application of crack growth formula	Thickness direction, only; Surface length is determined by the assumption that cracks grow geometrically similarly	Thickness and surface directions; Change of the crack shape can be evaluated reasonably

(2) 亀裂伝播則を深さ方向と表面方向にそれぞれ独立して適用するので、亀裂形状変化が適切に予測できる。したがって、Sec. XI で採用しているアスペクト比一定の仮定によって生ずるような不都合は生じない。

(3) 干渉効果および亀裂形状変化を適切に評価するので、合体の判定方法についても Sec. XI の場合より合理的であり、明確となっている。

IV. 伝播予測結果と試験結果との比較

平板試験片の疲労試験結果から得られた表面亀裂の伝播挙動に関し、本章では以下に述べる予測法 I ~ III による亀裂伝播予測を行い、試験結果と比較する。

予測法 I は ASME Code Sec. XI に規定された方法であり、予測法 II は前章で提案した方法である。さらに、予測法 III は予測法 II において干渉効果および表面効果を考慮しない予測法、すなわち干渉効果および表面効果の補正係数を 1.0 とした場合である。

上記の方法による亀裂伝播予測を行うには、材料の亀裂伝播特性、 da/dN vs. ΔK 曲線が必要であり、このデータは、平板試験片と同一の板材から中央切欠き試験片(幅160mm×板厚10mm)を製作し、その疲労試験結果から求めた。Fig. 5 に、得られた da/dN vs. ΔK 曲線を示す。各予測法による亀裂伝播予測は、Fig. 5 に示す上下限のバンド幅で行い、平板試験結果と比較した。

Fig. 5 Material da/dN vs. ΔK curve of SUS 304 L stainless steel plate

Fig. 6 (a) にケース 1 について、予測法 I ~ III による予測結果と試験結果との比較例を示す。同様に、Fig. 6 (b), (c) には、ケース 2, 3 について予測結果と試験結果との比較例を示す。Fig. 6 (a) ~ (c) からわかるように、

Fig. 6(a)~(c) Comparison of crack growth curves between test results and analytical results by Method I, II and III for Cases 1~3 test results

Fig. 6(b) Case 2

Fig. 6(c) Case 3

予測法Ⅰはいずれの試験結果に対しても短寿命側の結果を与えている。特にケース2, 3に対して, 試験結果に比べて亀裂が小さいうちに合体条件に達し, 非常に短寿命側の評価となっている。このことからSec.Ⅱにおける合体判定基準は大きすぎる安全裕度を有すると思われる。

一方, 各ケースの試験結果は, 本報で提案した予測法Ⅱによる伝播予測結果に対して, いずれも予測値の上限と下限のバンド幅の中に入っており, また合体が起こる亀裂深さの予測値も良好である。さらに, 表面効果および亀裂干渉効果を補正しない予測法Ⅲは, いずれの場合も試験結果より短寿命側の予測値を与えており, これらの補正が必要であることを示している。したがって, 補正を導入した予測法Ⅱは, 最も試験結果に近い亀裂伝播予測値を与えることが以上のことから明らかである。

次に, 亀裂伝播に伴う亀裂形状の変化をアスペクト比(a/b)と無次元化した亀裂深さとの関係で求め, 各予測法から得られた結果と試験結果との比較例を, ケース1~3についてFig.7(a)~(c)に示す。

これらの図から, いずれの試験結果においても, 亀裂伝播に伴ってアスペクト比は初期値($\beta=0.83$)から増加し, a/t が0.5程度で1.0~1.2の最大値となり, その後減少していくことがわかる。Sec.Ⅱでは相似亀裂形状が保持されるという仮定を導入しているの, 予

測法Ⅰによるアスペクト比は, 合体位置まで一定値を保ち試験結果とは一致しない。また, 試験結果と比較して亀裂がかなり浅いうちに合体条件に達していることは, Fig.7(b), (c)からも明らかである。

一方, 予測法Ⅱはいずれも試験結果の傾向と良く一致する。単一欠陥の場合 a/t が0.7以上になると, 試験結果から得られたアスペクト比の減少の割合は予測法Ⅱより大きくなり, 試験結果は予測値より若干小さなアスペクト比を示すようになる。

(a) FL-1 specimen

(b) FL-3 specimen

(c) FL-5 specimen

Fig.7(a)~(c) Change in aspect ratio with crack growth in FL-1, -3 and -5 specimens

Newman と Raju の解は、 a/t が 0.8 程度まで適用可能であり、予測法Ⅱによる亀裂形状変化の予測値も $a/t=0.8$ 程度までは良好である。また、ケース 2 に対しては、合体時の亀裂深さの予測値も良好であり、 a/t が 0.8 までの範囲では予測法Ⅱにより良好に合体時の亀裂深さも予測できると判断される。ケース 3 の試験結果では、予測値より浅い位置で合体が起きており背面の効果や応力拡大係数解の誤差が生じていると思われる。予測法Ⅲの結果は、予測法Ⅱよりかなりアスペクト比の変化が平坦であり、予測法Ⅱほど試験結果に対して良く一致していない。

以上から、予測法Ⅱによる伝播予測結果は、伝播寿命、亀裂形状変化および亀裂合体のいずれに対しても、おおむね良好な予測値を与えていることがわかる。

V. 亀裂形状変化および非合体 亀裂判定法の検討

複数表面亀裂の伝播評価においては、寿命評価とともに形状変化や隣接亀裂の合体深さの判定も重要である。そこで、本章では応力成分比をパラメータとして亀裂形状変化および非合体隣接亀裂判定法を検討する。

本研究で提案した伝播予測法では、表面点および最深点の応力拡大係数を基にして伝播速度を求め、順次亀裂寸法を拡大する方法を採っているが、一般に、 a_0/t および β_0 を初期値として与え、 a/t を順次大きくしてゆけば β の変化を求めることができる。この形状変化を亀裂間隔 d/t および応力成分比 σ_0/σ_m をパラメータとして求めることにより、隣接亀裂が合体前貫通か、または合体後貫通かの判定が可能である。Fig. 8 は、特定の R_m 値に対して d/t をパラメータとして合体時亀裂深さ (a_{coal}/t) と d/t との関係を a_{coal}/t が 0.9 付近まで求め、これを外挿することにより $a_{\text{coal}}/t=1.0$ 、すなわち合体と貫通が同時に生ずる臨界点の亀裂間隔 (d_{crit}/t) を推定し、 R_m との関係を図示したものである。同図から隣接亀裂の貫通前合体か否かの判定が可能である。すなわち、同図に示す推定値をもとに安全側の非合体隣接亀裂判定基準として次式が得られた。

$$d_{\text{non-coal}}/2t \pm \geq 1.6R_m^{-0.6} \quad (7)$$

一方、川原ら⁽⁷⁾は隣接亀裂の干渉効果を考慮し、さらに実験的に求めた亀裂形状変化式を基に隣接亀裂の合体時深さの推定法を提案しているが、川原らの方法から得られる $d_{\text{crit}}/2t$ と R_m との関係は Fig. 8 から明らかにように、(7)式とおおむね一致している。

Fig. 8 Critical interval of two collinear surface cracks to discriminate between coalescence and non-coalescence before penetration

VI. 結 論

複数表面亀裂の伝播挙動に関し、自由表面の効果および亀裂の干渉効果を明らかにするため、単数または複数表面欠陥付平板試験片により軸力荷重下における亀裂伝播試験を 3 ケース実施した。

試験結果から、オーステナイトステンレス鋼に対する表面効果係数および複数亀裂の干渉効果係数について、次の実験式が得られた。

$$C_{fs}=0.824$$

$$C_{it} = \left\{ \frac{(1+\lambda)^2 E(\phi)/K(\phi) - (1-\lambda)^2}{2\lambda\sqrt{1-\lambda}} \right\}^{\beta^{2.1}/(0.46+\beta^{2.1})}$$

また、表面における有効応力拡大係数は次のように表わされる。

$$K_{B, \text{eff}} = C_{fs} \cdot C_{it} K_B$$

平板試験の結果について、ASME Code Sec. VII による亀裂伝播解析との比較を行うとともに、上記の補正係数を基にした表面亀裂の伝播予測法を提案し、この予測法による亀裂伝播予測、および補正をしない場合の亀裂伝播予測を行い、これらと試験結果とを比較した。さらに、提案した予測法を基に亀裂形状変化および隣接亀裂合体判定法について検討した。

以上の結果から次の結論が得られた。

- (1) ASME Code Sec. XIにおける合体判定法は、大きな安全裕度を有すると考えられる。さらに、同コードに導入されている同一亀裂形状保持の仮定は試験結果から判断して妥当とはいえない。
- (2) 本研究で提案している表面亀裂伝播予測法は、亀裂形状変化および亀裂合体位置の予測に関して試験結果と良く一致し、また伝播寿命予測も良好である。
- (3) 複数表面亀裂伝播において、隣接亀裂内側表面点では明らかに干渉効果が認められるが、亀裂伝播寿命には大きな影響を及ぼさない。一方、亀裂伝播寿命に及ぼす自由表面効果は大きく、これを無視した場合、良好な伝播挙動予測はできない。
- (4) 本研究で提案した方法による亀裂形状変化の計算結果から、非合体隣接亀裂の判定式が得られた。

〔記 号〕

- a : (1) 貫通亀裂半長 (mm)
 (2) 表面亀裂深さまたは半楕円亀裂深さ (mm)
 a_{coal} : 合体時の亀裂深さ (mm)
 b : 表面亀裂の $\frac{1}{2}$ 長さ、または半楕円亀裂の $\frac{1}{2}$ 表面長さ
 C_{fs} : 自由表面効果補正係数
 C_{it} : 複数表面亀裂の内側表面点の干渉効果係数
 C_{eo} : 複数表面亀裂の外側表面点の干渉効果係数
 C_{is} : 複数貫通亀裂の内側の干渉効果係数
 d : 複数亀裂の中心間隔 (mm)
 $E(K)$: 第2種完全楕円積分 $\left(= \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-K^2 \sin^2 \theta} d\theta \right)$
 $K(K)$: 第1種完全楕円積分 $\left(= \int_0^{\pi/2} d\theta / \sqrt{1-K^2 \sin^2 \theta} \right)$
 ΔK : 応力拡大係数範囲 (MPa $\sqrt{m}$)
 ΔK_{eff} : 有効応力拡大係数範囲 (MPa $\sqrt{m}$)
 K_A : 半楕円亀裂最深点の応力拡大係数 (MPa $\sqrt{m}$)
 K_B : 半楕円亀裂表面点の応力拡大係数 (MPa $\sqrt{m}$)
 m : Paris 則における ΔK のべき乗指数
 N : 繰返し数 (cycle)
 s : 亀裂間の表面におけるリガメント (mm)
 α : 亀裂伝播速度比
 α_t : 貫通亀裂における複数亀裂内側と単一亀裂の伝播速度比

β : 表面亀裂または半楕円亀裂のアスペクト比

$$(\beta = a/b)$$

D : 増分または範囲を表わす

λ : 亀裂間のリガメント係数

$$(\lambda = (b_1 + b_2)/d = 1 - s/d)$$

$\phi = 2\sqrt{\lambda}/(1+\lambda)$, $\Delta\sigma$: 応力範囲 (MPa)

σ_0 : 曲げ応力 (MPa), σ_m : 膜応力 (MPa)

本報をまとめるにあたり、東京大学工学部 船舶工学科 飯田國廣教授より有益な教示ならびに討論を賜った。試験研究の遂行にあたっては、日本原子力研究所 東海研究所 能沢正雄 副所長、大洗研究所 森島淳好 所長ならびに 安全性試験研究センター 桂木 学 センター長より多くの支援と協力を賜った。

また、構造安全性研究委員会(委員長 安藤良夫 東大名誉教授)の委員各位より多くの討論を賜った。

各位には心より感謝致します。

— 参 考 文 献 —

- (1) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. XI, (1974 Ed.).
- (2) PARIS, P.C., ERDOGAN, F.: *Trans. ASME, Ser. D*, 85(4), 528 (1963).
- (3) IIDA, K., KAWAHARA, M.: *IIW Doc. XII-790-75*, (1975).
- (4) 川原正言, 栗原正好: 造船学会論文集, No. 137, 297 (1975).
- (5) 飯田國廣, 高 允宝: 同 上, No. 147, 203 (1980).
- (6) 川原正言, 栗原正好: 同 上, No. 139, 234 (1976).
- (7) 同 上: 同 上, No. 141, 250 (1977).
- (8) IIDA, K., KAWAHARA, M.: *Proc. 4th Int. Conf. PVT*, Vol. 1, London, (1980).
- (9) 飯田國廣, 安藤 清, 平田隆明: 造船学会論文集, No. 148, 284 (1980).
- (10) 安藤 清, 平田隆明, 飯田國廣: 同 上, No. 153, 352 (1983).
- (11) NEWMAN, J.C., Jr., RAJU, I.S.: *NASA-TP-1579*, (1979).
- (12) 新井淳一, 井野幸雄, 岩城秀夫: 機械学会論文集 (A) 48 [437], 29 (1983).
- (13) 宮田 寛, 楠本 韶: 同 上, 45[391], 252 (1979).
- (14) 村上敬宜, 西谷弘信: 機械学会論文集 (A), 47[415], 296 (1981).
- (15) KOBAYASHI, A.S.: *2nd ICM*, (1976).
- (16) 石田 誠: “亀裂の弾性解析と応力拡大係数”, (1976), 培風館.