

(昭和 47 年 10 月日本造船学会秋季講演会において講演)

表面欠陥からの疲労亀裂伝播特性について

(第 1 報)

正員 金 沢 武* 正員 町 田 進*
正員 糸 賀 興 右**

Fatigue Crack Propagation from a Surface Flaw

by Takeshi Kanazawa, *Member* Susumu Machida, *Member*
Kouyū Itoga, *Member*

Summary

The characteristics of fatigue crack propagation from a surface flaw under cyclic bending stress are studied experimentally and the propagation rate is related to the stress intensity factor range.

Measurement of crack configuration is made using electric-resistance probe method. The stress intensity factor for semi-elliptical surface crack is calculated using stress intensity magnification factor proposed by Kobayashi et al.

It is concluded that the initial flaw size has little effect on fatigue crack propagation rate, but the range of applied load has considerable effect. This suggests that the maximum value of stress intensity factor should be taken into account as well as the stress intensity factor range.

Fatigue crack propagation rate in bending test is compared with that in tensile test. It is shown that the former is a little lower than the latter.

1 緒 言

構造物の破壊に対する安全設計は 2 つの点から考慮されねばならない。構造物の破壊は、設計上・工作上の問題による欠陥、および材料に内在する欠陥などから起こると考えられる。構造物にとって最も危険なのは脆性破壊であり、多くの研究の成果にたつて、設計・工作法が改良され、優れた材料が開発されてきた。

脆性破壊に関連して重要な問題の 1 つに、疲労亀裂の進展がある。疲労破壊は亀裂が安定成長するので、初期の段階ではその限りにおいて脆性破壊ほど構造物にとって致命的とはなりえない。しかし、それがかなりの大きさに成長した場合は、脆性破壊への移行の危険性などを含めて、構造物全体の破壊につながることもありうる。また圧力容器などでは亀裂が板厚を貫通することによって内容物の漏洩が起こり、構造物の機能を失うのみか、人命の危険につながることもありうる。

これまでの破壊強度設計は、現象の相違・破壊機構の相異から上述の 2 つの面から独自に行われてきたが、最近では欠陥の評価という点に着目した総合的な研究が行われはじめた¹⁾。しかしながら、その為にはそれぞれの分野において各種のデータを積み上げる作業が不可欠であるいっぽう、構造物の破壊に対する安全性を目指すという共通の総合的視野にたつことにより、個別的研究の方向が明らかにされるべきであろう。

著者らはこうした観点から、crack-like defect として最も一般的と考えられる表面切欠から進展する疲労亀裂の挙動を詳細に研究する必要があると考えた。脆性破壊にしても疲労破壊にしても、その発生点は材料自体に内在する欠陥、設計・工作上の欠陥などの応力・ひずみ集中部であり、最も危険な箇所はそれらが重畳した溶接部である。溶接部には、溶接割れ、アンダーカット、溶着不良、スラグ巻き込み、気泡など種々の欠陥が生ずる

* 東京大学工学部

** 東京大学工学系大学院

危険があり、これらに溶接残留応力、熱影響による材質劣化、構造上の不連続による応力集中などが重なる可能性があり、破壊に影響をおよぼす因子を1つ1つ取り出して検討する必要がある。表面切欠は、溶着金属に生ずる縦割れ、横割れ、dentなどの表面キズをモデル化したものであり、本論文ではそれが変動荷重を受けた場合、どのような成長を遂げるかをしらべ、破壊力学的立場からこれを解析した。結果は十分とはいえないが、本研究はなお続行中であり、その後の成果については別に報告する予定である。

2 表面半楕円亀裂の K 値の解析

2.1 疲労亀裂伝播速度と K 値の関係

疲労亀裂の伝播速度に関する研究は、これまで多数の研究者により行われてきた。材料の分離・破壊を支配する力学的パラメータは応力 (力)、ひずみ (変形)、エネルギーといった物理量であると考えられる。したがって、疲労亀裂の伝播速度は一般に

$$\frac{dl}{dN} = f(\sigma', \epsilon') \quad (1)$$

ここに l : 亀裂長さ
 N : 繰返し数
 σ' : 応力
 ϵ' : ひずみ

という形に表わされうると考えられる。ここに σ' と ϵ' は疲労亀裂先端近傍の局所的な応力とひずみと考えるのが妥当であろうが、応力とひずみの間には一定の関係があり、局所的な応力と外応力 (applied stress) σ や亀裂の大きさ、亀裂を含む構造要素の形状・寸法などとは一定の関係があるわけであるから、結局疲労亀裂伝播速度は σ および幾何学的因子 L の関数として表わされよう。 L のうち最も支配的なのは亀裂長さ l であるから疲労亀裂伝播速度は近似的に

$$\frac{dl}{dN} = f(\sigma, l) \quad (2)$$

と表わされよう。幾多の実験の結果、(2) 式の右辺はほぼ

$$\frac{dl}{dN} = A(\Delta\sigma)^m \cdot l^n \quad (3)$$

ここで $\Delta\sigma$: 応力振幅
 A, m, n : 材料定数

という形で表わされることが知られている。

Frost ら²⁾ は荷重制御疲労伝播試験の結果、 $m=3, n=1$ であるとした。Liu³⁾ は疲労亀裂の成長は線形破壊力学の理論に従うと考え、 $m=2n$ とした。さらに疲労亀裂進展率はサイクル毎になされる塑性仕事に比例し、塑性仕事は塑性域の大きさに比例するというエネルギー論的考察から $m=4, n=2$ であるとした。また、Paris⁴⁾ も Liu と同様な考察から、

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^4 \quad (4)$$

ここで ΔK : K 値 (Stress Intensity Factor) の振幅

C : 材料定数

を導き、多くの金属について (4) 式が成り立つことを実験的に確かめている。

以来疲労亀裂伝播速度に関する研究は Paris の疲労亀裂進展法則を基にして行われてきたが、現在では (4) 式の指数 4 を一般化し

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (5)$$

ここで C, n : 材料定数

として研究が進められている。Gurney⁵⁾ は種々の金属についての実験結果を集め、(5) 式による整理を試みているが、あるパラッキ限度内で成り立つことが示されている。

しかし、small scale yielding condition が成立しない場合については K 値のみで考えるのは妥当とはいえず、

さらに (5) 式では平均応力 (平均ひずみ) の影響が入ってこないなどの問題点が残されている。最近、豊貞ら⁶⁾はこの観点から興味ある疲労亀裂伝播則を提案している。

2.2 表面半楕円亀裂の K 値の解析

前節で述べたように、疲労亀裂伝播速度は多くの場合 Stress Intensity Factor K でよく整理できる。したがって、実際構造物の中に生ずる亀裂形状についての K 値を計算することが是非とも必要である。

表面亀裂の K 値の解析は問題が三次元となり、その複雑さのゆえに研究は進んでいるとは言い難い。本節では Kobayashi ら^{7,8,9)}による表面半楕円亀裂の K 値の解析方法についてふれることにする。

無限体中に Fig.1 に示す楕円亀裂が存在し、亀裂面に垂直に無限遠方で一様応力 σ が作用する場合の K 値は Irwin¹⁰⁾ により求められている。図のように楕円周上の点をパラメータ表示した時の P 点の K 値を K_{I0} とすると

$$K_{I0} = \frac{\sigma}{E(k)} \left(\frac{\pi b}{a} \right)^{1/2} (a^2 \cos^2 \beta + b^2 \sin^2 \beta)^{1/4} \quad (6)$$

ここで $E(k)$: 第二種完全楕円積分

$$k^2 = 1 - \frac{b^2}{a^2}$$

で表わされる。

Kobayashi らは有限体に楕円亀裂が存在する場合の K 値を一般に

$$K = M \cdot K_{I0} \quad (7)$$

ここで M : 有限体に対する補正係数 (Stress Intensity Magnification Factor)

と表わし、 M を数値計算により求めている。

周知のように無限体中に平面欠陥が存在し、無限遠方で欠陥面に垂直な応力 σ が作用する場合の K 値は、重ね合わせの原理により、欠陥面に内圧 σ が作用し、無限遠方で応力が作用しない場合の K 値に一致する。よって無限体中に Fig.1 に示すような楕円亀裂が存在し、無限遠方で x および y の多項式で表わされる応力 $p(x, y)$ が亀裂面に垂直に作用する場合の K 値は

$$\sigma_{zz} = -p(x, y) \quad \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} < 1, z=0 \right) \quad (8)$$

$$w=0 \quad \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} > 1, z=0 \right) \quad (9)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad (z=0) \quad (10)$$

ここで z 軸は Fig.1 で $x-y$ 平面に垂直方向

w : z 軸方向変位

という境界値問題を解いて亀裂近傍の $z=0$ における垂直応力 σ_{zz} を求め

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} [\sqrt{2\pi r} \cdot \sigma_{zz}] \quad (11)$$

r : $z=0$ における楕円亀裂境界からの法線距離

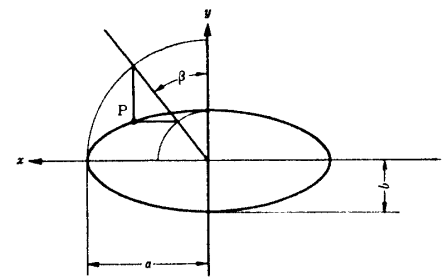
としてもとめられる。

Kobayashi らは、無限体中に楕円亀裂が存在する問題を

$$p(x, y) = A_{00} + A_{10}x + A_{01}y + A_{20}x^2 + A_{11}xy + A_{02}y^2 + A_{30}x^3 + A_{21}x^2y + A_{12}xy^2 + A_{03}y^3 \quad (12)$$

として、 $p(x, y)$ が 10 項の多項式で表わされる場合の K 値を解いている。 A_{00} の場合は一様引張、 $A_{01}y$ の場合は純粋曲げ、 $A_{00} + A_{01}y$ の場合は引張り曲げに対応する。一様引張 $A_{00} = \sigma$ の場合の K 値は (6) 式と一致する。曲げ応力の場合は

$$p(x, y) = 1 - \frac{y}{b} \quad (13)$$



$$P(a \sin \beta, b \cos \beta)$$

$$K = \frac{\sigma}{E(k)} \left(\frac{\pi b}{a} \right)^{1/2} (a^2 \cos^2 \beta + b^2 \sin^2 \beta)^{1/4}$$

$E(k)$: complete elliptic integral of second kind

$$k^2 = 1 - \frac{b^2}{a^2}$$

Fig.1 Embedded Elliptical Crack in Infinite Body

として求められており

$$K = K_{I0} \left\{ 1 - \frac{k^2 E(k) \cos \beta}{(1+k^2)E(k) - k'^2 K(k)} \right\} \quad (14)$$

ここで $K(k)$: 第一種完全楕円積分

$$k'^2 = 1 - k^2 = \frac{b^2}{a^2}$$

と表わされる。

したがって、有限板の表面に半楕円亀裂が存在し、一様曲げ応力を受ける場合の K 値は Fig.2 から

$$K = M_T \left(1 + \frac{2b}{t} \right) \frac{\sigma_N}{E(k)} \sqrt{\frac{\pi b}{a}} (a^2 \cos^2 \beta + b^2 \sin^2 \beta)^{1/4} \\ - M_B \frac{2b}{t} \frac{\sigma_N}{E(k)} \sqrt{\frac{\pi b}{a}} (a^2 \cos^2 \beta + b^2 \sin^2 \beta)^{1/4} \left\{ 1 - \frac{k^2 E(k) \cos \beta}{(1+k^2)E(k) - k'^2 K(k)} \right\} \quad (15)$$

ここで M_T : 引張応力に対する自由表面による Stress Intensity Magnification Factor

M_B : 曲げ応力に対する自由表面による Stress Intensity Magnification Factor

σ_N : nominal skin stress

t : 板厚

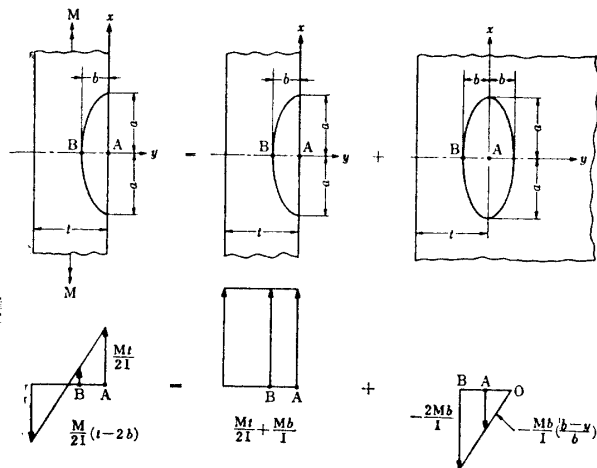


Fig.2 Calculation Procedure of Stress Intensity Factor for Semi-Elliptical Surface Crack Subjected to Bending Stress

れて、誤差は5%以内であるということである¹²⁾。

本論文では(15)式を用いて実験の解析を試みる。

3 実 験

3.1 供 試 材

供試材としては、新日本製鉄製の9% Ni鋼を用いた。その化学成分、機械的性質はTable 1に示す通りである。

3.2 試験片形状

試験片形状および寸法をFig.3に示す。切欠は厚さ1mmのノコギリの先端に40°のテーパをつけて試験片中央部表面に加工を施した。初期切欠形状・寸法が疲労亀裂伝播速度に及ぼす影響を調べるために、図中の表に示すように、それらを4通りに定め、A, B, C, Dシリーズと名付けた。試験片の切欠側表面は荒仕上げしてある。

3.3 負 荷 条 件

実験はFig.4に示すように四点曲げ方式を採用している。荷重スパンはそれぞれ300mm, 80mmである。負荷条件は同図に示すようにnominal skin stressによって4通りに定め、それぞれI, II, III, IVシリーズと名

と表わされる。

自由表面の影響係数 M_T, M_B については、無限体の場合の応力解析をNavierの弾性平衡方程式によって行い、自由表面にあたる面上の応力成分を求め、それを打ち消すことによって求める。打ち消しの操作はLove¹¹⁾の応力関数を用いて半無限体の自由表面の一部に打ち消すべき応力が作用した場合に、楕円亀裂面に相当する場所の垂直応力 σ_{zz} を求め、それをさらに打ち消すという手続きを繰り返すことにより行っている。

Kobayashiらは有限板表面に半楕円亀裂が存在する場合の自由表面の K 値に対する影響を、前面の影響 M_f 、後面の影響 M_b に分け、半無限体の場合について別々に計算し

$$M = M_f \times M_b \quad (16)$$

としている。(16)式は M を一度で求めた場合に比

Table 1

Chemical Compositions (%)								
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
0.06	0.26	0.49	0.007	0.004	0.03	9.27	0.10	0.02
Mechanical Properties								
Tension Test							Charpy Test	
	Direction of Roll	Yield Strength (kg/mm²)	Tensile Strength (kg/mm²)	Elongation (%)	Absorbed Energy at 0°C (kg-m)			
Top	L				20.6			
	C	70.0	75.4	25	15.0			
Bottom	L				19.3			
	C	73.2	77.0	27	17.7			

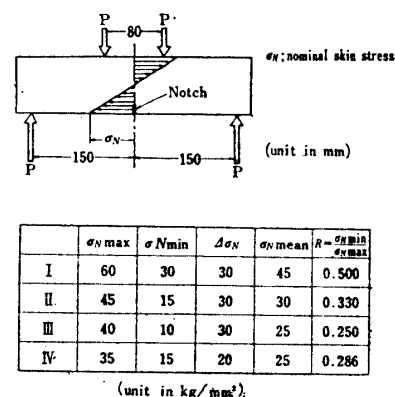
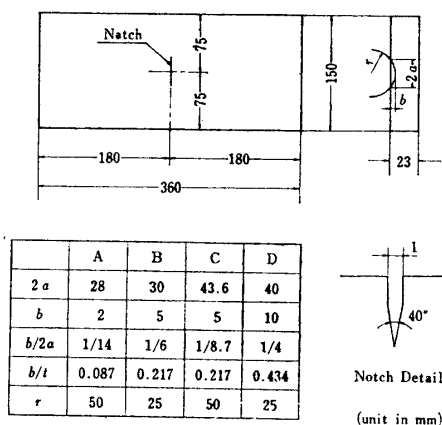


Fig. 3 Specimen Geometry

Fig. 4 Applied Load Condition

付けた。I, II, III シリーズは応力振幅を一定として最大応力を変え, IV シリーズは応力振幅を他のものと変えることにより, 疲労亀裂伝播速度に対する最大応力 (最大 K 値) の影響を調べた。試験片枚数は, 初期切欠寸法と負荷条件に従って計 16 枚である。なお, 本実験における試験機の繰り返し速度は 330 cpm である。

3.4 疲労亀裂伝播速度の計測法 (ポテンシャル法)

疲労亀裂伝播速度を求めるためには, 各繰り返し数に対する亀裂寸法を知っておかねばならない。本実験では表面切欠の疲労試験であるため, 平滑試験片とは異なり, 肉眼で亀裂長さを観測することは不可能である。非破壊的に材料の内部欠陥の大きさを観測する方法としては, X線, 超音波などを用いる方法があるが, 本実験では装置が簡単で, しかも計測が容易であるポテンシャル法¹⁹⁾を採用した。ポテンシャル法とは, Fig. 5 に示すように試験片表面に亀裂をはさんで接触子を設け, 一定電流を流し, 別の接触子により亀裂をはさんだ 2 点間の電圧を計測することにより亀裂の形状・寸法を求める方法である。

この方法では実験を行う前に, 亀裂の形状・寸法と電圧との関係を調べておく必要がある。上の目的で, 本実験では校正用に A, B, C, D 各シリーズに対して数本の試験片を用意し, 任意の深さまで亀裂を進展させた段階で実験を中止し, その点での電圧と静的に破断して測定した亀裂寸法とを対応させた。その場合, 電圧測定点は Fig. 6 に示すように, 切欠の中心, 中心から両側にそれぞれ 10 mm, 20 mm, 45 mm の点とし, 合計 7 点で行っている。

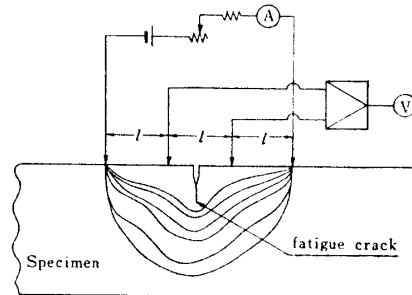


Fig. 5 Measurement of Crack Size by Electric-Resistance Probe Method

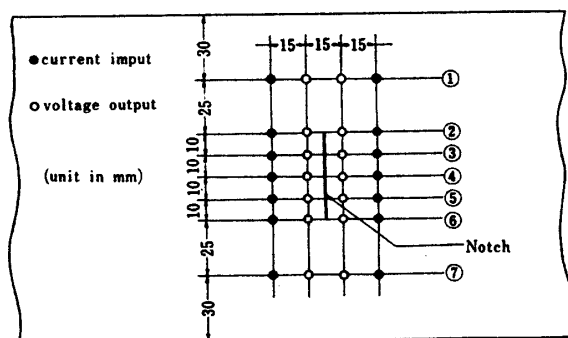


Fig. 6 Measurement Points of Electric Potential

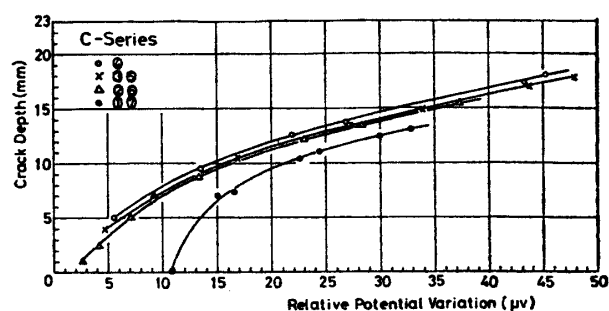


Fig. 7 Calibration Curve (C-Series)

各測定点での電圧は、その点での亀裂の深さのみに依存しているのではなく、亀裂全体の形状・寸法に依存するので、原理的には一点で計測すれば十分なわけであるが、本実験に採用した円弧亀裂や楕円亀裂などのように亀裂前面が直線でない場合には、測定点を多数とり、各測定点での電圧と全体の形状・寸法を対応させる方が校正曲線の信頼性が高いわけである。

Fig. 7 に校正曲線の一例としてCシリーズのものを示す。

Fig. 7 中の各曲線を示す番号は Fig. 6 に示す各測定点の番号と一致させてある。さて、校正曲線ができれば、任意の繰り返し数における亀裂の形状・寸法は、電圧変化を連続測定することによって求まる。しかし、本実験で用いた測定計器においては、7点の電圧を同時に連続測定することが不可能であるので、繰り返し数7,500回毎にスイッチを切り換えることにより各点の電圧を測定し、校正曲線を用いて亀裂寸法に換算した。

4 実験結果および考察

4.1 疲労亀裂伝播速度

3.4 で述べた方法により疲労亀裂伝播状況が知れる。

一例としてC-IVについて示そう。Fig. 8 は Fig. 7 から換算して描いた、各繰り返し数における測定点での亀裂深さである。亀裂の形状・寸法は Fig. 8 を基にして Fig. 9 のように描ける。Fig. 10 にA, B, C, D各シリーズの代表的な破面の

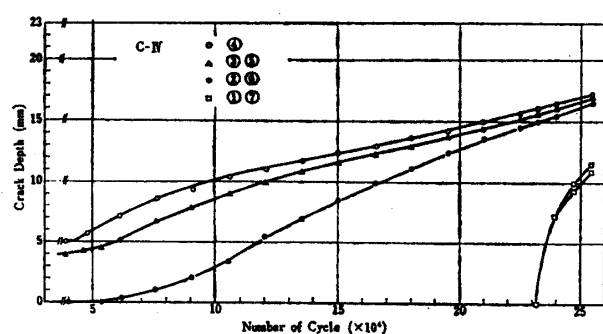


Fig. 8 Crack Depth at Measurement Points vs. Number of Cycles (C-IV)

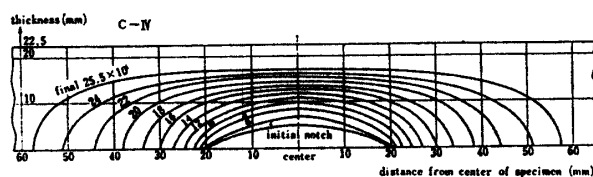


Fig. 9 Figure Crack Propagation Behavior (C-IV)

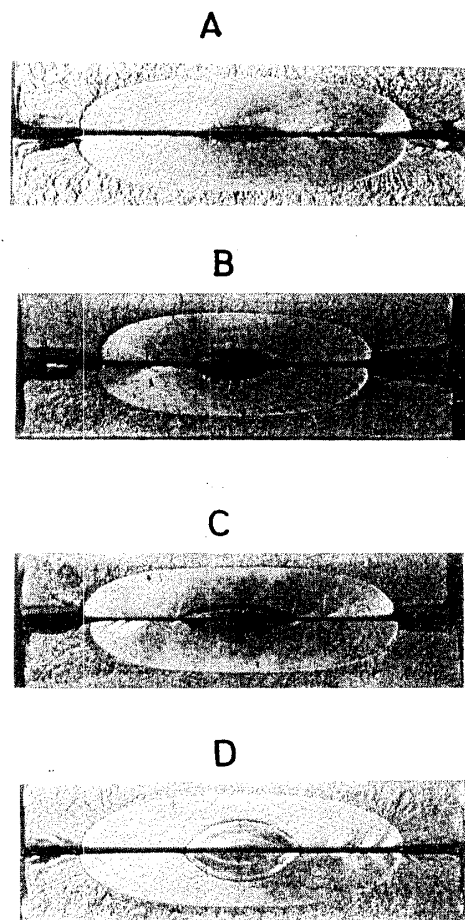


Fig. 10 Appearance of Fatigue Crack Surface

様子を示す。亀裂の進展は左右全く対称に起こり、形状はほぼ半楕円で表わせる。したがって、本実験においては試験片表面の亀裂先端位置と亀裂中央部深さを正確に求めておけば、全体の形状・寸法が求まることになる。疲労亀裂伝播速度もこの二方向について求めれば十分であろう。

疲労亀裂伝播速度 dl/dN は、Fig. 9 の試験片表面方向の長さおよび亀裂中央部深さを繰返し数に対してプロットし、それを滑らかな曲線で結び、図式微分することによって求めた。C-IVについてそれを示せば Fig. 11 のようになる。

つぎに、 ΔK 値を 2.2 節で述べた方法により計算し、両対数紙に dl/dN と ΔK をプロットしてみる。(5) 式が成り立つならば両者の関係は直線になるはずである。Fig. 12 に示したものは、同じく C-IV についての結果であるが、 ΔK 値、 dl/dN の値の大きい領域を除いて直線関係が成立することが確かめられた。直線から外れる 2 点は Fig. 11 で試験片表面の亀裂長さが急激に増加する領域であり、亀裂全長は板幅の 7 割近くに達している。2.2 節の K 値の計算法では、板厚の有限補正は考慮されているが、板幅が有限であるための補正は入っていない。このため、実際の K 値は板幅方向両端の自由縁の影響により上昇し続けるのに反し、計算上はそれが考慮されていないために K 値の上昇率が低下することによると考えられる。したがって、十分幅の広い試験片を用いるか、板幅方向の有限補正を考慮するかすれば実験値はすべて直線にのるものと推測される。この現象は他の試験結果についてもほぼ同様に見られた。

4.2 初期切欠寸法の影響

Fig. 13~Fig. 16 は初期切欠寸法が疲労亀裂伝播速度におよぼす影響を見るために、応力条件に従って試験結果を整理したものである。I, II シリーズの A, C が他のものと異なった関係にある他は、ほぼ初期切欠形状の影響はないものと見られる。

4.3 応力条件の影響

Fig. 17~Fig. 20 は応力条件の相異が疲労亀裂伝播速度に与える影響を調べるために、初期切欠寸法別に実験結果を整理したものである。各シリーズとも応力条件によって結果にかなりの差が認められる。亀裂の形状・寸法に関しては、較正用を含めた全試験片を実験後、静的に破断させて比較したところ、亀裂成長の初期の段階

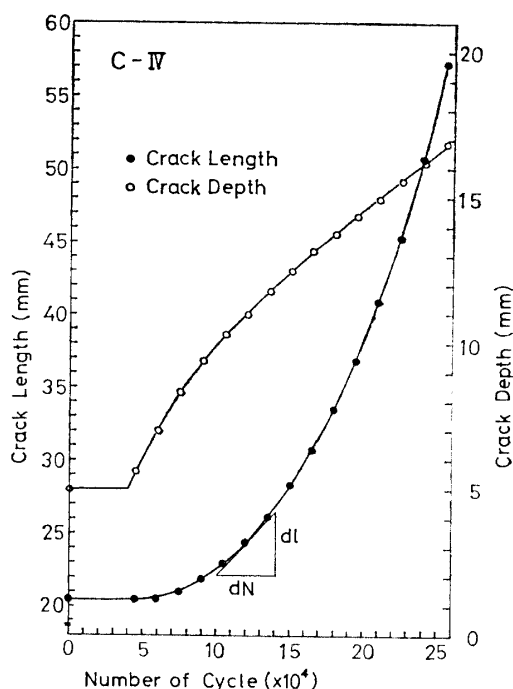


Fig. 11 Crack Length on Plate Surface and Crack Center Depth vs. Number of Cycles (C-IV)

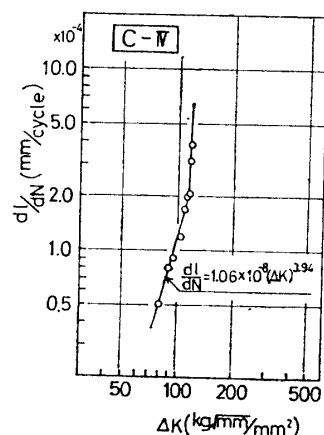


Fig. 12 Relation between Rate of Crack Propagation and ΔK

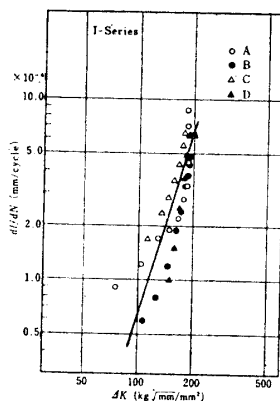


Fig. 13 Relation between Rate of Crack Propagation and ΔK (I-Series)

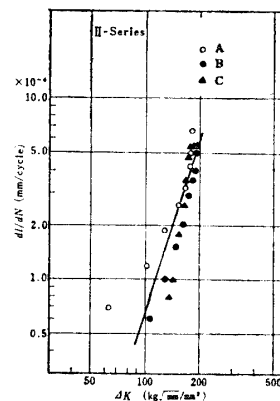


Fig. 14 Relation between Rate of Crack Propagation and ΔK (II-Series)

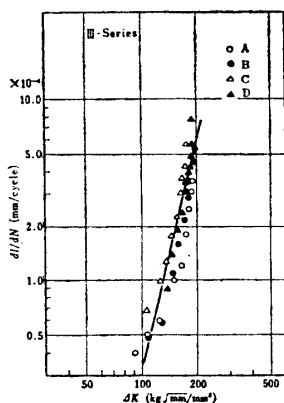


Fig.15 Relation between Rate of Crack Propagation and ΔK (III-Series)

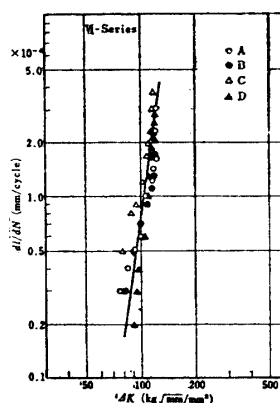


Fig.16 Relation between Rate of Crack Propagation and ΔK (IV-Series)

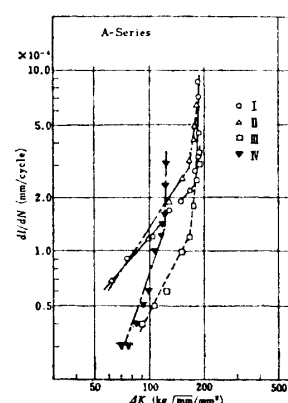


Fig.17 Relation between Rate of Crack Propagation and ΔK (A-Series)

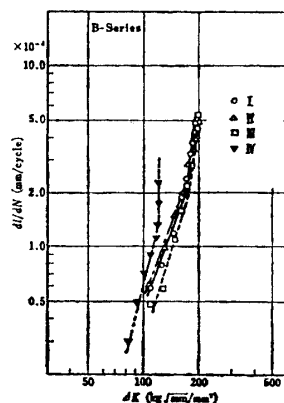


Fig.18 Relation between Rate of Crack Propagation and ΔK (B-Series)

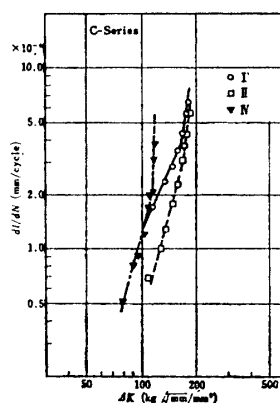


Fig.19 Relation between Rate of Crack Propagation and ΔK (C-Series)

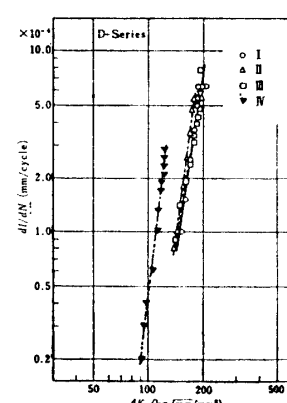


Fig.20 Relation between Rate of Crack Propagation and ΔK (D-Series)

(円弧亀裂が半楕円亀裂に成長する過渡段階)を除いて、試験片表面での亀裂長さと亀裂中央部深さが同じであれば、ほぼ同一の楕円形状であった。したがって、(5)式が正しいとすれば、応力条件に拘らず全試験結果は一直線上に位置するはずである。ところが、B, DシリーズのI, II, IIIがほぼ一致する他は、明らかに有為差が認められる。このことは、亀裂伝播速度が(5)式で統一的に表現され得ないことを示している。すなわち ΔK だけでなく K 値の絶対値が疲労亀裂伝播の機構を支配するものと推察される。これまでに、 K の絶対値を伝播則に導入し

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K \cdot K_{\max})^m \quad (17)$$

C, m : 材料定数

としたもの、材料の破壊靱性値 K_C と応力比 $R(=\sigma_{\min}/\sigma_{\max})$ を考慮して

$$\frac{dl}{dN} = C \frac{(\Delta K)^m}{(1-R)K_C - \Delta K} \quad (18)$$

K_C, m, C : 材料定数

としたもの¹⁴⁾などが提案され一定の成果をあげている。また、先述した豊貞らの提案もある。本論文においては、しかしながら、(5)式の不十分さのみを指摘するにとどめ、 K の絶対値その他を考慮した解析は後の機会に譲る。

4.4 引張り、および曲げ試験による疲労亀裂伝播速度の比較

本実験では、小荷重でしかも比較的大型の試験片を用いて実験を行うために曲げ試験を採用したが、それは

(5) 式あるいは (17), (18) 式から推定して, 疲労亀裂伝播速度は荷重方法に依存しないと判断したためである。幸い, 同じく 9% Ni 鋼を用いた引張疲労試験データを参照する機会を得た。引張疲労試験に用いられた材料は, 板厚 20 mm の 9% Ni 鋼であり, 試験片は長さ 1,200 mm, 幅 300 mm の板の中央に長さ 50.5 mm, 深さ 5 mm の円弧状切欠を設けたものである。試験条件は gross stress が最大 15 kg/mm², 最低 1 kg/mm², 繰返し速度は 300 cpm である。

引張疲労試験の場合は, 表面亀裂は板厚を貫通し, その後亀裂前面が板表面に垂直となって幅方向に進む。疲労亀裂伝播速度は板厚を貫通した後にルーペで計測しており, したがって ΔK の計算も貫通亀裂の式

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi l} \sqrt{\frac{2W}{\pi l} \tan \frac{\pi l}{2W}} \quad (19)$$

ここで $2l$: 亀裂長さ

$2W$: 板幅

から計算している。

Fig. 21 に引張り, および曲げ疲労試験による亀裂伝播速度の比較を示す。図中直線で示したものは引張試験データの平均値である。両者を比較した場合, 同じ ΔK 値に対して引張試験より曲げ試験の方が亀裂伝播速度は若干遅くなる。しかし, 両者は実験点の範囲内では, オーダー的に一致している。

4.5 実験および解析上の問題点

前節までに, 実験および解析結果を報告したが, 本節ではその問題点をいくつか挙げる。

まず, 実験に関しては, 第一に Fig. 7 に示した様に, 較正用実験点が少ないということである。亀裂形状が直線的でないために, 較正はかなり煩雑であり, 費用の点にもよるが, 試験片数を増やして数多く実験点をとるか, 放電加工などで較正点を増やすことが望ましい。

第二点としては, 電圧測定点をさらに多数にするということである。Fig. 8 および Fig. 9 を作成するにあたって, 電圧測定点が少ない場合には, 板表面の亀裂先端位置決定の精度が悪くなる。本実験では, 較正用試験片破面寸法を参照することによってこの欠点を補ったが, 若干の不正確さは残る。これは特に亀裂伝播速度の大きな領域で問題になる。何らかの方法で正確さを増す必要があろう。

K 値の解析に関しては, 第一として, 既に述べた様に板幅の有限補正が考慮されていないということである。これは $dl/dN \sim \Delta K$ 関係において折れ線となって表われている。第二には Fig. 2 に示した曲げ応力場中の表面半楕円亀裂の K 値の計算に, 曲げ応力に対する板の前方自由表面の補正が入っていないことである。2.2 節の方法によれば, この影響係数の算出も可能であり, 実行中である。

さらに, 疲労亀裂伝播則については, K 値で整理できるのは small scale yielding 状態が満足される場合についてであり, 高応力の疲労試験については塑性を何らかの形で考慮に入れた伝播則の確立が必要であろうし, また K 値で論じられる領域に関しても荷重が変動するという効果は本質的には考慮されていない。したがって今後は以上のような問題点を踏まえて, 疲労亀裂伝播の問題の実験・解析を続行し, 結果を報告したいと考える。

5 結 論

9% Ni 鋼の表面切欠曲げ疲労試験の結果の考察から次の結論を得た。

- (1) ポテンシャル法は疲労亀裂伝播速度の測定に非常に有効である。
- (2) 初期切欠寸法は疲労亀裂伝播速度に顕著な影響は与えない。
- (3) 応力条件によって疲労亀裂伝播速度は影響を受ける。したがって ΔK 値だけでなく, K の絶対値を考慮した解析が必要である。
- (4) 引張り, および曲げ試験による疲労亀裂伝播速度は相異し, 同一の ΔK 値に対しては引張試験の方が曲

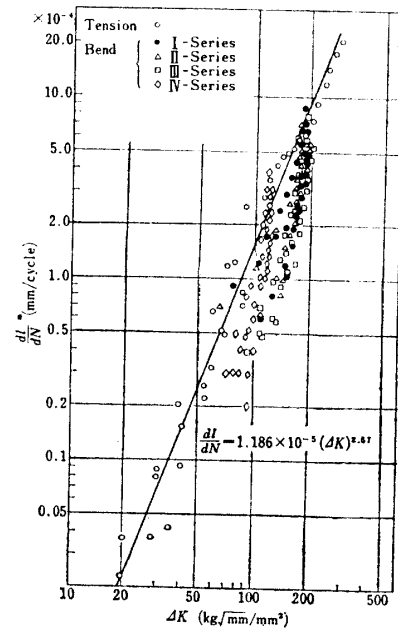


Fig. 21 Relation between Rate of Crack Propagation of Tensile Test and That of Bending Test

げ試験より速度が大きい。

最後に、本研究にあたっては、東京大学工学部船舶工学科強弱実験室の金子氏をはじめとする方々に非常にお世話になった。又、当時、東京大学工学部船舶工科学科学生であった豊永達司氏（日本鋼管）川上操氏に、実験および解析において多大の助力を戴いた。ここに厚くお礼を申し上げる。

参 考 文 献

- 1) J. D. Harrison, F. M. Burdekin, J. G. Young : Significance of Defects in Welded Structures, Welding Institute, London (1968) etc.
- 2) N. E. Frost, D. S. Dugdale : J. Mech. Phys. Solids, 6, 92 (1958).
- 3) H. W. Liu : J. Basic Engng., 83, 23 (1961) ; Ibid., 85, 116 (1963) ; Appl. Mater. Res., 3, 229 (1964).
- 4) P. C. Paris : Fatigue—an Interdisciplinary Approach, Syracuse Univ. Press, (1964) p.107.
- 5) T. R. Gurney : An Investigation of the Rate of Propagation of Fatigue Cracks in a Range of Steels, The Welding Institute Members' Report, No. E 18/12 (1968).
- 6) 豊貞雅宏, 大塚隆夫 : 部分片振領域における疲労亀裂伝播速度について, 日本造船学会溶接研究委員会第一分科会資料, 1-207-72 (1972).
- 7) A. S. Kobayashi, W. L. Moss : 2-nd I. C. F. Paper 4 (Session I), Brighton (1968).
- 8) R. C. Shah, A. S. Kobayashi : Engng. Fract. Mech., Vol.3, (1971) pp.71~96.
- 9) R. C. Shah, A. S. Kobayashi : 5-th National Symposium on Fract. Mech (1971).
- 10) G. R. Irwin : The Crack Extension Force for a Part Through Crack in a Plate, Trans. Am. Mechanical Engrs., J. Appl. Mech. (1962).
- 11) A. E. H. Love : On Stress Produced in a Semi-Infinite Solid by Pressure on Part of the Boundary, Philosophical Transactions of the Royal Society, Series A, Vol.228 (1929).
- 12) R. C. Shah, A. S. Kobayashi : Stress Intensity Factors for an Elliptical Crack Approaching the Surface of a Semi-Infinite Solid, Int. J. Fract. Mech. (March, 1971).
- 13) T. Yamaguchi et al. : Inspection Technique by Electric-Resistance Probe Method on a Nuclear Reactor Vessel, JAERI report 1~75 (1971).
- 14) T. W. Crooker, E. A. Lange : Fatigue Crack Propagation in a High-Strength Steel Under Constant Cyclic Load with Variable Mean Loads, NRL Report 6805, Nor.29 (1968).