

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420007

研究課題名(和文) SPCおよびMC試験片による高温構造物の高効率寿命/余寿命診断システム

研究課題名(英文) High Efficient Diagnostic System for Evaluation of Residual Life of Elevated Temperature Components Employing SPC and MC Specimens

研究代表者

小林 謙一 (Kobayashi, Kenichi)

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50114278

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：低合金鋼および高経年実機ボイラ水冷管を供試材料として、異なる雰囲気ですモール・パンチ・クリープ試験(SPC)試験及びミニチュア・クリープ(MC)試験を実施し、各変形特性と破断寿命を求め、次の点を明らかにした。

1. 試験片標点部を電子ビーム(EB)溶接したMC試験片でのクリープ破断寿命は、通常試験片での結果と大きな差異は生じなかった。2. 長期間使用されたボイラ水冷管の残存寿命を、MC試験と2種類の時間-温度-パラメータ(TTP)法で推定した結果、各ボイラ水冷管は十分健全であることを示した。

研究成果の概要(英文)：Employing a low alloy steel and a highly-aged boiler tube, small punch creep (SPC) and miniature creep (MC) tests were performed in different atmospheres. Their valuable creep properties, e.g., deformation and rupture lives, were obtained, and then following results were revealed.

1. Miniature uniaxial plate specimen introducing an electric beam welding is developed. Their creep rupture lives were almost the same as those performed using conventional uniaxial creep specimens. 2. Employing two types of time-temperature-parameter methods and MC test results, residual lives of aged boiler tubes used for 60k and 230k hours were estimated, and it was verified that both of them had a good safety margin.

研究分野：材料力学

キーワード：クリープ ミニチュア試験片 スモール・パンチ試験片 余寿命診断

1. 研究開始当初の背景

人工構造物の損傷や破壊は、構造部材の微小領域を起点として発生するため、構造物の健全性評価には微小領域を対象とした破壊/非破壊試験が求められている。高温機械構造物ではクリープ損傷が主となるため、長期使用による劣化損傷量や最終寿命を高い精度で計測できる診断/評価法が必要となる。

近年、従来の試験片寸法の約 1/300 の体積で強度試験ができるスモール・パンチ・クリープ(SPC)試験や、試験部直径が 2mm 程度の丸棒または板厚 1mm 以下の引張試験片でクリープ強度や変形特性が得られるミニチュア・クリープ(MC)試験が注目されている。ただし両試験結果には試験機の構造やジグの形状、試験雰囲気など各種因子が影響するものの、その系統的な研究は十分なされていない。

2. 研究の目的

上記背景を鑑み、両試験法について実験、数値解析の両面から検討する。最終的には、これら微小試験片を用いて、高温強度経年部材を高精度に余寿命診断することを目指した。

- (1) 代表的な耐熱材料として使用実績の高い 2.25Cr-1Mo 鋼を用いて、試験雰囲気の影響について実験的に検討した。大気中での試験、酸化皮膜形成を抑えた真空中での試験、抗酸化性と簡易試験機構造の兼ね備えたアルゴンガス中で試験を実施し、様々な知見を得る。
- (2) 上記(1)で得た知見を元に、実機発電プラントで長期間(6万時間および23万時間)使用されたボイラ水冷管を試験材料として SPC 試験、MC 試験を行い、微小試験片による経年材料の余寿命診断への適用性や健全性評価法を検証する。

3. 研究の方法

- (1) 真空中での長時間 MC 試験を実施するため、新たな MC 試験機を設計、製作した。新試験機を設置後、その基本性能を確認して一連の MC 実験を行った。なお SPC 試験機は既に3台設置済みであり、それぞれ大気中、真空中、アルゴンガス中で実施できる。
- (2) 耐熱材料として広く使用されている 2.25Cr-1Mo 鋼を用いて、通常直径 8mm の単軸クリープ試験、直径 5mm の小型単軸クリープ試験片、直径 2mm の微小(ミニチュア)丸棒クリープ試験片、板厚 1mm の微小(ミニチュア)平板クリープ試験片(電子ビーム(EB)溶接した試験片を含む)を用いて、クリープ試験を 600 で系統的に実施し、実験結果を相互比較して、各試験片の有効性と限界を求めた。

- (3) 学外の研究機関から提供された、6万時間および23万時間使用ボイラ水冷管を試験材料として、供用温度より高い温度で加速した MC 試験を実施し、2種類の温度-時間-パラメータ(TTP)法を適用して、経年ボイラ水冷管の健全性を評価した。

4. 研究成果

- (1) 真空型ミニチュア・クリープ試験機の開発・製作

図1は本研究で独自に設計製作した真空型 MC 試験機である。ここでは真空度の適正保持、摺動部の摩擦係数低減を同時に解決するため、低いバネ係数のペローズを介して、試験荷重を負荷できる構造とした。本試験機を用いると、ミニチュアの丸棒(2mm)およびミニチュアの平板(板厚 1mm)試験片でも通常のクリープ試験とほぼ同じ破断寿命を得た。この際、試験片表面に明瞭な酸化皮膜は形成されなかった。

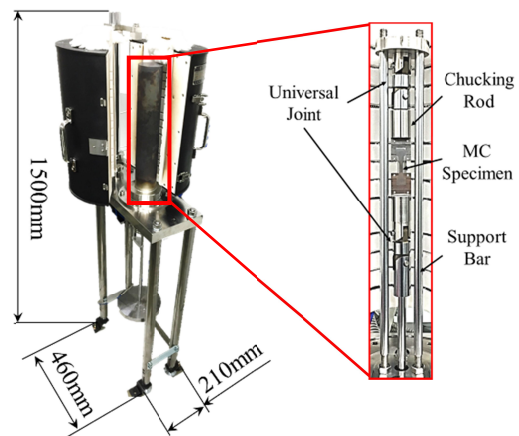


図1 試作した真空型ミニチュアクリープ(MC)試験機

- (2) 低合金鋼(2.25Cr-1Mo 鋼:SCMV4)での各種 MC クリープ試験

図2は、微小平板 MC 試験片によるアルゴンガス中(印)と真空中(印)での試験結果、EB 溶接 MC 試験片(印)での試験結果、および $\phi 2$ 微小丸棒 MC (印)と $\phi 5$ (印)、 $\phi 8$ (印)の単軸クリープ試験結果である。図中の各直線は試験結果に最小二乗近似を適用した結果である。クリープ破断時間のばらつきでは、EB 溶接 MC 試験片による試験結果(印)を除いて、 $\phi 5$ 単軸クリープ試験結果(印)の相関が最も高かった。印を基準にすると、最もばらつきが見られた $\phi 8$ 単軸クリープ試験結果(印)は長寿命側で 2.5 倍、短寿命側で 1/2.8 倍の範囲内に収まった。なお、120MPa でのアルゴンガス中での平板 MC 試験結果(

印)はφ5単軸クリープ試験結果(印)と比較すると大きく短寿命側に寄っているが、これは酸化減肉による影響と考えられる。

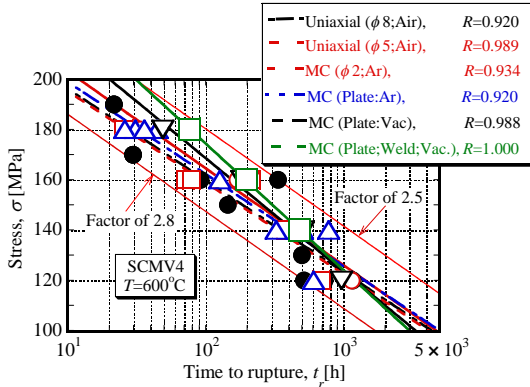


図2 各種試験片によるクリープ破断寿命

図3は、各種MC試験、およびφ5、φ8単軸クリープ試験で得られた最小クリープひずみ速度と破断寿命の関係(Monkman-Grantの関係)である。一部のEB溶接MC試験片以外、MC試験はφ5単軸クリープ試験とほとんど差が見られなかった。酸化の影響を受けた微小丸棒、平板MC試験片では単軸クリープ試験より短寿命側になる傾向が見られたが、Monkman-Grantの関係ではほぼ一直線上に整理できた。これより、本関係式を用いると、実機部材から採取した微小試験片で最小クリープひずみ速度が得られれば、クリープ余寿命は容易に推定できることが分かる。

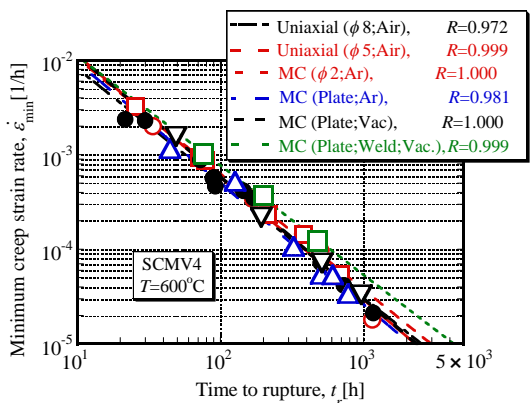


図3 各種試験片によるMonkman-Grantの関係

(3)高経年ボイラ水冷管の余寿命診断

6万時間および23万時間使用されたボイラ水冷管(STBA20; 0.5Cr-0.5Mo鋼)から試験部直径2mmのMC試験片を製作し、試験温度650にて一連のクリープ試験を実施した。そのク

ープ曲線を図4に示す。

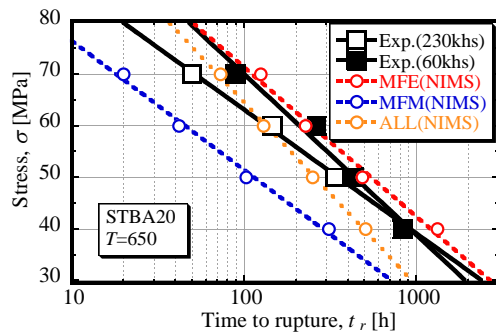


図4 ボイラ水冷管から採取したMC試験片によるクリープ曲線

クリープ破断寿命は、6万時間経年材(黒抜き印)より23万時間経年材(白抜き印)の方が短寿命となったものの、破断延性は6万時間経年材で低くなった。これは供用期間のみならず、使用温度が影響した結果と考えられる。

余寿命推定のため、一般的に経年材・処女材のクリープ破断寿命は別の方法で推定する必要がある。温度-時間-パラメータ(TTP)法はこれを推定する有用な方法である。本研究では Larson-Miller(LMP)法と Manson-Haferd(MHP)法を用いて、試験温度650での処女材のクリープ破断寿命を推定した。推定するための基礎データは物質・材料研究機構(NIMS)が有するクリープデータシート(CDS)を用いた。一例として、LMP法で推定した試験温度650でのクリープ破断寿命を図5に示す。

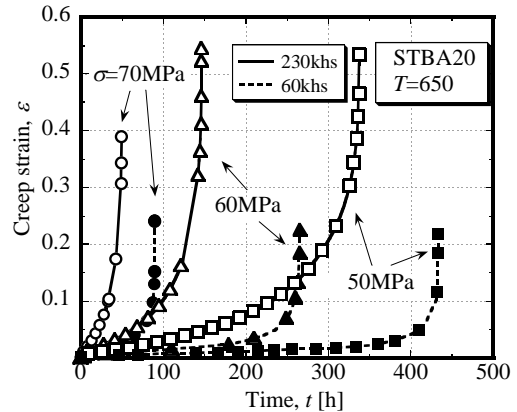


図5 LMP法で推定した処女材の寿命と経年ボイラ水冷管のクリープ破断寿命

NIMSのCDSには化学組成が若干異なる9ヒー

トのデータがあり、それぞれクリープ破断特性は異なっている。図5中、印と印は、経年ボイラ水冷管の実験結果である。また○印、○印、○印は、それぞれ全データ、最長寿命のヒートのみ、最短寿命となるNIMSヒートから推定したクリープ破断寿命である。これらを実験結果と比較すると、最長の破断寿命となる○印の一部データを除き、実験結果は処女材の推定破断寿命より長寿命となり、経年材が著しく劣化していないことが明らかになった。

<引用文献>

微小サンプルクリープ試験法標準、日本材料学会 編、2012、40-46

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

小林謙一、藤岡照高、微小領域からサンプリングした試料による高経年ボイラチューブの健全性評価とクリープ余寿命推定、ボイラ研究、査読有、第400号、2016、10-15

〔学会発表〕(計9件)

金子遼太、伊藤大介、小林謙一、小山秀夫、ミニチュアクリープ試験によるボイラ水冷管の健全性評価、日本機械学会・材料力学部門講演会(M&M2016)、同講演論文集 #OS-10-3 (全2ページ)、神戸市・神戸大学、2016.10.9

福田翔悟、小林謙一、予クリープ変形を受けたフェライト系ステンレス鋼のスマールパンチ・クリープ試験による累積クリープ損傷評価、日本機械学会・材料力学部門講演会(M&M2016)、同講演論文集 #OS-10-2 (全2ページ)、神戸市・神戸大学、2016.10.9

Ken-ichi Kobayashi and Tsuyoshi Kawashima, Creep Properties at Rupture by Using both Miniature Round Bar and Miniature Plate Specimens, 10th Asia-Pacific Conf. on Fracture and Strength (APCFS 2016), Toyama, Japan, 2016.9.21

川島 剛、青木秀肇、小林謙一、小山秀夫、JIS 規格外の微小板試験片によるクリープ破断特性、日本機械学会・関東支部第22期総会・講演会、同講演論文集 #GS0410 (全2ページ)、東京都・大田区、東京工業大学、2016.3.10

Ken-ichi Kobayashi, Sho Takei, and Shota

Ishikawa, Influences of Testing Atmosphere and Diameter of Loading Ball on Small Punch Creep Test, Abstract Book of Int'l Conf. on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2015, the 14th Asian Conf. on Experimental Mechanics, (ATEM14), Toyohashi, Japan, p.173 (OS10-9), 2015.10.6

Ken-ichi Kobayashi, Yosuke Nagamine, Terutaka Fujioka, and Shin-ichi Komazaki, Evaluation of Aged Boiler Tube by Small Punch Creep Test, Proc. of the 3rd Int'l Conf. on Small Sample Testing Techniques, pp.324-330, Leibnitz, Austria, 2014.9.24

石川翔大、小林謙一、小山秀夫、SPクリープ試験に及ぼす試験雰囲気と負荷ボール直径の影響、日本機械学会 M&M2014 材料力学カンファレンス、No.14-3 M&M2014 CD-ROM 論文集、GS-15 全3ページ、福島市・福島大学、2014.7.20

川島 剛、小林謙一、小山秀夫、微小サンプル試験におけるクリープ破断寿命への影響、日本機械学会 M&M2014 材料力学カンファレンス、No.14-3 M&M2014 CD-ROM 論文集、GS-14 全2ページ、福島市・福島大学、2014.7.20

小林謙一、永峰陽介、藤岡照高、高経年火力ボイラ蒸発管におけるSPクリープ試験と単軸クリープ試験の関係、日本材料学会第63期学術講演会、#107 (2ページ)、福岡市・福岡大学、2014.5.17

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 謙一 (KOBAYASHI, Kenichi)
千葉大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 50114278

(2) 連携研究者

田淵 正明 (TABUCHI, Masaaki)
(独法)物質・材料研究機構・グループリーダー
研究者番号: 60354239

(3) 研究協力者

藤岡 照高 (FUJIOKA, Terutaka)
野中 勇 (NONAKA, Isamu)
駒崎 慎一 (KOMAZAKI, Shinichi)
小山 秀夫 (KOYAMA, Hideo)

永峰 陽介 (NAGAMINE, Yosuke)
川島 剛 (KAWASHIMA, Takeshi)
武井 翔 (TAKEI, Sho)
石川 翔大 (ISHIKAWA, Shota)
青木 秀肇 (AOKI, Hidetoshi)
福田 翔悟 (FUKUDA, Shogo)
伊藤 大介 (ITOH, Daisuke)
金子 遼太 (KANEKO, Ryota)
Brian WILSHIRE
Gavin C. STRARFORD