多軸応力下における改良 9Cr-1Mo 鋼切欠き材の 低サイクル疲労寿命評価法[†]

金 泰 俊* 渡 辺 祐 樹**
張 聖 徳*** 坂 根 政 男***

Notch Effect on Multiaxial Low Cycle Fatigue Life for Mod.9Cr-1Mo Steel

by

Taejoon KIM*, Yuki WATANABE**, Shengde ZHANG*** and Masao SAKANE***

This paper presents the results of a study of the notch effect in low cycle fatigue of Mod.9Cr-1Mo steel under multiaxial loading. Tension-torsion multiaxial low cycle fatigue tests were carried out at room temperature using three types of circumferential notched specimens and crack initiation, propagation and failure lives were experimentally obtained. Two proportional and nine nonproportional strain paths were used in low cycle fatigue tests. The crack initiation and failure lives decreased with the elastic stress concentration factor but the crack propagation lives slightly decreased with the elastic stress concentration factor in push-pull low cycle fatigue. The superposition of torsion straining on push-pull loading reduced the crack initiation, propagation and failure lives but they little decreased with elastic stress concentration factor. The crack initiation, propagation and failure lives in nonproportional loading were smaller than those in proportional loading but showed smaller reduction with the elastic stress concentration factor. Finite element analysis was carried out for evaluating the local strain at the notch root using elastic linear plastic model. Von Mises equivalent strain, path strain and nonproportional strain ranges conservatively estimated the crack initiation and failure lives of the notched specimens. The most suitable parameter for evaluating the crack initiation and failure lives was von Mises equivalent strain range.

Key words: Low cycle fatigue, Mod.9Cr-1Mo steel, Multiaxial stress, Nonproportional loading, Notch effect

1 緒 言

ほとんどの構造部は形状不連続部を有しており、また、疲労負荷を受けることがある。このような応力集中部に対して簡易な寿命評価法を開発することは構造部の信頼性保障の点から重要な研究課題である。また、構造部は単軸応力の繰返し負荷よりも多軸応力が負荷される場合も多く、とくに、主ひずみ方向が時間的に回転する非比例負荷を受けることもある。

本研究で供試材とした改良 9Cr-1Mo 鋼は高速増殖炉の蒸気発生器や 2 次系配管などの高温機器に使用実績があり、高温強度と耐食性に優れた代表的な材料であること¹⁾から、同鋼の応力集中部の比例および非比例負荷の下での多軸低サイクル疲労強度特性の把握と、低サイクル疲労寿命の評価法を開発することは構造設計上有意義であると思われる。

これまで改良 9Cr-1Mo 鋼のクリープおよびクリープ疲労の研究については数多く報告されている。^{1)~5)}青砥ら¹⁾はクリープ疲労損傷を組織との関連で考察し、圧縮保持における寿命低下についても考察した。また、伊藤ら²⁾はクリープ変形の進行に伴う硬さの変化から余寿命評価

について検討した。西野ら⁵⁾は引張・圧縮負荷の下で対称三角波、引張保持台形波および圧縮保持台形波を用いて低サイクル試験を平滑および 2 種類の環状切欠き試験片を用いて、保持が疲労寿命に及ぼす影響について検討した。しかし、改良 9Cr-1Mo 鋼の低サイクル疲労に関する研究のほとんどは単軸応力下でのものであり、多軸応力下での疲労寿命評価についての報告は少ない。筆者らが知る限りでは、旭吉ら⁶⁾が、室温および高温において、比例多軸負荷の下で平滑材の疲労寿命評価法について考察しているのみである。また、筆者ら⁷⁾は 3 種類の環状切欠き試験片を用いて 5 種類のひずみ波形下での非比例多軸低サイクル疲労試験を行い、ノイパー則⁸⁾を用いて切欠き底での局所ひずみを算出し、切欠き効果が疲労寿命に及ぼす影響について考察した。改良 9Cr-1Mo 鋼の多軸応力下での研究例は非常に少ない現状にあるといえる。

本研究では、改良 9Cr-1Mo 鋼の 3 種類の切欠き材を用いて、11 種類の比例および非比例負荷の下でのき裂発生、伝ばおよび破損寿命を実験的に求めた。併せて、有限要素法 (FEM) による弾塑性応力-ひずみ解析を行い、切欠き底での局所ひずみを算出し、それを用いて比

[†] 原稿受理 平成 22 年 9 月 14 日 Received Sep. 14, 2010 ©2011 The Society of Materials Science, Japan

* 学生会員 立命館大学大学院理工学研究科総合理工学専攻 〒525-8577 草津市野路町, Graduate School of Sci. and Eng., Ritsumeikan Univ., Nojihigashi, Kusatsu, 525-8577

** 立命館大学大学院理工学研究科機械システム専攻 〒525-8577 草津市野路町, Graduate School of Sci. and Eng., Ritsumeikan Univ., Nojihigashi, Kusatsu, 525-8577

*** 正 会 員 立命館大学理工学部機械工学科 〒525-8577 草津市野路東, Dept. of Mech. Eng., Ritsumeikan Univ., Nojihigashi, Kusatsu, 525-8577

例および非比例負荷の下での低サイクル疲労寿命（以下、疲労寿命）評価法について検討した。

2 試験方法および解析方法

2・1 試験方法

本研究で用いた試験片は、フェライト系耐熱鋼の改良 9Cr-1Mo 鋼の 3 種類の環状切欠き材であり、その化学成分および試験片の形状・寸法を Table 1 および Fig. 1 に示す。本研究では、3 種類の切欠き底の曲率半径 (ρ) を有する開口角 60° の V 型の環状切欠き試験片を用いた。切欠き底の曲率半径はそれぞれ 0.09mm, 0.20mm および 0.60mm である。弾性応力集中⁹⁾係数は引張またはねじりの負荷モードによって異なり、同一形状に対しては引張の弾性応力集中係数がねじりのそれに比べて 2 倍程度大きい。Table 2 に 3 種類の試験片の引張およびねじりでの弾性応力集中⁹⁾係数を示す。

試験装置には、引張・圧縮と繰返しねじりを任意の波形で負荷することができる 2 軸電気・油圧サーボ疲労試験機を用いた。ひずみの計測には、試験片軸方向の変位とねじり角を独立して計測することができる 2 軸伸び計を使用した。伸び計は切欠きを挟んだ標点間距離 8mm に取付け、この標点間の軸ひずみとねじり角とを計測・制御した。本稿では伸び計で計測・制御されたひずみを制御ひずみと称する。試験片軸方向の制御垂直ひずみは、切欠きを挟んだ標点間距離での垂直変位を 8mm で除した値とし、制御せん断ひずみは、標点間距離 8mm の切欠き底谷直径部に均一ひずみが生じたときの外皮せん断ひずみとして定義した。

Table 1 Chemical composition of the material tested (wt %).

Cr	Mo	C	Si	Mn	P
8.61	0.93	0.10	0.36	0.37	0.014
S	Ni	V	Nb	N	Fe
0.001	0.08	0.20	0.07	0.057	Bal

Normalizing 1323K(1050°C) × 60min

Tempering 1053K(780°C) × 60min

Fig. 1 Shape and dimensions of the specimen.

Table 2 Elastic stress concentration factor in tension and torsion.

Notch root radius ρ , mm	Elastic stress concentration factor	
	Tension K_{tp}	Torsion K_{tt}
0.09	6.0	2.9
0.20	4.2	2.2
0.60	2.6	1.6

低サイクル疲労試験はミーゼス型の制御相当ひずみ速度を 0.20%/s, 制御垂直ひずみ範囲 ($\Delta\epsilon$) を 0.20%, 制御せん断ひずみ範囲 ($\Delta\gamma/\sqrt{3}$) を 0.13% で実施した。制御ひずみ波形には Fig. 2 に示す 11 種類のものを用いた。Fig. 2 では縦軸に制御せん断ひずみを、横軸に制御垂直ひずみを用いてひずみ波形を表示している。同図で Case 0 は引張・圧縮波形, Case 1 は 1 サイクル毎に引張・圧縮と繰返しねじりが交番する波形, Case 2 および Case 3 は Case 1 を 45° 傾けた波形, Case 2 が両振りで Case 3 が片振り波形となっている。Case 4 は引張・圧縮と繰返しねじりと組合せた波形, Case 5 および Case 6 はそれぞれ圧縮保持と引張保持の波形, Case 7 は Box 型波形, Case 8 および Case 9 は Case 4 に対して位相差がそれぞれ 45° および 90° である波形, Case 10 は円形波形である。これらの波形の中で、Case 0 および Case 4 は比例負荷、それ以外の波形は主ひずみ方向が時間によって回転する非比例負荷である。

Fig. 2 のひずみ波形で、Case 0 と Case 4 との疲労寿命の比較を通して、比例負荷でせん断負荷導入が疲労寿命に及ぼす影響を明らかにしようとした。また、Case 0 と Case 1 との疲労寿命の比較を通して、垂直ひずみとせん断ひずみが交番する非比例負荷の影響を、Case 2 と Case 3 との疲労寿命の比較を通して、両振りと片振りの相違が疲労寿命に及ぼす影響、Case 5, Case 6 および Case 7 での疲労寿命の比較を通して、保持が疲労寿命に及ぼす影響、Case 4, Case 8 および Case 9 での疲労寿命の比較を通して、位相差が疲労寿命に及ぼす影響を明らかにしようとした。さらに、Case 10 は回転負荷が疲労寿命に及ぼす影響を明らかにしようとした。

本論文では、制御垂直ひずみおよび制御せん断ひずみがそれぞれ 1 周期したときに 1 サイクルと定義した。ただし、Case 0 は垂直ひずみのみを変動するため、垂直ひずみのみの 1 周期で 1 サイクルとカウントした。この定義に従えば、Fig. 2 に示した制御ひずみ波形を 1 巡したとき Case 2 および Case 3 は垂直ひずみおよびせん断ひずみが 2 周期することから 2 サイクルとなり、その他の Case は 1 サイクルとなる。なお、以下の結果はこの定義に従ったサイクルカウントであることに注意が必要である。¹⁰⁾

Fig. 2 Proportional and nonproportional strain paths.

本研究では、き裂発生繰返し数 (N_c) を直流電位差法によって検出した。¹¹⁾一定の直流電流 (20A) を試験片に通電し、切欠き肩部の電圧を分解能 $1\mu\text{V}$ のデジタルボルトメータで計測した。破損繰返し数 (N_f) は、引張側の応力振幅が $(1/2) N_f$ ときのそれから $3/4$ に低下したときの繰返し数として定義した。¹²⁾き裂伝ば繰返し数 (N_p) は $N_f - N_c$ として定義した。¹³⁾直流電位差法の詳細は参考文献¹¹⁾を参照されたい。

2・2 FEM 解析

Fig. 3 に FEM 解析に使用した要素分割図、境界条件および座標系を示す。ここで、Z は軸方向、R は半径方向、 θ は周方向を表している。FEM 解析では、対称性を考慮して試験片標点近傍断面の $1/4$ の部分を要素分割した。使用した要素は、ねじりを考慮した 8 節点軸対称要素であり、1 つの要素内に 9 つのガウス積分点を有している。節点 E は実験で伸び計先端を押し当てた位置であり、節点 E の変位が Fig. 2 に示した制御ひずみ波形となるように A—B 間の強制変位を制御して解析を行った。3 種類の切欠きモデルの節点数および要素数を Table 3 に示す。

Fig. 4 に改良 9Cr-1Mo 鋼の静引張試験から得られた室温での応力—ひずみ関係および中実平滑丸棒材を用いた繰返し応力—ひずみ関係を示す。併せて、外形 12mm、内径 8mm の中空円筒試験片を用いた Case 10 のひずみ波形での繰返し応力—ひずみ関係を示す。Case 10 のひずみ波形は、これまで非比例負荷の下での追硬化を調べるためによく用いられているひずみ波形¹⁰⁾である。なお、Case 10 での応力—ひずみ関係については、ミーゼス型相当応力とミーゼス型相当ひずみで表記した。本研究で

Table 3 Numbers of nodes and elements.

Notch root radius ρ , mm	0.09	0.20	0.60
Number of nodes	519	478	314
Number of elements	159	143	91

Fig. 3 FEM mesh and boundary condition ($\rho = 0.60\text{mm}$).

Fig. 4 Stress-strain curves in tensile and step up tests.

は Fig. 4 に点線で示す静引張試験から得られた応力—ひずみ関係を 2 直線で近似した線形硬化の構成関係を FEM 解析に用いた。線形硬化の構成関係の各材料定数を Table 4 に示す。静引張試験結果を用いた理由は、本材料は Case 10 の非比例負荷の下でもほとんど追硬化挙動を示さず、最も簡便な静引張試験結果を用いて切欠き材の寿命評価を試みようとしたことによる。本研究では線形硬化の構成関係を用いて Fig. 2 に示すひずみ経路での FEM 解析を 2 サイクル実施し、2 サイクル目の切欠き底の局所垂直ひずみ (ϵ_l)、同局所せん断ひずみ (γ_l)、同最大主ひずみ (ϵ_1) および同最小主ひずみ (ϵ_3) を求めた。

3 試験結果および考察

3・1 き裂発生、伝ばおよび破損繰返し数の負荷経路および弾性応力集中係数依存性

Fig. 5 に各ひずみ波形でのき裂発生繰返し数、き裂伝ば繰返し数および破損繰返し数を引張の弾性応力集中係数 (K_{tp}) について示す。本稿では Case 6 と Case 9 の $K_{tp} = 2.6$ の試験片はき裂発生繰返し数を得ることができなかったため K_{tp} が 4.2 および 6 のみについて表している。

引張・圧縮波形である Case 0 では、 N_c は K_{tp} の増加に伴い減少する。 N_p は K_{tp} の増加に伴ってわずかに減少するが、その程度は N_c に比べて小さい。 N_f についても N_c や N_p と同様に K_{tp} の増加に伴って減少するが、その減少の程度は N_c に比べて小さく、 N_p に比べて大きい。Case 4 では、 N_c 、 N_p および N_f は Case 0 のそれらより全体的に小さい。また、Case 4 では 3 寿命ともに Case 0 に見られたような K_{tp} の大きな依存性は見られない。これらのことは、同じ ρ の試験片においては、引張負荷よりもせん断負荷の方が大きく 3 寿命を低下させること、およびせん断負荷においては 3 寿命の ρ の依存性は引張・圧縮負荷よりも小さいことを示唆している。一方、引張・圧縮

Table 4 Constitutive relationship used FEM.

Young's modulus E , GPa	Poisson's ratio ν	Yield stress σ_y , Mpa	Hardening coefficient H , GPa
211	0.3	490	6.5

Fig. 5 Variations of N_c , N_f and N_p with elastic stress concentration factor in tension.

とせん断とを交番負荷した Case1 においては, Case0 および Case4 に比べて 3 寿命は K_{tp} に対して大きく減少する. また, 3 寿命の ρ の依存性も Case0 と同じ程度であるが Case4 のそれより大きい. これらのことは, 引張・圧縮とせん断負荷を交番する非比例負荷の影響によって 3 寿命が低下したと考えられる. また, 引張・圧縮とせん断の交番する Case1 負荷が引張・圧縮とせん断を組合せた Case4 負荷より ρ の依存性が大きいことを示唆している. Case1 を 45° 傾けた波形である Case2 および Case3 の 3 寿命は Case4 のそれらと余り大きな差はなく, Case2 および Case3 での非比例負荷の影響はそれ程大きくは現れていない. Case2 と Case3 とを比べると 3 寿命は大きな差がないことから, 改良 9Cr-1Mo 鋼の切欠き材は両振りと片振りの影響が大きく現れないと考えられる. Case5 と Case6 の 3 寿命の結果から, Case5 の圧縮保持に比べて Case6 の引張保持の 3 寿命の方が小さいことがわかる. また, Case6 の引張保持と Case7 の両側保持の 3 寿命の差は余り大きくない. これらのことから, 改良 9Cr-1Mo 鋼の切欠き材では圧縮保持より引張保持の方が 3 寿命をより大きく低下させると考えられる. Case4 と Case8 とを比べると 45° の位相差を有する Case8 の 3 寿命が大きく低下していることがわかる. また, Case4, Case8 および Case9 の 3 者を比べると 45° の位相差を持つ Case8 の疲労寿命が Case4 のそれより大きく低下するが, Case8 の 45° の位相差に比べて Case9 の 90° 位相差の N_f には大きな差はない. Case10 の円形負荷での 3 寿命は他の非比例負荷でのそれらと大きな差がなく, 円形負荷の非比例負荷の影響は他の非比例負荷の Case と同程度であると考えられる.

3・2 FEM 解析結果

Fig. 6 に試験片に負荷された軸荷重およびトルクの実験値と FEM 解析から得られた節点反力との比較を Case1 と Case4 について示す. Fig. 6 から, Case1 の実験と FEM 解析でのトルク範囲はほぼ同じ値となったが, 軸荷重範囲は実験値より FEM 解析結果がやや大きくなった. また, Case4 の実験と FEM 解析での両範囲はほぼ同じとなったが, 実験結果では垂直ひずみ経路時にややトルクがかかっていた. その他の波形についても, 両者の関係を確認したが, それほど大きな差はなく, FEM 解析は実験結果を比較的正確に模擬できていると考えられる.

Fig. 7 に, FEM 解析から得られたすべての Case の切欠き底での軸ひずみ-せん断ひずみ関係を示す. Fig. 2 の制御ひずみ波形と Fig. 7 の切欠き底でのひずみ波形を

Fig. 6 Axial load and torque for $\rho = 0.60$ specimen in Case 1 and Case 4.

Fig. 7 Axial and shear strain curves at the notch root for the $\rho = 0.09$ specimen.

比較してみると、Fig. 7での切欠き底でのひずみ範囲がFig. 2の制御ひずみ範囲より大きいことがわかる。Case 0とCase 4の切欠き底の局所ひずみの形状は、Fig. 2に示した制御ひずみの形状と同じである。また、Case 1についても、やや形状が異なるが、局所ひずみと制御ひずみ間の形状に大きな差はない。しかし、Case 2およびCase 3では両者間に大きな差が生じ、Case 3の方が ϵ および γ とも大きい。Case 5とCase 6の局所ひずみの形状も制御ひずみのそれとは大きく異なっているが、両波形は対称的な形状となった。Case 7～Case 10の局所ひずみの形状は、制御ひずみのそれらと似ている。

3・3 非比例多軸低サイクル疲労寿命評価

環状切欠き試験片の比例および非比例負荷でのき裂発生および破損寿命を予測するため、FEM解析から得られた局所ひずみを用いて、これまで提案されてきた3種類の多軸低サイクルひずみ破損パラメータの適用性について検討した。

これまで非比例負荷を含む多軸低サイクル疲労寿命評価パラメータがいくつか提案^{14), 15)}されてきているが、本稿で適用したひずみパラメータは、ミーゼス型相当ひずみ範囲 ($\Delta\epsilon_{eq}$)、ひずみ経路長さに基づくひずみ範囲 ($\Delta\epsilon_{path}$)¹⁶⁾および非比例ひずみ範囲 ($\Delta\epsilon_{NP}$)¹⁷⁾である。各パラメータはそれぞれ式 (1)～(3)で示される。

ミーゼス型相当ひずみ範囲

$$\Delta\epsilon_{eq} = \sqrt{\Delta\epsilon^2 + \frac{1}{3}\Delta\gamma^2} \quad (1)$$

ひずみ経路長さに基づくひずみ範囲

$$\bar{d\epsilon} = (d\epsilon^2 + d\gamma^2 / 3)^{1/2}$$

$$\Delta\epsilon_{path} = \frac{1}{2} \int_{cycle} \bar{d\epsilon} \quad (2)$$

非比例ひずみ範囲

$$\Delta\epsilon_{NP} = (1 + \alpha f_{NP}) \Delta\epsilon_I \quad (3)$$

式 (2)の $\Delta\epsilon_{path}$ は ϵ - $\gamma/\sqrt{3}$ 線図の上の1サイクルのひずみ経路の長さの1/2の長さをひずみ範囲としたものである。式 (3)の $\Delta\epsilon_I$ は最大主ひずみ範囲、 α は非比例負荷での追硬化の程度を表す材料定数、 f_{NP} は非比例の程度を表すパラメータである。 α はFig. 4の結果から0.05とした。

Figs. 8～10それぞれのパラメータで (a) には N_c を、(b) には N_f を整理した結果を示す。なお、各図中の太い実線は平滑丸棒材の N_f のデータ^{18), 19)}であり、それらを基準に係数を設定した。一般に、平滑材の N_c は、 N_c を定義する際のき裂長さや材料に大きく依存するため、一義的に定義することが難しい。たとえば、平滑材の N_f と N_c の寿命比はSUS304の N_c/N_f が0.5から0.6範囲になると報告されている²⁰⁾が、はんだでは²¹⁾その比はもっと小さいことが報告されている。 N_c/N_f の寿命比は材料に依存している。したがって、本論文では、これまで定義が比較的明確である、改良9Cr-1Mo鋼の平滑材の N_f を基準にして寿命評価を行った。以下の切欠き材の N_c の寿命評価において、もし、改良9Cr-1Mo鋼の平滑材の N_c を基準にすれば N_f よりもより安全側に評価されることに注意が必要である。

Fig. 8のミーゼス型相当ひずみ範囲によるCase 0の N_c および N_f の整理結果では、弾性応力集中係数2.6の N_c および N_f は係数2の範囲内に評価された。しかし、それ以外のほとんどが係数2の範囲を超えて長寿命側に評価された。 N_f の整理結果は弾性応力集中係数が高いほど安全側になり、その程度も N_c の整理結果より大きくなった。これは切欠き底にき裂が一旦入ると切欠きの効果がほとんどなくなるということに起因していると考えられる。また、Case 0にせん断ひずみ波形を負荷したCase 4の N_c および N_f の整理結果においても弾性応力集中係数2.6の結果のみが係数2の範囲に整理されたが、それ以外のほとんどが係数2の範囲を超えて長寿命側に評価された。また、Case 4の結果はCase 0の N_c および N_f と比べて大きな差はなかった。1サイクル毎に引張・

Fig. 8 Correlation of N_c and N_f with Mises strain range. Fig. 9 Correlation of N_c and N_f with path strain range. Fig. 10 Correlation of N_c and N_f with nonproportional strain range.

圧縮と繰返しねじりを交番する Case 1 の非比例負荷での N_c の整理では、ほとんどのデータが係数 2 の範囲内に整理された。しかし、 N_f の整理結果では弾性応力集中係数 2.6 のみ係数 2 の範囲に整理され、弾性応力集中係数が大きくなるほど係数 2 の範囲を超えて長寿命側に整理された。また、引張・圧縮の Case 0 と比べるとせん断負荷を交番負荷することで引張・圧縮より疲労寿命が低下することがわかる。Case 1 を 45° 傾けた波形で両振りの Case 2 と片振りの Case 3 での N_c および N_f の整理結果で

は、弾性応力集中係数 2.6 以外のすべてのデータが安全側であった。Case 5, Case 6 および Case 7 での N_c および N_f の整理結果では、弾性応力集中係数が大きいほど安全側に整理された。また、圧縮保持の Case 5 は安全側に整理されたが、引張保持の Case 6 および Case 7 では弾性応力集中に依存して安全側と危険側に整理された。Case 4 に対して位相差が 45° , 90° である Case 8 および Case 9 も安全側と危険側にばらつきが大きく整理され、 N_c および N_f とともに弾性応力集中係数が小さいものほ

ど危険側に整理された。位相差が 0° である Case 4 と比べると N_c は弾性応力集中係数が小さいほど Case 4 より Case 8 および Case 9 が危険側に整理される傾向があった。円形波形である Case 10 では、弾性応力集中係数が大きいほど安全側に整理され、弾性応力集中係数が小さいほど危険側に整理された。その程度は他の Case より大きく、非比例負荷である他の Case より切欠き効果の影響を大きく受けると考えられる。

Fig. 9 のひずみ経路長さに基づくひずみ範囲による N_c および N_f の整理結果では、比例負荷での Case 0 および Case 4 ではミーゼス型相当ひずみ範囲の整理結果と同じ程度に整理された。Case 1 での N_c および N_f は、弾性応力集中係数 2.6 のみが係数 2 の範囲に整理され、弾性応力集中係数が大きくなるほど係数 2 の範囲を超えて長寿命側に整理された。両振りの Case 2 と片振りの Case 3 での N_c および N_f の整理結果に両振りと片振りの影響は大きくは現れなかった。Case 5, Case 6 および Case 7 での N_c および N_f は、弾性応力集中係数が大きいほど安全側に整理され、圧縮保持での Case 5 より引張保持が入った Case 6 および Case 7 が弾性応力集中係数に依存して安全側と危険側に整理された。Case 8 および Case 9 の N_c および N_f とともに弾性応力集中係数が小さいほど危険側に整理された。また、弾性応力集中係数が小さいほど Case 4 より Case 8 および Case 9 が危険側に整理される傾向があり、位相差の大きさによる予測寿命に大きな差は生じなかった。円形波形である Case 10 では、弾性応力集中係数が大きいほど安全側に整理され、ミーゼス型相当ひずみ範囲と比べてばらつき範囲が少し大きくなった。これらの結果により、ひずみ経路長さに基づくひずみ範囲で N_c および N_f を整理すると、ミーゼス型の相当ひずみ範囲と比べ、非比例負荷での寿命が大きく安全側に整理される傾向があった。

Fig. 10 の非比例ひずみ範囲による N_c および N_f の整理では、Case 0 の結果はミーゼス型相当ひずみ範囲およびひずみ経路長さに基づくひずみ範囲による整理結果とまったく同じとなったが、Case 4 のすべてのデータは係数 2 の範囲を超えて安全側に整理された。また、Case 1 の非比例負荷での N_c および N_f の整理では、ミーゼス型相当ひずみ範囲およびひずみ経路長さに基づくひずみ範囲の整理結果よりも危険側に整理される傾向となった。両振りの Case 2 と片振りの Case 3 の N_c および N_f の整理結果には、両振りと片振りの影響は大きくは現れなかった。Case 5, Case 6 および Case 7 での N_c および N_f の整理結果では、弾性応力集中係数が小さいものほど危険側に整理される傾向になった。圧縮保持の Case 5 より引張保持の Case 6 および Case 7 が弾性応力集中係数に依存して安全側と危険側に整理された。Case 8 および Case 9 の N_c および N_f とともに、弾性応力集中係数の小さいものほど危険側に整理された。また、位相差の大きさによる予測疲労寿命には大きな差は生じなかった。円形波形である Case 10 では、弾性応力集中係数が大きいほど安全側に整理された。

Table 5 The ratio of the predicted lives to the experimental lives for N_c and N_f used FEM.

	Mises strain range $\Delta\epsilon_{eq}$	Path strain range $\Delta\epsilon_{path}$	Nonproportional strain range $\Delta\epsilon_{NP}$
N_c	1/3.3 ~ 40	1/3.2 ~ 129	1/7.6 ~ 25
N_f	1/2.5 ~ 211	1/2.5 ~ 384	1/10.6 ~ 71

これらの結果により、非比例ひずみ範囲で N_c および N_f を整理すると、ミーゼス型の相当ひずみ範囲およびひずみ経路長さに基づくひずみ範囲の整理結果と比べ、非比例負荷の中で保持を有する Case 5, Case 6 および Case 7 が危険側に整理される傾向があった。

3 種類のひずみパラメータの適用性について考察するため、Table 5 に 3 種類のパラメータで実験寿命を予測寿命で除した値を示す。危険側および安全側ともに最もばらつき範囲が小さいのはミーゼス型相当ひずみ範囲であり、3 種類のパラメータの中ではミーゼス型相当ひずみ範囲が最も良い予測をすることが判明した。

4 結 言

(1) 2 種類の比例および 9 種類の非比例のひずみ波形を用いて多軸低サイクル疲労試験を行った結果、比例負荷ではせん断負荷の導入によって、き裂発生寿命および破損寿命が大きく低下し、切欠きの影響は小さくなった。非比例負荷での両寿命は比例負荷のそれらよりも小さく、切欠き底曲率半径の影響も小さかった。引張保持の両寿命は圧縮保持の両寿命より小さくなった。引張とねじりの間の位相差は両寿命に余り大きく影響しなかった。

(2) 改良 9Cr-1Mo 鋼は、非比例負荷の下ではほとんど追硬化を生じないことが判明し、追硬化係数 α は 0.05 であった。

(3) FEM 解析で求めた切欠き底の局所せん断ひずみと局所垂直ひずみ範囲は、制御せん断ひずみよりも大きい。ほとんどの波形で両者の形状は同じであった。

(4) FEM 解析から得られた局所ひずみを用いて、ミーゼス型相当ひずみ範囲、ひずみ経路長さに基づくひずみ範囲、非比例ひずみ範囲の適用性を検討した。ミーゼス型相当ひずみ範囲がき裂発生および破損寿命に対して良い予測を与えることがわかった。

参 考 文 献

- 1) K. Aoto and Y. Wada, "Creep-fatigue evaluation of Mod.9Cr-1Mo steel", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.44, No.496, pp.23-28 (1995).
- 2) T. Ito, I. Nonaka, S. Kihara and H. Umaki, "Creep damage property and life evaluation of Mod.9Cr-1Mo steel", Proceedings of the 36th Symposium on Strength of Materials at High Temperatures, pp.1-4 (1998) The Society of Materials Science, Japan.
- 3) T. Ogata, "Influence of long-term strain hold on creep-

- fatigue life of Mod.9Cr-1Mo steel", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.46, No.1, pp.25-31 (1997).
- 4) K. Raguchi, E. Kanno, S. Ozaki and T. Uno, "Creep-fatigue life evaluation based on the overstress concept for modified 9Cr-1Mo steel", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.38, No.434, pp.86-91 (1989).
 - 5) S. Nishino, K. Shiozawa, A. Kojima, S. Seo and Y. Yamamoto, "Influence of thermal aging and notch on low cycle fatigue strength of forged Mod.9Cr-1Mo steel at elevated temperature", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.48, No.6, pp.231-232 (1999).
 - 6) N. Hiyoshi and M. Sakane, "Multiaxial low cycle fatigue and crack propagation of Mod.9Cr-1Mo steel at high temperature", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.48, No.1, pp.56-62 (1999).
 - 7) T. Kim, S. Zhang and M. Sakane, "Multiaxial low cycle fatigue life of Mod.9Cr-1Mo steel circumferential notched specimen under nonproportional loading", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.76, No.768, pp.1059-1067 (2010).
 - 8) H. Neuber, "Theory of stress concentration for shear-strain prismatical bodies with arbitrary nonmilinear stress-strain law", *Transactions of the ASME, Journal of engineering materials and technology*, Vol.28, No.4, pp.544-550 (1961).
 - 9) R. E. Peterson, "Stress concentration design factor", pp.35-57 (1953) John Wiley & Sons.
 - 10) S. Kida, T. Itoh, M. Sakane, M. Ohnami and D. F. Socie, "Dislocation structure and nonproportional hardening of type 304 stainless steel", *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol.20, No.10, pp.1375-1386 (1997).
 - 11) M. Sakane and M. Ohnami, "Electrical potential drop and notch opening displacement methods for detecting high temperature low cycle fatigue cracks of circumferential notched specimens", *Transactions of the ASME, Journal of Engineering materials and technology*, Vol.110, No.3, pp.247-252 (1988).
 - 12) JSMS Committee on High Temperature Strength of Materials, "Standard for high temperature low cycle fatigue testing", pp.24-36 (2003), The Society of Materials Science, Japan.
 - 13) M. Nozaki, M. Sakane and Y. Tsukada, "Crack propagation behavior of Sn-3.5Ag solder in low cycle fatigue", *International Journal of fatigue*, Vol.30, No.10-11, pp.1729-1736 (2008).
 - 14) D. F. Socie and G. B. Marquis, "Multiaxial fatigue", pp.273-336 (2000) Society of Automotive Engineers, Inc.
 - 15) Y. S. Garud, "A new approach to the evaluation of fatigue under multiaxial loadings", *Transactions of the ASME, Journal of Engineering materials and technology*, Vol.103, No.2, pp.118-126 (1981).
 - 16) S. Kitade, T. Igari, M. Yamauchi and K. Nakashima, "Cyclic deformation and failure of 2 1/4Cr-Mo steel under biaxial stresses", *Proceedings of the 25th symposium on strength of materials at high temperatures*, pp.97-101 (1987), The Society of Materials Science, Japan.
 - 17) T. Itoh, K. Murashima and T. Hirai, "Material dependence of multiaxial low cycle fatigue properties under nonproportional loading", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.56, No.2, pp.157-163 (2007).
 - 18) M. Nozaki, A. Yamaguchi, T. Tsurui, M. Fujiwara and M. Sakane, "Low cycle fatigue life evaluation using miniature specimen of Mod.9Cr-1Mo steel", *Proceedings of the 58th JSMS Annual Meetings*, pp.133-134 (2009), The Society of Materials Science, Japan.
 - 19) National Institute for Materials Science, "Fatigue database", Fatigue data sheet No.78, available from <https://tsuge.nims.go.jp/MADS/ja/sheet/Fatigue.htm>, (accessed 2010-08-27).
 - 20) M. Ohnami, Y. Asada, M. Sakane, M. Kitagawa and T. Sakon, "Notch effect on low cycle fatigue in creep fatigue at high temperature : experiment and FEM analysis", *Transactions of the ASTM, Special Technical Publication*, Vol.942, pp.1066-1095 (1988).
 - 21) H. Nose, M. Sakane, M. Yamashita and K. Shiokawa, "Crack initiation and propagation behavior of three types of solders in torsion low cycle fatigue", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.69, No.684, pp.46-53 (2003).