高経年火力ボイラー蒸発管の SP クリープ特性と単軸クリープ試験との関係*

小林 謙一^{*1}, 永峰 陽介^{*2}, 藤岡 照高^{*3}, 駒崎 慎一^{*4}

Small Punch Creep Properties of Aged Boiler Tube Used in Thermal Power Stations, and Relationship between Those and Uniaxial Creep Test Results

Ken-ichi KOBAYASHI^{*1}, Yosuke NAGAMINE, Terutaka FUJIOKA
and Shin-ichi KOMAZAKI^{*1} Mechanical Engineering Course, Graduate School of Engineering, Chiba University
Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan

Small Punch (SP) Creep test is a new semi destructive testing methodology where a very small specimen is required to examine creep properties. The size and the volume of SP creep specimens are much smaller than those of conventional uniaxial creep specimens. This testing methodology has been recognized as a practical procedure to know residual creep lives of high temperature components. Employing a part of aged boiler tubes made of STBA24 used for about 140,000 hours below 500°C, the SP and the uniaxial creep tests were conducted at 650°C in air and Argon gas to study the relationship between the SP and the uniaxial creep tests, and to investigate the influence of testing atmosphere on test results. SP creep rupture lives were nearly the same regardless of both sampling area and the testing atmosphere. Ratio of an applied load in the SP creep test to an initial stress in the uniaxial one was about 2.1mm², and a little increased with the rupture life.

Key Words : Creep Test, Small Punch, Testing Atmosphere, Rupture Life, Aged Boiler Tube, STBA24

1. 緒 言

現在稼働している高温発電プラントシステムの構造健全性を保ちつつ、運転寿命の延伸を簡便に評価できる半破壊的高温強度試験法が求められている。近年、微小体積でも一定のクリープ特性の評価が可能なスモール・パンチ (Small Punch: 以下 SP) クリープ試験が注目されている^{(1),(2)}。SP クリープ試験片は従来の単軸クリープ試験片と比較すると、体積比で約 1/300 と小さく、局所部位の評価が可能である。サンプリング後の補修も容易であるため、実機経年劣化部材のクリープ余寿命推定に活用が期待されている^{(3),(4)}。しかしながら SP クリープ試験結果に影響する因子が多数あり、その標準的試験法⁽⁵⁾は国内外ともに未確立である。

本研究では国内火力発電プラントで約 14 万時間以上使用された厚肉蒸発管のクリープ寿命評価を行うため、同蒸気管から単軸クリープ試験片と SP クリープ試験片を採取し、各クリープ試験を実施してその結果を比較検討した。ここでは特に SP クリープ試験片採取位置や、試験雰囲気試験結果に及ぼす影響について検討した。

2. 単軸クリープ試験および SP クリープ試験

2・1 供試材料

供試材料には、火力発電用ボイラー蒸発管としてメタル温度が 500°C に達しない状態で約 14 万時間以上使用された低合金鋼 (STBA24) を用いた。その化学成分と機械的特性 (室温) をそれぞれ表 1、表 2 に示す。

* 原稿受付 2013 年 8 月 29 日

^{*1} 正員, 千葉大学大学院 工学研究科 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33)^{*2} 学生員, 千葉大学大学院 工学研究科^{*3} 正員, (一財)電力中央研究所 エネルギー技術研究所 (〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂 2-6-1)^{*4} 正員, 鹿児島大学大学院 理工学研究科 (〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-40)

E-mail: k-cobayashi@faculty.chiba-u.jp

Table 1 Nominal chemical composition of test material (STBA24, wt %).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
~0.15	~0.5	0.3~0.6	0.03	0.03	1.9~2.6	0.87~1.13	-

Table 2 Mechanical properties of the test material (STBA24).

Temperature (°C)	Proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile strength σ_B (MPa)	Elongation δ (%)
20	205	410	30

(a) Sectioning the test boiler tube, and naming the test pieces.

(b) Cutting the aged boiler tube for uniaxial and SP creep specimens.

Fig.1 Aged boiler tube for uniaxial and SP creep tests, and sectioning and naming specimens.

(a) Top view (#B).

(b) Allay of thin plates from inside to outside (#B).

Fig.2 Sliced plates for SP creep specimens.

抜管された素材は外径 51.2mm, 内径 34.0mm, 肉厚 8.6mm, 長さ 118mm の経年劣化蒸発管である (図 1). これを精密切断機で長手方向に単軸クリープ試験片用 (図 1(a), #A, #C, #E, #F) と SP クリープ試験片用 (図 1, #B) に切り出した. その後, 単軸クリープ試験片 (ゲージ部直径 5mm, 平行部長さ 25mm) は旋盤で製作した. また SP クリープ試験片は層状に切り出した後, ワイヤ放電加工機と精密研磨で所定の寸法 (直径 10mm, 板厚 $0.500\text{mm} \pm 0.002\text{mm}$) に仕上げた.

図 2(a), (b) は SP クリープ試験片用に #B 材を板厚方向に層状にスライスした後の写真である. 各板材は SP クリープ試験片の最終板厚 (0.500mm) よりやや厚い約 $0.6\sim 0.7\text{mm}$ とし, 1 枚の層状板材から 8 枚前後を採取した. 本研究ではこれを #B1, #B2, ..., #B8 とし, 以後 SP クリープ試験片は #B3-1 のように試験片番号を付けた. これは, B 材の内側から 3 層目の板材内で, 1 番目に採取した試験片を意味する.

単軸および SP クリープ試験を行う前に蒸発管板厚内の硬さをマイクロビッカース硬さ試験機で計測した. ここでは内側 (#B1), 中央部 (#B3), 外側 (#B6) の周方向切断面 (図 2(a)) を各 20 箇所ずつ計測した. その結果, 蒸発管内側 (#B1) では平均 153HV, 中央部 (#B3) では同 144HV, 外側 (#B6) では同 138HV となり, 蒸発管外側ほど, 硬さ値は小さくなった. 図 3 はその硬さ分布であり, 図中のエラーバーは最大値と最小値間を表す.

図 4 は SP クリープ試験に用いた板材・断面内の金属組織写真例 (#B1) である. この写真をもとに, 蒸発管

Fig.3 Vickers hardness in a cross section of the aged Boiler tube.

Fig.4 Metallurgical structures of the aged boiler tube (#B1).

Fig.5 Schematic illustration of main part of the SP creep test.

Fig.6 SP creep testing machine.

の板厚方向 (TD) と長手方向 (LD) の結晶粒度番号 N を求めたが、採取の位置 (#B1, #B3, #B6) や方向 (半径方向, 長手方向) に拘わらず粒度番号は 7~8 となり、大きな差異は見られなかった。

2・2 SP クリープ試験法

SP クリープ試験片は、#500~#1500 までのエメリー紙とアルミナ粒子で研磨し、最終的に所定寸法となった試験片のみを実験に供した。SP クリープ試験機・主要部の模式図を図 5 に示す。SP クリープ試験では試験片 (図 5) の中心部に一定の試験荷重 P を与えて、クリープ温度下での変位量と破断時間を求めた。試験荷重 P を負荷すると、試験片中心部のみが負荷ボール (Si_3N_4) とともに $\phi 4\text{mm}$ の下部ダイ内に張り出す。本研究ではこの張り出し量 δ を SP クリープ変位量とし、これを電気炉外のリニアゲージで連続的に測定した。なお、破断寿命に影響する下部ダイの肩部半径 r は 0.6mm であった。

本研究で使用した SP クリープ試験機の外観とその概略図を図 6 に示す⁽⁶⁾。SP クリープ試験は試験雰囲気の影響を検討するため大気中および Ar ガス中 (純度 99.9%, 流量 100mL/min) で、単軸クリープ試験は大気中でのみ行った。なお、すべての試験温度は $T=650^\circ\text{C}$ 一定とした。

3. 実験結果および考察

3・1 単軸クリープ試験結果

クリープ構成式の作成や SP クリープ試験結果との対比のため、テコ比 10:1 の定荷重クリープ試験機を用いて、単軸クリープ試験を行った。初期応力 σ は、 $40\text{MPa} \sim 80\text{MPa}$ 内の 4 応力レベルとした。図 7 は得られた (a) クリープ曲線と (b) 初期応力 σ ~ 最小クリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{\min}$ 線図である。実験範囲内でクリープ破断延性は十分大きいものの、長寿命側でやや低下した。図 7(b) から導出した Noton 則は式 (1) となった。

Fig.7 Uniaxial creep test results.

Fig.8 Photo of uniaxial creep specimen, #A, ruptured at the stress of 50MPa, and $t_r=425.6h$.

(a) In air, (#B6-1) $P=180N$, $t_r=40.4h$
 (b) In Argon, (#B3-5) $P=100N$, $t_r=475h$

Fig.9 Appearance of SP creep specimens after rupture.

$$\dot{\epsilon}_{\min} = 3.14 \times 10^{-15} \sigma^{6.20} \quad (1)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}_{\min}$:1/h, σ :MPa, 図 7(b) 中の直線はこれを表す。図 8 は初期応力 $\sigma=50\text{MPa}$ で破断した試験片外観写真である ($t_r=425.6h$)。試験片表面は激しく酸化し、破断時の酸化被膜はリング形状を呈した。その他の初期応力でも破断後の試験片表面性状は同様であった。

3・2 SP クリープ試験結果および考察

図 9 は SP クリープ試験後の各試験片の外観写真の一例である。大気中での試験片 (図 9 (a)) は短時間の試験でもかなり酸化していたが、Ar ガス中での試験片 (図 9(b)) に顕著な酸化膜は付かなかった。図中の変色部分は、治具から取り外した時に付いた剥離物である。なお、変形量が大きかったため、図 9(b) の写真中央部には負荷ボールが貫通せずに残った。

試験雰囲気の影響を調べるため、大気中と Ar ガス中での試験を比較した (図 10)。本試験条件 ($P=150N$) では、試験雰囲気による破断時間への影響は少なかった。また試験片の採取位置 (硬さの大小) による破断寿命やクリープ変形特性を調べるため、蒸発管内側 (#B1-2) と蒸発管外側 (#B6-2) での実験結果を比較したが、両者にほとんど差異はなかった。

SP クリープ試験と単軸クリープ試験を破断寿命で比較したものが図 11 である。図中の直線は各試験ごとの最小二乗近似線である。SP クリープ試験結果を実機で活用するためには、単軸クリープ試験の初期応力 σ と SP クリープ試験の試験荷重 P の比 (P/σ 値) が破断時間でどう変化するかを求める必要がある。SP クリープ試験の試験雰囲気による差がないものとした近似直線 (緑色実線) と単軸クリープ試験の近似直線 (赤色実線) から、同一破断時間での P/σ 値を算出したものが図 12 である。これより、 P/σ 値はこれまでの報告事例⁽⁵⁾に近い値 (2.1mm² 前後) となったが、10³h 以上の実験範囲外でやや破断時間に依存する傾向があり、今後試験データを積み重ねてこれを検証する必要がある。

Fig.10 SP creep test results at $P=150\text{N}$ to examine the influence of testing atmosphere.

Fig.11 Applied stress vs time to rupture in uniaxial creep tests, and applied load vs time to rupture in SP ones.

Fig.12 Dependency of ratio of load in the SP creep test to stress in the uniaxial creep test on time to rupture.

4. 結 言

14 万時間を超える高経年火力ボイラー蒸発管 (STBA24) から単軸クリープ試験片および SP クリープ試験片を採取し、各々のクリープ試験結果をもとに P/σ 値を求めた。その結果、以下のことが明らかになった。

経年劣化蒸発管の板厚内ではビッカース硬さに多少の変化があったが、SP クリープ破断寿命に大きな差異はなかった。また SP クリープ試験の破断寿命は、試験雰囲気による影響は現れなかった。同一破断寿命に対する P/σ 値は従来の報告事例に近い値 (2.1mm^2 前後) となった。

文 献

- (1) 伊藤拓哉, 野中 勇, “スモールパンチ試験によるクリープ評価”, 日本材料学会 第 51 期学術講演会講演論文集, (2002), pp.159-160.
- (2) 駒崎慎一, “SP クリープ試験法を用いた余寿命診断技術の開発”, 材料, Vol.61, No.12 (2012), pp.980-986.
- (3) Tettamanti, S. and Crudeli, R., “Small Punch Creep Test : A promising methodology for high temperature plant components life evaluation”, *Baltica IV Plant Maintenance for Managing Life & Performance*, Vol.2 (1998), pp.501-509.
- (4) Dogan, B. and Hyde, T., “Industrial application of Small Punch Testing for in-service component condition assessment : An overview”, *Proceeding of the ASME 2012 Pressure Vessels & Piping Conference*, PVP2012-78691, (2012).
- (5) 野中 勇 編著, “- 高温機器余寿命評価のための- 微小サンプルクリープ試験標準法”, 日本材料学会 高温強度部門委員会 微小サンプルクリープ試験法ワーキンググループ成果報告書, ISBN978-4-901381-38-3, (2012), pp.95-97, pp.112-115.
- (6) 小林謙一, 金子将大, 小山秀夫, Gavin C. Stratford, 田淵正明, “スモールパンチクリープ試験における変形, 破壊とその影響因子”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.77, No.782 (2011), pp.1594-1602.