

# 疲労き裂先端の圧縮塑性域が伝播挙動に及ぼす影響

正員 熊 纒\* 正員 勝 田 順 一\*\*  
河 野 和 芳\*\* 崎 山 毅\*\*

Effects of Compressive Plastic Zone at the Fatigue Crack Tip on Propagation Behavior

by Yiong Xiong, *Member* Junichi Katsuta, *Member*  
Kazuyoshi Kawano Takeshi Sakiyama

## Summary

In this paper, emphasis on physical meanings of hysteresis loops denoting a relationship between loads and strains near the fatigue crack tip, variations of the tensile plastic load zone in loading and the compressive plastic load zone in unloading are studied respectively under various test conditions, and the effects on acceleration, delayed retardation and non-propagation during fatigue crack propagation are also studied. It can be speculated that the compressive plastic zone at the crack tip has some effects on fatigue crack propagation. Furthermore, it is known that the crack closure phenomenon ends after the compressive plastic zone appears but before the minimum load. Therefore, a parameter  $P_{CF}$  called the crack closure finish load is presented for evaluating behavior of fatigue crack propagation.

## 1. 緒 言

疲労き裂伝播中の閉口現象が Elber<sup>1)</sup>により確認されてから、き裂先端の弾塑性挙動が疲労き裂伝播に大きく影響することが明らかになってきた。現在、このことを評価するパラメータとして、Parisにより提案された  $\Delta K(=K_{\max}-K_{\min})$ の代わりに、き裂先端が開口してからの有効応力拡大係数範囲  $\Delta K_{\text{eff}}(=K_{\max}-K_{\text{op}})$ が用いられている。また、西谷ら<sup>2)</sup>は閉口するまでの  $\Delta K_{\text{eff}}(=K_{\max}-K_{\text{cl}})$ を定義した。これらの評価法では、き裂先端の塑性変形によるコンプライアンス変化の物理的意味は十分に考慮されていない。豊貞ら<sup>3)</sup>は疲労伝播中のコンプライアンスの変化を考察することによって、再引張塑性域形成荷重  $P_{\text{RPG}}$ を定義し、き裂先端が塑性変形する間の  $\Delta K_{\text{RP}}(=K_{\max}-K_{\text{RPG}})$ を提案した。しかしながら、これらのパラメータは、注目点から最大荷重までの荷重範囲での評価であり、き裂先端の圧縮塑性変形の役割は評価されていない。

そこで、本論文では、き裂先端近傍ひずみと荷重から算出するヒステリシスループにおける負荷引張塑性域と除荷圧縮塑性域の生じ始める点の変化に注目し、疲労き裂伝播中の加速、遅延減速及び停留現象との関連を詳しく調査することによって、き裂先端にある圧縮塑性域の変化が疲労

き裂伝播に与える効果を明らかにすることを目的とする。一定荷重振幅、最小荷重を一定にして応力比を変化させるスパイク状及びブロック状の繰返し荷重を負荷する疲労き裂伝播試験、及び最大荷重を一定に保ちながら最小荷重を上昇させる  $K_{\text{th}}$ 試験を行った。

## 2. 試験及び計測方法

### 2.1 疲労き裂伝播試験条件及び材料

疲労き裂伝播試験は、200kN 電気サーボ式疲労試験機を使用し、高精度ロードセルとデジタル型動ひずみ計、及び自作した計測プログラムを用いて、荷重、き裂先端近傍ひずみ、試験片背面ひずみをサンプリングタイム 1msec で同時計測した。試験中の状況はパソコン画面でモニタした。

使用した材料は溶接構造用軟鋼(JIS-SM400B)であり、Fig.1に示すようなCT型試験片を用いた。また、き裂伝播経路に沿って高密度5連ひずみゲージを貼付し、疲労き裂先端に最も近い未切断ひずみゲージを選択して疲労き裂先端近傍ひずみを計測した。載荷条件はFig.2に示すように、載荷速度10Hz、最大荷重20kN、最小荷重2kNの引張sin波荷重を基本荷重として、一定振幅の繰返し荷重、一定振幅の繰返し中にスパイク荷重、ブロック状に振幅を増減させる繰返し荷重を負荷する疲労き裂伝播試験及び  $K_{\text{th}}$ 試験を行った。スパイク荷重載荷の場合には、き裂先端が42.9mm, 51.3mm, 53.6mm,

\*長崎大学大学院生産科学研究科  
\*\*長崎大学工学部構造工学科  
原稿受理 平成17年8月25日

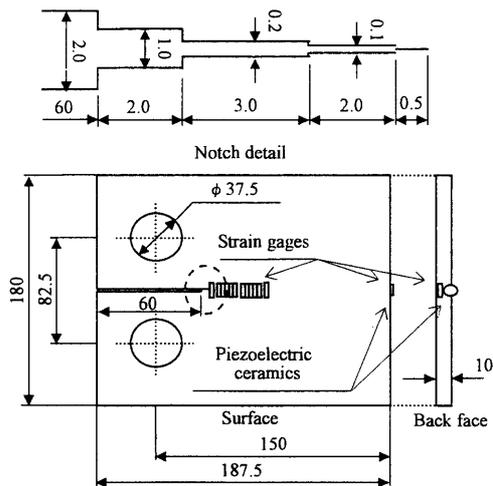


Fig.1 Shape of CT type specimen

63.3mm と 72.3mm まで進展する時点で、スパイク荷重を負荷した。ブロック荷重載荷の場合には、繰返し回数 5 万回ごとに最大荷重を増減させた。また、 $K_{th}$  試験の場合には、最大荷重は一定で、き裂が 2.5mm 伝播するごとに最小荷重を逐次上昇させて、14 ステップ行った。

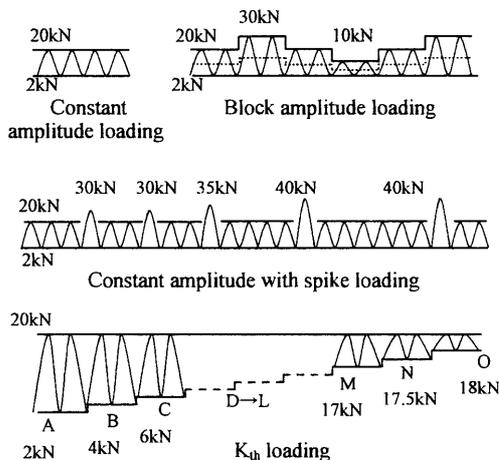


Fig.2 Types of external loading

## 2.2 計測方法

疲労き裂伝播試験中、4000 回ごとに計測したき裂先端近傍ひずみと荷重の関係の一部を Fig.3 に示す。また、これらの結果は 1 枚のひずみゲージで計測した結果である。なお、1 回の計測結果ごとにき裂先端近傍ひずみから除荷弾性ひずみを引き算して横軸方向に拡大することで、ヒステリシスループを求めた。その一例を Fig.4(b)に示す。このヒステリシスループを載荷側と除荷側に分離して、最小二乗法を適用して関数化した<sup>4)</sup>。また、ヒステリシスループのコンプライアンス変化を詳細に調査するために、ひずみを荷重で一回微分して  $d\varepsilon'/dp$  を、二回微分して  $d^2\varepsilon'/dp^2$  を求め、これらと  $P$  の関係を Fig.4(a)と Fig.4(c)に示す。

町田ら<sup>5)</sup>も述べているように、除荷過程においては、き裂先端に再圧縮塑性域が形成するとともに  $d\varepsilon'/dp$  が上昇しているのに対して、き裂が開くと見掛け上のリガメントが増加するとともに  $d\varepsilon'/dp$  が下降していることから、除荷側の一回微分の極大値を閉口荷重  $P_d$  と判断する。また、負荷過程においては、き裂開口以前は  $d\varepsilon'/dp$  が上昇し  $d^2\varepsilon'/dp^2$  が下降しているものの、き裂先端に再引張塑性域が形成するとともに  $d\varepsilon'/dp$  と  $d^2\varepsilon'/dp^2$  が共に上昇することから、負荷側の二回微分の極小値を再引張塑性域形成荷重  $P_{RPG}$  と判断する。

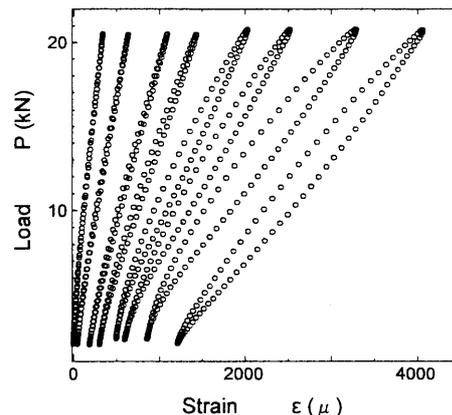


Fig.3 The examples of relation between load and strain near fatigue crack tip

また、除荷側の二回微分の極小値を再圧縮塑性域形成荷重  $P_{RCPG}$  とする。ヒステリシスループの除荷側を二回微分した場合、 $P_d$  と  $P_{min}$  の間に極値が現れた。 $P_d$  からこの極値に至る間は、閉口域の成長が支配因子になるとともに、再圧縮塑性域の成長速度が  $P_{RCPG}$  から  $P_d$  に至るよりも遅くなることから、 $d\varepsilon'/dp$  が下降し  $d^2\varepsilon'/dp^2$  が上昇しているものと考えられる。この極値まで除荷すると、閉口可能なき裂表面が完全に接触されて、圧縮塑性域が成長しないため、この後から  $P_{min}$  に至る間は  $d\varepsilon'/dp$  と  $d^2\varepsilon'/dp^2$  が共に下降しているものと考えられる。したがって、この極大値をき裂開口終了荷重  $P_{CF}$  と定義する。しかし、 $P_d$  から  $P_{CF}$  に至る除荷過程では圧縮塑性域が存在しているため、本文では  $P_{RCPG} \sim P_{CF} (\Delta P_{RCF})$  の領域を除荷圧縮塑性荷重域としてき裂伝播挙動を考察することにする。なお、 $P_{RPG} \sim P_{max} (\Delta P_{RPG})$  の領域を負荷引張塑性荷重域、 $P_{max} \sim P_{RCPG}$  の領域を除荷弾性荷重域、 $P_{CF} \sim P_{min}$  の領域をヒステリシスループ tail と呼ぶことにする。

## 3. ヒステリシスループによる疲労き裂伝播挙動の考察

### 3.1 一定振幅荷重の場合

Fig.5 は一定荷重振幅の繰返しによる疲労き裂伝播の試験結果である。ただし、Fig.5(a)は、疲労き裂伝播に伴い、き裂先端に得られたヒステリシスループの推移の一部を示し

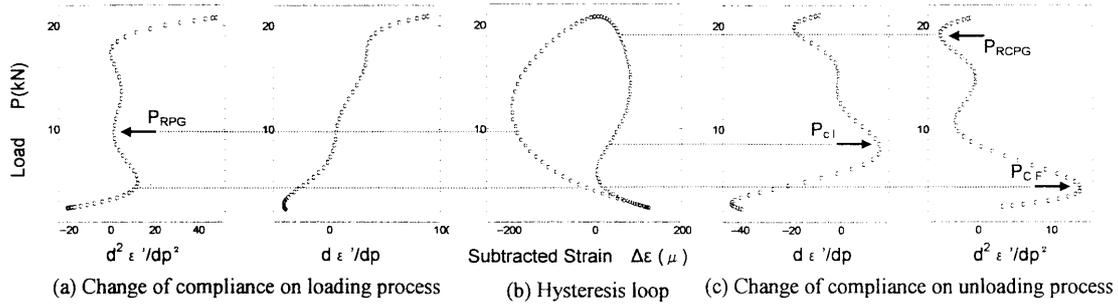


Fig. 4 Quantitative calculation of  $P_{RCPG}$ ,  $P_{RPG}$ ,  $P_{cl}$  and  $P_{CF}$

たものである。疲労き裂伝播の初期段階では、切欠きの幅が 0.1mm である切欠き底で、小さな荷重で降伏が起こるため、 $P_{RCPG}$  に対して  $P_{RPG}$ ,  $P_{cl}$ ,  $P_{CF}$  が低荷重域に存在する。この場合には、ヒステリシスループ tail が Fig.5(a)(1) のように形成しない。 $P_{RPG}$ ,  $P_{cl}$ ,  $P_{CF}$  が上昇するにつれて、ヒステリシスループ tail が Fig.5(a)(2) のようにしだいに大きくなり、 $P_{RCPG}$ ,  $P_{RPG}$ ,  $P_{cl}$ ,  $P_{CF}$  がそれぞれ一定値に安定すると、ヒステリシスループ tail が Fig.5(a)(3),(4) のように明確になり、き裂が定常状態で伝播するようになる。しかし、最終段階では、 $P_{RCPG}$  が上昇し  $P_{RPG}$ ,  $P_{cl}$ ,  $P_{CF}$  が低下して、き裂先端が Fig.5(a)(5),(6) のように除々に閉口しなくなり、き裂伝播速度が急増する。これは、き裂が大きくなりリガメントが小さくなると、き裂全体が大きくなり開口するため、除荷過程ではき裂が閉口しにくくなるものと考えられる。ヒステリシスループ tail の大きさの変化は、Elber<sup>1)</sup> が述べているように、き裂が進展するにつれてき裂表面に残留する引張変形層の影響によるものと考えられる。

3.2 スパイク荷重載荷の場合

Fig.6 は、一定振幅の繰返し荷重中にスパイク荷重を負荷する疲労き裂伝播の試験結果である。ただし、Fig.6(a) は、スパイク荷重を 4 回目(図(b)中の D 時点)負荷した直前、直後のヒステリシスループの変化状態であり、Fig.6(b) は、微分法によって算出した各変曲点荷重とき裂長さの関係を示したものである。これらの図から、スパイク D を負荷する直前に、疲労き裂伝播速度は一定振幅荷重下における同じ時期のレベルに回復すると、ヒステリシスループの様子も一定振幅荷重下における安定進展時期の結果と同じであることがわかる。しかしながら、スパイク D を負荷した時点で、ヒステリシスループ tail が Fig.6(a)(2) のように消失し、 $P_{RPG}$ ,  $P_{cl}$ ,  $P_{CF}$  が一旦低下してき裂が加速する。これは、過大引張荷重によりき裂先端近傍において大きい引張塑性変形が生じて、き裂先端が開口し易くなるためであると考えられる。しかし、その後、 $P_{cl}$  が除々に高い荷重域まで上昇し、ヒステリシスループ tail が Fig.6(a)(3),(4),(5),(6) のように除々に大きくなり、

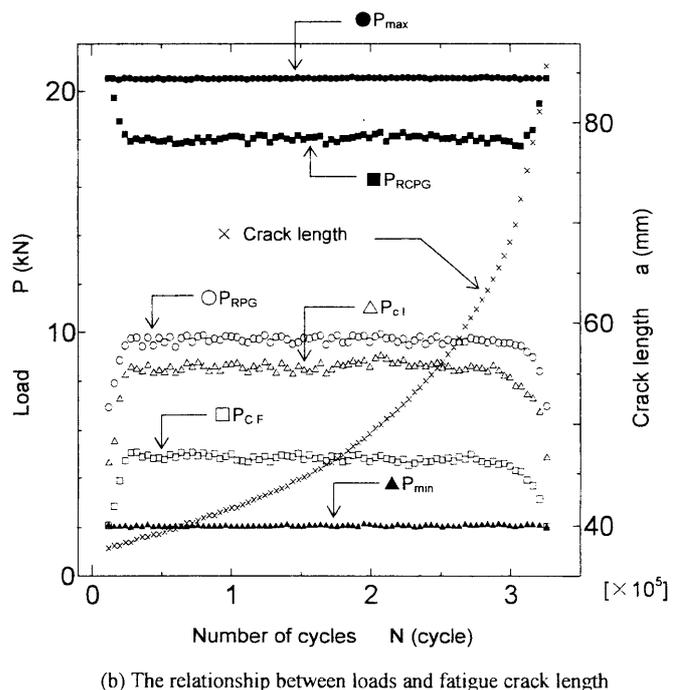
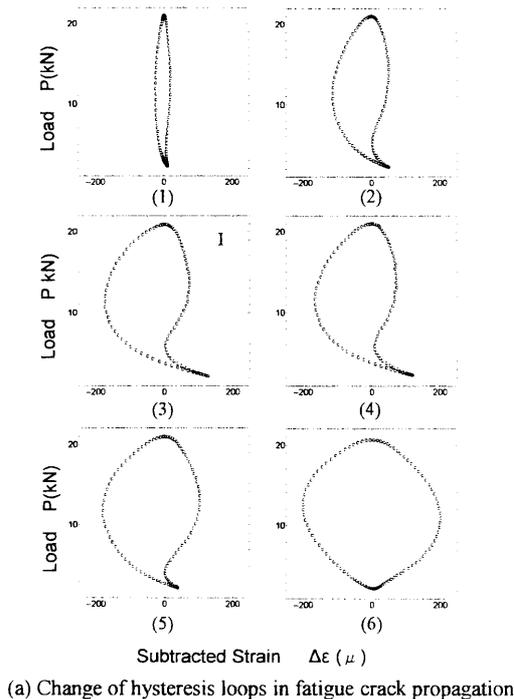


Fig.5 Results of constant amplitude loading test

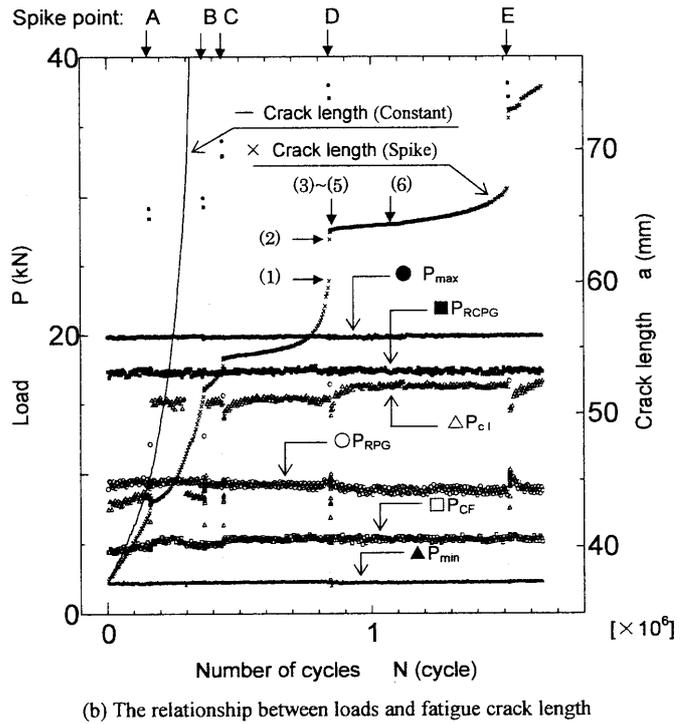
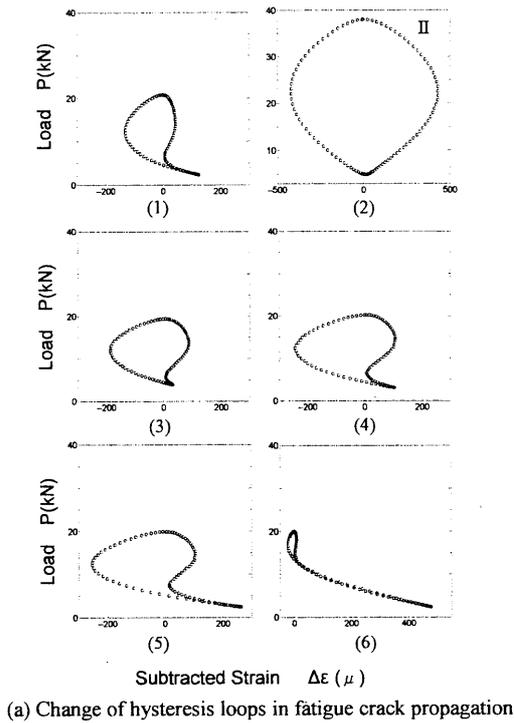


Fig.6 Results of spike amplitude loading test

き裂がしだいに減速する。これは、過大荷重時に生じた大きな塑性変形域をき裂が進展する結果、き裂表面に厚い残留引張塑性変形層が形成されて、き裂が閉口し易くなるためであると考えられる。したがって、ヒステリシスループの推移およびヒステリシスループ tail の変化により、スパイク荷重載荷後の遅延現象が推察できることが明らかとなった。

3.3 ブロック荷重載荷の場合

Fig.7 は、ブロック状に振幅を変化させた疲労き裂伝播の試験結果である。ただし、Fig.7(a)は、段階ごとのある箇所(図(b)中のひし形矢印)で計測したヒステリシスループを示したものである。A 段階は試験条件が同じ一定振幅荷重試験の結果と同じである。B 段階で最大荷重  $P_{max}$  を 30kN まで上昇さ

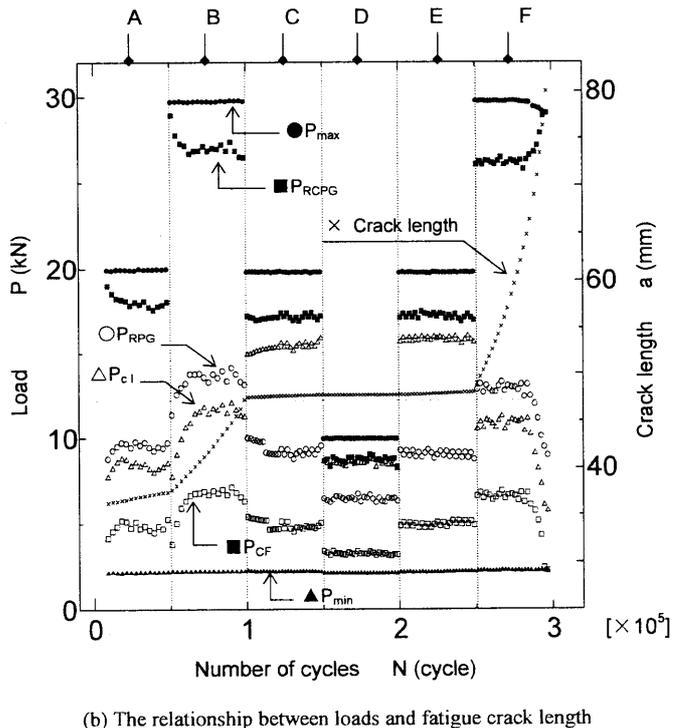
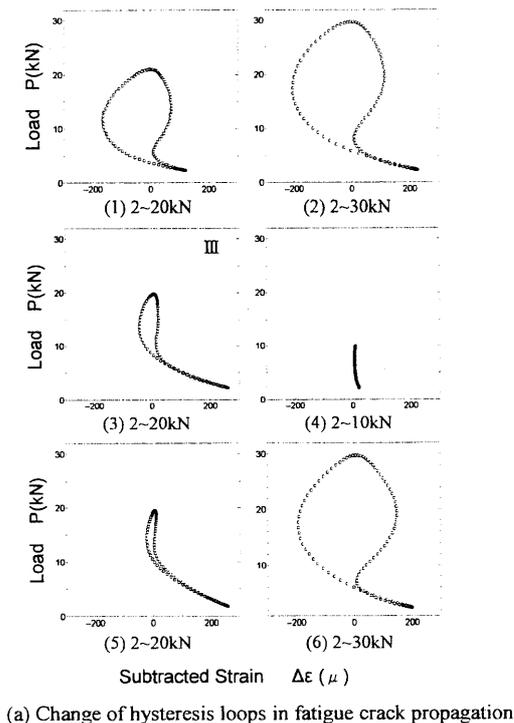


Fig.7 Results of block amplitude loading test

せると、 $P_{RPG}, P_{cl}, P_{CF}$  が一旦低下してき裂が加速する。この現象はスパイク荷重を負荷した直後の状況と同じである。その後、き裂が進展するにつれてき裂表面の残留引張変形層が厚く、き裂が閉口し易いために、 $P_{RPG}, P_{cl}, P_{CF}$  が上昇し、定常状態になる。C 段階及び E 段階では、 $P_{RCPG} \sim P_{cl}$  が縮小し、ヒステリシスループ tail が Fig.7(a)(3),(5) のように長くなる。これは、B 段階でき裂先端に形成された大きい引張変形域を通過しておらず、き裂が閉口し易くなっているために、き裂が減速するものと考えられる。D 段階では  $P_{max}$  が C 段階の  $P_{RPG}$  に近づいて、 $P_{RCPG} \sim P_{cl}$  がほとんど 0 となり、低応力振幅となってき裂先端は Fig.7(a)(4) のように弾性変形のみとなり停留状態になるものと考えられる。F 段階では、 $P_{max}$  の増加に伴い、 $P_{RCPG}$  が上昇し  $P_{RPG}, P_{cl}, P_{CF}$  が低下して、 $\Delta P_{RPG}$  と  $\Delta P_{RCF}$  が拡大することから、き裂が再び加速することがわかる。

### 3.4 $K_{th}$ 試験の場合

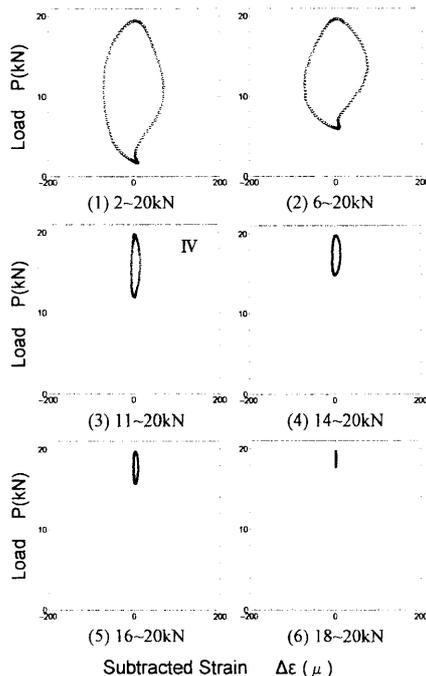
Fig.8 は、ブロック状に振幅を変化させた  $K_{th}$  試験の結果である。ただし、Fig.8(a) は、 $K_{th}$  試験におけるいくつかの段階のヒステリシスループを示したものである。Fig.8(a)(1) では試験条件が同じ一定振幅荷重試験の初期結果と同じ形である。しかし、 $P_{min}$  が逐次上昇するに伴い、ヒステリシスループが Fig.8(a)(2),(3),(4),(5),(6) のように小さくなると、ヒステリシスループ tail も徐々に消失する。また、Fig.8(b) より、荷重振幅が小さくなると、 $P_{RPG}$  が  $P_{max}$  までに、 $P_{cl}$  が  $P_{min}$  に漸近し、き裂が減速して停留することがわかる。これは、 $P_{max}$  を一定に保った状態で、き裂表面に形成された残留引張塑性

変形層の厚さがほぼ同じであるため、 $P_{min}$  が高荷重域まで逐次上昇するにつれて、その除荷過程では、き裂が閉口するまでに荷重が  $P_{min}$  に達して、ヒステリシスループ tail が消えるような減速現象を表すものと考えられる。しかし、前履歴段階の除荷弾性域まで最小荷重が上昇すると、その後の荷重過程では弾性状態にあるき裂の開口もあまり大きくなり、停留中のループの開口は非常に小さい。この特徴はブロック荷重試験と同様の結果である。したがって、き裂が進展するためには、き裂先端に十分な圧縮塑性域が形成される必要があることが明らかとなった。

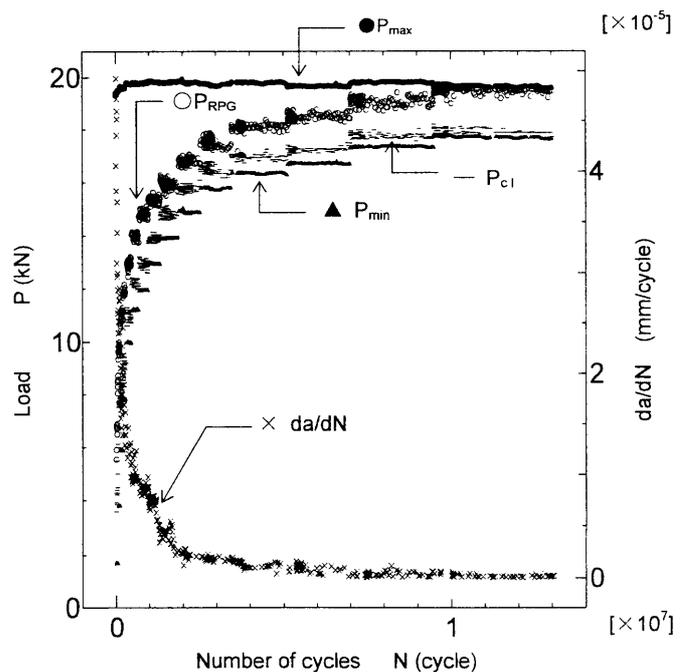
## 4. き裂先端の実振幅の変化が圧縮塑性域に及ぼす効果の評価

Fig.9 は、上述のような試験結果により、それぞれ疲労き裂が定常に進展、加速、減速した場合の例である。また、最大荷重まで負荷される過程では生じるき裂開口形状、最小荷重まで除荷される時点のき裂閉口形状、およびき裂先端近傍で生じる塑性域成長の模式図も Fig.9 に示す。ただし、Fig.9(a) は一定振幅荷重下でき裂が定常に進展した例(Fig.5(a)(3))を、Fig.9(b) はスパイク荷重荷重時点で疲労き裂が加速した例(Fig.6(a)(2))を、Fig.9(c) はブロック荷重荷重下で疲労き裂が減速した例(Fig.7(a)(3))を、Fig.9(d) は  $K_{th}$  試験中で疲労き裂が減速した例(Fig.8(a)(3))を示す。

Fig.9(a) を例にして、1 サイクルにおけるき裂開閉口挙動を以下のように述べる。 $P_{min}$  より荷重過程に入ると、 $P_{CF}$



(a) Change of hysteresis loops in fatigue crack propagation



(b) The relationship between load and fatigue crack growth data

Fig.8 Results of  $K_{th}$  test

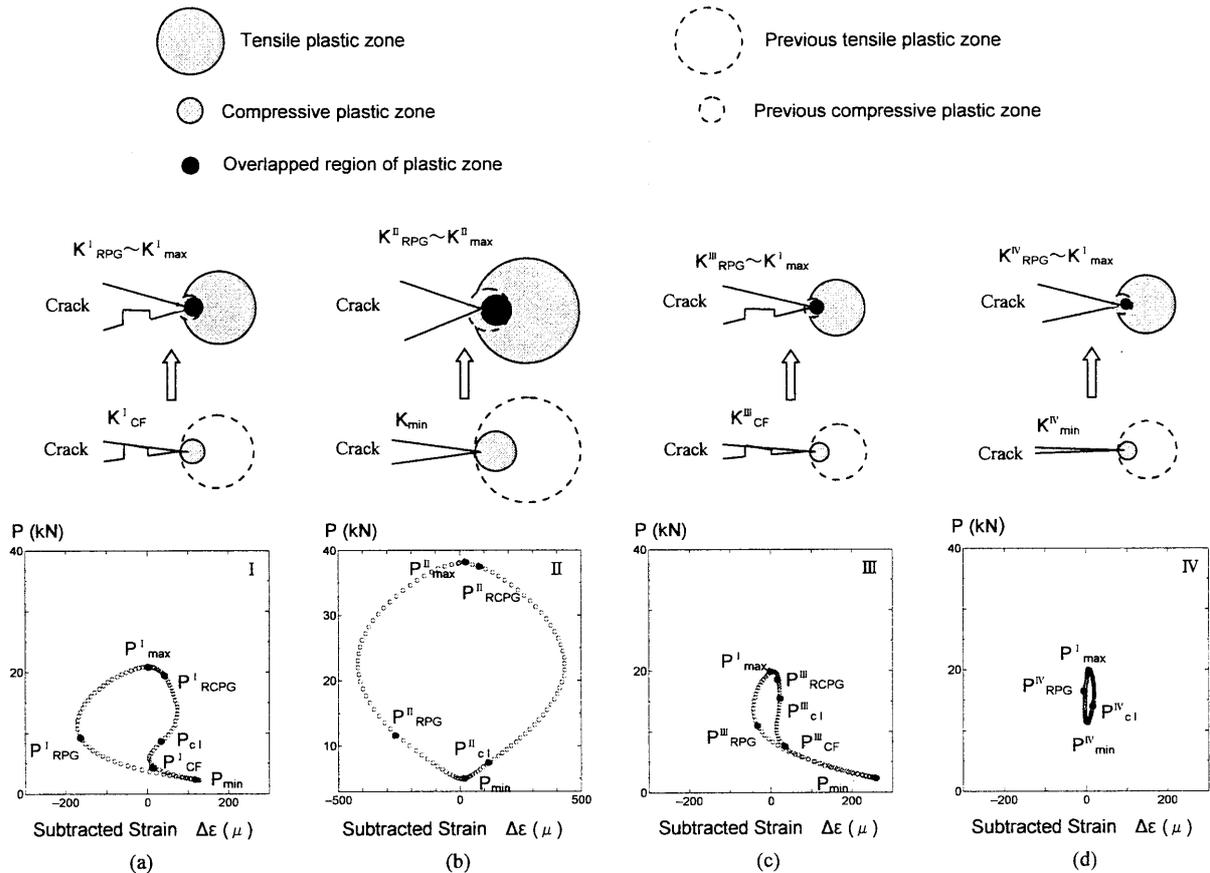


Fig.9 Schematic diagram of cyclic plasticity at the crack tip based on hysteresis loops

に達して閉口したき裂表面が徐々に開口していき、一旦  $P^I_{RPG}$  に達すると、き裂先端部に存在する残留圧縮応力はすべて解放され、再引張塑性域が形成し始める。続いて  $P^I_{max}$  付近に達すると引張塑性変形が大きくなり、き裂が進展する。その後、 $P^I_{max}$  より除荷すると、除荷弾性域  $P^I_{max} \sim P^I_{RCPG}$  を経て、き裂先端に再圧縮塑性域が成長し始め、 $P^I_d$  に達するときき裂先端が閉口し始める。 $P^I_{CF}$  まで除荷すると、閉口可能なき裂表面が完全に接触して、き裂閉口は進行しないため、 $P_{min}$  まで除荷しても、き裂先端の応力拡大係数は  $K^I_{CF}$  となる。そこで、き裂先端の実振幅が  $\Delta K^I_{CF}$  である。

Fig.9(b)の場合では、き裂先端が完全に開口して、 $P^II_{CF} = P_{min} < P^I_{CF}$  で、 $P^II_{max} > P^I_{max}$  であるため、き裂先端の実振幅は応用振幅  $\Delta K^II$  であり、また  $\Delta K^II > \Delta K^I_{CF}$  となる。Fig.9(c)の場合では、Fig.9(a)の場合に比べると、除荷する途中でき裂先端の閉口が早めに終了したため、 $P^III_{CF} > P^I_{CF}$  となり、また  $\Delta K^III_{CF} < \Delta K^I_{CF}$  となる。Fig.9(d)の場合では、 $P_{min}$  が逐次上昇するとともに、き裂先端が閉口せずに、 $P^IV_{CF} = P^IV_{min} > P_{min}$  であるため、き裂先端の実振幅は応用振幅  $\Delta K^IV$  であり、また  $\Delta K^IV < \Delta K^I_{CF}$  となる。それにもかかわらず、 $\Delta K_{RCF} (= K_{RCPG} - K_{CF}) < \Delta K_{CF} (= K_{max} - K_{CF})$  であることから、 $\Delta K_{RCF}$  がき裂先端の実振幅とともに増減するものと推測される。

Dugdale<sup>6)</sup> モデルにより、疲労き裂先端近傍の塑性域の大きさが求められる。 $K_{max}$ 、 $\Delta K_{RCF}$  が引張塑性域と圧縮塑性域の大きさをそれぞれ表すとすると、 $\Delta K_{RPG}$  はき裂先端前方にある引張塑性域と圧縮塑性域が重なる領域を意味する。この領域における塑性エネルギーは新たなき裂面を形成するのに消費される<sup>7)</sup>。上述の試験より、圧縮塑性域( $\Delta K_{RCF}$ )が不十分になると、再引張塑性域( $\Delta K_{RPG}$ )が小さくなり、き裂が進展しにくくなることが明らかとなった。

5. 結 言

本報では、疲労き裂先端近傍で計測されるヒステリシスループの変化に着目し、各試験条件における疲労き裂先端の弾塑性挙動を詳細に考察した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) ヒステリシスループの推移およびヒステリシスループ tail の変化により、疲労き裂伝播挙動を定性的に把握できる。
- (2) き裂先端近傍ひずみと荷重により得られたヒステリシスループを関数化し、微分法で求めた変曲点荷重によって、疲労き裂先端の弾塑性挙動を定量的に評価する方法は有効である。
- (3) 疲労き裂伝播中では、引張塑性域と圧縮塑性域の繰返し

変化はき裂進展の必要条件である。十分な圧縮塑性域がない場合には、疲労き裂は減速する。

(4) 疲労き裂進展における  $P_{RPG} \sim P_{max}$  と  $P_{RCPG} \sim P_{CF}$  の経路は、き裂の開閉口に重要な影響を与える。変動荷重下において加速、減速、停留などの現象が生じる原因となる。

### 参考文献

- 1) Elber, W: The significance of fatigue crack closure. In: Damage tolerance in aircraft structures, ASTM STP 486., pp.230-242, 1971.
- 2) 西谷弘信, 陳玳珩: 除荷弾性コンプライアンス法に関する一考察, 日本機械学会論文集(A編), Vol.51, No465, pp1436-1441, 1985.
- 3) 豊貞雅宏, 山口喜久次, 丹羽敏男, 武中秀樹, 梶本勝也, 矢島 浩: 新疲労き裂伝播パラメータの提案と高精度コンプライアンス計測法の開発, 日本造船学会論文集, 第 169 号, pp.245-255, 1991.
- 4) 勝田順一, 鉄川進, 河野和芳, 日高稔久: 圧電素子を利用した疲労き裂伝播挙動の計測について, 西部造船会会報, 第 100 号, pp.313-325, 2000.
- 5) 町田進, 吉成仁志, 牧野寛之: 疲労き裂先端ひずみ変化の詳細観察, 材料, Vol.46, No.2, pp.138-142, 1997.
- 6) Dugdale, D. S: Yielding of steel sheets containing slits. J. Mech. Phys. Solids, pp.100-108, 1960.
- 7) 豊貞雅宏: 残留引張変形層の役割と疲労き裂伝播の下限界に関する一考察, 西部造船会会報, 第 105 号, pp.223-235, 2002.