

東大(院)	○村上 隆司	東大(工)	酒井 信介
東大(工)	泉 聡志	電中研	新田 明人
電中研	楠元 淳一	電中研	緒方 隆志

1 緒言

わが国において火力発電プラントは頻繁な起動、停止や負荷変動といった過酷な条件下で運用されている。これら火力発電設備には、当初見込まれた設計耐用寿命を越えた、いわゆる経年火力プラントと呼ばれるユニットが年々増加する傾向にある。このような状況において、経年火力発電設備の寿命延伸を図り、安定な電力供給源として利用するには、ボイラ、タービン等の高温機器の劣化損傷状態の的確な余寿命評価法の確立が必要となってきた¹⁾²⁾。

様々な余寿命評価法のうち、硬さは、測定の簡便さから最も良く用いられる非破壊評価法の1つである。従来の硬さは常温硬さを用いて行われている。本論文では、高温にて生じる損傷を同一の温度条件下で評価する方法について検討する。そこで、高温硬さに注目し、1Cr-1Mo-V 鍛鋼の廃却タービンロータ材に対し高温硬さ試験を実施し、より高精度かつ非破壊的にクリープ構成式の予測を行う手法の検討を行う。

2 高温硬さ試験を用いたクリープ構成式推定手順

硬さには温度依存性のほかに時間依存性があることが知られており、Sargent と Ashby らの研究³⁾により、Norton 型のクリープ構成式から以下のような関係があることが理論的、実験的に確認されている⁴⁾。

$$-n \ln H = \ln B - \frac{Q}{RT} + \ln t \quad (1)$$

ここで、 n 、 H 、 B 、 Q 、 R 、 T 、 t はそれぞれ応力指数、硬さ、定数、活性化エネルギー、気体定数、絶対温度、荷重保持時間である。この式から求められる n や Q の値は引張りクリープ試験結果と良く一致することが知られており、非常に簡便な押し込み試験から材料のクリープ特性を評価することを目的とする研究が多くなされている³⁾⁴⁾。しかし、損傷によるクリープ特性の変化を押し込み試験から評価する試みはこれまで行われていない。本研究では、高温における長時間使用による経年損傷が材料のクリープ特性に与える影響を、押し込み試験から評価することを試みる。

押し込みクリープ式 (1) を用いて、一般的な引張りクリープ特性を表す Norton 型のクリープ構成式

$$\dot{\epsilon} = C \sigma^n \quad (2)$$

を算出する手法の定式化を行う。

まず、式 (1) を取り扱いが容易になるよう、定数項をまとめて以下のように書き直す。

$$-n \ln H = \ln \tilde{B} + \ln t \quad (3)$$

ただし、

$$\tilde{B} = B \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (4)$$

である。ここで、押し込み試験では圧子直下の塑性域が自己相似的に発達すると近似すると、塑性域の流動応力 σ と硬さ H には比例関係があることが報告されている⁵⁾ ことから、 $H = \alpha \sigma$ (α は定数) が成立するものと仮定し、さらに硬さ試験の幾何学的関係を考慮することにより、式 (3) は

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{2n} \tilde{B} \alpha^n \sigma^n \quad (5)$$

と変形される。

まず実験結果を式 (1) にあてはめることにより、 n 、 $\tilde{B}$ の値を決定する。次に、別途行った引張りクリープ試験結果から得られた σ と $\dot{\epsilon}$ の関係と n 、 $\tilde{B}$ の値を用いることにより式 (5) の α を決定する。

3 実験手法

3.1 供試材及び試験片 供試材には 1Cr-1Mo-0.25V 鍛鋼高中圧タービンロータの廃却材を用いた。実機使用時に低温であったカップリング部 (CP 部) を非損傷部、実機使用時に約 538 °C の高温であった部位の中心孔部を損傷部として、損傷による影響を調べた。試験片は 5×5×10mm に切り出し、5×10mm の面の 1 つに対し電解研磨を行い試験面とした。

3.2 押し込みクリープ試験手順 押し込みクリープ試験はニコン社製 QM を用いて行なった。圧子にはダイヤモンド製のビッカース圧子を採用した。CP 部、中心孔部の各部位について、荷重保持時間を変化させて硬さの時間的変化を測定した。測定は 500、600、700 °C の各温度で行った。押し込み荷重は 50gf とし、荷重保持時間は 5、10、15、30、100、300、1800、3600s とした。圧子の押し込み速度は 0.7μm/s とした。各条件で少なくとも 5 回の測定を行い平均をとった。ただし、荷重保持時間 1800 及び 3600s の条件については 2 回の測定の平均をとった。

4 結果

4.1 押し込みクリープ試験結果 押し込みクリープ試験結果から、CP 及び中心孔部ともに各温度で時間とともに硬さの低下が見られた。室温では荷重保持時間の影響による硬さの低下は見られなかったことから、高温で時間とともに硬さが低下するのはクリープ変形によると考えられる。CP 部の荷重保持時間-硬さ曲線を図 1 に、600 °C における CP 部と中心孔部のグラフを図 2 に示す。これらの図上で、各温度でのデータ点が直線に乗ることから式 (1) のあてはめが可能であることが確認できる。これらの図の傾きから算出した応力指数の値を表 1 に示す。表より、応力指数の値は、各部位で温度が高くなると小さくなっている。また、部位間の比較では中心孔部のほうが大きくなっている。

4.2 クリープ構成式推定結果 図 3 には CP 部 600 °C における引張り試験の結果を示す。押し込み試験時の圧子直下の応力は高応力であると考えられる。一方、図 3 に点で示した引

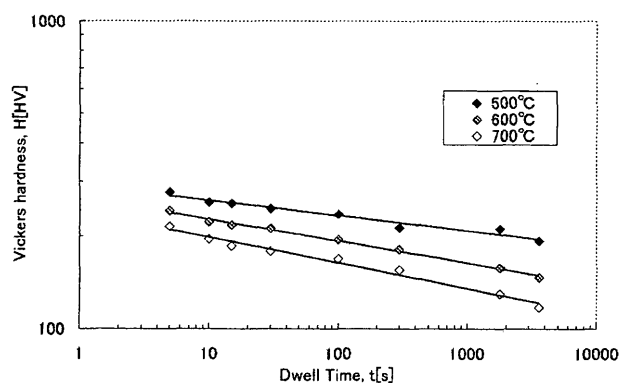


Fig.1 time-hardness plot of CP

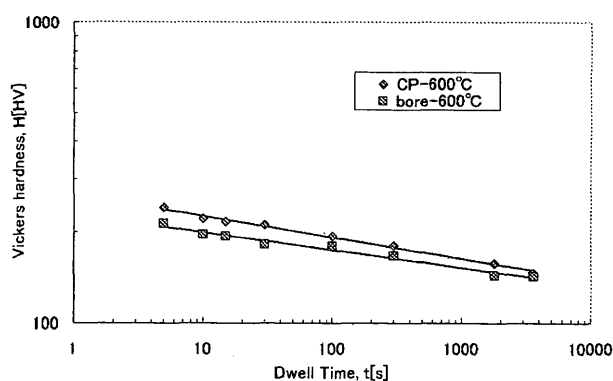


Fig.2 time-hardness plot of CP and bore at 600 °C

張クリープ試験結果は、ある応力を境に勾配が変化しており、このデータの高応力側と押込みクリープが対応していると考えられる。よって、高応力での引張試験データ 2 点のうち a 点を用いてクリープ構成式の推定を行った。n は図 1 の 600 °C の近似直線の勾配から、また $\dot{\epsilon}$ は切片から算出した。n および、 $\dot{\epsilon}$ と引張データ ($\sigma, \dot{\epsilon}$) = (215.6、 2.425×10^{-3}) から α を求めると、 $\alpha = 0.568$ となった。式 (5) に代入して、600 °C における CP 部の推定構成式は

$$\dot{\epsilon} = 1.85 \times 10^{-39} \sigma^{14.0} \quad (6)$$

となった。また、得られた α を用いて、600 °C における中心孔部のクリープ構成式を推定すると、

$$\dot{\epsilon} = 4.85 \times 10^{-46} \sigma^{16.8} \quad (7)$$

となった。

5 考察

5.1 押込みクリープ試験による材料のクリープ特性の評価
押込みクリープ試験から得られる n の値が CP 部と中心孔部で異なったことより、損傷によって材料のクリープ特性が

Table.1 stress exponent of CP and bore at 500, 600 and 700 °C

	500 °C	600 °C	700 °C
CP	20.0	14.0	12.0
bore	31.1	16.7	12.7

変化したと考えられる。式 (6) の結果を図 3 中の実線で示す。算出に用いた α テン以外に b 点も線上に乗っていることから、本研究で得られた n 値は高応力での引張クリープ試験から得られる n 値とほぼ等しいことが確認できる。角屋⁶⁾は、1Cr-1Mo-0.25V 鍛鋼の引張り試験では 200~300[MPa]に遷移応力が存在し、その前後で n 値が変化することを報告している。押込み試験は圧子直下の塑性域における流動応力は非常に大きくなることが知られているため、押込みによるクリープ変形は遷移応力以上の引張りクリープ試験の場合と同様の変形機構によるクリープが生じていると考えられる。

5.2 推定構成式の精度の検証 図 3 において式 (6) の直線により b 点を高い精度で推定できていることがわかる。これより、押込みクリープ試験を利用することで引張クリープ試験データが 1 点あれば構成式を推定できることになる。ただし、精度の検証のためには、データ点数を増やすことと、中心孔部については、高応力における引張りクリープ試験結果のデータによる検証が必要である。

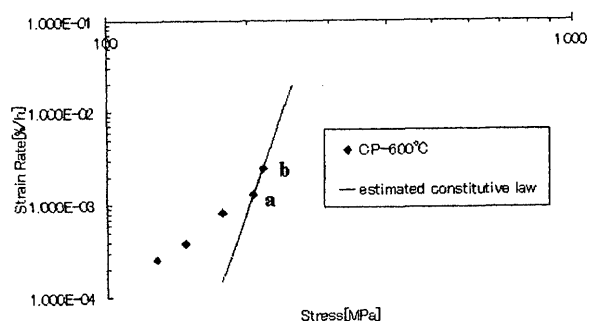


Fig.3 constitutive law of CP

6 結論

- (1) Cr-Mo-V 鍛鋼について押込みクリープ試験を行い、損傷材のクリープ特性を調査し、非破壊的手法で Norton 型構成式の評価が可能であることを確認した。
- (2) 押込みクリープ試験と、引張クリープ試験のデータ点 1 つからクリープ構成式を推定する手法を提案し、Cr-Mo-V 鍛鋼の CP 部、中心孔部について 600 °C におけるクリープ構成式を算出した。算出した構成式はクリープ特性を精度良く評価できることが確認できた。この結果、高温硬さからクリープ損傷材の高応力下のクリープ構成式が推定できることを示した。

参考文献

- 1) 経年火力蒸気タービンロータの余寿命評価, 新田明人他, 火力原子力発電, vol.37, No.9, 917-930, 1986
- 2) 設備診断技術実証試験報告書, 財団法人 発電設備技術検査協会, 1991
- 3) P.M. Sargent and M.F. Ashby, *Materials Science and Technology* 8, pp.594-601, 1992
- 4) B.L. Shen, T. Itoi, T. Yamasaki and Y. Ogino, *Scripta mater.* 42, pp.893-898, 2000
- 5) 藤原雅美, 軽金属 52(6), pp.282-290, 2002
- 6) 角屋好邦, 後藤徹, 鉄と鋼 76(7), pp.1171-1178, 1990