

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360294

研究課題名(和文) 小型矩形SP試験片を用いた高Crフェライト系耐熱鋼溶接部の高精度余寿命評価

研究課題名(英文) Remaining-Life Prediction of High Cr Ferritic Steel Welded Joint by Rectangular-Type Small Punch Test Specimen

研究代表者

駒崎 慎一 (Komazaki, Shin-ichi)

鹿児島大学・理工学研究科・教授

研究者番号：70315646

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：データ数およびひずみ計測の精度が十分でなかったため、SPクリープ試験結果を単軸クリープ試験結果に変換するための有効な方法(換算式)を提案するには至らなかった。しかし、SPクリープ試験結果から余寿命を直接予測できる可能性があることを明らかにした。つまり、SPクリープ破断試験結果に基づき、線形損傷則(寿命比則)による余寿命評価を試みた結果、劣化模擬材の外表面からの距離が0.5mmおよび4mmにおける寿命消費率はそれぞれ99.99%と99.52%となり、この時点でほぼすべての寿命を消費しているという結果になった。これは、外表面近傍で微小き裂が発生していたという観察結果と整合していた。

研究成果の概要(英文)：The effective method (load-stress conversion equation) for converting the SP creep test results to the uniaxial creep ones could not be unfortunately proposed in this study, because of insufficient number of data and low accuracy of strain measurement. On the other hand, the present study has revealed the possibility that the remaining-life can be directly predicted by the SP creep test results. The creep life fractions at the distances of 0.5 mm and 4 mm from the outer surface were estimated to be 99.99% and 99.52%, respectively, based on the life fraction rule using the SP creep rupture data. These results indicated that almost all the lives had been already consumed at the subsurface of outer surface, and they were in qualitatively good agreement with the observation that some microcracks were initiated there.

研究分野：材料強度学

キーワード：スモールパンチ試験 クリープ 余寿命評価 溶接接手 高Crフェライト系耐熱鋼 デジタル画像関連
法 Type IV破壊 微小試験片

1. 研究開始当初の背景

近年、9-12%Cr フェライト系耐熱鋼において、Type IV 損傷と呼ばれる溶接継手部での不具合が世界的に大きな問題となっている。研究代表者らは、このメカニズム解明を目的として、TEM ディスク形状の極めて小さな試験片 ($\phi 3 \times 0.25t$ mm) を用い、HAZ 局所領域のクリープ特性を系統的に計測・評価してきた。その結果、HAZ の中でも細粒域におけるクリープ強度が最も低いことをはじめに実験的に明らかにし、さらには“定常平均相当応力”を用いた標準単軸クリープ破断データへの変換方法を世界に先駆け提案した。本試験法は局所領域のクリープ特性評価にはたいへん有効な方法であるが、溶接金属、HAZ および母材のすべてを含めた溶接継手全体の強度特性（メーカーやユーザーにとってはむしろこの特性の方が重要）を計測するには、上述したような試験片では小さすぎる。かといって、大型の標準試験片による評価は決して現実的ではなく、また超音波探傷法やレプリカ法などの非破壊検査による評価も精度、定量性という点で決して十分とはいえないのが現状である。

このような中、研究代表者らは、本研究課題の予備実験として、12%Cr フェライト系耐熱鋼溶接継手部より小さな矩形試験片 ($10 \times 6 \times 0.50$ mm) を採取し、長手方向の両端のみをクランプするという新しい試験方法について検討してきた。ここでは、3 種類の異なる試験片、すなわち幅 2mm 程度の HAZ を試験片中央に幅方向と並行に配置した「幅方向試験片」、HAZ を試験片中央に長手方向と並行に配置した「長手方向試験片」、母材のみの「母材試験片」を用いた。その結果、各試験片のクリープ変形・破壊挙動を従来試験片のものと比較し、以下の興味深い知見が得られた。

高荷重短時間試験の結果のみではあるが、幅方向試験片のクリープ破断強度がもっとも低くなる。

幅方向試験片に限っては、巨視的破壊が円周上に沿って生じるのではなく、試験片の幅方向つまり溶接線と平行に発生する。これは、Type IV 損傷の起点となる HAZ 細粒域においてキャビティや微小き裂の発生・成長が加速されるためである。

加えて、有限要素解析によって、最終的に破断する箇所の相当応力と最大主応力がクリープ試験中ほぼ一定になり、見かけ上定常状態が現れることが明らかとなった。これは、従来試験の結果と同じであり、以前は荷重 P の増加とともにこの一定の応力値 σ_s (定常平均相当応力) も大きくなり、両者の間に線形的な関係 $P = \alpha \sigma_s$ が成立した。また、試験片が $\phi 3 \times 0.25$ mm のとき α 値は 0.46 となり、 P の代わりに σ_s を使って SP クリープ破断試験データを整理すると、単軸クリープ試験のそれと完全に一致した。これは、 σ_s が単軸クリー

プ試験応力 σ と等価であり、この σ_s を力学パラメータとして用いることによって SP クリープ破断試験の結果を単軸クリープ試験のそれに変換できることを示唆していた。今回の予備実験で得られた結果は、本研究課題においても同じようなアプローチ (σ_s) が適用できることを示唆していた。

2. 研究の目的

本研究課題では、上述の予備実験結果に基づき、“小さな矩形試験片を用いた改良型 SP クリープ試験による溶接継手部の余寿命診断技術の開発”についてより詳細かつ系統的な検討を行う。

3. 研究の方法

(1) 試験形状および試験条件の最適化と改良試験機の製作：予備実験では $10 \times 6 \times 0.50$ mm の試験片を仮に用いたが、本研究課題では試験片および治具の形状と摩擦係数の影響を有限要素解析により調査し、溶接継手の強度特性をより適切に反映した SP 試験特性を得るための最適な試験条件を決定する。併せて、デジタル画像相関法によるその場変形解析が可能な SP クリープ試験装置を新たに設計・試作する。

(2) 12%Cr 鋼 (SUS410J3) 溶接継手の SP クリープ特性計測：経年劣化模擬材より採取した矩形試験片を用い、最適化した試験条件の下“SP クリープ試験データ”と“HAZ 局所領域におけるひずみ分布の経時変化データ”を蓄積する。併せて、ミニチュアクリープ試験を実施して、“単軸クリープ試験データ”も採取する。

(3) SP クリープ試験結果の単軸クリープ試験結果への変換と損傷メカニズムの解明：有限要素解析 and/or デジタル画像相関法の結果を用い、改良 SP クリープ試験にて得られた試験データを単軸クリープ試験データに変換するための方法を新たに提案する。加えて、Type IV 損傷のメカニズム解明に資するための詳細なミクロ組織調査を実施する。

4. 研究成果

(1) 試験形状および試験条件の最適化と改良試験機の製作：有限要素解析法を用い、高 Cr フェライト系耐熱鋼溶接継手全体のクリープ特性が適切に SP クリープ試験特性に反映されるような試験片形状について検討した。その結果、予備実験で用いた $10 \times 6 \times 0.5$ mm 形状の矩形試験片の中央に溶接熱影響部を長手方向と垂直に配置すると、組織弱化した熱影響部細粒域で相当応力がもっとも高くなり、試験片形状として最適であることがわかった。また、実際の試験においては、破壊は必ずこの溶接熱影響部細粒域で生じていた。

SP クリープ試験片表面のひずみをデジタル画像相関法によってその場計測できる SP クリープ試験装置を新たに開発するのに成

功した(図1).このような試験装置の開発は国内外を問わずこれまで例がなく、はじめてである.本試験装置を用いることによりクリープ中の熱影響部局所領域のひずみ分布が明らかとなり、得られる知見は溶接継手における余寿命診断手法の開発に大いに役立つものと期待される.



図1 新たに製作したSPクリープ試験装置

(2) 12%Cr 鋼 (SUS410J3) 溶接継手の SP クリープ特性計測: ボイラ用 12%Cr 鋼溶接継手より大型の角状の単軸クリープ試験片を採取し、種々の時間で試験を途中止めて様々な損傷度を有するクリープ中断材を作製した.このクリープ中断材を経年劣化模擬材とし、ここから $10 \times 6 \times 0.5\text{mm}$ 形状の矩形試験片を採取した. Type IV 損傷のメカニズム解明とその評価という観点から、クリープ変形・破壊特性の板厚方向依存性も併せて調査した.その結果、経年劣化模擬材の SP クリープ破断時間はいずれも新材に比べ短かった.また、新材では採取位置の影響はあまり認められず、破断時間は $30 \sim 40\text{h}$ 程度とほぼ一定であった.一方、経年劣化模擬材の破断時間は採取位置に依存し大きく異なった.表面より 34mm のところから採取した試験片の破断時間は 15h 程度と新材に比べその減少量はわずかであったが、外表面に近づくにつれて破断時間の減少は顕著になった.外表面からの距離が約 0.5mm と 4mm の試験片においては、破断時間はそれぞれわずか 13s と 11min であった(図2).

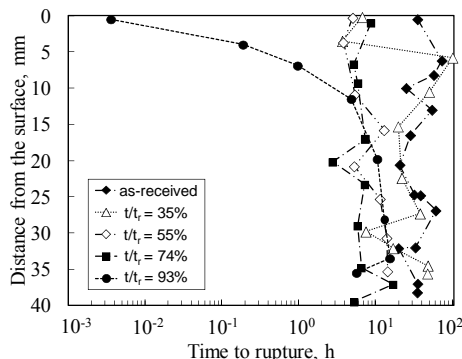


図2 経年劣化模擬材のSPクリープ破断時間を外表面からの距離で整理した結果

(3) SP クリープ試験結果の単軸クリープ試験結果への変換と損傷メカニズムの解明: データ数およびひずみ計測の精度が十分でなかったため、SP クリープ試験結果を単軸クリープ試験結果に変換するための有効な方法(換算式)を提案するには至らなかった.しかし、SP クリープ試験結果から余寿命を直接予測できる可能性があることを明らかにした.つまり、SP クリープ破断試験結果に基づき、線形損傷則(寿命比則)による余寿命評価を試みた結果、劣化模擬材の外表面からの距離が 0.5mm および 4mm における寿命消費率はそれぞれ 99.99% と 99.52% となり、この時点ではほぼすべての寿命を消費しているという結果になった.これは、外表面近傍で軟化が顕著に生じ、微小き裂も発生していたという観察結果と整合していた.

加えて、水素昇温脱離分析を用いて同溶接継手のクリープ損傷度を評価し、SP クリープ試験結果が妥当であることを確認した.そして、この改良 SP クリープ試験と水素昇温脱離分析法を組み合わせることによって、高精度な余寿命診断が行える可能性があることを明らかにした(図3).

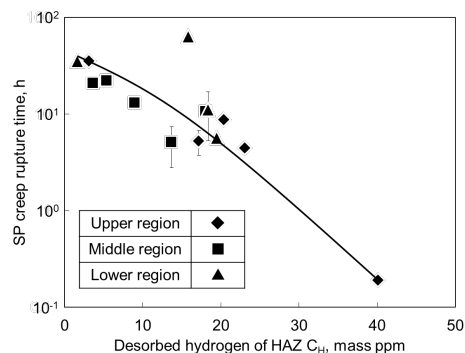


図3 経年劣化模擬材のSPクリープ破断時間と水素放出量の関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計6件)

山下勇人, 駒崎慎一, 大島将史, “Gr.122 鋼溶接継手部のクリープに伴う水素昇温脱離特性の変化”, 日本鉄鋼協会第169回春季講演大会, 2015年3月18~20日, 東京大学(駒場, 東京都)

山下勇人, 駒崎慎一, 大島将史, “水素昇温脱離分析による Gr.122 鋼溶接継手部のクリープ損傷評価”, 日本材料学会高温強度シンポジウム, 2014年12月4~5日, ロワジールホテル函館(函館市, 北海道)

内村 洋, 駒崎慎一, 山下勇人, 楠元淳一, “改良 SP クリープ試験法による Gr.122 鋼溶接継手部のクリープ損傷評価”, 日本材料学会高温強度シンポジウム, 2014年12月4~5日, ロワジールホテル函館(函館市, 北海道)

内村 洋，駒崎慎一，山下勇人，楠元淳一，“改良 SP クリープ試験法による 12%Cr 耐熱鋼溶接継手部のクリープ特性評価”，日本鉄鋼協会第 167 回春季講演大会，2014 年 3 月 21～23 日，東京工業大学（大岡山，東京都）

内村 洋，駒崎慎一，山下勇人，金谷章宏，楠元淳一，“改良 SP クリープ試験法による 12%Cr 耐熱鋼溶接継手部のクリープ特性評価”，日本機械学 M&M 材料力学カンファレンス，2013 年 10 月 11～14 日，岐阜大学（岐阜市，岐阜県）

内村 洋，駒崎慎一，山下勇人，金谷章宏，楠元淳一，“改良 SP クリープ試験法による 12%Cr 耐熱鋼溶接継手部のクリープ特性評価”，日本機械学会九州支部鹿児島講演会，2013 年 9 月 27～28 日，鹿児島大学（鹿児島市，鹿児島県）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

駒崎 慎一 (KOMAZAKI, Shin-ichi)
鹿児島大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：70315646

(2) 研究分担者

徳永 辰也 (TOKUNAGA, Tatsuya)
九州工業大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：40457453

郭 永明 (GUO, Yong-Ming)
鹿児島大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号：60262375