516 内圧クリープ試験による改良 9Cr-1Mo 鋼溶接継手のクリープ損傷評価

Creep Damage Evaluation of 9Cr-1Mo Steel Weld Joint by Internal Pressure Creep Test

○正 斎藤 潔(東 芝)

糸 亮一(発電技検)

正 藤山一成(東 芝)

正 木村和成(東芝)

Kiyoshi SAITO, Toshiba Corporation, Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama

Ryoichi KUME, Japan Power Engineering and Inspection Corporation, Benten-cho, Tsurumi-ku, Yokohama

Kazunari FUJIYAMA, Toshiba Corporation, Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama

Kazunari KIMURA, Toshiba Corporation, Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama

Key Words : Creep, Creep Damage, Life Prediction, 9Cr-1Mo Steel, Weld Joint, Internal Pressure Creep Test

1. はじめに

火力発電設備の高効率化への要求から、ボイラ過熱器管や管寄せ、蒸気タービンの高温配管等に、高温強度に優れた改良 9Cr-1Mo 鋼が使用されるようになり、中には 10 年を越えて運転されているものがある。これらの機器は高温長期間使用中にクリープ損傷が蓄積するので、長期信頼性の確保にはクリープ損傷量の的確な把握が不可欠である。

この観点から本報では改良 9Cr-1Mo 鋼溶接継手について、内圧クリープ試験及び有限要素法によるクリープ解析を実施し、実験・解析の両面からクリープ損傷の非破壊評価法を検討すると共に実機部品のクリープ損傷評価について検討した結果を報告する。

2. 試験方法

2.1 内圧クリープ試験

内圧クリープ試験体は改良 9Cr-1Mo 鋼管から製作した外径 50mm×肉厚 5mm×長さ 300mm の円筒形試験体であり、溶接継手の形状として、長手溶接継手及び周溶接継手の 2 種を用いた。供試鋼管の化学組成を表 1 に示す。溶接継手はサブマージアーク (SMA) 溶接により製作した。内圧クリープ試験は大気中で不活性ガス加圧により実施した。試験条件は、温度 903K、圧力 16.7~23.3MPa(周方向の肉厚平均径応力に換算した場合: 75~105 MPa)とした。破断試験体(加圧ガスのリーク時を破断とした)及びクリープ中断試験体を作成した後、クリープポイド等の組織観察を行った。

Table 1 Chemical composition of material used (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Nb	N
0.08	0.39	0.42	0.014	0.001	0.07	8.59	0.93	0.22	0.08	0.062

2.2 FEM解析モデルと解析条件

解析形状モデルの外形は対称性を考慮し、溶接金属の中央を対称面とした。図 1 に一例として長手溶接継手の解析モデルを示す。溶接部の材料特性は、長手溶接継手、周溶接継手とも、①母材(Base metal)、②溶接熱影響部細粒域(F.G.HAZ)、③溶接金属と溶接熱影響部粗粒域(WM+C.G.HAZ)の 3 種の材料にモデル化した。それぞれのクリープ構成式は橋本ら⁽¹⁾が提案した式と、これを Eggeler ら⁽²⁾のクリープ試験結果(応力と定常クリープ速度の関係)を基に修正した式⁽³⁾を用いた。

以上の形状モデル、材料モデルをもとに境界条件は上記の内圧クリープ試験条件として、最大 5000 時間までのクリープ解析を行った。

Fig.1 FEM creep analysis model for longitudinal welded pipe

3. 試験結果

3.1 内圧クリープ試験

(1) クリープ破断特性

図 2 に破断時の応力と LMP との関係を示す。図中には火 STPA28 鋼母材及び溶接継手部の単軸クリープ試験結果を参考として示す。内圧クリープ試験体の応力は肉厚平均値を用いているので厳密な比較とは言えないものの、長手継手は単軸溶接継手部の結果に、周継手は母材の結果に近い破断特性を示している。

Fig.2 Creep rupture strength of Mod. 9Cr-1Mo steel and welded joint

(2) 長手溶接継手のクリープ損傷

長手溶接継手のクリープ破断(加圧ガスリーク)は溶接線に沿って熱影響部細粒域で生じた。

図 3 に内圧クリープ試験破断後の長手溶接継手断面部の組織観察結果を示す。クリープポイドは溶接ボンド部から約 2.5mm 離れた溶接熱影響部細粒域に発生しており、「Type IV」型の割れであった。

クリープポイド面積率の肉厚方向分布を図 4 に示すが、ポイドは外表面から肉厚内部にかけて多く観察され、内表面では少ないことが判る。外表面のポイド面積率は損傷量とともに増加し、両者には相関が認められた。

Fig.3 Metallurgical Structure of longitudinal welded joint after Inner pressure creep test

Fig.4 Distribution of void area fraction in fine grained heat affected zone of longitudinal welded joint

(3) 周溶接継手のクリープ損傷

周溶接継手のクリープ破断（加圧ガスリーク）は溶接熱影響部粗粒域で生じ、き裂の方向は溶接線に垂直（試験体長手方向）であった。

図5に内圧クリープ試験後の周溶接継手断面部の組織観察結果を示す。クリープボイドは前記長手溶接継手と異なり、溶接ボンド部近傍の溶接熱影響部粗粒域に発生しており、割れは「Type III」型であった。クリープボイドは内外表面表面から内部に至る全域にわたって発生していた。

ボイド面積率及びAパラメータは損傷量とともに増加し、両者とも損傷量との相関が認められた。

Fig.5 Metallurgical Structure of circumferential welded joint after inner pressure creep test

3.2 FEM解析

(1) 長手溶接継手

溶接熱影響部細粒域での各主応力成分（半径方向応力、周方向応力、軸方向応力）を比較すると周方向応力 σ_θ が最大であった。

図6に5000時間後の熱影響部細粒域の周方向応力 σ_θ の肉厚方向分布を示す。 σ_θ の分布状態と前出の図4のクリープボイドの分布状態を比較すると両者の分布傾向が類似していることが判る。

Fig.6 Distribution of circumferential stress σ_θ at fine grained heat affected zone along the radial direction for longitudinal weld joint

(2) 周溶接継手

周溶接継手について、周方向応力 σ_θ の軸方向に沿う分布状態を図7に示す。 σ_θ の最大位置は熱影響部粗粒域相当部位であり、これは前出の内圧クリープ試験でボイドの発生した位置と一致している。

Fig.7 Distribution of σ_θ along the axial direction for circumferential weld joint

4.まとめ

- (1) クリープボイド及びき裂（ガスリーク）は長手溶接継手では溶接熱影響部細粒域に発生し(Type IV)、周溶接継手では溶接熱影響部粗粒域に発生した(Type III)。
- (2) いずれの溶接継手においてもクリープボイドは損傷量とともに増加し、両者には相関が認められた。またクリープボイドは外表面で観察可能であり、実機部材での損傷検出法として有効と考えられる。
- (3) FEM 応力解析の結果、最大主応力である周方向応力 σ_θ とボイド分布との間に相関が認められることから、クリープ損傷に対しては、主応力の影響が大きいと考えられる。

本報告の一部は（財）発電設備技術検査協会が通商産業省の委託により実施した「設備診断技術実証試験」で得られたものである。本実証試験を推進いただいた設備診断技術実証試験委員会の岡村弘之委員長、大谷隆一主査を始め各委員及びご協力いただいた関係各位に感謝いたします。

参考文献

- (1) 橋本他, 材料, 44-496, (1995), 11-15
- (2) Eggeler G. et al., Int. J. Pres. Ves. & Pipnig, 60, (1994), 237-257, Elsevier Science Limited.
- (3) 木村他, “改良 9Cr-1Mo 鋼部材のクリープ損傷評価－第2報”, 機論A編, Vol. 66, No. 647, (2000).