高温における低炭素鋼の引張繰返曲げ

動クリープと残留応力*

平 修 二** 村 上 裕 則*** 小 寺 沢 良 一**

Dynamic Creep of Low Carbon Steel at Elevated Temperature as Related with the Residual Stresses Retained after Dynamic Creep under Combined Stresses of Static Tension and Alternating Bending

by

Shuji TAIRA, Yasunori MURAKAMI and Ryoichi KOTERAZAWA
(Kyoto University) (Ritsumeikan University) (Kyoto University)

Dynamic creep tests were carried out with 0.05 percent carbon steel at 450°C under combined stresses of static tension and alternating bending. The present study aims to establish the basis for analysis of the dynamic creep strength under combined stresses of static tension and alternating bending from static creep data or from the data of dynamic creep under pulsating axial stresses. The residual stress retained after the dynamic creep test was measured and compared with the results of analysis, in order to examine the validity of the basic idea on which the analysis is based.

According to the results of the study, it is ascertained that the approximate estimation of the dynamic creep strength under combined stresses of static tension and alternating bending can be made by applying the same method of analysis as that for the prediction of dynamic creep under axial varying stress from static creep data, which has been reported previously. The distribution of the residual stress retained after the tests is also discussed. (Received Jun. 2, 1959)

1. 緒 言

高温において材料が静荷重と繰返荷重を同時に受ける場合のクリープについては、多く静引張荷重のうゑに引張圧縮繰返荷重を重ねて加える引張圧縮動クリープ試験が行なわれている。筆者らもこれについては実験のなびに解析的研究を行なつて、すでに低炭素鋼および13クローム鋼について行なつた実験の結果から、固体状態力学方程式を基礎として導き出した等価静応力を使用することにより、静クリープ試験結果より動クリープ強度の推定が可能であることを示した^{1,2)}。しかし、実際の機械部分はかならずしも引張圧縮変動荷重のみを受けるのではなく、たとえば、タービン翼は、遠心力による静引張荷重と、振動による繰返曲げ荷重を同時に受ける。このような荷重状態における動クリープについても筆者らはさきに13クローム鋼について実験を行なつた³⁾。本報告は、静引張クリープ試

験結果から引張繰返曲げ動クリープ強度を推定するための解析の基礎を固めることを目的としたものであつて、引張圧縮動クリープを取り扱う際に基本的な性質を持つものとして取り上げた低炭素鋼の焼鈍材を使用して、実験と解析を行なうと同時に、その解析の基礎とした考え方の妥当性を確かめる意味において、試験後の試験片に生ずる残留応力を測定して計算結果との比較を行なつたものである。

2. 実験装置および実験方法

本実験に使用した実験装置および実験方法は、さきに13クローム鋼に関する実験に用いたと同一のものである。試験機は高温引張繰返曲げ疲労試験機で、重錘とレバーにより静引張荷重を与え、偏心質量の回転による強制振動によって定振幅繰返曲げを与える。振幅測定はダイヤルゲージとダッシュポットにより行なっている。伸び測定は試験片標点距離の両端に取りつけた取出棒の先端に直線のEdgeを持つ薄板を付し、その相対移動を顕微鏡で読みとることにより行なつた。試験片の加熱には電気炉を使用し、温度測定はアルメ

* 原稿受付 昭和34年6月2日

** 正員 京都大学工学部

*** 正員 立命館大学理工学部

Table 1 Chemical composition, heat treatment and mechanical properties at room temperature

Composi- tion	C	Si	Mn	P	S	Fe
%	0.05	0.03	0.12	0.008	0.01	bal.
Heated after machining at 920°C for one hour in vacuum with subsequent cooling in furnace						
Yield point (kg/mm ²)	24.1		Elongation (%)		36.0	
Tensile strength (kg/mm ²)	36.2		Reduction of area (%)		71.3

Fig. 1 Test specimen

ルクロメル熱電対と電位差計式温度計によっている。また、サイラトロン方式の自動温度調整装置により、試験片温度の時間的変動を450°Cにおいて±2°C以内におさえた。残留応力の測定には腐食法を採用した。すなわち、試験片の一端固定、他端に鏡を取りつけて、その片面を腐食し、この際生ずる鏡の回転を望遠鏡とスケールを用いて読みとり、その際の腐食量と読みの変化の関係より残留応力を算出した。

3. 試験材料および試験片

試験材料は0.05%炭素鋼の焼鈍材であって、その化学成分、熱処理条件ならびに常温における機械的性質をTable 1に示す。低炭素鋼の焼鈍材を使用したのは、この種の材料については、すでに報告したように組織的に安定で、固体状態力学方程式にもとづいた解析によって、静クリープ試験結果から引張圧縮動クリープ強度の推定が可能であり、これについての実験ならびに解析は他の材料の強度性質を解析するための基礎を与えると考えられるからである。試験片は厚さ4 mm、幅10 mm、平行部分長さ15 mmの板状試験片でその形状寸法をFig. 1に示す。この試験片の有効標点距離は既報の方法で計算し、その値は19.0 mmである。

4. 実験結果

本実験における試験条件は

Table 2 Test conditions

Temperature	450°C
Stress ratio ($\frac{\text{Repeated bending stress}}{\text{Static tensile stress}}$) A_b	0 (Static) 0.75 (Dynamic)
Frequency of repeated bending stress	780 cpm
Duration of test	Up to 50 hours

Table 2に示すとおりである。ここで応力比 A_b は試験片表面における最大繰返曲げ応力の静引張応力（静引張荷重を断面積で除した公称値）に対する比である。得られた実験結果をFig. 2～Fig. 5に示す。Fig. 2, Fig. 3は引張繰返曲げ動クリープ試験結果, Fig. 4, Fig. 5は試験後の試験片に生じている残留応力の測定結果である。

(I) 引張繰返曲げ動クリープ試験結果

Fig. 2はクリープ曲線で、白丸は静クリープ試験結果、黒丸が $A_b=0.75$ における引張繰返曲げ動クリープ試験結果である。Fig. 3はFig. 2の結果を負荷後50時間における許容ひずみを2%, 4%および6%におさえた場合の静引張応力と繰返曲げ応力の組合せを示す時間強度線図として表わしたものである。この図において同一時間に同一ひずみを生ずる静引張応力は、繰返曲げ応力の加わることによりかなり(20~25%)減少しており、静引張応力のうゑに重畳して加えられた繰返曲げ応力かなりの程度にクリープを促進することを示している。

(II) 残留応力測定結果

材料が静引張応力と繰返曲げ応力を同時に受ける場合、すでに報告したように、断面内における塑性変形量が表面近傍と内部とは異なるため、平均応力の分

Fig. 2 The creep curves under static tension and the dynamic creep curves under combined static tensile and repeated bending stresses

Fig. 3 Stress range diagram for specified creep strain (Combined static tensile and repeated bending stress)

Fig. 4 Residual stresses in the annealed specimen and in those subjected to static creep tests

Fig. 5 Residual stresses in specimens subjected to dynamic creep test of combined static tension and repeated bending

布は一樣でなく、大きい繰返応力の加わる表面において内部に比べて小さい平均応力の値を持つ結果として、応力を取り去ったあとには表面に圧縮、内部には引張りの残留応力の発生することが予想される。すなわち、引張繰返曲げ応力のもとにおける応力分布は、もし、塑性変形(もしくはクリープ変形)がまったくおこらず弾性変形のみであるとする、Fig. 6 (a)に示すように、一樣な平均応力 σ_t と断面中心において 0 で表面に向かって直線的に増加する繰返応力(表面において

σ : Stress
 σ_t : Static tensile stress
 σ_{ba} : Alternating bending stress
 σ_m : Mean stress σ_r : Residual stress
 y : Distance from the center of cross section

Fig. 6 Schematic representation of the cause of residual stress due to combined static tensile and repeated bending stresses

σ_{ba})よりなる。したがって、表面に平行な各層の受ける平均応力は同一であるが、繰返応力は中央では作用せず表面に近づくほど大きくなる。一般に平均応力に繰返応力が加わるによりクリープひずみは増大するものであるから、もし、これらの各層が互に拘束されず自由に伸びうるものとするれば表面に近い層ほど伸びが大きくなるであろう。しかし、実際は各層の間には拘束があり、変形前平面であった横断面は、変形後も平面を保つから、表面には圧縮、内部には引張りの内部応力が発生し、平均応力の分布は Fig. 6 (b)に示すように表面に近づくほど小さくなる。このような状態より、外部から加えた応力を取り去ると Fig. 6 (c)に示すように、表面に圧縮、内部に引張りの残留応力が発生することとなる。Fig. 4は焼鈍材および静クリープ試験後の残留応力であり、Fig. 5が問題としている引張繰返曲げ動クリープ試験後の残留応力を示したものである。両図を比較すれば、うえて予想したように引張繰返曲げ動クリープ試験後の試験片には焼鈍材および静クリープ試験後の試験片に比べていちじるしく大きい圧縮残留応力が試験片表面

において発生していることが認められる。うへの引張繰返曲げ動クリープ試験後の残留応力測定結果は、負荷後 3 分、30 分および 50 時間後において行なったものを示しているが、これらの間にほとんど差異がなく、上記内部応力は負荷後ごく短時間の間に定常状態に達し、以後の変化はほとんどないことがわかる。なお、Fig. 4に示されているように静クリープ試験後に残留応力が発生するのは主として表面効果によるものと推測される。

5. 引張繰返曲げ動クリープの解析

静クリープ試験結果から引張繰返曲げ動クリープ強度の推定を可能ならしめるための解析を行なうのが本節の目的であるが、静クリープ試験結果から引張圧縮動クリープ¹⁾²⁾強度を推定する方法についてはすでに報告したとおりであるので、ここでは引張圧縮動クリープ強度が与えられた場合にこれから引張繰返曲げ動クリープ強度を計算する方法について考える。そのためにはまず、前節で述べた平均応力の分布を求めなければならない。前節で述べたように、試験片表面に平行な各層は互に拘束されているために自由に伸びえず、試験片断面は平面を保持する。これがこの際与えられた一つの条件となる。繰返曲げのために各層のひずみは周期的に変動しているが、その振幅の中心位置へきたときを考えると、そのときの各層の全ひずみならびにその増加速度は上記条件によって断面全体にわたって一定でなければならない。全ひずみは弾性ひずみとクリープひずみからなり、弾性ひずみは平均応力の不均一な分布に伴なって一定でないから、クリープひずみも厳密には一定でない。しかし、いまの場合、クリープがいちじるしいために全ひずみの中の弾性ひずみの割合はきわめて小であって、ひずみはほとんどクリープひずみのみとみなしてさしつかえない。したがって、クリープひずみもクリープひずみ速度とともに断面全体にわたって近似的に一定となる。ところで筆者らは静クリープ試験結果から引張圧縮動クリープ¹⁾²⁾強度を推定する際に、「等価静応力」を使用しているが、これの定義はある変動応力のもとにおけるクリープひずみと等しいクリープひずみを与える静応力である。したがって、上記クリープひずみならびにクリープひずみ速度が断面内において一様であることは、とりもおさず等価静応力が断面全体にわたって一定であることにほかならない。

等価静応力は与えられた材料についてある温度のもとにおいては平均応力と応力振幅の関数である。本実験では定振幅の繰返曲げを与えているためにひずみ振幅が与えられた条件であって、断面中心で0で表面に向かって直線的に増加する。繰返曲げ応力の繰返速度がかなり大きいからその間の変形はほぼ弾性的とみなされ、ひずみ振幅に弾性係数を乗ずることによって応力振幅は既知となる。したがって、等価静応力一定の条件より、与えられた σ_a の断面内分布に対して σ_m の分布が定まる。 σ_m の分布が定まればこれをもととして引張圧縮動クリープ強度と引張繰返曲げ動クリープ強度の関係を求めることができる。その方法はつぎのとおりである。

Fig. 7 はある時間 t にあるひずみ ε を生ずるような平均応力 σ_m と応力振幅 σ_a の組合せを示す時間強度

Fig. 7 Schematic representation of stress range diagram for combined static tension and repeated tension and for combined static tension and repeated bending

線図を模型的に表わしたもので、破線で示した引張圧縮の場合の線図が求まっているものとする。これをもととして、かりに実線で表わした引張繰返曲げの場合の σ_e と σ_{ba} の関係を示す線図を求めるのがここにおける問題である。いま、任意の σ_{ba} に対して t 時間にひずみ ε を生ずるような σ_e を求めることを考える。 σ_{ba} は試験片表面における応力振幅であるから、試験片表面における平均応力は引張圧縮動クリープに関する破線上の σ_{ba} に対応する σ_m すなわち σ_{m0} で与えられる。破線上では等価静応力 σ_e は一定であり、横軸上では応力振幅は0であるから、破線と横軸の交点における σ_m がこの場合の断面全体について一定な σ_e の値を与える。また、応力振幅は断面中心で0で断面内で直線的分布を持つから、図の縦座標 σ_a は断面中心よりの距離に比例することとなり、破線がこの際の断面内の平均応力の分布を与える。したがって、この平均応力の断面についての平均が σ_e となる。本実験の場合は板の平面曲げであるから、図のうえでの平均すなわち、図中のハッチを施した二つの部分の面積が等しくなるように引いた横軸への垂線が σ_e の値を与える。また、引張荷重を除いたあとの中立軸の片側の残留応力の分布はハッチを施した部分によって示されるものである。このようにして引張繰返曲げに対する $\sigma_{ba}-\sigma_e$ 線図上の一点が求められたから、同じことを繰り返すことにより実線で表わした線図が求まる。

Fig. 8 は前述の引張繰返曲げ動クリープ試験結果と解析結果を両軸に静引張応力および繰返曲げ応力の等価静応力に対する比をとって無次元表示した時間強度線図上において比較したものである。破線が静クリープ試験結果より計算した引張圧縮動クリープに関する線図で、これより、上記方法で引張繰返曲げの場合の計算を行なった結果が実線で示した曲線である。ただし、ここで静クリープ曲線を、

$$\varepsilon = a \sigma^b t^c \quad (1)$$

Fig. 8 Non-dimensional stress range diagram of a low carbon steel for the combined static tension and repeated bending (The line for the combined static and repeated tension is presented for reference)

Fig. 10 Non-dimensional stress range diagram of 13 chromium steel for the combined static tension and repeated bending (The lines for the combined static and repeated tension is presented for reference)

Fig. 9 Comparison of analytical distribution of residual stress with experimental one

ϵ : クリープひずみ, σ : 応力, t : 時間,

α, β : 定数

なる式で近似して求めた $\alpha/\beta=97$ を用いて計算を行っている。実線で表わした引張繰返曲げ動クリープ強度の計算結果は丸印で示した実験結果とまず満足すべき一致を示しているといえる。Fig. 9 は残留応力の実験値と計算値の比較である。縦軸の残留応力としては、Fig. 5 の引張繰返曲げ動クリープ試験後の残留応力より、Fig. 4 の静クリープ試験後の残留応力をさし引いたものが繰返曲げにより発生したものと考えて、これをとって実線の計算値と比較している。両者の間に多少の相違はあるが、ほぼ近い値を与えており、引

張繰返曲げ動クリープ強度推定のための上述の考え方の妥当性を示すものと考えられる。Fig. 10 はさきに報告した 13 クローム鋼に関する実験結果と上記方法による解析結果の比較であって、Fig. 8 と同様の表示をしている。両者の一致はこの場合もまず満足なものといえる。

なお、本解析は動クリープ変形のみについて行なったものであるが、動クリープ破断についても適用することができる。すなわち、筆者らが、低炭素鋼および 13 クローム鋼について行なった引張圧縮動クリープ試験結果によると、破断に関する等価静応力は変形に対する等価静応力とほとんど同一であって、このような場合には上記解析結果は破断強度に対しても適用しうる。

6. 結 言

静クリープ試験結果より引張繰返曲げ動クリープ強度の推定を行なうための解析的基礎を固めることを目的として、低炭素鋼について引張繰返曲げ動クリープ試験と試験後の試験片の残留応力測定を行ない、同時に試験片断面内の平均応力の分布を考慮して解析を行なった。その結果によると等価静応力が断面全体にわたって一様であるとして計算した動クリープ強度は実験結果との満足な一致を示し、また、残留応力の計算結果も測定結果とほぼ一致して、解析の基礎とした考え方の妥当性を示している。なお、本解析方法を既報の 13 クローム鋼についての実験結果に適用して満足な結果を得た。以上より本解析方法を用いることにより、静クリープ試験結果あるいは引張圧縮動クリープ

試験結果より引張繰返曲げ動クリープ強度の推定が可能であるといえる。なお、本解析結果は動クリープ破断の場合に適用できる。

終りに本実験を行なうにあたり、立命館大学学生浅田秋彦、奥村忠生の両君の協力を得たことを付記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 平, 田中, 小寺沢, 田中, 藤田, 機械学会論文集, 25, 151, 163 (昭34)
- 2) 平, 小寺沢, 小沢, 鈴木, 機械学会関西支部第34期定時総会講演会(昭34-3)において講演
- 3) 平, 田中, 小寺沢, 井上, 機械学会論文集, 25, 151, 148 (昭34)
- 4) 西原, 平, 田中, 村田, 林科試験, 5, 34, 410 (昭31)
- 5) 平, 村上, 材料試験, 7, 62, 591 (昭33)
- 6) 西原, 平, 岩田, 機械学会論文集, 13, 45, 119 (昭22)
- 7) 平, 田中, 小寺沢, 日本機械学会第36期通常総会講演会(昭34)において講演

有 機 材 料

ポリマーの配向および複屈折に関する理論

(Theory of Orientation and Double Refraction in Polymers) E.F. Gurnee,
J. App. Phys., Vol. 25, No. 10, pp. 1232~1240 (Oct. 1954) 図16, 表2

糸からまり状自由分子の配向度が、ポリマーの両端距離に比例すると考え、原子価角によるのこぎり歯状分子の両端距離を配向度100%とする。ポリスチロールについて、そのメチレン結合分子が完全に配向し、フェニール基が自由回転、および拘束回転する場合について、平均分極率の差($\alpha_z - \alpha_x$)を主鎖との関係は考慮せずフェニール基の主分極率 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ から計算してある。複屈折率($n_z - n_x$)と分極率との関係は、Lorentz-Lorenzの式を用いて計算する。実験的測定

には配行性モノフィラメントの複屈折が一樣でないとき、繊維軸から距離 d に対する分布関数 $D(d)$ を求めるには、モノフィラメントの端を円錐形、または、くさび形に切断して、その繊維軸上のRetardationの傾斜から計算できる。

スチロール、モノフィラメントについて、くさび形の実例があげられ、議論されている。

(伊藤勝彦)

ゴムおよびプラスチックに及ぼすガンマ線照射の影響

(Effect of Gamma Radiation on Certain Rubber and Plastics) J. W. Ryan,
Nucleonics, Vol. 11, No. 8, pp. 13-15 (Aug. 1953)

長期 γ 線の照射によるゴム、およびプラスチックの機械的性質の変化が測定された。

試料としては、ポリエチレン、ブナーN、ネオプレン、天然ゴム、チオコールが用いられ、機械的性質としては、ASTM D 882-46 T による応力-ひずみ曲線、Durometer "A" seale による硬度試験と、さ

らに特殊圧縮試験も試みられている。平均フラックス10 in photors/cm²/sec 6ヶ月に及ぶ照射と未照射のものが比較された。

γ 線の照射の結果は、いずれのポリマーもだいたい弾性係数が増大し、硬くなり、塑性流れがおこりがたくなっている。

(伊藤勝彦)