620.178.322.3-181.2:539.431.019.2

大形疲れ試験の結果について*

(第 2 報, 平滑試験片のき裂進行)

星 野 次 郎**

Some Studies on Fatigue of Large Steel Specimens

(Part 2, Propagation of Fatigue Crack on Smooth Surface Specimens)

by Jiro HOSHINO

It has been noticed in rotating bending fatigue test on 125φmm smooth surface specimens, described in part 1, that shell patterns appear on fractured surface when radical change of the stress is made on the specimen.

The author has developed a general relationship between stress and propagation speed of fatigue cracks from analytical studies on shapes of the shell pattern, which may be summarized as follows:

1. The shell pattern shows a definite shape, which is drawn as a family of curves depending upon arc length of the crack.

2. Assuming that the stress σ (kg/mm²) on the edge line of the fractured surface is equal to the stress on a beam having a sectional shape same as that of the specimen having a reduced area by the fracture, σ was computed on a number of samples of shell patterns, as a result of which it has been found that the relation between the propagation speed v_c (μ/c) and σ may be obtained from the following formula:

$$v_c = \frac{\sigma - \sigma_0}{B}$$

Where: σ_0 is a critical value of σ ; =11.5 kg/mm². Where σ exceeds σ_0 , the propagation of crack takes place.

B is a constant depending upon the size of the specimen. $B = 17$ for 125φmm specimen.

1. 緒 言

7.5 t-m の大形回転曲げ疲れ試験機を用いて 0.2% C 炭素鋼の大形試験片 (直径 125mm) の平滑試験を行ないその結果を第 1 報⁽¹⁾として先に発表した。

そこで第 2 報においては、試験に際して実験した疲れき裂の進行状況、疲れ破面に現われる貝がら模様の形状および、き裂進行速度と応力の関係等についてのべる。

疲れ破壊におけるき裂の発生とその進行は興味ある問題であるが、これに関する研究発表は少なく、特に疲れ破面に現われる貝がら模様の形状については、機械部品の疲れ損傷と関連して若干の経験的考察⁽²⁾⁽³⁾が発表されているにすぎない。

本報告においては、試験に際して測定された応力、応力繰返し数、およびき裂の進行速度にもとづき、若

干の仮定を行なって、き裂発生により試験片の断面積が減少したための応力増加を求め、これとき裂速度との関係を導き、更にこの関係を用いて、破面に現われる貝がら模様の形状につき考察を行なった。

2. 試 験 方 法

試験機の構造、試験材料および試験片の形状等については第 1 報にのべているので省略し、第 1 表に材料の化学成分、機械的性質および疲れ限度を示す。

疲れ試験のき裂発生後の状態を検討するために最も必要なことは、き裂をできるだけ早く発見することである。そのために次のようなき裂検出装置を使用し、あわせて、回転中の試験片の表面を観察し得るストロボ照明をも装置した。試験片内部のき裂進行状況は破面に貝がら模様を描かせ、試験片の破断後これと表面のき裂の長さとを対照し、き裂進行の各段階における破面の形状を判定した。疲れ破面に貝がら模様を描かせるには、試験片に発生したき裂が進行してい

* 昭和 34 年 10 月 16 日 東京秋期講演大会において論文講演として講演、昭和 34 年 7 月 25 日。

** 正員、日本海事協会技術研究所 (三鷹市新川 700)。

る際に、その応力を急激に変化させる方法を採用した。この方法はき裂を生じた試験片を破断に導くため試験機を高速運転 1250 rpm より 560 rpm に切り換えて応力を一度低下させた際、破断面に貝がら模様がめいりょうに現われたことによって偶然見出されたものである。

2.1 疲れき裂の検出法 試験片に疲れき裂が発生すると、き裂の小さい間は、試験状態に全く変化は起らないが、き裂が進行するに従い、試験荷重の動的変化および荷重軸受箱の振動が増加する。したがって荷重変動および軸受箱の振動を動的ひずみ計で計測し、その計測値を連続的に自動記録すればき裂発生を知ることができる。具体的には動的ひずみ計の陰極線オシロ用出力をインピーダンス変換器を通して自記電圧計に入力として与える方法を用いた。ただしこの方法は 125 mm 径の試験片においてき裂の長さが 70 mm を越えないと検出が困難で、き裂の発生初期における状況を知るには十分な方法とはいえない。

第2の方法は、第1図に示すように、試験片を磁化し、き裂部より漏れる磁束をコイルにより検出し、これを増幅して振動子形リレーを作動させ警報装置を働かすものである。この方法は試験片の磁化装置、探傷コイルの往復装置等を必要とし、やや複雑にはなるがその感度は非常にすぐれ、30 mm 程度のき裂も容易に検出することができる。

2.2 き裂発生後の荷重操作 き裂の進行状況についてのデータは、第1報にのべた疲れ試験 15 本の中

第1図 き裂探傷装置

の破断した 9 本とその後行なった B 1151 材の 1 本（応力 26.0 kg/mm²、繰返し数 2.75×10⁶）を加えた計 10 本の試験片から得たもので、試験番号はすべて第1報と共通にし、追加した1本を B 11 としている。

第2表は各試験においてき裂発生後に行なった試験片への荷重の操作状況を示し、試験片の見掛けの応力 σ_n （き裂がないものとして求めた応力）とその応力が繰返された数 N を記入してある。また N の欄に * 印をつけたものは 1250 rpm で試験されたものであり、印のないものは 560 rpm に対するものである。

試験片への荷重操作は大別して次の3種となる。すなわち第2表(a)の A 4 ないし B 1 は、試験片を破断させるための電動機切換えおよびき裂を精密に調べるために試験機を停止した際に行なった荷重操作であり、第2表(b)の B 3、B 6 はき裂進行速度を表面において測定する目的から荷重を漸増させたもので、同じく B 9 ないし B 11 は破面に貝がら模様を描かせるため荷重を反復増減したものである。

3. 試験結果

試験の結果は、破面の状況と、試験片表面のき裂進行状況に分けられる。

3.1 破面の貝がら模様 試験片の疲れ破面は一般にき裂起点よりしだいにあらさを増すが、前にのべたようにき裂進行中に応力を急激に変化させると面のあらさの異なった部分が帯状に現われ、ちょうど機械部品が疲れ破壊した破面と同様な貝がら模様となる。

第2図および第3図は、各試験片の破面の写真に現われた貝がら模様を図示したもので、き裂起点と貝がら模様の線の間が各試験片の破面である。

第2図 A4, A5, A6, A7, B1, B3, B6 の貝がら模様

第1表 材料の化学成分、機械的性質および疲れ限度

材 種	機械的性質 (4号試験片)				化 学 成 分 %					疲れ限度
	降 伏 点	引張強さ	伸 び	絞 り	C	Si	Mn	P	S	
A	24.0~24.5	46.4~47.0	36.8~37.2	58.1~63.2	0.22	0.23	0.42	0.028	0.034	20.0
B 1009	29.3~31.6	47.7~49.5	35.5~39.8	57.4~63.7	0.20	0.26	0.59	0.023	0.015	23.0
B 1151	30.0~33.5	49.8~52.0	31.8~37.5	52.0~62.7	0.22	0.28	0.59	0.031	0.015	23.4

第 2 表 (a) A4, A5, A6, A7, B1 の荷重操作

試験番号	A 4		A 5		A 6		A 7		B 1	
	σ_n kg/mm ²	$N \times 10^{-3}$	σ_n kg/mm ²	$N \times 10^{-3}$	σ_n kg/mm ²	$N \times 10^{-3}$	σ_n kg/mm ²	$N \times 10^{-3}$	σ_n kg/mm ²	$N \times 10^{-3}$
き裂発見時	21.1	*1100	20.2	*13600	20.6	*3600	21.5	*590	23.3	2900
1	荷重操作を行わず		5.3	*5.4	12.8	2.0	21.5	*2.1	16.2	6.3
2			18.5	*3.7	15.2	20.0	6.6	3.1	23.6	7.5
3			11.5	*12.0	破	断	22.6	12.0	破	断
4			18.5	12.0			破	断		

第 2 表 (b) B3, B6, B9, B10, B11 の荷重操作

試験番号	B 3		B 6		B 9		B 10		B 11	
	σ_n kg/mm ²	$N \times 10^{-3}$	σ_n kg/mm ²	$N \times 10^{-3}$	σ_n kg/mm ²	$N \times 10^{-3}$	σ_n kg/mm ²	$N \times 10^{-3}$	σ_n kg/mm ²	$N \times 10^{-3}$
き裂発見時	24.4	*370	23.7	*1040	24.5	*830	24.0	*1130	26.0	*240
1	3.5	11.5	5.2	3.5	8.9	*23.1	10.1	*20.4	10.1	*32.1
2	4.9	10.0	8.0	11.6	21.2	*7.5	23.6	*6.0	21.2	*5.9
3	5.7	10.0	10.7	12.8	10.1	*12.0	8.9	*18.9	11.4	*43.0
4	6.8	10.0	13.5	10.9	18.2	*11.3	15.1	*4.4	24.0	*5.2
5	9.2	10.0	16.3	10.2	11.4	*19.8	23.6	*13.5	12.6	*34.9
6	10.1	10.0	19.1	3.2	15.1	*21.1	8.9	*21.9	17.6	*23.7
7	11.2	15.2	破	断	8.9	*12.1	15.1	6.9	13.8	*21.4
8	12.4	13.2			12.6	*11.0	8.9	2.0	21.3	*10.8
9	13.4	9.1			16.3	*20.0	18.2	5.7	11.4	*97.1
10	14.6	12.3			5.8	4.8	8.9	2.0	20.0	*6.7
11	15.8	7.9			16.3	6.3	18.2	5.6	8.9	*56.6
12	16.9	4.0			7.6	4.1	8.9	2.0	15.1	*12.0
13	18.0	5.5			13.8	5.5	18.2	6.4	7.7	*23.2
14	破	断			7.6	1.7	8.9	3.3	12.6	*11.1
15					12.6	5.7	18.2	6.4	8.9	2.6
16					7.6	2.9	8.9	1.9	15.1	2.6
17					10.1	6.7	18.2	3.4	16.1	10.6
18					11.4	4.8	8.9	2.1	15.1	3.9
19					7.6	0.7	18.2	4.8	12.6	5.3
20					10.2	3.0	破	断	破	断

第 2 図(a) は A4, A5, A6, A7 の貝がら模様を示し、試験片番号と第 2 表の荷重操作番号を図に示した模様と対応させて付記してある。すなわち A4 はき裂が半周に及んだため試験を中止し、試験片を屈曲破断した際の、疲れ破面の限界線を示し、A5 においては既に発生していたき裂が No.1 の操作で停止し、A5-1 のしみができ、No.2 の操作で再び進行し No.3 の操作で停止して A5-3 を生じたことを示す。A6 は A5 と同様であるが、A7 はき裂起点が 2 個存在し、その小さい方を A7-1、大きい方を A7-2 とした。A7-2 は No.1 の荷重操作で生じたものであるが、A7-1 はその発生の時期が明らかでない。

第 2 図 (b) も (a) と同様に貝がら模様を示したものであり、B1 については電動機切換えの荷重操作で No.1 ができ、No.1 の操作で若干き裂が進行し、No.2 の操作で、き裂進行が急激となり、両者の境界が B1-2 の線として現われたものである。B3 について No.1 の荷重操作で B3-1 ができたことは前同様であるが、それ以後段階的に荷重を増した際には貝がら

模様は現われず、ただ No.12 の操作でゆっくり進行していたき裂が No.13 で急激に進行し始めた境界が認められたのでこれを B3-12 とした。B6 は B3 とほぼ同様であるが、この場合には No.5 から No.6 へ移った際の貝がら模様は明確に認められない。

第 3 図も第 2 図と同様に破面の貝がら模様を図示し、第 3 図 (a) は B9 の破面で 12 個、第 3 図 (b) は B10 の破面で 11 個、(c) 図は B11 の破面で 15 個のしみがそれぞれ現われており、これらの図においてはのおののしまに対応する荷重操作の番号を記入してある。

第 4 図は第 3 図の貝がら模様の写真で、第 4 図 (a) の B9 破面においては No.8~9 のしままでがめいりょうであるが、10 以上の番号のしまは不めいりょうであり、また第 4 図 (b) の B10 破面では No.6 のしままでがめいりょうで、それ以上の番号のものは不めいりょうである。しかしながら第 4 図の B11 破面の貝がら模様は非常にめいりょうである。これは貝がら模様の線の部分すなわちき裂進行が停止する部分の

幅の差によるもので、応力を下げてき裂進行を停止させる過程の操作時間に関係する。すなわち応力が下がっていく間(数秒を要す)にき裂はゆっくりと進行し、この部分が平滑な面となり線状部が現われる。それゆえ第2表において1250 rpmにて試験を行なった*印のある荷重操作に対応するしま模様はめいりょうに現われるが、560 rpmのものは不めいりょうである。またB11の場合は、荷重をき裂進行が完全に停止するところまで下げず、進行速度が非常におそくなる範囲までに止めたため、線状部は幅が広く、かつめいりょうに現われている。

第2～4図における貝がら模様の形状は、き裂起点と中心を結ぶ線に対しほぼ対称であり、試験片の回転方向と逆な方向に進むき裂の進行速度は、回転方向のものよりわずかに大きいことがわかる。しかしながらB10のようにすみ肉部にかかって破断した場合には第3図(b)のように著しく非対称となる。これはすみ肉部に向かって進行するき裂速度が小さいためと考えられる。

3.2 表面のき裂進行状況 試験片表面におけるき裂進行の方向と進行速度との間には興味ある関係が見出される。すなわちき裂を生じた付近を展開して示すと、き裂は第5図のようにAの範囲では起点を中心として軸の中心線と平行なOx軸に垂直なOy軸方向

(円周方向)に進む。次にBの範囲ではき裂はわずかに方向をかえOy軸となす角度 β は $\pm 10^\circ$ 程度であるが、その正負は一定しない。しかしながらき裂がすみ肉部に近く発生した場合には、回転方向に進行するき裂がすみ肉部に進入し、逆方向のものがすみ肉より遠ざかる。

試験片の応力が一定の場合にはき裂の角度 β はほぼ一定でつる巻状に進行する。また応力を下げると β も変化し、第5図C部のようにOy軸とほぼ平行になる。この場合のき裂進行速度は非常におそく、多くは若干進行した後停止する。一般にOy軸とき裂のなす角度 β は進行速度に比例するようである。

次に試験片の応力を再び増し、き裂を進行させるとD部のように β が大となる。この表面におけるき裂進行方向と破面とを対応させてみると、C、Eのように β の小さい部分が貝がら模様の線に、B、Dのように β の大きい部分が帯状部に相当することがわかる。

4. 試験結果に対する考察

上に述べた試験結果より、疲れによって生じたき裂の進行速度は、試験片の応力が大きいほど速く、またある応力以下においては進行しないこと、およびき裂進行が速いほど、破面はあらかなること等の現象が起ることがわかる。そこで次にこれらの事実について更

第3図 貝がら模様

第4図 B9, B10, B11の破面

に詳細な考察を行なうことにする。

4.1 破面の貝がら模様の近似作図法 破面に現われる貝がら模様は、第 2 図、第 3 図等に表示されるように、試験片破断部の外周円と交わる他の円の一部分とみられ、その円の半径は、き裂が長くなるほど大きくなっている。それゆえ貝がら模様の近似作図法は第 6 図のようにして行なうことができる。すなわち、破面外周を半径 R なる円で与え、このときき裂が $\widehat{ADA'}$ の間に生じていると考えてみる。次に AA' の中点 B と円の中心 O を結ぶ線を y 軸として、 OB の間に $\overline{OB}/\overline{BC} = \eta$ となるように C 点を取り、 A 点より $\overline{AC}$ に垂線を立て、これと y 軸の交点 O_1 を中心として、半径 $\rho = \overline{O_1A}$ の円弧を描いて貝がら模様の近似形とする。破面の貝がら模様は、種々な長さのき裂に対し $\angle BOA = \theta$ と、 $\overline{OB}/\overline{BC} = \eta$ の 2 個のパラメータを有する次のような円の方程式にて示される。

$$x^2 + \{y - R \cos \theta (1 + \eta \tan^2 \theta)\}^2 = R^2 \sin^2 \theta (1 + \eta^2 \tan^2 \theta) \dots \dots \dots (1)$$

ただし

$$-R \sin \theta \leq x \leq R \sin \theta, \quad \eta \geq 1$$

$$\overline{OO_1} = R \cos \theta (1 + \eta \tan^2 \theta)$$

$$\rho = \overline{O_1A} = R \sin \theta \sqrt{1 + \eta^2 \tan^2 \theta}$$

(1) 式において η はき裂の深さを示すパラメータであり、 η が 1 に近いと同じ θ に対し、き裂が深く、1 より大となると浅くなる。

近似貝がら模様と実際のそれとは、 $\eta = 5/3$ の場合に最も近く、この場合の式 (1) で与えられる曲線を、第 2 図および第 3 図に点線で示した。同図より θ の小さい間はほぼ完全に合致するが、 θ が $30^\circ \sim 60^\circ$ の付近でやや誤差が大きく、 $60^\circ \sim 90^\circ$ で再び合致する傾向があることがわかる。

4.2 き裂先端部の応力 き裂先端部には、局部的に非常に大きな応力集中が起るが、これはき裂先端の

形状、すなわち曲率半径に関係するものと、き裂発生により、試験片の有効面積が減じたために生ずるものの 2 種に分けて考えるのが便利である。

き裂先端の曲率半径に関係する応力集中は、き裂が鋭いので、き裂の深さとは関係なく常にきわめて大きく、き裂先端部には、局部的な塑性変形を生ずるものと推察される。

したがって、回転曲げ試験片のき裂進行速度と応力とを関係づけるためには、き裂による試験片の断面積の減少がどのように応力に影響するかを考えればよいわけである。

き裂による断面積の減少を最も簡単に考えに入れる方法としては、き裂部の応力を第 7 図のように試験片断面からき裂面積をさし引いた残りの図形を断面とするはりの曲げ応力を計算する方法が考えられる。すなわち破面を除いた図形の図心を O_G 、慣性主軸を $O_G y$ 、 $O_G z$ とし、 $O_G z$ と α なる傾きをなす $O_G z'$ 軸のまわりに M なる曲げモーメントが作用する場合を考えると、き裂破面縁線上の任意の点 b の応力 σ_b は、はりの非対称曲げの問題として次式のように与えられる。

$$\sigma_b = \frac{M \cos \alpha}{I_z} y + \frac{M \sin \alpha}{I_y} z \dots \dots \dots (2)$$

ここに

I_z, I_y : それぞれ断面図形の慣性主軸 $O_G z, O_G y$ 軸のまわりの断面主二次モーメント

y, z : b 点の $O_G y z$ 座標

σ_b は α の関数であり、曲げモーメントは原断面の中心 O のまわりを等速回転する ($O_G z'$ 軸の回転運動は非等速である) ので σ_b を最大とする α を α' とすれば

$$\frac{d\sigma_b}{d\alpha} = -\frac{M \sin \alpha}{I_z} y + \frac{M \cos \alpha}{I_y} z = 0$$

$$\tan \alpha' = \frac{I_z}{I_y} \cdot \frac{z}{y} \dots \dots \dots (3)$$

$$(\sigma_b)_{\max} = M \left(\frac{y \cos \alpha'}{I_z} + \frac{z \sin \alpha'}{I_y} \right)$$

第 5 図 試験片表面のき裂進行

第 6 図 貝がら模様の近似作図法

第 7 図 き裂試験片の応力

き裂がない試験片の外周部の応力 σ_n と $(\sigma_b)_{\max}$ を比較し、応力倍加率 ν_b を求めれば

$$\nu_b = \frac{(\sigma_b)_{\max}}{\sigma_n} = \left(\frac{y \cos \alpha'}{i_z} + \frac{Z \sin \alpha'}{i_y} \right) \frac{1}{R} \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。ここに $i_z = I_z/I_0$, $i_y = I_y/I_0$.

I_0 : 試験片の断面二次モーメント

このように、図形の断面主二次モーメントを求めれば、き裂縁線上の応力倍加率は (3) および (4) 式より決定することができる。

第8図は第3図および第4図の破面貝がら模様の実例および(1)式にて描かれる近似貝がら模様について ν を求め、き裂の広がり角 θ と比較したものである。

第8図は、試験片外周の ν_a と、き裂縁線の中央 d についての ν_d を示し、 ν_a は θ とともに増加するが、 ν_d は θ が $0^\circ \sim 40^\circ$ の間で1より小となり、 45° を越

第8図 ν と θ

第9図 θ と i_y, i_z

えると急激に増加し、 90° 付近で ν_a とほぼ等しくなる。

第8図において、 θ が 90° を越えると中心部の ν_d が逆に外周部より大となっている。これはき裂の進行が応力の大きさにしたがって変化するという想定と相反するものである。すなわち、実際の破面においては、 θ が 90° より大であっても、外周部のき裂進行速度は、中心部より大である。なにゆえに θ が 90° を越えた場合、不合理を生ずるかは明らかでないが、おそらくき裂が大となると試験荷重の動的変化が大となり (θ が 90° で平均荷重の $\pm 30\%$ 程度の変動を示す) 作用する曲げモーメント自体が変化するためと想像される。

また(1)式の近似貝がら模様と実例とを ν について比較すると、約 $\pm 10\%$ の誤差はあるが、ほぼ実測値のばらつきの中には入っている。

また第9図は参考のために i_y, i_z と θ との関係を示したもので、実例および近似図形ともばらつきが少なく、ヒステリシス曲線に似た図形になっている。

4.3 き裂進行速度と応力の関係 4.3.1 実験結果に対する考察

(4)式により、あらゆる長さのき裂についてその破面縁線上の応力倍加率 ν を求めることができ、これに第2表の σ_n をかければ、破面縁線上の応力を算定することができる。またき裂の進行速度 v_c は、第3図に示した貝がら模様につき、破面縁線に立てた法線が次の破面縁線が交わる点までの長さ l を測定し、これをこの間の応力繰返し数 N で割って定め、その単位をミクロン/サイクル (μ/c) にて示す。

第10図は各実例につき、第2表の (a), (b) の σ_n, N と (4) 式で求めた ν とより、き裂進行速度 $v_c = l/N$ (μ/c) と、 $\sigma = \nu \sigma_n$ (kg/mm^2) の関係を示したものである。

第10図において、細い線は貝がら模様の中の一つの線上の σ と v_c の関係を示し、線の右端は外周部、左端はき裂縁線の中央を意味している。破面中央部のき裂速度を決定し得るのは、B9, B10, B11 の三例であり、このうちB10はき裂がすみ肉部に発生しているために、き裂の速度が回転方向と反回転方向で等しくないので、第10図には記載していない。他の実例A5, B3, B6については、試験片外周のき裂速度と、第8図より求めた ν と第2表の σ_n を乗じた応力につ

いて記載している。また寸法の異なった試験片に関する例⁽⁴⁾として、直径 52 mm の試験片表面の ν を第 8 図より推定し、き裂速度と $\nu\sigma_n$ の関係を求め第 10 図に示した。

第 10 図のき裂速度と応力の関係は、個々の貝がら模様については、一般に試験片外表面のき裂速度が応力の大きい割合におそく、中央部が逆に速くなっており、特にき裂進行速度の非常におそい範囲でこの傾向が著しい。これは前に述べたき裂の停留する現象によって起るものと推察される。すなわち応力を低下させた場合、き裂はしばらくの間わずかに進行した後停止することがあり、貝がら模様の線の部分の幅として現われるが、その幅を N で割ってき裂進行速度を求めるのは、この場合無意味である。

また第 10 図において σ と v_c を図示したのは、 θ が 80° までのものである。この角度以上では前に述べたように荷重変動が著しくなり、 σ_n が一定といえなくなるためである。

試験片のき裂進行速度と応力の関係は、第 10 図のように若干のばらつきはあるが、一応ある範囲内にあり、前にのべた ν の計算法がほぼ正しいものであることを示している。また v_c と σ の関係を示す近似式を求めれば、(5・a)式のように応力の二乗と v_c が比例するものと(5・b)式のように応力と v_c が比例するものの二つを与えることができる。

第 10 図 σ と v_c

$$v_c = \frac{(\sigma - \sigma_0)^2}{A} \dots\dots\dots (5 \cdot a)$$

$$v_c = \frac{\sigma - \sigma_0}{B} \dots\dots\dots (5 \cdot b)$$

(5・a) 式および (5・b) 式の定数 A , B は試験片の寸法に関するものと想像され、 v_c の μ/c , σ を kg/mm^2 にて表わしたとき、125 mm 試験片に対し $A=400$, $B=17$, 52 mm 試験片に対し $A=1600$, $B=80$ となる。また σ_0 はき裂が進行し始める応力の限界を意味し、試験片寸法に関係なく、(5・a)式では 7.0 kg/mm^2 , (5・b) 式にて 11.5 kg/mm^2 となる。

(5・b) 式の近似は、第 10 図にも示すように σ の全範囲については成立せず、 σ が材料の降伏点以上では、 B および σ_0 がともに変る。すなわち 125 mm 試験片では、(降伏点 30 kg/mm^2) $B=10$, $\sigma_0=19 \text{ kg/mm}^2$, また 52 mm 試験片では、 $B=22$, $\sigma_0=26 \text{ kg/mm}^2$ となるようである。

このように疲れき裂の進行速度が試験片の寸法によって異なることは明らかであるが、実験例が少ないので、具体的な表現はできない。しかしき裂進行速度に及ぼす試験片寸法の影響が著しく大きいものであることが推察される。また第 10 図において、試験片の応力 σ_n を徐々に増した場合に、き裂進行速度はかなり小となり、(5・b)式において $\sigma_0=18 \text{ kg/mm}^2$ とした場合とほぼ合致している。これは疲れに対する過小応力効果と似た現象により、その進行速度が変化したものと想像され、興味ある点である。

4・3・2 近似貝がら模様に関する解析 疲れき裂の進行速度と応力の関係は、第 10 図に示されるように、(5・a), (5・b) と 2 種の近似式を与え、いずれが正確であるかは事例については判定し得ない。それゆえ近似貝がら模様につき、このような模様が描かれるにはいかなる関係が、応力とき裂速度との間に必要かを検討

第 11 図

する。

き裂の進行速度を近似貝がら模様について調べるため第 11 図の l_a , l_b 等の値を求める。

$$O_1O_1' = OO_1' - OO_1 = R \cos(\theta + \Delta\theta) \{1 + \gamma \tan^2(\theta + \Delta\theta)\} - R \cos\theta(1 + \gamma \tan^2\theta) \dots\dots\dots (a)$$

$$O_1'b' = R \sin(\theta + \Delta\theta) \sqrt{1 + \gamma^2 \tan^2(\theta + \Delta\theta)} \dots\dots\dots (b)$$

$$Ob' = O_1'b' \frac{\sin \gamma_b'}{\sin \theta_b'}$$

$$O_1'b' \cos \gamma_b' + O_1'b' \frac{\sin \gamma_b' \cos \theta_b'}{\sin \theta_b'} = R \cos(\theta + \Delta\theta) \{1 + \gamma \tan^2(\theta + \Delta\theta)\}$$

$$R \sin(\theta + \Delta\theta) \sqrt{1 + \gamma^2 \tan^2(\theta + \Delta\theta)} \left(\cos \gamma_b' + \frac{\sin \gamma_b' \cos \theta_b'}{\sin \theta_b'} \right) = R \cos(\theta + \Delta\theta) \{1 + \gamma \tan^2(\theta + \Delta\theta)\}$$

$$\tan(\theta + \Delta\theta) \sqrt{1 + \gamma^2 \tan^2(\theta + \Delta\theta)} (\sin \theta_b' \cos \gamma_b' + \cos \theta_b' \sin \gamma_b') = \sin \theta_b' (1 + \gamma \tan^2(\theta + \Delta\theta))$$

$$\sin(\theta_b' + \gamma_b') = \frac{\sin \theta_b'}{\tan(\theta + \Delta\theta) \sqrt{1 + \gamma^2 \tan^2(\theta + \Delta\theta)}} \dots\dots\dots (c)$$

θ_b' は b' の位置を作図して求めることができ、これより (c) 式を用い、 γ_b' を計算する。

$$\left. \begin{aligned} l_b &= bb' = O_1'b' - O_1b = O_1'b' - R \sin\theta \sqrt{1 + \gamma^2 \tan^2\theta} \\ O_1'b' &= \sqrt{O_1'b'^2 + O_1'O_1'^2 - 2O_1'b' \cdot O_1'O_1' \cos \gamma_b'} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (d)$$

すなわち (a) (b) (c) 式より $O_1'b'$, $O_1'O_1'$, γ_b' を求めれば (d) 式により l_b を計算することができる。

次にき裂の進行速度 v_c は、貝がら模様のある一つの線については l_b と比例するから、(5・a) 式および (5・b) 式が成立するには、次の (6・a), (6・b) 式が成立することが必要である。

$$\sqrt{\frac{v_{cb}}{v_{ca}}} = \sqrt{\frac{l_b}{l_a}} = \frac{\sigma_n \nu_b - \sigma_0}{\sigma_n \nu_a - \sigma_0} = \frac{\nu_b - \frac{\sigma_0}{\sigma_n}}{\nu_a - \frac{\sigma_0}{\sigma_n}} \dots\dots\dots (6 \cdot a)$$

$$\frac{v_{cb}}{v_{ca}} = \frac{\sigma_n \nu_b - \sigma_0}{\sigma_n \nu_a - \sigma_0} = \frac{\nu_b - \frac{\sigma_0}{\sigma_n}}{\nu_a - \frac{\sigma_0}{\sigma_n}} \dots\dots\dots (6 \cdot b)$$

ここに v_{ca} , v_{cb} は、それぞれ試験片外周および内部のき裂進行速度を示す。

第 12 図 (a), (b) は (6・a) 式および (6・b) 式の右辺を x 軸に、左辺を y 軸に示したもので、 θ を 10° より 80° まで 10° おきにとり、 $\Delta\theta$ を 1° として計算し、かつ σ_n は材料の疲れ限度に近い値 23 kg/mm^2 を与えている。

第 12 図 (a) より (6・a) 式は明らかに一般に成立せず、第 12 図 (b) より (6・b) 式が近似的に成立していることがわかる。

したがってき裂の進行速度は応力に比例するという (5・b) 式が貝がら模様の形状を表わすための両者の関係を示すものであるということができる。

また逆にいえば (5・b) 式より σ_0/σ_n の比がき裂速度の比に影響を及ぼし、 σ_0/σ_n によって貝がら模様の形状が、若干変化することが想像される。

(a) $\frac{\nu_b - (\sigma_0/\sigma_n)}{\nu_a - (\sigma_0/\sigma_n)}$ と $\sqrt{\frac{v_{cb}}{v_{ca}}}$

(b) $\frac{\nu_b - (\sigma_0/\sigma_n)}{\nu_a - (\sigma_0/\sigma_n)}$ と $\frac{v_{cb}}{v_{ca}}$

第 12 図

4.4 き裂進行速度と破面のあらさとの関係 疲れ

き裂が進行する際に、その速度により破面のあらさが変わり、き裂進行の速度が急激に変った場合に、あらさの違いがめいりょうとなり、破面に貝がら模様として現われることは前にのべた。ここでは、B 9, B 11 の事例につき、第 3 表に示すき裂縁線上の応力 σ およびき裂速度 v_c と破面のあらさの変化につきのべる。第 13 図は、B 9, B 11 の破面のき裂起点付近の詳細であり、第 3 表と第 13 図を比較すれば、B 9-8, B 11-7 の破面がなめらかで、かつ、き裂進行速度も小であり、B 9-6 がこれにつぎ、B 9-11, B 9-13, B 11-8, B 11-10 等は破面が著しくあらい。しかしながらこのあらさの差を量的に表現することは困難で、破面の詳細な調査とともに今後に残された研究課題である。

5. 結 論

以上直径 125 mm の大形回転曲げ疲れ試験において平滑試験片の破面の状況およびき裂進行速度と応力との関係等について述べたが、これらを要約すれば次の結論をうる。

1. 疲れ破面の貝がら模様は、き裂が進行している間に応力が急激に変化することにより生ずる。すなわち応力が増減すると、き裂の進行速度が変化し、一方破面のあらさはき裂の進行速度に応じて変るために、急激な応力変化は破面あらさの著しい差となり、貝がら模様が現出する。

2. 疲れ破面の貝がら模様は、試験片の中心を原点、外周に現われたき裂の midpoint と中心とを結ぶ線を y 軸、中心をとおりこれと垂直な軸を x 軸とするとき次の方程式によってその形状を近似的に表わすことができる。

$$x^2 + \{y - R \cos \theta (1 + \eta \tan^2 \theta)\}^2 = R^2 \sin^2 \theta (1 + \eta^2 \tan^2 \theta)$$

ここに $\eta = 5/3$ (平滑試験片に対し)

R : 試験片の半径, θ : き裂端部と中心を結ぶ線と y 軸のなす角度

3. 疲れき裂の進行速度と応力の関係は近似的に次の式にて満足される。

$$v_c = \frac{\sigma - \sigma_0}{B}$$

ここに v_c : き裂の進行速度 μ/c

σ : 破面縁線上の応力 kg/mm^2 (き裂により減少した試験片の断面図形と同じ図形を有するはりの応力)

σ_0 : き裂の進行し始める応力; $= 11.5 kg/mm^2$

B : 試験片の寸法によって変化する定数. 125 mm 試験片に対し 17, 52 mm 試験片に対し 80.

第 3 表 外周のき裂進行速度と応力の関係

貝がら模様の番号	σ_n kg/mm^2	v_{ca} μ/c	貝がら模様の番号	σ_n kg/mm^2	v_{ca} μ/c
B 9-2	26.5	0.87	B 11-2	24.3	0.77
B 9-4	25.8	0.71	B 11-4	27.4	0.96
B 9-6	22.8	0.40	B 11-6	21.4	0.60
B 9-8	21.3	0.45	B 11-7	19.7	0.33
B 9-9	29.7	1.05	B 11-8	32.4	1.20
B 9-11	41.1	2.20	B 11-10	34.3	1.64
B 9-13	44.0	2.18	B 11-12	32.3	1.08

(a) B 9 破面

(b) B 11 破面

第 13 図

なお、この関係は σ が材料の降伏点以下の場合であり、これを越えた場合には次のようになる

125 mm 試験片 $\sigma_0 = 19$, $B = 10$

52 mm 試験片 $\sigma_0 = 26$, $B = 22$

4. き裂部に σ_0 をわずかに下回る繰返し応力が作用すると、疲れき裂の進行速度は著しくおそくなり、上の近似式において σ_0 が増した場合に相当する変化が生ずる。

最後に本研究に対し、多くの御教示をいただいた日本海事協会技術参与の各先生に深謝の意を表するとともに煩雑な計算に従事された野口君の労を多とするものである。

文 献

- (1) 星野, 新井, 機械学会論文集, 25, 155 (昭 34-7), 528.
- (2) B. K. Batten, *Inst. Marine Engrs.*, 70, 11(1958), 331.
- (3) C. Lipson, *Machine Design*, 22, (1950), 147.
- (4) 大内田, 機械学会誌, 62, 484 (昭 34-5), 732.

討 論

〔質問〕 (1) 第8図において、き裂角 θ が 90° 以上になると、応力倍加率 ν は外周部より中央部の方が大きくなっているのに、実際には外周部のき裂進行速度が中央部より大きい。この理由を曲げモーメントの変動のためと推定されているが、疲れには最大引張応力だけでなく応力振幅も関係することを考慮すれば、さらに合理的に説明できると思う。すなわち、既に指摘されているようにき裂部分も圧縮応力は負担できると考えると、 $\theta \approx 90^\circ$ の場合、中央部の圧縮応力はほぼ0となるから(外周部にはき裂発生前と同じ圧縮応力が働く)、外周部のき裂進行速度がより大きくなると考えられる。このように説明するのが合理的ではないか。

(2) 第12図の結果から(5・a)式より(5・b)式の方が貝がら模様の説明に合理的であるとしているが、 σ_n が 23 kg/mm^2 以外の場合に対してもいえるのか、また σ_0 の値のとり方によっても変るのではないか。

(3) 第10図において同じ最大引張応力の場合に、き裂進行速度は大形試験片の場合が小形試験片より大きい、いかなる理由によるか。

(4) (5)式の σ_0 は既にはいったき裂が進行する最小の引張応力と思うが、これは材料定数と考えられるものか。

(川田雄一)

〔回答〕 (1) θ が 90° をこえる場合のき裂進行は、貴意のように応力振幅が外周部と中心部に相違する、ということが影響すると考える。しかしき裂縁上の応力が試験片の回転につれて変化する状況は、荷重の動的変化の影響を考えるとおおよび、破面の一部が圧縮応力領域にはいったときの中立軸の位置の決定等に難点があり、これを正確にはあくし難い。

(2) 第12図は円弧近似画法によって求めた貝がら模様につき、(5・a)、(5・b)式の適否を判定したものである。この近似法は第2図に示すように、 σ_n が疲れ限度に近い場合には良く合致するが、第3図のように σ_n が小さい場合には、誤差が大となる。したがって第3図のような貝がら模様につき(5・a)、(5・b)式の判定を行なうには、各貝がら模様の線につきその部分の σ_n を用いて第12図のような検討を行なうべきである。この検討は表示が非常に繁雑となるので、代表的に近似貝がら模様のみにつき結果を図示した。

(3) 試験片表面より中心に向かっての応力こう配によるものと考え。この点につき段付軸の疲れき裂の進行を比較検討中である。

(4) σ_0 は材料の定数であり、 σ が材料の降伏点以下の場合に、(5・b)式の σ_0 は材料のき裂強さ(き裂材の疲れ限度)を示すものとする。

〔質問〕 (1) 570ページにき裂の角度 β うんぬんというのがありますが、これはこの試片に回転曲げ

応力以外にねじり応力が働いているためではないでしょうか。ねじり応力を一度測定されたいかがでしょうか。

(2) 第10図の $v_c=0$ というき裂のすすまない応力は、き裂材の疲れ限度と考えてよろしいでしょうか。もしそうならこの場合、き裂試片の疲れ限度は 11.5 kg/mm^2 (573ページ)ということになります。

私達が以前に行なった実験では、き裂材の疲れ限度は 7 kg/mm^2 程度でしたが、この差は材料の差によるものでしょうか。もっとも私達の場合、き裂は次のようにして入れました。すなわち、V形切欠きをつくり、これに 6 kg/mm^2 程度の応力を($10^6 \sim 10^7$)回かけ、き裂を切欠き底に入れV形切欠きのところをとりぞいてき裂試片をつくったもので、き裂のはいり方も、今回のとちがい付図1のようになっています。

(3) この論文ではき裂がはいったための断面積の減少による応力倍加率 ν_b を考えておられるが、き裂による応力集中によるみかけの応力倍加率も求めるわけにはいかないでしょう

か。第1表での疲れ限度と 11.5 kg/mm^2 (573ページ)からき裂による応力集中度 β_0 が約2となりますが、参考までに私達が行なったデータは付表1のようです。

(中村 宏)

付図1

付 表 1

平滑材の疲れ限度 kg/mm^2	20(問1)	22(問2)
き裂材の疲れ限度 kg/mm^2	10	(6~7) 程度
試片の直径 mm	10	50mm (ただし平滑試片は 10mm)
材質	C=0.18%	C=0.35%

〔回答〕 (1) 試験片に作用するねじり応力は、静的応力 0.9 kg/cm^2 、動的応力 $10 \sim 15 \text{ kg/cm}^2$ という結果を得ている。しかしこれはき裂のない場合であり、き裂が大きくなると、ねじり応力の変動が増し、表面のき裂角度 β に影響を及ぼすものと想像される。

(2) 川田氏への回答と同じ。

(3) 貴意のように疲れき裂による見掛けの切欠き係数は2となると考える。異なった材料については今後続けて実験を行なう予定である。

〔質問〕 第1報の貴重な大形試験の結果を今回さらに試験片の破面につき、詳細な検討をされたことに對し敬意を表します。

(1) 貝がら模様を描かせるために行なわれた荷重

(問1) 中村, 甘粕, 上田, 機械学会論文集, 23, 135 (昭 32-11), 863.

(問2) 中村, 甘粕, 外3名, 機械学会論文集, 25, 151 (昭 34-3), 214.

操作によって、これを行なわない場合のき裂速度との相違が生じたのではないのでしょうか。表面のき裂速度を二つの場合についてしらべる必要があると思います。

(2) Bacon(問3)や Foster(問4)は疲れき裂の進行模様をだ円として解析し実験とよく合うとしており他の破面の例を見ても、だ円と見た方が近いように思われますが、この点御検討願います。

(3) 小形試験片でも貝がら模様を検討され、き裂速度と寸法との関係を更に明らかにされることを希望します。

(4) Gassner(問5)が Programme load の実験できれいな貝がら模様を求めております。この実験と同様な操作をしたことになるでしょう。(大内田 久)

〔回答〕 (1) 荷重操作を行なった場合と、そうでない場合とで、き裂進行速度は確かに若干変化する。それは荷重を増してき裂進行を開始させる際に、き裂は荷重増加と同時に進行を開始せず、若干の時間的遅れの後に進行し始めることが観察されるためである。それゆえ、き裂進行速度を測定する際に、十分長い時間き裂を進行させた結果をとれば、操作の有無は影響しないものとする。

$$\text{—: } \delta = 1 - \cos \theta (1 + \eta \tan^2 \theta) + \sin \theta \sqrt{1 + \tan^2 \theta \cdot \eta^2}$$

$$\text{---: } \delta^2 + 2\delta \tan \theta = [2 \sin (\theta/2) / \cos \theta]^2$$

○: Bacon 実測値 (5/8 in)

Forrest, *J. Appl. Mech.*, 3 (1936), A-25 による。

付 図 2

(問3) Forest, *J. Appl. Mech.*, 3 (1936), A-23.

(問4) Cazaud, *Fatigue of Metals*, 8.

(問5) Gassner, *Konstruktion*, 6 (1954), 101; *Proc. Inst. Mech. Engr.*, 170, 21 (1956), 737.

(2) 貝がら模様の近似法を著者の円弧近似と、Baconのだ円近似について比較すると、付図2のようになる。 θ が $60 \sim 80^\circ$ で円弧近似が約10%大となるが、Baconの実測値には合致している。

(3) 小形試験片の貝がら模様は付図2よりみて、円弧近似法にて描くことができる。すなわち貝がら模様の形状は試験片の大小には関係なく一定とみなしうる。

〔質問〕 実物の疲れ破面にいわゆる年輪が生ずるのは、応力の変化や応力の休止等にもとづくものであることは以前からいわれていたが、これを逆に利用してき裂進行のようすを究明するという行きかたはまことに興味深いものと思う。ことに第10図に示された応力とき裂進行速度との関係に注目したい。一般に疲れ強さとか疲れき裂の進行などは応力の最大値のみによっては定まらず、応力変動範囲が重要な因子となる。回転曲げ試験において試験片表面の最初受ける応力は両振りであるが、き裂縁上の受ける応力は両振りではない。なんとすればき裂部は引張応力は受けえないが、圧縮応力は受けうるものと考えられるからである。このことについては拙論文「疲れ破隙の進行について」(問6)にも述べた。なおき裂縁線上におけるき裂進行に対する抵抗はそのときの応力のみによっては定まらず、応力履歴(コークシング効果など)その他の因子の影響を受け(問7)問題は複雑となる。しかし応力とき裂進行速度との関係についてはこれらのことを考慮して論ずべきではないかと思う。

(河本 実)

〔回答〕 (1) き裂縁上の応力が試験片の回転につれて変化する状況については、川田氏への回答(1)と同じ。

(2) き裂先端のコークシング効果はき裂の進行速度がおそい場合に著しく現われるようである。すなわち第11図のB9-5, B11-7および荷重操作を行なわないB3, B6, 52φmm試験片等は σ に対し v_0 が著しく小さい。これはコークシング効果によりき裂先端部が強化し、き裂が強化層を進行するためにおそくなったとみることができる。また同時にコークシング効果は応力の繰返し数が大きい場合に現われることも想像される。すなわち、き裂進行がすみやかであると、き裂先端はコークシング効果が現われるより早く進行し、この場合にその進行速度と応力の関係は(5・a), (5・b)式のように表わすことができるのである。

(問6) 河本, 西岡, 機械学会論文集, 19, 83 (昭 28-7), 86.

(問7) 河本, 木村, 機械学会論文集, 25, 155 (昭 34-7), 552.