

物材機構 ○本郷宏通 田淵正明 渡部 隆
電中研 高橋由紀夫

Type-IV creep damage behavior in P122 steel weld

Hiromichi HONGO, Masaaki TABUCHI, Takashi WATANABE and Yukio TAKAHASHI

1 緒 言

高 Cr フェライト系耐熱鋼では、溶接施工時の熱履歴により、溶接熱影響部(HAZ)に細粒組織が形成される。高温で長時間使用される発電プラント等では、細粒 HAZ に発生する Type-IV 損傷による溶接部のクリープ強度の低下が問題となっている。しかし、損傷の発生・成長のメカニズムやプロセスについての詳細な調査はあまり行われていない。

本研究では、12Cr 系耐熱鋼(P122 鋼)の溶接継手について、材料試験、組織解析、損傷計測および FEM 解析を実施し、Type-IV 損傷の発生機構を調査した。

2 供試材および実験方法

供試材には、板厚 30mm の P122 鋼板(10.5Cr-1.8W-0.3Mo-0.98Cu-0.19V-0.05Nb) を用いた。供試材を母材として、ガスタングステンアーク溶接法で H 開先の多層盛溶接継手を作成した。溶接後熱処理 (PWHT) 条件は、750°C, 75min とした。作成した供試継手のマクロ組織を Fig. 1 に示す。約 2.5mm の幅の HAZ が観察された。

HAZ のクリープ特性を取得するために、溶接シミュレータ (Gleeble 試験機) を用いて、細粒 HAZ 組織を再現するための熱処理を行った。再現 HAZ 熱処理の最高加熱温度は 950°C とした。熱処理後に 750°C, 75min の PWHT を行った。再現 HAZ 材のクリープ試験片(Simulated HAZ) は、直径 4mm, 平行部 15mm の平滑丸棒試験片とした。

母材のクリープ試験片(Base metal)は、直径 6mm, 平行部 30mm の平滑丸棒試験片とし、供試継手の母材部から採取した。また、供試継手から溶接金属部が試験片平行部中央に位置するように、厚さ 17.5mm, 幅 5mm, 平行部 100mm の小型平板溶接継手試験片(Welded joint), および厚さ 24.5mm, 幅 24.5mm, 平行部 100mm の大型平板溶接継手試験片(L-welded joint)を採取した。

母材、小型平板溶接継手および再現 HAZ 材のクリープおよびクリープ破断試験は、550, 600 および 650°C で行った。また、損傷プロセスを調査するために、大型平板溶接継手試験片を用いたクリープ中断試験を、600°C, 100MPa の条件で行った。

クリープ損傷 (ポイド, き裂) の観察と測定は、走査型電子顕微鏡(SEM)を用い、クリープ中断材の板幅中心を溶接線と直交する方向に切断した断面について行った。1500 倍の SEM 画像を HAZ から連続的に取得し、縦 0.18mm, 横 2mm の領域の組み画像を作成した。この領

域におけるクリープ損傷を、画像解析ソフトウェアを使用して測定した。

また、母材および再現 HAZ 材の高温引張試験およびクリープ試験から得られた材料定数を用いて FEM 解析を行った。

3 結果および考察

母材、溶接継手および再現 HAZ 材 (細粒 HAZ) の応力と破断時間の関係を Fig. 2 に示す。図中のプロットの添字は、溶接継手試験片の破断位置を示した。550°C では、溶接継手試験片はすべて母材部(BM)で破断し、母材、再現 HAZ および溶接継手はほぼ同じクリープ強度を示した。600°C および 650°C においては、溶接継手試験片は短時間側から HAZ で破断し(Type-IV 破壊)、低応力・長時間側では母材と溶接継手のクリープ強度の差が大きくなる傾向を示した。

著者らは P91 鋼溶接継手のクリープに伴うポイドの生成・成長過程を調べた結果、ポイドは破断寿命の 0.2 で

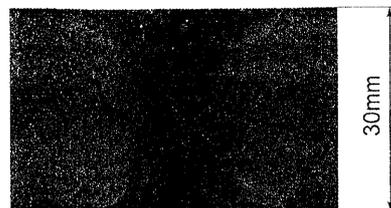


Fig. 1 Microstructure of welded joint.

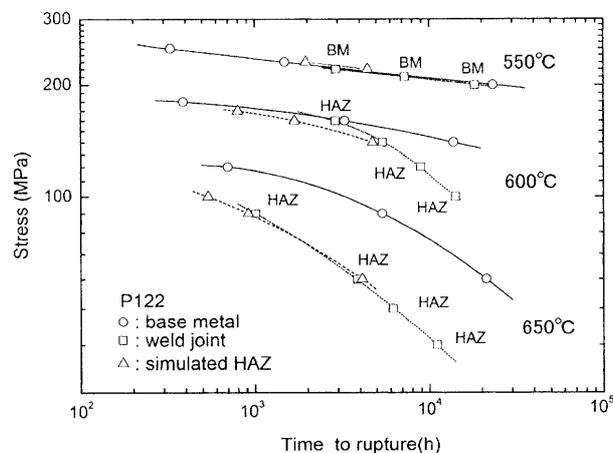


Fig. 2 Creep test results for the base metal, welded joint and simulated HAZ of the P122 steel.

すでに観察され、時間の経過とともに増加し、約 0.7 でクラックが観察されることを明らかにしている¹⁾。P122 鋼については、大型平板溶接継手試験片のクリープ試験を寿命の約 0.5 と 0.9 で中断し、クリープ損傷の計測を行った。P122 鋼の溶接継手では、破断寿命の約 0.5(7500h) で HAZ にボイドがわずかに観察された。約 0.9(13400h) では、0.5 中断材よりもボイドの量は増加したが、クラックは観察されなかった。P122 鋼の溶接継手では、ボイドおよびクラックの発生が P91 鋼の溶接継手よりも遅く、破断末期に急激に増加するものと推察される。観察されたボイドの一例を Fig. 3 に示す。クリープボイドの多くは、細粒 HAZ 組織の粒界に沿って周囲を取り囲むように発生していた。

Fig. 4 に破断寿命の約 0.9 でクリープ試験を中断した溶接継手試験片の HAZ における、ボイド数密度とボイド面積率の板厚方向の分布を示した。ボイド数密度、面積率ともに、表面から約 8mm で最も高かった。

大型溶接継手試験片について FEM 解析を行った。クリープ構成式は Norton 則とし、再現 HAZ 材および母材のクリープ試験から得られた定数 A 、指数 n を用いた。溶接金属のクリープデータは未取得のため、母材の材料定数で代用した。600°C、100MPa で 3次元解析を行い、

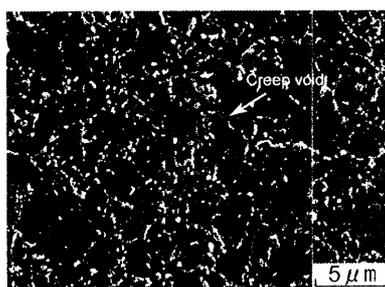


Fig. 3 Creep void in the fine-grained HAZ of welded joint crept for 13400h at 600°C and 100MPa.

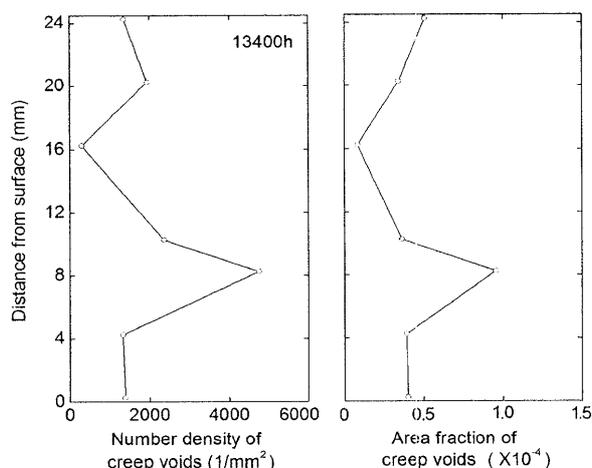


Fig. 4 Distribution of creep voids in HAZ of the welded joint crept interrupted for 13400h at 600°C and 100MPa.

実験と同様に板幅中心部の応力-ひずみ分布を調査した。応力多軸度および相当クリープひずみの分布を Fig. 5 に示した。応力多軸度は、ボイドが最も多く観察された位置（下表面から 8mm 付近）、および板厚中央の会合部で高い値を示した。相当クリープひずみは、板厚中央から約 1mm の開先角度の大きい部分で高い値を示した。従って、Type-IV 損傷の発生には、多軸応力の影響が大きいものと考えられた。

4 結 言

1. P122 鋼の溶接継手では、550°C では 20000h でも Type-IV 破壊が観察されなかった。600°C、650°C では、Type-IV 破壊によりクリープ強度が低下した。
2. ボイドは、細粒 HAZ の粒界に沿って周囲を取り囲むように発生した。
3. 溶接継手のクリープ中断試験では、ボイドは破断寿命の約 0.5 でわずかに観察され、約 0.9 においてもクラックは観察されなかった。
4. ボイドは板厚表面から約 8mm 付近で最も多く観察され、この位置では応力多軸度が高い値を示した。

謝辞 本研究は、電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの委託事業として、(財)電力中央研究所が実施した「次世代高温原子力プラント溶接構造に対する損傷防止技術の開発」の成果である。

参考文献

- 1) 本郷宏通, 田淵正明, 李永奎, 高橋由紀夫, 材料, 58, (2009) pp.101-107.

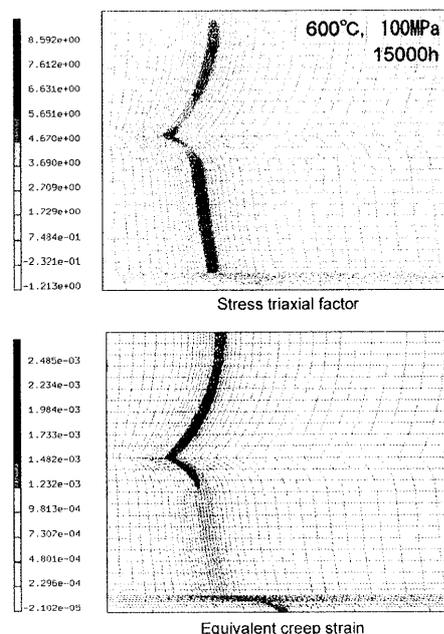


Fig. 5 Distributions of the stress triaxial factor and equivalent creep strain in HAZ of the welded joint crept for 15000h at 600°C and 100MPa.