Grade92 鋼に対するクリープひずみ式の開発†

茂山 治久* 高橋 由紀夫* Jonathan Parker**

Development of Creep Strain Equations for Grade 92 Steel

by

Haruhisa SHIGEYAMA*, Yukio TAKAHASHI* and Jonathan PARKER**

Creep strain equations of Grade 92 steel which is used in boilers and piping systems of ultra-supercritical (USC) thermal power plants were developed based on the results of creep tests using smooth round bar specimens of three different sources of Grade 92 steels. In these equations, primary creep behavior was represented by a power-law function of time and tertiary creep behavior was described by an exponential function of time. Parameters in these equations were determined as a function of creep rupture time which was obtained from each creep rupture curve. The creep strain equations were able to express the creep deformation behavior of each test material with a satisfactory accuracy for a wide range of temperature and stress.

Key words:

Creep deformation, Grade 92 steel, Creep strain equation, Primary creep, Tertiary creep

1 緒 言

火力発電プラントに使用される耐熱鋼は高温・高圧環境下で使用されることが多く、設計や健全性評価の際、クリープ強度を考慮する必要がある。ボイラ配管のような内圧を受ける部材のクリープに対する健全性は、平滑丸棒試験片におけるクリープ試験から得られたクリープ破断曲線と、評価対象部位の代表的な応力値を基に議論される。しかしながら、実際には、単純な内圧のみを受ける配管でさえ応力分布が生じ、その応力分布はクリープ変形の進行とともに時々刻々と変化する。また、エルボや溶接部等では、さらに複雑な応力分布が生じるため、これらの部位の適切な健全性評価を行うために、有限要素法による詳細解析が必要となる場合が少なくない。これらの解析には、材料のクリープ変形挙動を高い精度で表現できるクリープひずみ式（クリープひずみ-時間関係式）が必要となる。

これまでに、1次および2次クリープを表現するクリープひずみ式は多数提案されており、3次クリープを含めたクリープ変形挙動全体を表現する式としては θ 法¹⁾ や改良 θ 法²⁾ が代表的である。また、高橋は、近年の超々臨界圧 (USC) 火力発電プラントのボイラや蒸気配管材として多用されている焼き戻しマルテンサイト組織を有する高クロム鋼 (ASME Grade 91鋼やGrade 122鋼) に対して、これらの材料特性を考慮したクリープひずみ式を開発している^{3), 4)}。Grade 91鋼よりも母材のクリープ強度が高く、近年の国内外のUSC火力発電プラントで広く使用されているASME Grade 92鋼に関しては、これまでに高温での引張変形挙動⁵⁾やクリープ変形挙動⁶⁾⁻⁸⁾に関する報告があり、一部では、クリープ変形やクリープ損

傷のモデリングが行われている^{7), 8)}。Lombardiら⁷⁾は、クリープ変形のモデリングとしてクリープひずみ速度則を提案しており、1次クリープひずみ速度を時間の指数関数で、定常クリープひずみ速度を応力のべき乗で表し、3次クリープ挙動は連続体損傷力学による損傷変数を使用することで表現した。また、Ciniら⁸⁾は、クリープひずみ速度則を、擬塑性、高応力クリープ、低応力クリープの3つの異なるメカニズムによるひずみ速度の和で表し、各メカニズムのひずみ速度はノートン則もしくは改良ノートン則と損傷変数を組み合わせた式により表現した。ただし、これらのモデルでは、多くのパラメータが必要になること、また、限られた条件のみでの検討であり、広範な温度、応力条件への適用性が十分とは言えないことなど、いくつかの課題が見うけられる。

このような状況のなか、著者らはGrade 92鋼に対するクリープひずみ式を開発し⁹⁾、有限要素法による環状切欠きクリープ試験の解析を通して、多軸応力場への適用性を示した⁹⁾⁻¹¹⁾。本報では、その後の一部の改良も含めて、モデル化の手順とクリープひずみ式の詳細を示すとともに、多数の試験データとの比較によって適用性を評価した結果を示す。

2 試験方法

2.1 供試材および試験片

供試材には、ヒートの異なる3種類のGrade 92鋼を使用した。それぞれをBase Metal A, B, C (以下, BM A, BM B, BM C) と呼ぶこととする。BM Aは外径610mm, 肉厚102mmの管から採取した材料, BM Bは外径298mm, 肉厚30mmの管から採取した材料, BM Cは厚さ50mmの板から採取した材料である。各材料の化学組成をASME

† 原稿受理 平成28年8月19日 Received Aug. 19, 2016 ©2017 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 一般財団法人電力中央研究所 〒240-0196 横須賀市長坂

* Central Research Institute of Electric Power Industry, Nagasaki, Yokosuka, 240-0196.

** Electric Power Research Institute, Charlotte, NC, 28262-8550, USA.

Fig.2 Creep rupture properties of each material.

Table 3 Constants in equation (1).

	BM A	BM B	BM C
a_0	72371.9	61374.1	57199.8
a_1	-14127.3	-11517.8	-10329.5
C_1	44.170	37.900	35.662
b_0	28473.7		
b_1	3409.2		
b_2	-2191.8		
C_2	25.453	25.071	24.842

にはGrade 92鋼母材の平均特性における定数¹²⁾を使用し、 C_2 の値を最適化することで各ヒートの低応力/長時間領域における破断特性を表している。

式(1)によって計算されたクリープ破断曲線をFig. 2中に線で示した。各ヒート、温度におけるクリープ破断特性を良好に表現できていることがわかる。

3・2 1次クリープ挙動の定式化

BM Aの600°Cにおける加速クリープ開始直前までのクリープひずみと時間の関係をFig. 3に示す。いずれの応力においても、両対数グラフ上においてクリープひずみと時間は直線関係を示すことがわかる。このことから、1次クリープひずみ ε_p は以下に示す時間のべき乗で表現することが可能である。

$$\varepsilon_p = D_1 t^{r_1} \quad (2)$$

各々の試験ごとに最小二乗法により、係数 D_1 と r_1 を求めた。Fig. 4に係数 D_1 と破断時間の関係を示す。係数 D_1 と破断時間の関係は両対数グラフ上において負の傾きを持った線形的な関係になることがわかる。そこで、係数 D_1 を以下に示すように破断時間のべき乗で近似することとした。

$$D_1 = 1.89507 \times 10^{-2} t_R^{-3.48768 \times 10^{-1}} \quad (3)$$

次に、係数 r_1 と破断時間の関係をFig. 5に示す。係数 r_1 についても係数 D_1 と同様に両対数グラフ上において負の傾きを持った線形的な関係になるため、以下に示すように破断時間のべき乗で近似した。

$$r_1 = 7.76630 \times 10^{-1} t_R^{-9.15983 \times 10^{-2}} \quad (4)$$

Fig.3 Fitting of primary creep behavior by equation (2) for BM A at 600°C.

Fig.4 Relationship between parameter D_1 and rupture time. Fig.5 Relationship between parameter r_1 and rupture time.

3.3 3次クリープ挙動の定式化

Grade 92 鋼のクリープ変形挙動は明白な定常クリープ領域を示さないことから, 本研究ではクリープひずみ式を1次クリープと3次(加速)クリープの和で表現することとした. 各試験で得られたクリープ変形挙動に関して, 3次クリープひずみ ε_t を以下に示す式で計算した.

$$\varepsilon_t = \varepsilon_c - D_1 t^{r_1} \quad (5)$$

ここで, ε_c は全クリープひずみであり, D_1 および r_1 は各条件の実験で得られた値を使用した. ただし, 3次クリープひずみが小さい領域ではバラツキが大きいため, 0.001 (0.1%) 以下のデータは評価対象に含めないこととした. 例として, BM A の 600°C における3次クリープひずみと時間の関係を Fig. 6 に示す. 同図に示すように, 3次クリープひずみは以下に示す指数関数で表現することとした.

$$\varepsilon_t = D_2 \{ \exp(r_2 t) - 1 \} \quad (6)$$

各々の試験ごとに最小二乗法により, 係数 D_2 と r_2 を求めた. Fig. 7 に係数 D_2 と破断時間の関係を, Fig. 8 に係数 r_2 と破断時間の関係を示す. 係数 D_2 と破断時間の関係では非常にバラツキが大きい結果となった. 一方, 係数 r_2 と破断時間の関係は両対数グラフ上において負の傾きを持った線形的な関係になり, 係数 r_2 は以下に示す破断時間のべき乗で良好に近似することができた.

$$r_2 = 7.97042 t_R^{-1.04797} \quad (7)$$

次に係数 D_2 に関しては, 式(7)から計算される r_2 を使用し, 条件ごとに以下の式で計算される値の平均値を求めた.

$$D_2 = \frac{\varepsilon_t}{\exp(r_2 t)} \quad (8)$$

このようにして求めた係数 D_2 と破断時間の関係を Fig. 9 に示す. 両者の関係のバラツキは Fig. 7 と比較して小さくなり, 両対数グラフ上において正の傾きを持った線形的な関係になることから, 係数 D_2 も他の係数と同様に破断時間のべき乗で近似し, 以下の式を得た.

$$D_2 = 8.52824 \times 10^{-5} t_R^{1.14326 \times 10^{-1}} \quad (9)$$

3.4 Grade 92鋼のクリープひずみ式のまとめ

以上で得られた1次クリープひずみ式と3次クリープひずみ式を足し合わせることで, Grade 92 鋼のクリープひずみ式は以下のように表される.

$$\varepsilon_c = D_1 t^{r_1} + D_2 \{ \exp(r_2 t) - 1 \} \quad (10)$$

以上によって得られたクリープひずみ式を Table 4 にまとめた. 開発した式により, クリープひずみは以下の3つのステップで容易に求めることができる.

Fig. 6 Fitting of tertiary creep behavior by equation (6) for BM A at 600°C.

Fig. 7 Relationship between parameter D_2 and rupture time.

Fig. 8 Relationship between parameter r_2 and rupture time.

Fig. 9 Relationship between parameter D_2 obtained by calculated value of r_2 and rupture time.

- (i) 応力と温度から式(1)およびTable 2の定数を用いて破断時間を求める。ただし、実機適用の際に評価対象プラントで使用されている材料のクリープ破断特性は得られていないことが一般的であるため、その場合は、Grade 92 鋼の平均的なクリープ破断特性¹²⁾を使用することが想定される。このため、Table 4にはパイプ材および鍛造材から得られているGrade 92 鋼の平均特性式も示している。
- (ii) (i)で求めた破断時間から式(3), (4), (7)および(9)を用いて各係数 D_1 , r_1 , D_2 , r_2 を計算する。
- (iii) 式(10)と(ii)で求めた各係数および時間から、クリープひずみを計算する。

本式の特徴は、すべての係数 D_1 , r_1 , D_2 , r_2 が破断時間のみの関数で表されていることである。破断時間が求まれば、温度によらずクリープ変形挙動が一意的に決定される。

なお、本クリープひずみ式を有限要素解析で使用する場合、クリープひずみ式をプログラム中に組み込む必要がある。その際、式(10)中の時間 t に実時間を使用すると、時間硬化則を仮定することになるが、応力変動がある場合ではひずみ硬化則の方が実際の変形挙動をより良い精度で表現できることが知られている。そこで、式(10)中の時間 t には、実時間の代わりに、その時点の応力とクリープひずみからNewton法などの数値解法を使用してクリープひずみ式を逆に解くことにより得られる等価時間を用いる。この等価時間を求めるプロセスを上述のステップ(ii)と(iii)の間に入れることで、ひずみ硬化則を仮定することができ、応力変動がある場合でも精度良く変形挙動を予測できると考えられる。

また、本クリープひずみ式は複雑な形を持つが、単純な初期ひずみ法を用いれば比較的容易に有限要素解析に適用できる。特に既存の有限要素解析ソフトで使用する場合は、ユーザーサブルーチン等の機能を使用すれば、比較的少ない労力で容易に組み込むことができる。

3.5 実験データとの比較

開発したクリープひずみ式から得られるクリープ変形曲線と実験データの比較をヒート、温度ごとにFigs. 10~16にそれぞれ示す。開発したクリープひずみ式から計算されるクリープ変形挙動は全般的に実験データと良く一致している。特に、10000時間を超えるような長時間データにおいても十分な精度でクリープ変形挙動を予測することが確認できる。

Fig. 17にクリープひずみ式から計算される最小クリープひずみ速度と実験で得られた最小クリープひずみ速度の比較を示す。ほとんどのデータがファクターオブ2の範囲内に整理されていることがわかる。また、破断時間と最小クリープひずみ速度の関係をFig. 18に示す。この図では、実験データをプロットで、開発したクリープひずみ式から得られる関係を線で示している。クリープ

Table 4 Summary of creep strain equations for Grade 92 steels.

$\varepsilon_c = D_1 t^{r_1} + D_2 \{\exp(r_2 t) - 1.0\}$	
$D_1 = 1.89507 \times 10^{-2} t_R^{-3.48768 \times 10^{-1}}$	
$r_1 = 7.76630 \times 10^{-1} t_R^{-9.15983 \times 10^{-2}}$	
$D_2 = 8.52824 \times 10^{-5} t_R^{1.14326 \times 10^{-1}}$	
$r_2 = 7.97042 t_R^{-1.04797}$	
$t_R = \min(t_{R1}, t_{R2})$	
BM A	$t_{R1} = 10^{(72371.9 - 14127.3 \log \sigma) / T_{abs} - 44.170}$
	$t_{R2} = 10^{(28473.7 + 3409.2 \log \sigma - 2191.8 (\log \sigma)^2) / T_{abs} - 25.453}$
BM B	$t_{R1} = 10^{(61374.1 - 11517.8 \log \sigma) / T_{abs} - 37.900}$
	$t_{R2} = 10^{(28473.7 + 3409.2 \log \sigma - 2191.8 (\log \sigma)^2) / T_{abs} - 25.071}$
BM C	$t_{R1} = 10^{(57199.8 - 10329.5 \log \sigma) / T_{abs} - 35.662}$
	$t_{R2} = 10^{(28473.7 + 3409.2 \log \sigma - 2191.8 (\log \sigma)^2) / T_{abs} - 24.842}$
Average Grade 92 steel ¹²⁾	$t_{R1} = 10^{(19467.1 + 24911.1 \log \sigma - 8228.8 (\log \sigma)^2) / T_{abs} - 35.630}$
	$t_{R2} = 10^{(28473.7 + 3409.2 \log \sigma - 2191.8 (\log \sigma)^2) / T_{abs} - 24.956}$

ε_c : Creep strain (mm/mm)

t : Time from start of test (h)

t_R : Rupture time (h)

T_{abs} : Absolute temperature (K)

σ : Stress (MPa)

Fig.10 Comparison of creep curves for BM A at 600°C.

Fig.11 Comparison of creep curves for BM A at 625°C.

Fig.12 Comparison of creep curves for BM A at 650°C.

Fig.16 Comparison of creep curves for BM C at 650°C.

Fig.13 Comparison of creep curves for BM B at 600°C.

Fig.14 Comparison of creep curves for BM B at 650°C.

Fig.15 Comparison of creep curves for BM C at 600°C.

Fig.17 Comparison of predicted and experimental minimum creep strain rate.

Fig.18 Relationship between rupture time and minimum creep strain rate.

ひずみ式から得られた上記の関係は、実験結果を良好な精度で表現できている。以上の結果から、開発したクリープひずみ式は様々な温度、応力条件に適用でき、また、解析対象とするヒートにおけるクリープ破断特性を使用することで、ヒート間差も含めて、本鋼のクリープ変形挙動を十分な精度で予測できることが確認できる。

3・6 NIMSクリープデータでの適用性確認

Grade 92鋼に関しては、(独)物質・材料研究機構(NIMS)がパイプ材(MJP)とチューブ材(MJT)における幅広い温度(550~750℃)でのクリープ試験を実施しており、中には10万時間近いクリープ破断データも得られている¹³⁾。ここでは、実験で得られたクリープ破断時間を用いてクリープひずみ式から計算される最小クリープひずみ速度と実験値との比較を行った。Fig. 19にその結果を示す。最小クリープひずみ速度が大きい比較的短時間のデータでは、ほとんどのデータがファクターオブ2の範囲内に整理されているが、最小クリープひずみ速度の小さい比較的長時間のデータでは、開発したひずみ式は最小クリープひずみ速度を過小評価する傾向が認められる。本研究でひずみ式の開発に使用したクリープ破断データは、2・2節でも述べた通り最長でも3.5万時間程度であるが、この範囲でもNIMSデータに対しては全般的に最小クリープひずみ速度を過小に推定する傾向が現われており、この原因については今後検討を加える予定である。

4 結 言

本研究では、クリープ強度の大きく異なる3種類のGrade 92鋼に関して平滑丸棒試験片を用いたクリープ試験を実施し、得られたクリープ変形挙動を基に1次クリープ挙動から3次クリープ挙動までを表現可能なクリープひずみ式を開発した。本式では、時間の関数として1次クリープをべき乗則、3次クリープを指数関数で近似しており、2次クリープを表す項は θ 法や改良 θ 法と同様にひずみ式に入っていないことが特徴である。また、式中の係数はすべてクリープ破断時間のべき乗で表した。クリープ破断曲線に長時間側でのクリープ強度低下(腰折れ)を考慮した式を使用することで、短時間領域から長時間領域にかけて幅広い温度、応力でのクリープ変形挙動を良好な精度で表現することが可能となっている。また、ヒート間差に対してもそれぞれのヒートにおけるクリープ破断曲線を用いることで、クリープひずみ式自体は共通化できることが確認された。

Fig.19 Comparison of predicted and experimental minimum creep strain rate for NIMS creep data of Grade 92 steels.

参 考 文 献

- 1) R. W. Evans and B. Wilshire, "Creep of metals and alloys", pp. 203-243 (1985) The Institute of Metals.
- 2) K. Maruyama, C. Harada and H. Oikawa, "A strain-time equation applicable up to tertiary creep stage", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol. 34, No. 386, pp. 1289-1295 (1985).
- 3) Y. Takahashi, "Creep rupture behavior of modified 9Cr-1Mo steel under multiaxial stress and its modeling", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol. 58, No. 2, pp. 115-121 (2009).
- 4) Y. Takahashi, "Development of creep strain equations for Ka-SUS410J3 (grade 122)", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol. 63, No. 4, pp. 338-344 (2014).
- 5) Sultan Alsagabi, Triratna Shrestha and Indrajit Charit, "High temperature tensile deformation behavior of grade 92 steel", Journal of Nuclear Materials, Vol. 453, pp. 151-157 (2014).
- 6) T. Sakthivel, S. Panneer Selvi and K. Laha, "An assessment of creep deformation and rupture behavior of 9Cr-1.8W-0.5Mo-VNb (ASME grade 92) steel", Materials Science and Engineering A, Vol. 640, pp. 61-71 (2015).
- 7) P. Lombardi, L. Cipolla, P. Folgarait, N. Bonora and L. Esposito, "New time-independent formulation for creep damage in polycrystalline metals and its specialisation to high alloy steel for high-temperature applications", Materials Science and Engineering A, Vol. 510-511, pp. 214-218 (2009).
- 8) E. Cini, E. Desdoit, A. Villani and J. Besson, "Modeling creep behavior of boiler grade steels - application to grade 92 steel", Procedia Engineering, Vol. 55, pp. 735-741 (2013).
- 9) H. Shigeyama, Y. Takahashi and J. Parker, "Development of creep strain equations for grade 92 (Ka-STPA29) steels and application to circumferentially notched round bar tests", Proceedings of the 52nd Symposium on Strength of Materials at High Temperatures, pp. 55-59 (2014).
- 10) H. Shigeyama, Y. Takahashi and J. Parker, "Simulation of creep deformation and rupture of notched bar specimens of grade 92 steel", Proceedings of the ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2015-45252 (2015).
- 11) H. Shigeyama, Y. Takahashi and J. Parker, "Prediction of creep life on notched bar specimens of grade 92 steel", Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2016-63964 (2016).
- 12) K. Kimura and Y. Takahashi, "Evaluation of long-term creep strength of ASME grades 91, 92 and 122 type steels," Proceedings of the ASME 2012 Pressure Vessels & Piping Conference, PVP2012-78323 (2012).
- 13) NIMS Creep Data Sheet, No. 48A, (2012).