疲労き裂伝播の減速現象を評価するためのシミュレーション法

正会員 勝 田 順 一^{*1} 正会員 楠 葉 貞 治^{*2}
 誉 田 登^{*3} 久 保 諭^{*4}
 学生会員 山 口 正 弘^{*5} 正会員 和 田 眞 禎^{*5}

A Simulation Method for Evaluation on Delayed Propagation of Fatigue Crack

by Junichi Katsuta, *Member* Sadaharu Kusuba, *Member*
 Noboru Konda Satoshi Kubo
 Masahiro Yamaguchi, *Student Member* Masayoshi Wada, *Member*

Summary

At a fatigue crack tip, the occurrence of opening-closure behavior is already known. The opening-closure behavior of a fatigue crack tip is caused by cyclic elasto-plastic deformation of the crack tip. Fatigue strength ($S - N$ curve) and fatigue crack propagation rate ($da/dN - \Delta K$) have been evaluated only in mechanical environment, and they have not been evaluated by comparison with mechanical environment and the limits of material characteristic as other fracture phenomenon.

The present paper proposes a numerical simulation method using comparison with mechanical environment of crack tip and the limits of material characteristic for consideration with delayed propagation of fatigue crack. In the proposed simulation method, tensile fracture elongation after compressive plastic deformation of a mild steel have been used. In this paper, the results of the case of constant amplitude loading, block loading, and constant amplitude loading with spike load are shown.

1. 結 言

鋼構造物の溶接継手部は、構造的な不連続部、局部的応力集中部、引張り溶接残留応力、および冶金的不連続部が重畳して存在するために、使用開始後比較的早い時期に疲労き裂が発生する可能性が高い環境にある。さらに、疲労き裂が存在する場合に複雑に変動する荷重が作用すると、加速、減速、または停留を繰返して疲労き裂が伝播することが知られている。このために、疲労き裂の伝播寿命を設計段階で正確に把握しておくことは非常に困難である。

疲労き裂伝播の評価は、き裂長さと荷重範囲（最大荷重と最小荷重の差）によって行われてきたが、疲労き裂先端で開閉口挙動が繰返されることが明らかにされて以来、開閉口を考慮した疲労き裂伝播に関するいくつかの評価方法が提案されている。これらの評価方法は、いずれの方法も載荷する最大荷重と各評価方法の定義する下限荷重との差

を、疲労き裂伝播に有効な荷重範囲とするものである。これらの評価方法では、荷重振幅が大きくなって疲労き裂伝播速度が増加する場合には十分に評価可能であるものの、同じ荷重振幅において、疲労き裂伝播が減速、または停留する場合には評価することができない。ただし、豊貞九州大学名誉教授らが開発した FLARP 解析¹⁾のみが、疲労き裂伝播の減速現象をシミュレーション可能であることを著者らは確認²⁾している。

また、疲労破壊以外の多くの破壊現象は、破壊発生源近傍の力学的環境と材料の破壊限界の比較によって破壊の発生、進展が評価されている。しかし、疲労破壊に関しては、疲労試験結果や疲労き裂伝播試験結果を図上で表した係数を材料の疲労特性としているのみで、き裂先端の力学的環境と材料の破壊限界の比較による評価は行われていない。

そこで、本論文では、加速、減速を繰返ししながら伝播する疲労き裂を対象に、き裂先端の力学的環境と新たに提案する材料の破壊限界を比較することにより、減速現象を生じる疲労き裂伝播をシミュレーションする方法を検討した。

著者らは、疲労き裂伝播試験中に計測した荷重と疲労き裂先端近傍のひずみから求めたヒステリシスループの形状が疲労き裂伝播状況をよく表わすことを明らか^{3), 4)}にしている。このヒステリシスループから、疲労き裂先端では圧縮塑性変形と引張り塑性変形が繰返し生じていることは明らかである。そこで、今回は、繰返し荷重下の疲労き裂先端の引張り変形量が破壊限界に達した場合に、疲労き裂が伝播するものと仮定し、その破壊限界を、圧縮塑性変形を

^{*1} 長崎大学 大学院 工学研究科

^{*2} (株)PAL構造 構造解析技術部

^{*3} 住友金属工業(株) 総合技術研究所

^{*4} 住友金属工業(株) 鋼板建材カンパニー

^{*5} 長崎大学 大学院 生産科学研究科

受けた後の破断伸びとした、疲労き裂伝播シミュレーション法について検討した。

2. 疲労き裂伝播における減速現象

まず、疲労き裂を一定振幅荷重で伝播させている途中で、随時スパイク荷重を負荷した後に一定振幅荷重に戻すことによって、伝播中の疲労き裂を一時的に減速させ疲労き裂伝播試験を行った。

疲労き裂伝播試験には構造用軟鋼を用い、試験片形状は板幅 150mm、板厚 10mm の C T 型とした。Fig.1 に、使用した C T 型疲労き裂伝播試験片形状を示す。

Fig.1 Shape of compact tension type specimen

試験条件は、応力比 0.1 の一定振幅荷重で疲労き裂を伝播させた後に、最小荷重一定のままで、スパイク荷重として最大荷重を 1.5 倍～2.0 倍に増加させた繰返し荷重を 300 回、随時負荷した。スパイク荷重後、元の一定振幅荷重に戻して疲労き裂を伝播させた。なお、スパイク荷重を 300 回とした理由は、保有する疲労試験機がフィードバック信号を元に設定荷重に徐々に漸進させる制御方法を採用していることから、1 回だけでは設定荷重に到達しないため、設定した荷重を確実に負荷するための最少回数としたためである。一定振幅荷重の繰返し回数と比べて非常に少ないことから、ここでは、この少数の過大繰返し荷重をスパイク荷重と呼ぶことにする。き裂長さの推定には、試験片背面中央に貼付したひずみゲージによるひずみと荷重関係から求めたコンプライアンスによる方法を用いた。

Fig.2 に、一定振幅荷重を負荷中に随時スパイク荷重を載荷した場合の繰返し回数とき裂長さの関係を示す。図中の

Fig.2 The relation between crack length and number of cycles in the case of constant loading with spike loading

A～Eの箇所がスパイク荷重を載荷した時点である。なお、この図には、一定振幅荷重だけの場合の結果も示してある。

この図から、スパイク荷重を載荷した後、疲労き裂伝播が一時的に減速し、その後、徐々にき裂がスパイク前の速度に戻っていくことがわかる。

一定振幅荷重下で疲労き裂が伝播中にスパイク荷重を受け、その後一定振幅荷重に戻った場合に一時的にき裂伝播速度が減速する現象を詳細に調べるために、微小区間ごとの疲労き裂伝播速度を算出した。その伝播速度の変化の一例を、Fig.3 に示す。

この図から、スパイク荷重が作用すると、伝播速度が急に増大するものの、一定振幅荷重に戻った後には急激に減速しており、一定振幅荷重に戻った後にもしばらく減速状態が続いた後に、一定振幅荷重だけが作用する場合の伝播速度まで徐々に上昇していることがわかる。このようなことが、Fig.2 での減速状態として現れている。現在までに提案されている各種応力振幅のみによる評価では、この現象が十分に評価できていない。

Fig.3 Fatigue crack propagation rate after spike load⁴⁾

現在までに提案されている評価方法のうち、豊貞ら¹⁾が開発した FLARP 解析では、疲労き裂伝播に寄与する荷重の下限を再引張り塑性域形成 (RPG) 荷重としており、疲労き裂先端の弾塑性挙動を考慮していることから、このような減速現象をシミュレーションできるものと考えられ、著者の一部はこのことを確認²⁾している。FLARP 解析によって、Fig.2 に示した疲労き裂伝播の減速現象や停留現象が生じた疲労き裂伝播試験と同じ条件で FLARP 解析した結果を、Fig.4 に示す。

Fig.4 Simulation results of delayed propagation crack by FLARP analysis²⁾

この図より、FLARP 解析では、スパイク荷重によって生じる疲労き裂の減速伝播現象もシミュレーションできていることが確認できる。しかし、FLARP 解析を行うために必要な RPG 荷重による ΔK_{RP} と疲労き裂伝播速度の関係における C, m を求めるため（FLARP 解析では RPG 荷重を解析的に求めることが可能であるが時間を要し、確認のための試験も必要）には、疲労き裂先端近傍ヒステリシスループを計測する必要があるが、この計測はかなり困難で、著者らの試験においても常にヒステリシスループを完全に計測できているわけではない⁴⁾。

3. 圧縮塑性ひずみを受けた材料の破断伸びの変化

3.1 疲労き裂進展のための新しい進展条件の考察

3.1.1 疲労き裂先端の弾塑性挙動

疲労き裂は、先端で開閉口を繰返ししながら伝播していることが明らかにされており、FLARP 解析では、疲労き裂先端の再圧縮塑性域寸法の替わりに、疲労き裂先端近傍のヒステリシスループから RPG 荷重を求めて使用している。

Fig.5 に、著者らが計測した疲労き裂先端近傍のヒステリシスループのうち、疲労き裂が一定振幅荷重により定常状態で進展している場合 (a)、荷重振幅が増大して加速して進展している場合 (b)、およびスパイク荷重後に減速・停留している場合 (c)、それぞれのヒステリシスループの一例を示す。ヒステリシスループの膨らみは、計測するひずみゲージと疲労き裂先端の距離が大きく影響する⁴⁾。除荷過程のループ下部で載荷過程のループ下部とほぼ一致する部分（著者らは、tail と呼んでいる）に、疲労き裂の伝播状況が現れていることが、これらの図からわかる。

Fig.5 Hysteresis loops in the case of each propagation rate

Fig.6 に、計測した疲労き裂先端近傍のヒステリシスループを分析⁴⁾した一例を示す。なお、図中には、各変曲点の荷重と、これらを最小値とした応力拡大係数範囲も示してある。また、最大荷重 (P_{max}) と最小荷重 (P_{min}) は計測値、き裂開口荷重 (P_{open}) は豊貞らが提案した反転法¹⁾で、再引張り塑性域形成荷重 (P_{RPG})、再圧縮塑性域形成荷重 (P_{RCPG}) とき裂開口荷重 (P_{close}) は著者らが前報で報告した微分法求めた点である。

Fig.6 や Fig.5 の図から、疲労き裂先端では、引張り塑性変形（発生範囲； $P_{RPG} \Rightarrow P_{max}$ ）だけでなく、圧縮塑性変形（発生範囲； $P_{RCPG} \Rightarrow P_{min}$ ）も生じていることが確認できる。疲労き裂先端で開閉口挙動発生、すなわち、載荷過程で生じた引張り塑性変形が消失して閉口するためには、除荷過程

で圧縮塑性変形が生じる必要がある。よって、疲労き裂先端では圧縮塑性変形と引張り塑性変形を繰返し生じていることで、鋼材の機械的性質が変化している可能性がある。

Fig.6 Some singular loads of hysteresis loops

3.1.2 予圧縮試験と引張り試験の概要

本報告では、圧縮塑性変形と引張り塑性変形が繰返されることによって変化する可能性がある機械的性質として、鋼材の変形能に注目した。

圧縮塑性変形を受けた後での、引張り変形性能の変化を確認するために、丸棒試験片を用いて、圧縮した後に引張り試験を行った。試験に用いた鋼材は構造用軟鋼で、試験部に切欠きがないものと、切欠きがある（応力集中率： $\alpha = 1.52, 2.56, 7.26$ ）試験片を使用した。静的圧縮試験では、座屈変形して同一断面において局部的に異なった圧縮変形が生じる影響を排除するために、100mm 角の立方体クロムモリブデン鋼のブロックに試験片の両端をそれぞれ 75mm 埋め込み、上下の埋め込み治具の 4 箇所角には支え棒を取り付けて、埋め込み治具を静的に圧縮した。なお、4 本の支え棒は、下の埋め込み治具とは試験片と同じように支持されているが、上の埋め込み治具とは固定されておらず、滑らかにスライドするようにしてある。Fig.7 に、静的圧縮試験の概要を示す。

Fig.7 Outline of static compressive test

Fig.8 に、使用した試験片形状を示す。

Fig.8 Shapes of round bar type specimens

静的圧縮試験においては、荷重に注目して降伏荷重、最大圧縮荷重、その中間の荷重までをそれぞれの試験片に負荷した。圧縮後の静的引張り試験は、一般的な静的引張り試験と同様に引張り破断させて、破断位置での断面積を求めた。

3.2 圧縮塑性変形を受けた材料特性の変化

3.2.1 圧縮－引張り試験による変形量の算出

圧縮塑性変形後の引張り変形性能を比較するために、対象断面の変化から、破断伸びに換算した。Fig.9 に、絞りから伸びに換算する過程を模式的に示す。

Fig.9 Schematic diagrams for transformation of reduction of area into elongation

まず、静的圧縮試験中で負荷した最大圧縮荷重から弾性圧縮荷重を除き、圧縮塑性荷重と加工硬化率 ($E/200$) から塑性ひずみを算出し、弾性ひずみを加算して、負荷した全圧縮ひずみとした。また、圧縮試験終了時に、試験対象部の直径を計測した。なお、直径は楕円状になる可能性があるために鋼板板厚方向と板厚直角方向を計測し、平均し

た。また、試験対象部として直径を計測した部分は、切欠きなし試験片では最大直径となった箇所とし、切欠き付試験片では切欠き底部とした。以上の計測結果と (1) 式を用いて、全圧縮ひずみを求めた。

静的引張り試験では、試験片破断後に絞りを計測した。なお、絞り形状は楕円状になる可能性があるために鋼板板厚方向と板厚直角方向を計測し、平均した。この絞りが生じた箇所のみを対象として体積一定の仮定の基に、破断伸びに換算した。絞り部分と対象厚さによる体積を体積一定の仮定で換算に用いた。Fig.10 に示すように、切欠きなし試験片では試験後に最大の絞りを生じた部分の厚さを、切欠き付試験片は試験前の切欠き先端半径と切欠き角度の交点までの厚さを対象厚さとした。これらと (2) 式を用いて、算出した伸びを換算破断伸び (ΔL) と呼ぶことにする。

ここで、換算に用いた対象厚さは、切欠きなし試験片と切欠き付試験片では異なるために、試験前の対象厚さで除して単位長さ当りの伸びとして、それぞれの試験結果を比較することとした。なお、単位長さあたりの負荷後の変化量は「ひずみ」であるが、一般的な試験対象部全体の平均伸びではなく、絞りを生じた箇所のみを対象としたこと、およびき裂先端の伸びという表現を用いたほうがき裂先端の破断をイメージし易いことから、本論文では、あえて伸びと表現することし、一般的な伸びと区別するために、「換算破断伸び」と呼ぶことにした。

以下に、全圧縮ひずみの算出に用いた式 (1) と、絞りを生じて破断する箇所のみを対象とした換算破断伸びの算出に用いた式 (2) を示す。

* Calculation of Compressive Strain ε_c

$$\left. \begin{aligned} P_e &= \sigma_y \cdot A_0 \\ P_p &= P_{comp.max.} - P_e \\ \varepsilon_c &= \varepsilon_e + P_p / (A_c \cdot E') \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

* Calculation of Transformed Elongation ΔL

$$\left. \begin{aligned} b_c &= (A_0 \times b_0) / A_c \\ b_f &= (A_c \times b_c) / A_f \\ \Delta L &= (b_f - b_c) / b_0 \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

(1) In the case of specimen without notch (2) In the case of specimen with notch

Fig.10 Schematic diagrams of used thickness for transformation of elongation

3.2.2 圧縮塑性変形後の引張り伸びの変化

前述のようにして求めた、構造用軟鋼の丸棒試験片を用いた全圧縮ひずみとその後の換算破断伸びの関係を、Fig.11に示す。この図には、95%信頼性区間も示してある。

Fig.11 Relationships between transformed elongation and compressive strain

この図から、降伏荷重程度の圧縮ひずみを受けた場合には、その後の換算破断伸びは、圧縮荷重を受けない場合とほとんど差異は認められないことがわかる。しかし、降伏ひずみ以上の圧縮ひずみを受けた場合には、その後の換算破断伸びは低下しており、しかも、大きな圧縮ひずみを受けるほどその低下量は大きく、応力集中率が大きくなるほど、圧縮ひずみを受けた後の換算破断伸びは小さくなっていることがわかる。

圧縮後の換算破断伸びにおよぼす応力集中率の影響を確認するために、試験した最大圧縮荷重を受けた場合の、応力集中率と換算破断伸びとの関係を、Fig.12に示す。

Fig.12 The relationship between stress concentration and transformed elongation after plastic compression

この図から、応力集中率が大きくなると、換算破断伸びの減少量は次第に収束していることがわかる。疲労き裂先端と今回の試験片切欠き先端では力学的状況は異なるもの

の、応力集中率が約 2.5 以上になると、換算破断伸びの低下はほぼ収束していることから、数値解析によるき裂先端の伸びと材料の換算破断伸びの比較による、疲労き裂伝播シミュレーションには、応力集中の影響が収束している応力集中率 2.5 以上の換算破断伸びの平均値を用いた。

4. 疲労き裂の新しい伝播モデル

4.1 新しい伝播モデルによる疲労き裂の進展

前章で求めた圧縮ひずみとその後の換算破断伸びの関係をj用いて、繰返し荷重振幅が一定の場合、荷重振幅が増加した場合、およびスパイク荷重が作用して疲労き裂伝播速度が加速・減速する場合の一部をシミュレーションした。

今回提案する圧縮ひずみを受けた場合の換算破断伸びを用いた、疲労き裂伝播条件を次のように仮定する。

まず、き裂先端が十分な圧縮塑性変形を経験していない場合には、き裂先端の材料の伸び性能が高いために、き裂は進展しない。

その後荷重が繰返されると、き裂先端の高い応力集中のためにき裂先端は圧縮塑性変形と引張り塑性変形を繰返すことになる。この繰返しによって、徐々に圧縮ひずみと伸びが増加することで、き裂先端の伸びが鋼材の換算破断伸びに達すると、限界を超えた領域だけ破断する。

荷重振幅が増加した場合には、き裂先端の圧縮ひずみと伸びがより大きくなるために、少ない繰返し回数で換算破断伸びに達することになり、疲労き裂の巨視的な速度が増加することになる。

スパイク荷重が作用してき裂が一時的に加速した後に、一定振幅荷重に戻って減速する場合には、圧縮ひずみを経験した部分がスパイク荷重のために破断して、圧縮ひずみをほとんど経験していない部分が新たにき裂先端となる。新たにき裂先端となった部分では換算破断伸びは大きいために元の荷重振幅に戻ると破断せず、き裂先端の圧縮ひずみと伸びの繰返しによって換算破断伸びに達するまで、疲労き裂は進展しないものとする。

Fig.2 から、伝播中にスパイク荷重を受けた疲労き裂は、そのままの状態で減速しているのではなく、スパイク荷重によって急激にき裂が進展していることがわかる。Fig.3 でも、一時的に加速した後、荷重振幅が元に戻ると減速していることがわかる。

また、スパイク荷重が一定振幅荷重に比べてそれほど大きくない場合に減速現象は認められない。今回の仮定でも、スパイク荷重載荷直後にき裂先端の圧縮ひずみと伸びが換算破断伸びに達しない場合には、き裂先端の圧縮ひずみが増大するだけで、き裂先端は破断せずに圧縮ひずみと伸びを蓄積することになる。

このような挙動によって、圧縮ひずみ履歴の蓄積が鋼材特性に影響しているものと仮定した。

4.2 新しい伝播モデルを導入したシミュレーション

4.2.1 シミュレーションのための解析モデル

数値解析には、汎用数値解析ソフト Marc を用いて、疲労き裂伝播試験片と同じC T型の解析モデルとし、1/2モデルを用いて弾塑性解析を行った。解析時の基準荷重は伝

播試験と同様に最大荷重 20.0kN, 最小荷重 2.0kN として, sin 波形の繰返し荷重を付与した。

Fig.13 に, シミュレーションに使用した数値解析モデルを示す。材料定数は, ヤング率 (E) を 206GPa, 降伏応力 (σ_y) を 300MPa, ポアソン比 (ν) を 0.3 とし, 応力とひずみ関係は, 降伏後 0.2%ひずみまで, 加工硬化係数を $E/100$, その後は完全塑性とし, 移動硬化則を適用した。

Fig.13 Numerical analysis model

Fig.14 に, き裂最先端の要素の繰返し圧縮-引張りひずみ関係を示す。

この図から, 荷重が繰返されることで, き裂先端の圧縮ひずみが徐々に増大していくことがわかる。これは移動硬化則を用いたことによるものであるが, 進展するき裂先端の引張り塑性域を消滅させて閉口するために生じた圧縮塑性域の増大と推察することができる。圧縮ひずみを受けた後の換算破断伸びと, この数値解析結果を比較するために, き裂最先端の要素の数値解析結果から, 荷重が繰返されるごとに, 最大引張り荷重から最大圧縮荷重までの圧縮過程の全ひずみ幅を横軸に採り, 次の最大圧縮荷重から最大引張り荷重までの引張り過程の全ひずみ幅を要素長さを考慮して, 単位長さ当たりの伸びに換算して縦軸に採って, 換算破断伸びの図にプロットすることとした。

Fig.14 Relation of stress and strain on the crack tip element

4.2.2 一定振幅荷重下でのき裂伝播

Fig.15 に, 一定振幅荷重で伝播中の場合において, 上述のシミュレーション方法を適用した結果を示す。この図には, 試験結果から算出した換算破断伸び (応力集中率 2.5 以上の換算破断伸びの平均値) を実線で, 繰返し 1 回ごとのき裂先端の数値解析結果 (圧縮全ひずみと先端要素の単位長さあたりの伸び) を, ○, △印で示してある。

Fig.15(a)は, 荷重の繰返しによって圧縮ひずみが大きくなるものの, き裂先端要素の伸びが換算破断伸びには達していない状態, Fig.15(b)は, き裂先端の伸びが換算破断伸びに達した状態を示す。Fig.15(c)は, 換算破断伸びに達したき裂先端の要素を切断し, 新たにき裂最先端となった要素の圧縮ひずみと引張り伸びの関係を示してある。Fig.15(d) は, Fig.15(c)の図を拡大して示してある。なお, Fig.15(c)と Fig.15(d)の図では, 切断された最初のき裂先端要素の結果は破線で示してある。このとき, き裂進展後は, 新しいき裂先端の圧縮ひずみの蓄積が切断された要素よりも小さいため, 圧縮ひずみが蓄積して換算破断伸びに達するまでき裂は進展しない。

(a) Results of first crack tip (b) Determination of fracture

(c) Results of new crack tip element (d) Detail of (c)

Fig.15 Relationships between compressive strain and transformed elongation at the crack tip in the case of constant amplitude loading by new concept

このようにして, シミュレーションで求めたき裂最先端要素の切断までの繰返し回数とき裂最先端要素幅から伝播速度を算出し, 応力拡大係数範囲との関係を, Fig.16 に示す。なお, この図には, 同じ応力範囲で疲労き裂伝播試験した構造用軟鋼を用いた結果も示してある。

この図から, 一定振幅荷重の場合, シミュレーション結果は伝播試験結果に比べて 1/3 程度の伝播速度となっているものの, 傾きはほぼ同じとなっていることがわかる。試験結果よりもシミュレーション結果が低速側になった原因

は、要素の破断判定に用いた鋼材の破断限界を求める試験が、圧縮－引張り荷重を静的に1回だけ載荷した試験であり、荷重繰返しの影響は考慮していないこと、疲労き裂先端とは異なり、ほぼ全断面降伏状態の試験結果を破断限界としていることが考えられる。

Fig.16 Comparison with results of fatigue crack propagation test and analysis in the case of constant amplitude loading

4.2.3 荷重振幅が増加する場合のき裂伝播

Fig.17 に、一定振幅荷重で伝播中に荷重振幅が増加し、そのままの荷重振幅を維持した場合を示す。

Fig.17 Simulation results in the case of increase amplitude loading by new concept

この図にも、試験結果から算出した換算破断伸び（応力集中率 2.5 以上の換算破断伸びの平均値）を実線で、繰返し1回ごとのき裂先端の数値解析結果（圧縮全ひずみと先端要素の単位長さあたりの伸び）を、○、□印で示してある。Fig.17(a)は、一定振幅荷重で伝播中に荷重振幅が増加したもののき裂先端要素の伸びがまだ換算破断伸びに達していない状態である。ただし、振幅が増大すると、圧縮ひずみも要素伸びも増大している。Fig.17(b)は、荷重振幅が増加したままで換算破断伸びに達した場合である。Fig.17(c)は、換算破断伸びに達したき裂先端の要素を切断し、新たにき裂最先端となった要素が増加したままの荷重振幅を受ける場合の圧縮ひずみと要素伸びの関係を示してある。Fig.17(d)は、Fig.17(c)の図を拡大して示してある。この場合、き裂先端の要素伸びがより大きくなって、この図において右下がりに表示される換算破断伸びに到達しやすくなっており、き裂先端の圧縮ひずみも大きくなっていることから、Fig.15 に示した一定振幅荷重の場合に比べて少ない回数で換算破断伸びに達することがわかる。よって、伝播試験と同様に、疲労き裂の伝播速度は速くなる。

4.2.4 スパイク荷重作用後に減速する場合のき裂伝播

Fig.18 に、一定振幅荷重で伝播中にスパイク荷重が作用した場合を示す。この図にも、試験結果から算出した換算破断伸び（応力集中率 2.5 以上の換算破断伸びの平均値）を実線で、一定振幅荷重の繰返し1回ごとのき裂先端の数値解析結果（全圧縮ひずみと先端要素の単位長さあたりの伸び）を、○、△印で、スパイク荷重の結果を×印で示してある。

Fig.18 Simulation results in the case of constant amplitude loading with spike loading by new concept

Fig.18(a)は、一定振幅荷重で伝播中のき裂先端の要素伸びがまだ換算破断伸びに達していない状態である。Fig.18(b)は、スパイク荷重が作用して荷重振幅が増加したことにより、き裂先端の要素伸びが増大して換算破断伸びを超えた場合である。Fig.18(c)は、換算破断伸びを超えたき裂先端の要素を切断し、新たにき裂最先端となった要素が元の一定振幅荷重の繰返しを受ける場合の圧縮ひずみと要素伸びの関係を示してある。Fig.18(d)は、Fig.18(c)の図を拡大して示してある。Fig.18(c), (d)において、新たにき裂先端になった要素のシミュレーション結果は、圧縮ひずみがスパイク荷重前よりも小さくなっており、換算破断伸びに達するまでにより多くの繰返し回数が必要となる。このことによって、スパイク荷重後に一定振幅荷重に戻っても、減速現象が生じることになる。

以上から、疲労き裂の進展は、き裂先端が圧縮塑性変形と引張り塑性変形を繰返して低下する破断伸びに達することで生じるという評価方法は適用が可能であると考えられる。この方法によって、スパイク荷重が作用した後の疲労き裂伝播速度の減速を推定可能であるものと期待される。

4.3 新しい伝播モデルにおける未検討課題

現在までに提案されている疲労き裂伝播の評価方法とは全く異なり、圧縮塑性変形後の鋼材の換算破断伸びとき裂先端の伸びの比較により、疲労き裂の進展や減速を考慮する評価方法を今回提案した。しかし、圧縮塑性変形の蓄積を受けた後の鋼材の破断伸びの挙動が、これだけでは十分に把握できていない上に、評価方法にも検討の余地がある。

現時点で、鋼材の圧縮塑性変形後の破断伸びの評価に関して、検討課題は、次のとおりであると考えている。

- ・切欠き付丸棒試験片でも塑性拘束は存在するが、この試験片での全断面圧縮塑性変形する場合と、き裂先端のような塑性拘束が存在する場合における、圧縮塑性変形後の破断伸びに及ぼす影響の検討
- ・今回、圧縮塑性変形後の破断伸びは、1回の静的圧縮-引張り荷重を載荷して求めており、繰返し荷重による破断伸び変化の検討

以上の件については、現在一部調査中であり、鋼種の相違による変化の有無や変化量も含めて、今後も調査を継続する予定である。

5. その他の鋼材の圧縮塑性変形後の伸び性能

5.1 供試した鋼材

前報⁴⁾において、近年開発された耐疲労鋼の疲労き裂伝播特性について、疲労き裂先端近傍のヒステリシスループの形状に注目して、同程度の静的強度を有する従来鋼と比較して報告した。

用いた鋼材の伸び率は、耐疲労鋼で約30%、従来鋼で約20%であった。この伸びは、圧縮塑性変形の履歴のない引張り試験の結果であり、疲労き裂先端のように圧縮と引張りの塑性変形を受ける場合の伸び性能の変化の有無を確認しておくことには意義があると思われる。

耐疲労鋼は、低 ΔK 領域で優れた疲労き裂伝播性能を有するものの、高 ΔK 領域では従来鋼と大きな差異はない⁵⁾

という原因についても考察することとする。

また、日本工業規格(JIS)では、溶接構造用鋼(SM材)とは別に、耐震性能向上を目的とした建築構造用鋼(SN材)が規定されている。SN材は耐震性能を向上させるために、不純物の含有量に制限を設けて、低降伏比とともに、伸び性能を確保している鋼材である。この鋼材についても、圧縮と引張りの塑性変形を受ける場合の伸び性能の変化の有無を確認しておくことにした。

5.2 疲労強度向上鋼の圧縮塑性変形後の伸び性能

Fig.19に、耐疲労鋼(F鋼と呼ぶ)とそれと同程度の静的強度を有する従来型圧延鋼(K鋼と呼ぶ)を用いた、丸棒試験片による圧縮ひずみとその後の換算破断伸びの関係を示す。この試験に用いた試験片は、Fig.8に示した試験片のうち、切欠きのない試験片と切欠き(応力集中率;2.56, 切欠き先端半径 $R=1.0\text{mm}$)付試験片である。試験法や試験結果の整理方法は、前述のとおりである。

Fig.19 Relationships between transformed elongation and compressive strain of Steel K and Steel F

この図から、構造用軟鋼の場合と同様にいずれの鋼材とも、切欠きのない場合に比べて切欠きのある場合のほうが換算破断伸びは小さくなっていることがわかる。切欠きのない試験片の場合にはばらつきが大きいものの、F鋼はK鋼よりも換算破断伸びが大きくなることがわかる。また、切欠き付試験片の場合にもわずかながらF鋼のほうがK鋼よりも、圧縮塑性変形後の換算破断伸びが大きいことがわかる。

今回提案している疲労き裂の伝播シミュレーション法は、破断限界のわずかの差であっても、換算破断伸びに達するまでの繰返し回数の差は多くなり、F鋼のほうがK鋼よりも伝播速度が遅くなる。また、 ΔK が小さくき裂先端の塑性変形が小さいほど、破断判定するまでの繰返し回数の差が多くなり、 ΔK が大きき裂先端の塑性変形が大きい場合には、破断判定するまでの繰返し回数の差が少なくなつて、F鋼とK鋼の伝播速度の差異が少なくなる。これは、疲労き裂伝播試験における疲労き裂伝播速度と応力拡大係数範囲の関係に現れる事実⁵⁾と一致している。

5.3 建築構造用鋼の圧縮塑性変形後の伸び性能

Fig.20 に、溶接構造用鋼 (SM 材) と、建築構造用鋼 (SN 材) を用いた、丸棒試験片による圧縮ひずみとその後の換算破断伸びの関係を示す。この試験に用いた試験片は、前述までの試験片 (試験部直径 10mm) と異なり、試験部直径が 8mm と若干小型である、切欠きのない試験片と切欠き (応力集中率; 3.34, 切欠き先端半径 $R=0.4\text{mm}$) 付試験片である。これは、疲労試験機を用いたために、試験機の容量に合わせて小型試験片としたためである。疲労試験機を用いた圧縮-引張り試験は、载荷速度 0.002Hz で、圧縮荷重载荷から開始してその後引張り荷重を载荷した。試験結果の整理方法は、前述のとおりである。ただし、小型試験片としたために、他の鋼種の換算破断伸びと直接比較することはできない。

Fig.20 Relationships between transformed elongation and compressive strain of SM steel and SN steel

この図から、圧縮荷重を载荷しない場合の応力集中のない試験片の結果において、SN 材は SM 材に比べて、換算破断伸びは大きく、圧縮荷重载荷した場合も換算破断伸びが大きいことがわかる。しかし、応力集中がある試験片の結果においては、SN 材よりも SM 材のほうが換算破断伸びは大きくなることがわかる。

このことは、耐震性能を向上させるために、伸び性能を確保しているはずの SN 材でも、溶接止端部のように応力集中が存在する箇所では、大きく圧縮塑性変形した後に疲労き裂が進展する場合は、本来の目的を果たせない可能性があることを示唆している。なお、今回の SN 材と SM 材は、それぞれ 1 つの鋼材であり、これらの鋼種全般に関わる特性か、否かは今後調査する必要がある。

6. 結 言

今回、伝播中に減速する疲労き裂を対象にして、き裂先端の力学的環境と鋼材の破断限界を比較することによって、伝播をシミュレートする方法を提案した。

得られた結果は、次のとおりである。

- 1) 事前に圧縮塑性変形を受けると、その後の換算破断伸びが減少する。
- 2) 圧縮塑性変形を受けた後の換算破断伸びは、応力集中が存在する場合により大きく減少する。
- 3) 疲労強度向上鋼の疲労き裂伝播性能には、圧縮塑性変形後の換算破断伸びに優れていることも寄与していることが試験結果から推察された。
- 4) 溶接構造用鋼よりも伸び性能を確保しているとされる、今回試験に用いた建築構造用鋼の応力集中部の圧縮塑性変形を受けた後の破断性能は、切欠きのない場合に比べて逆に大きく低下して、溶接構造用鋼よりもわずかに小さくなったことから、鋼種によっては圧縮塑性変形後の伸び性能が大きく異なることが推察された。
- 5) き裂進展に有効に寄与する応力範囲を用いて評価する従来のき裂進展モデルでも評価可能であった定常状態や加速状態のき裂伝播挙動だけでなく、減速や停留する疲労き裂伝播挙動に対しても本報告で提案した新たなき裂伝播モデルでは、ある程度の精度でシミュレーションできることを示した。

今回の検討で、疲労き裂伝播性能に優れた鋼材を開発する場合に、圧縮塑性変形を受けた後の引張り変形能を改善するという目標を与えればよいことが考えられる。

謝 辞

本研究は、科学研究費補助金 (平成 20～22 年度) の助成を受けて行われたことを付記して、謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 豊貞雅宏, 丹羽敏男: 鋼構造物の疲労寿命予測, 共立出版, 2001
- 2) 楠葉貞治: き裂のモニタリングとシミュレーションを用いた疲労寿命評価に関する基礎的研究, 長崎大学学位論文, 2007
- 3) 熊纒, 勝田順一, 河野和芳, 崎山毅: 疲労機裂先端の圧縮塑性域が伝播挙動に及ぼす影響, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 2 号, 2006, pp.311-317
- 4) 勝田順一, 久保論, 菅田登, 古賀脩平, 牛島慎一, 河野和芳: 耐疲労鋼の疲労き裂伝播特性における遅延効果, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 12 号, 2010, pp.209-217
- 5) 菅田登, 有持和茂, 藤原知哉, 永吉明彦, 稲見彰則, 山下正人, 矢島浩: 金属組織制御による鋼材の疲労き裂進展特性の改善 —疲労特性に優れた船体用鋼板の開発 第 1 報—, 日本造船学会論文集, 第 190 号 (2001), pp.507-515