

板試験片切欠き底の面内曲げ低サイクル疲労 表面疲労き裂進展速度則の検討

真谷捷郎*・吉井雄一*
福井太介*

Study on Propagation Law of Surface Fatigue Crack from Small Hole In Notch Root of Beam Plate Specimen

by

Katsurou Shingai, Yuuichi Yosii, Daisuke Fukui

The fatigue test of surface crack propagation was conducted on the plate specimen with the small hole at a notch root in the low cycle fatigue region. The cyclic strain at a notch root was measured by strain gage and the cyclic strain behavior have been shown as the relationship between strain and number of cycles. The rate of surface fatigue crack propagation at a notch root were found from the crack length curve. It is found that the rate of surface fatigue crack propagation is expressed as the m th power of the range of strain intensity factor. Where the strain intensity factor is defined as the parameter multiplied the cyclic strain range at a notch root by root of the surface crack length. The m of m th power of the strain intensity factor range are different in the middle and in the edge of plate thickness. These experimental data and discussion have been presented.

1. 最初に

機械や構造物の低サイクル疲労寿命は、通常切欠きより生じる表面疲労き裂の発生寿命と進展寿命で決まるが、ひずみ範囲が大きい場合には進展寿命が疲労寿命のほとんどを占めることは周知の通りである。従って、切欠き材の低サイクル表面疲労き裂進展寿命評価を定量的に行うことが重要になる。ここで、低サイクル疲労き裂は、疲労き裂部の塑性変形が大きい場合を指し、低応力繰返し条件でもき裂寸法が十分大きいときにはき裂端の塑性域寸法が大きい疲労き裂（小規模降伏条件を越えたき裂）やき裂周辺の広い領域で高応力繰返し条件下にあるときの疲労き裂が考えられる。

従来より、き裂先端が小規模降伏条件になっているときの疲労き裂進展速度は、線形破壊力学に基づく応力拡大係数範囲（ ΔK ）のべき乗則で定量的に表すことができる^{(1), (2), (3)}。また弾性の応力拡大係数範囲べき乗則を適用できない低サイクル疲労き裂の疲労き裂

進展速度則は、 J 積分^{(4), (5)}、COD範囲やひずみ拡大係数範囲^{(6), (7), (8)}等のべき乗則がそれぞれ限定された試験条件毎に提案されている。これらは板厚貫通き裂を入れた中央き裂や両側き裂の試験片、CT試験片、薄肉円筒試験片等を使用して、貫通き裂の疲労き裂進展速度則を求めている事が多い。しかし、切欠きからの表面疲労き裂の低サイクル疲労き裂進展速度則の検討は、実用的には重要であるが、これまであまり検討されていない。

本研究では、両振り面内曲げ下の両側切欠き材の切欠き底の低サイクル表面疲労き裂進展試験を行い、表面疲労き裂進展速度則を検討した。すなわち、片方の切欠き底中央に小孔（直径0.5mm）を加工した両側半円切欠きを有する板試験片を使用して、両振り定曲げ変位面内曲げ下での表面疲労き裂進展試験を行い、この際小孔無しの他方の切欠き底および切欠き前方の側表面等にひずみゲージを貼り、繰返しひずみ挙動を

平成13年10月24日

*機械システム工学科 (Department of Mechanical Systems Engineering)

計測した。本報告では、表面疲労き裂の進展挙動、ひずみ挙動、表面疲労き裂進展速度則を記述している。

また、著者らはこれまでに切欠き板試験片の低サイクル疲労寿命評価の検討において、表面疲労き裂発生寿命と表面疲労き裂進展寿命に関していくつかの結果を報告している^{(9)~(12)}。なお、本論文は機械学会論文集に掲載されたものであるが⁽⁹⁾、材料強度評価法の一助のために本報告にも記載しておきたい。

2. 試験片および実験方法

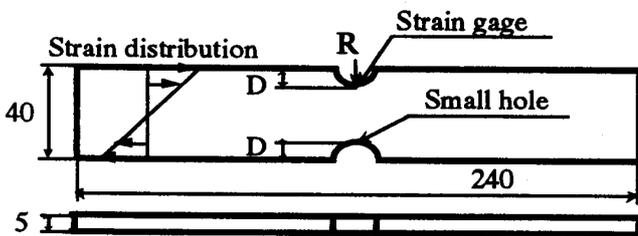
使用した材料は、炭素鋼S 2 5 Cの焼きなまし材(880×1hr)であり、この化学成分を表1に、機械的性質を表2に示す。図1に両側に半円切欠きを有する板試験片を示す。片方の切欠き底中央には、ドリルで直径約0.5 mm 深さ約0.5 mmの小孔をあけている。試験機は、図2に示すようにモーター駆動による偏心カムクランク式面内曲げ疲労試験機を使用した。偏心カムにより両振り定曲げ変位試験を行うことができ、クランクと軸の交差部はアンギュラー玉軸受で円弧曲げ軌道になるようにして、さらに軸方向にスライドできるように工夫している。図3に示すように、切欠き底にはゲージ長さ0.2 mmのひずみゲージを、切欠き

Table 1 Chemical compositions (%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ca
0.24	0.22	0.50	0.012	0.016	0.07	0.15	0.13

Table 2 Mechanical properties

Modulus of elasticity	199 GPa
Yield stress	273 MPa
Tensile strength	457 MPa
Elongation	38 %



R : 4, 8, 12 mm D : 4, 8, 12 mm

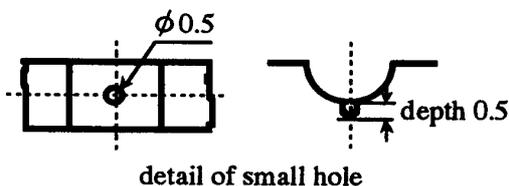


Fig. 1 Notched specimen

前方にはゲージ長さ1 mmのひずみゲージを1~2 mm間隔で数枚、また試験片平行部にはゲージ長さ1 mmのひずみゲージを貼付した。表面疲労き裂長さの計測は、切欠き底に0.2 mm毎にけがき線を入れて、CCDカメラにより拡大して0.1~0.2 mmのき裂進展毎に行った。

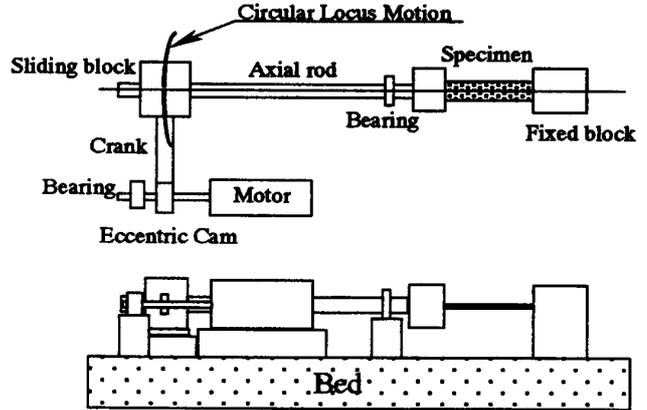


Fig. 2 Fatigue test apparatus

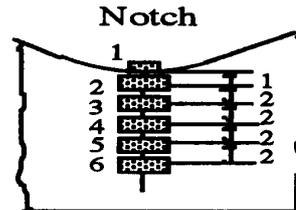


Fig. 3 Positions of strain gages

Table 3 Test conditions of each specimen

Notch root radius R (mm)	Cam No.	Strain range measured ϵ_R (%)
R8	C2	3.05
R8	C4	1.03
R8	C5	0.45
R4	C3	1.60
R12	C2	1.70

3. 試験結果と考察

図4には、切欠き底のひずみ範囲と切欠き底の表面き裂長さ約0.6mmまでの寿命 $N_{a=0.6}$ (切欠き底小孔より長さ0.05mmのマクロき裂発生寿命)、表面き裂長さ3.2mmまでの寿命 $N_{a=3.2}$ およびほぼ板厚貫通き裂になる約4.8mmまでの寿命 $N_{a=4.8}$ の関係を示している。各表面き裂長さの寿命について、それぞれのデータ点を通る直線を引き示しているが、3線とも勾配は約0.5になる。

図5には、切欠き底の最大ひずみと最小ひずみの線

返し数に対する変化の例を示している。切欠き底のひずみは繰返し数とともに増加して、繰返しクリープ挙動を生じていることがわかる。図6には、切欠き底のひずみ範囲および平均ひずみと繰返し数の関係を示す。ひずみ範囲は繰返し数に対してほぼ一定になるが、平均ひずみは繰返し数とともに増加する。図7には、繰返し数10および100サイクル時のひずみ分布変化の一例を示すが、切欠き底部のひずみ分布は繰返し数とともに片振り引張りに変化していく。このことは後述する表面疲労き裂の両振り曲げ繰返し中に生じるき裂開閉口で、き裂を開口するように寄与していると考えられる。

なお、試験に使用した3種類の偏心カムについて測定された切欠き底のひずみ範囲は、それぞれ3.05, 1.03, 0.45%であり、降伏ひずみ範囲(0.27%)を十分越えている。ここで、降伏ひずみ範囲は降伏応力の2倍を縦弾性係数で除した値で、0.27%になる。

図8には各試験片の表面疲労き裂長さ a と繰返し数の関係を示している。図9には、表面き裂が小孔より発生した直後の長さ0.6mmからほぼ板厚貫通き裂になる長さ4.8mmまでの表面き裂長さ a と $a=0.6$ の間でのき裂進展寿命期間を考慮して、表面疲労き裂長さ比 $(a-0.6)/4.2$ と寿命比 $(N-N_{a=0.6})/(N_{a=4.8}-N_{a=0.6})$ の関係を示している。図8から、繰返しひずみ範囲の大小で板縁近くの表面疲労き裂進展曲線に少し差が見られるが、大体同じ傾向曲線になっている。

また、図10にはき裂進展経路のモデルを示し、A, Bで進展状態を区分けし、A区間は板厚中央部の典型的な表面き裂進展区間で、B区間は板縁が表面疲労き裂進展に影響を及ぼす区間と考える。

図11には、切欠き底の表面き裂進展速度の対数とき裂長さの関係を示している。これより板厚中央部の表面き裂進展速度はき裂長さに比例すること(勾配が1になる)がわかる。また表面き裂長さが板縁に近づくと勾配は1以上になる。図12において表面き裂長さ3.2mmを境界にして区間A, Bにわけた理由は、表面疲労き裂長さが約3.2mm以下では勾配は1になり、3.2mm以上では勾配は1以上になることによる。

図12に、切欠き底の表面疲労き裂進展速度(da/dn)と切欠き底の弾塑性ひずみ範囲に表面き裂長さの平方根を乗じたパラメーター($\epsilon_R \sqrt{a}$, これをひずみ拡大係数範囲と呼ぶ)の関係を両対数グラフにプロットして示す。両者の相関は、表面疲労き裂進展速度が $10^{-4} \sim 10^{-1}$ mm/cycleのデータ範囲で勾配2の直線相関があり、本実験式は式(1)の2乗則で表される。

$$da/dn = C (\epsilon_R \sqrt{a})^2 \quad (1)$$

da/dn : 切欠き底の表面疲労き裂進展速度
(mm/cycle)

C: 材料定数

ϵ_R : 切欠き底のひずみ範囲 (%)

a: 切欠き底の表面疲労き裂長さ (mm)

本図から、図11に示す区間Aの板厚中央部では勾配は2になり、上述のようにき裂進展速度は表面き裂長さに比例する。なお、西谷らは¹³⁾平滑試験片の回転曲げや引張り圧縮の微小表面疲労き裂進展速度が、き裂長さに比例することを見出ししている。区間Bの板縁部では勾配は2以上になり、き裂進展速度は区間Aより早くなる。図12には、切欠き半径が4, 8, 12mmの試験片のデータを一緒にプロットしているが、切欠き半径による有意差は見られなく、本実験式は任意の切欠き半径に適用できると考えられる。また、図4の直線の勾配が約0.5になることは、式(1)の結果に対応した勾配を表している(積分すると $\epsilon_R N^{1/2} = F(a)$ になること)。実験データが勾配0.5にほぼ一致していることは、当然だが表面疲労き裂進展寿命が本疲労寿命の中で支配的寿命であることを示している。

ここで、疲労試験条件は両振り定曲げ変位面内曲げであるが、表面き裂の開閉口については図5より最大と最小のひずみが引張り側に伸び続けているので、面内曲げの両振り全範囲ではほぼ開口していると考えて、ひずみ範囲はき裂進展速度に対して全範囲を有効とした。

また、アルミニウム合金材(A2017P材)について同様な試験片と試験条件で切欠き底の表面疲労き裂進展試験を行った結果より、表面疲労き裂進展速度とひずみ拡大係数範囲の関係を求めると、本材の勾配も鋼材の勾配2と同じで、式(1)の2乗則が成り立つことがわかる¹⁴⁾。

図14に切欠き底の表面き裂の弾塑性状態の模式図を示すが、切欠き底に塑性域を伴う大きい弾塑性ひずみが繰り返されていて、さらに表面き裂先端ではき裂によるひずみ集中を生じているため、線形破壊力学の応力拡大係数の適用外になり、ここでは切欠き底の弾塑性ひずみ範囲に表面き裂長さの平方根を乗じたパラメーター(ひずみ拡大係数範囲)の適用が妥当であろうと考えている。ひずみ拡大係数範囲は、き裂先端部が小規模降伏状態では線形破壊力学の ΔK ($\sigma_R \sqrt{a}$)と等価になり、弾性より塑性までの広い範囲に渡り疲労き裂進展速度を定量的に表すパラメーターとして適用できよう。

著者らは(6), 既に両側切欠き板試験片の面内定曲げ角度制御下の低サイクル貫通疲労き裂進展試験において, 貫通疲労き裂進展速度はき裂先端に対応する公称曲げひずみ範囲とき裂長さの平方根の積なるひずみ拡大係数範囲のべき乗になることを示している. これより, 切欠き底の表面疲労き裂に対しても切欠き底の弾塑性ひずみ範囲を考えてひずみ拡大係数範囲とすることにより, 表面き裂と貫通き裂にひずみ拡大係数範囲を適用できることになる.

また, 実際の機械や構造物において, き裂部の公称弾塑性ひずみ範囲を計測したり, 計算することは簡単であり, 本表面疲労き裂進展則は実用的な適用も期待できると考えている.

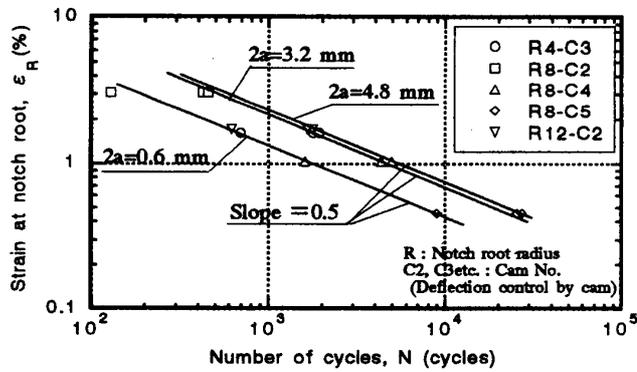


Fig. 4 Relationship between strain range at notch root and number of cycles to surface crack lengths

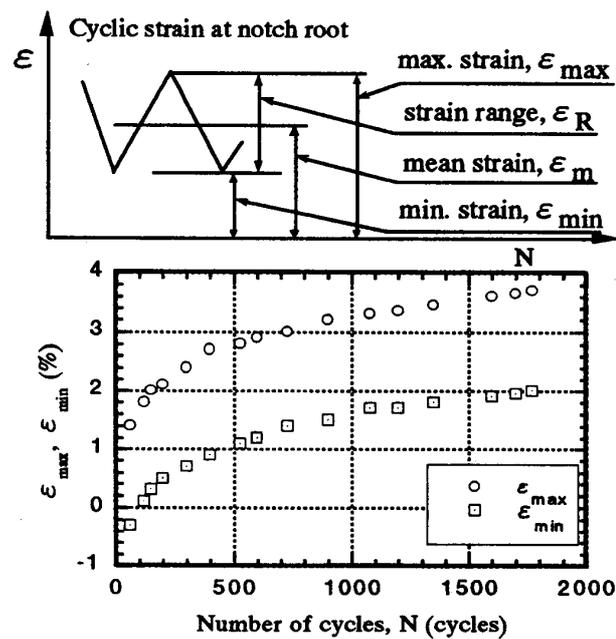


Fig. 5 Relationship between ϵ_{max} , ϵ_{min} and N

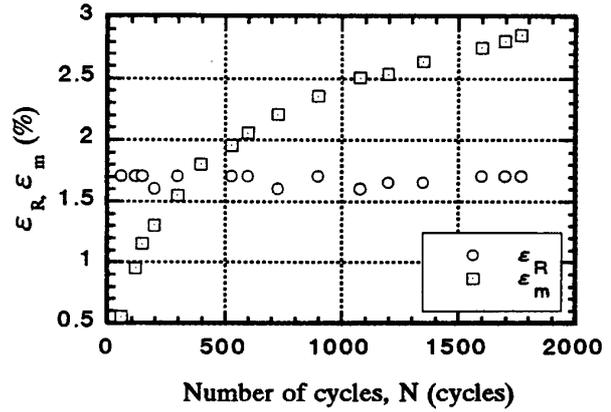


Fig. 6 Relation between ϵ_R , ϵ_m and N

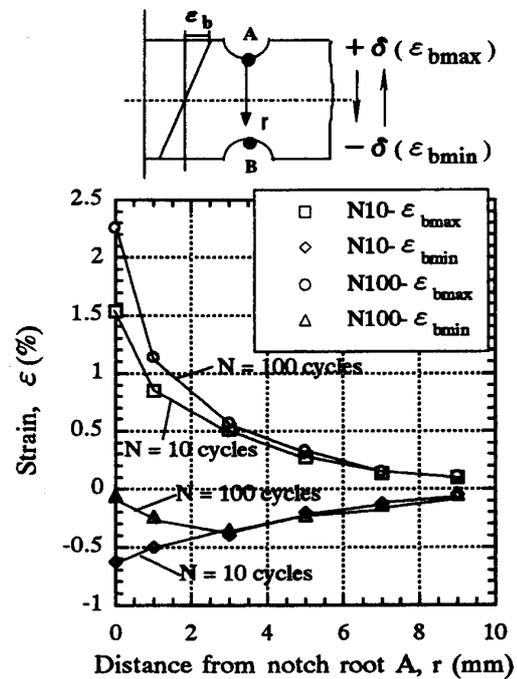


Fig. 7 Change of strain distribution

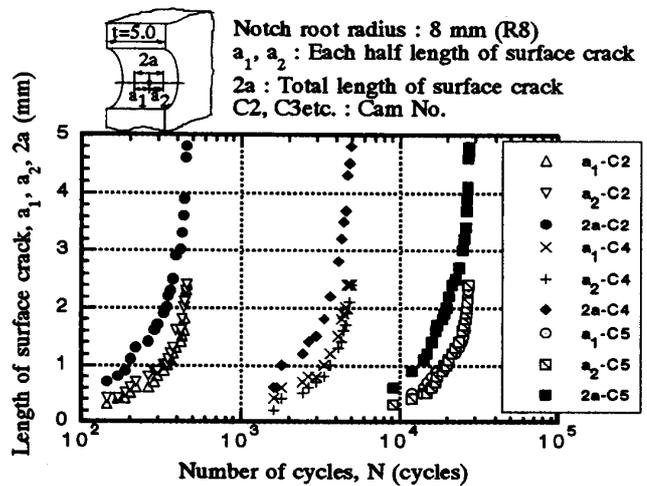


Fig. 8 relationship between surface crack length and number of cycles

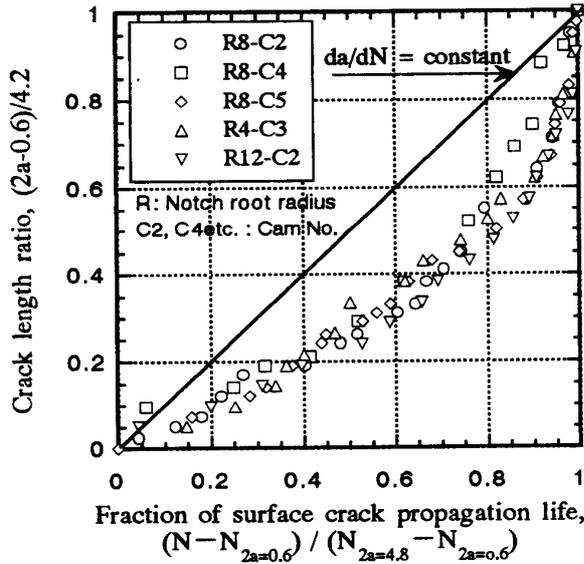


Fig. 9 Crack length ratio vs fraction of fatigue crack propagation life

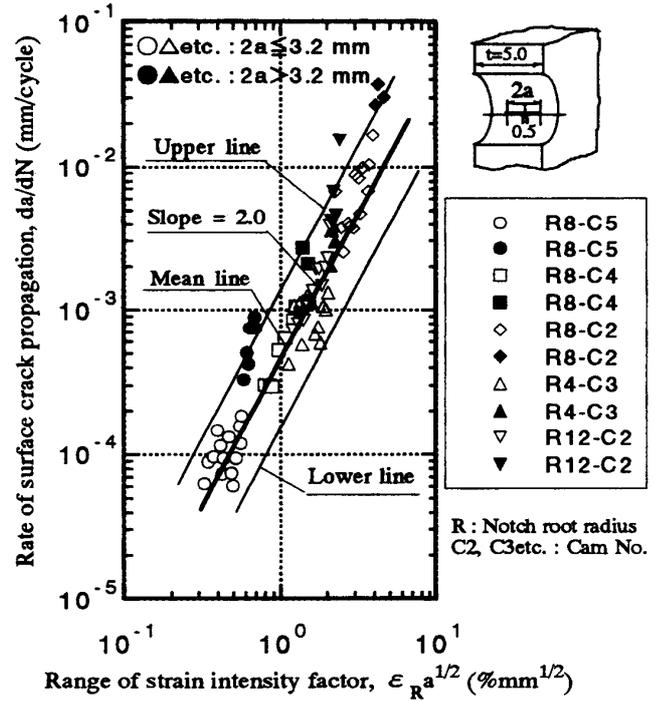


Fig. 12 Relationship between rate of surface fatigue crack propagation and range of strain intensity factor

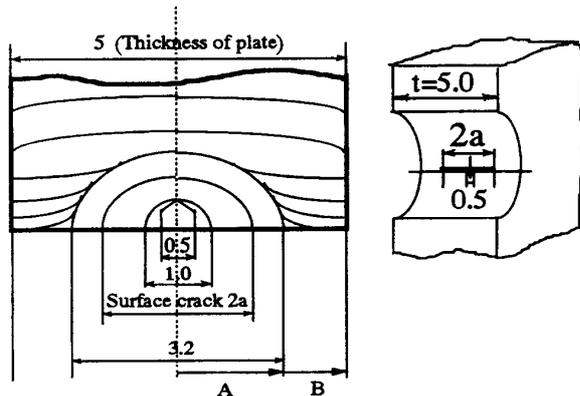


Fig. 10 Path model of surface fatigue crack

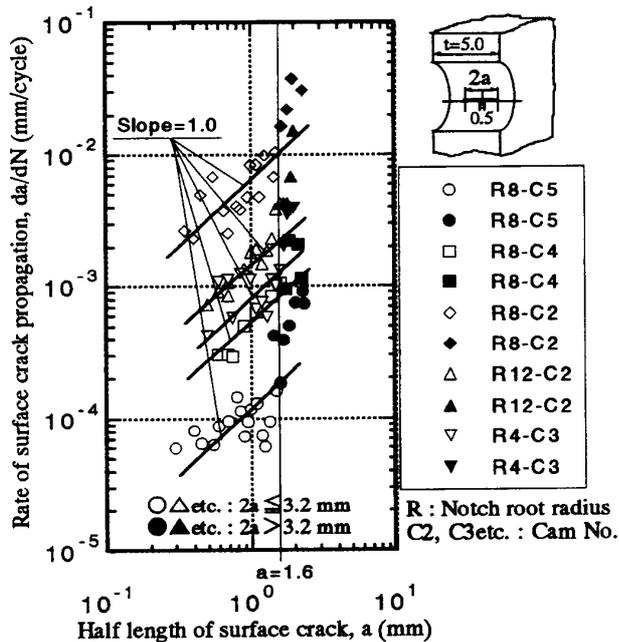


Fig. 11 Relationship between rate of surface fatigue crack propagation and length of surface crack

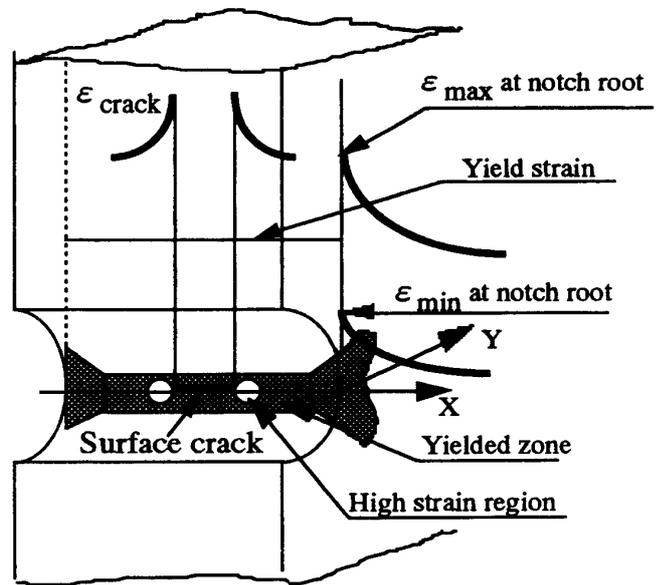


Fig. 13 Strain state of surface crack at notch root

4. 結 言

- (1) 切欠き底の表面疲労き裂進展速度 (da/dn) は、切欠き底の弾塑性ひずみ範囲に表面き裂長さの平方根を乗じたパラメーター ($\epsilon_R \sqrt{a}$, ひずみ拡大係数範囲) の2乗則になる。しかし板厚縁部では2乗以上になりき裂進展速度は板厚中央部より早くなる。
- (2) 本表面疲労き裂進展速度則は、切欠き半径に依らず、また鋼材とアルミニウム合金材に適用でき、汎用的であると考えられる。また、本速度則は一般的にはひずみ拡大係数範囲のべき乗則になると考えられる。
- (3) 切欠き底の繰返しひずみは、繰返し数とともに引張り側に増加する繰返しクリープ挙動を示す。従って、両振り定曲げ変位条件にもかかわらず切欠き底の表面き裂は片振り引張り条件になり、き裂は切欠き底の全ひずみ範囲でほぼ開口していると考えられる。

謝 辞

試験片加工において、御支援を頂きました実習工場の皆様にお礼を述べます。

参 考 文 献

- (1) Paris, P. C. ・ Erdogan, F., Trans. ASME, Ser. D, 85-4 (1963), 528
- (2) Shingai, K.ほか2名, J. Eng. Fract. Mech. 5 (1973), 528
- (3) 小林・ほか5名, 機論, 43-366, A(昭52), 416
- (4) Dawling, N. E., ASTM STP 590(1976), 82 and ASTM STP 601(1976), 19
- (5) 朝田. 結城. 真谷. ほか5名, I. Mech. E., C52 / 80 (1980), 347
- (6) 西谷・真谷, 機論, 34-258 (昭43), 224
- (7) 平野・ほか2名, 機論, 42-361, A (昭51), 2673
- (8) 大南・坂根, 機論, 43-375 (昭52), 3955
- (9) Shingai, K., Proc. of ICF9, 3 (1997), 1421
- (10) Shingai, K. ・ほか2名, Proc. of FATIGUE'99, 4-2 (1999), 1181
- (11) 真谷・ほか2名, 材力部門機講論, 99-16 (1999), 535
- (12) 真谷・ほか2名, 年次機講論, 99-1 (1999), 89
- (13) 西谷・後藤, 機論(A), 51-462 (昭60), 332
- (14) 真谷, 機講論, 998-1 (1999), 15
- (15) 真谷-ほか2名, 機論 (A) , 67-660 (2001), 1372