A201 改良 9Cr-1Mo 鋼溶接継手のクリープ損傷予測法の開発

Development of creep damage evaluation method for a Mod. 9Cr steel weld joint

緒方隆志・電中研

Takashi Ogata, CRIEPI

酒井高行・電中研

Takayuki Sakai, CRIEPI

屋口正次・電中研

Masatsugu Yaguchi, CRIEPI

Key Words: <Creep, Mod. 9Cr-1Mo steel, Weld joint, Void growth simulation, Life prediction

論文要旨

In this study, creep tests have been conducted on a P91 to identify creep rupture life property of the weld joints, and creep damage process in heat affect zone (HAZ) has been clarified by producing creep damaged materials. As results, it was found that creep rupture time of the weld joints reduced to about 1/5 of the base metal and creep voids have already initiated at 20% of the creep life in the HAZ. Size and number of voids in the HAZ increased with increasing creep damage. Creep rupture time of the weld joint can be predicted by creep strain rate in the HAZ and limited creep strain defined in this study. It was confirmed that quantitative void growth behavior could be predicted by the void growth simulation method.

1. 緒言

超々臨界圧火力発電プラントにおいては、フェライト系低合金鋼に比べ高温強度、耐食性に優れた高クロム鋼がボイラ高温配管等に使用されている。高クロム鋼溶接継手のクリープ強度は、母材に比べ低下すること、その低下度合いは低合金鋼に比べて顕著であることが報告されている¹⁾。しかしながら、溶接熱影響部におけるボイドの成長過程については必ずしも明確にされておらず、溶接部での微視的損傷が破断に及ぼす影響についても定量的な議論はなされていない。本研究では、改良 9Cr 鋼溶接継手のクリープ破断特性ならびに溶接熱影響部におけるボイド成長とクリープ損傷の関係を調べる。また、溶接継手試験片のクリープ破断寿命予測法および既に開発したボイド成長シミュレーション法²⁾の溶接熱影響部への適用性について議論する。

2. 試験方法

改良 9Cr-1Mo 鋼溶接継手、母材および熱影響部模擬材を用いて単軸クリープ試験を試験温度 650℃ および 700℃ で実施した。また、溶接継手試験片では、クリープ損傷過程におけるボイド発生状態を調べるため、650℃、66MPa の条件で、破断時間に対して 20%、40%、60%、80% それぞれの時間で試験を中断した損傷中断材を作製した。

3. 試験結果

650℃ および 700℃ における各材のクリープ破断試験結果を図 1 に示す。溶接継手の破断位置は、各温度で最も高い応力においては溶接金属部であり、それより低い応力条件では溶接熱影響部細粒部であった。各温度において、母材のクリープ破断強度が最も高く、溶接継手はそれに対して 1/5 程度の破断時間であり、Type IV 破断により寿命が低下することがわかる。クリープ損傷中断試験片の走査型電子顕微鏡による観察では、20% 損傷材で既に粒界に楕円状に成長した数 μm 長さのボイドが観察された。40%、60%、80% と損傷が増すにつれて、ボイド個数と長さが増大していた。

Fig. 1 Comparison of creep rupture property

4. 溶接継手の破断時間予測法

溶接継手試験片における応力、ひずみ状態を明らかにするため、試験片の3次元有限要素クリープ解析を実施した。解析結果の代表例として、応力 66MPa で 2300 時間後の溶接継手試験片の中央部および表面近傍での軸方向応力の分布を図 2 に示す。溶接熱影響部の試験片中央部では公称応力より高い引張応力を生じており、表面近傍では引張応力が低下している。また、中央部では軸方向に垂直方向にも、軸方向応力の 1/2 程度の引張応力を生じており、単軸試験においても同部位が 3 軸引張応力状態となっていた。2300 時間後のクリープひずみ分布では、試験片上部表面近傍および試験片中央部の熱影響部で最大のクリープひずみを生じた。クリープ破断試験片の縦断面観察結果からは、表面近傍に比べ中央部でボイド発生が多く、クリープ損傷は表面部近傍に比べ中央部で優先して進行したことが示唆された。

Fig.2 Axial stress distribution along specimen axis.

細粒模擬材、母材および溶接継手熱影響部の定常クリープひずみ速度、 $\dot{\epsilon}_c$ と破断時間、 t_r の関係を図3に示す。図中には、溶接継手の標点間での定常クリープひずみ速度、 $\dot{\epsilon}_{c,wj}$ と破断時間、 t_{rwj} の関係もプロットしている。細粒材、母材、溶接継手熱影響部に対しては、概ね同様な関係が成立つ。定常クリープひずみ速度と破断時間の積を限界ひずみと定義すると、本試験条件の範囲内では材料、応力多軸性に無関係に、限界ひずみは約4%程度である。これより、溶接継手試験片のクリープ破断時間、 t_{rwj} は、3材料要素モデルを用いた溶接継手試験片の有限要素解析により、熱影響部における最大主応力部での主定常クリープひずみ速度、 $\dot{\epsilon}_{lcHAZ}$ を算出することにより、次式で推定することができる。

$$t_{rwj} = 0.044 / \dot{\epsilon}_{lcHAZ} \quad (1)$$

5. クリープボイド成長シミュレーション

ボイド成長シミュレーションにあたって、既に開発した粒界作成プログラム²⁾により、溶接熱影響部細粒部の模擬組織をコンピュータ上に作成した。同結晶の平均結晶粒径は、6.4 μ m (標準偏差 3.65 μ m)であり、マクロ組織から計測された平均結晶粒径 5.9 μ m (標準偏差 3.23 μ m)と同等の結晶粒が得られた。同組織を用いて、ボイド成長挙動を予測した。ボイドの成長式は、著者が既に提案しているボイド成長モデルから導出された式を用いる。ボイド形状が擬球状およびき裂状の場合のボイド成長式はそれぞれ次式で表される。

(擬球状ボイド)

$$\frac{da}{dt} = \frac{a \dot{\epsilon}_c}{2h(\psi)} \left(\frac{\Lambda}{a} \right)^3 \frac{1}{L+M} \quad (2)$$

(き裂状ボイド)

$$\frac{da}{dt} = \frac{\alpha}{4\pi h(\psi)} \left(\frac{\Lambda}{a} \right)^{5/2} \frac{1}{(L+M)^{2/3}} \quad (3)$$

式中の記号については別報²⁾を参照されたい。同プログラムにおいては、力学条件が同一であっても粒界性状により、ボイドが存在しない粒界があることを考慮し、全粒界に対して平均値が1.0、標準偏差が μ となる正規分布をもつ粒界性状値を与えた。この粒界性状値がある値以上の粒界でボイドが発生するとし、この値をボイド発生値と定義した。このようにして、ボイド発生に対する統計的要素を考慮した。

各損傷中断材において損傷率に対する観察されたボイド

Fig.3 Relation between steady state creep strain rate and rupture time . (2)

Fig.4 Comparison of void area fraction between observation and simulation results.

面積率を、シミュレーションで得られたボイド面積率と観察結果の関係と比較して図4示す。シミュレーションにおけるボイド面積率の算出では、すべてのボイドで楕円形状を仮定し、楕円の長軸と短軸の比を0.3とした。損傷材で観察されたボイド面積率の増大傾向とシミュレーションによって予測されたボイド面積率の増大傾向は概ね一致している。このように、本シミュレーションによって、溶接熱影響部のクリープ損傷に伴うボイド面積率の増大を予測することができた。

6. 結言

改良 9Cr-1Mo 鋼溶接継手の単軸クリープ破断寿命は母材のその1/5程度に低下すること、単軸および多軸応力場によらず、破断までの時間と定常クリープひずみ速度の積で定義される限界クリープひずみは、ほぼ一定であることが明らかとなった。また、ボイド成長シミュレーション解析によって予測されたボイド面積率とクリープ損傷の関係は実験で得られた結果と良好に一致した。

参考文献

- (1) M. Tabuchi, T. Watanabe, K. Kubo, M. Matsui, J. Kinugawa and F. Abe., Journal of the Society of Materials Science, Vol.50, No.2, pp.116-121(2001).
- (2) 緒方, 材料 Vol.56, No.2, pp.100-105 (2007).