

ボイラ管寄せ管台溶接部のクリープ疲労寿命評価法

Creep-Fatigue Evaluation Method of Boiler Tube-Header Weldment

技術本部 田中保幸^{*1} 時吉 巧^{*2}

原動機事業本部 藤田正昭^{*3}

長崎造船所 中谷浩巳^{*4}

火力発電プラントのDSS (Daily Start Stop), WSS (Weekly Start Stop) 運用が本格化するにつれて、ボイラ管寄せ管台溶接部にクリープ疲労に起因すると考えられるき裂の発生が見られるようになってきた。本研究では実機管台を模擬した実物大供試体を用いてクリープ疲労試験を行い、その寿命評価法を確立するとともに、実機適用の便を図るため、シミュレーションコードを開発した。本コードを用いて、実機の逆解析を行った結果、実機実績と非常に良い整合性のあることが分かり、クリープ疲労寿命評価法の精度向上が図れた。

An improvement of the creep-fatigue evaluation method is strongly required for the tube-header weldment of the boiler which is operated in two shift operation mode. In this paper, firstly, the specimen-based evaluation method is described. This method was verified by the creep-fatigue test of actual size weldment specimens and by the theoretical analysis for specimens. Secondly, the computer code for creep-fatigue life evaluation was developed. This code can estimate the creep-fatigue life of an actual tube-header weldment using the same method for the tested specimens. This code was applied to analyze the actual cracked tube weldment. From the comparison of actual damage and estimated damage, it can be concluded that there is excellent agreement between the predicted life and the actual cracked life. Therefore, from the test results, we believe we have successfully developed a practical predictive code.

1. ま え が き

火力発電プラントは、電力需要の日間変動に追従するため中間負荷運用が一般化しつつあり、DSS (Daily Start Stop), WSS (Weekly Start Stop) 等、頻繁な起動停止を伴う運用形態で使用されている。このため、ボイラ機器に関しても、従来はさほど問題でなかった疲労による損傷が見られるようになってきた。中でも図1に示すように伝熱管を管寄せに溶接している管台と呼ばれる部分は、構造的に不連続な形状となっていること、及び同図に温度、ひずみ変動の典型例を示すように主に起動時に複数の伝熱管の間に温度差がついて、高い熱応力が発生すること等の理由から、疲労損傷を受けやすい部位である。その上、この部分は適用位置によっては500℃以上の高温で運転されるため、クリープの影響がかなり大きく、いわゆるクリープ疲労と考えられるケースが多い。

クリープ疲労については、古くから多くの研究⁽¹⁾がなされている

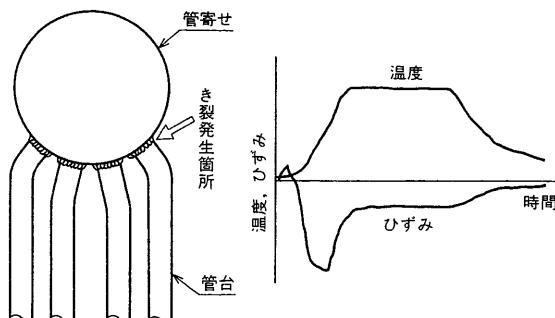


図1 管台概略図とその使用条件 管寄せ、管台の概念を示す模式図とその使用条件としての温度、ひずみの変動パターンを示す。
Schematic figure of tube and header and operation curve

が、いずれも標準形状の試験片を用いたもので、実機に即して溶接部のビード形状を再現した試験片を用いての研究はなされていない。そこで本研究では、実機管台を模擬した実物大供試体を用いた実験とシミュレーションにより、管台溶接部のクリープ疲労寿命予測手法の精度向上を試みた。

2. 管台のクリープ疲労試験

2.1 供試体

クリープ疲労試験に用いた供試体は実機過熱器管台溶接部を模擬したもので、形状寸法を図2に示す。管の材質は2¼Cr-1Mo鋼である。溶接は実機管台と同じように行い、溶接後に応力除去焼鈍を行っている。

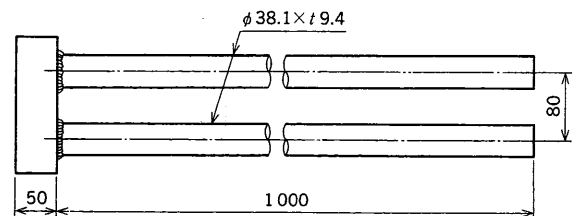


図2 供試体形状寸法 実機管台溶接部を模擬して溶接製作した実物大供試体。
Test specimen

2.2 試験方法

クリープ疲労試験はインストロン社製10t構造物疲労試験機を用いて行った。試験方法を表す模式図を図3に示す。供試管の溶接部から600mmの位置を管保持ジグでつかみ、これを試験機のアクチュエータに取付けて上下に引張ることで、管に曲げを加えた。これは実機では、管列間の温度差に伴う伸び差を、管の曲げ変形で吸収する状態を模擬したものである。そしてつかみ位置の

*1 長崎研究所強度研究室主務

*2 長崎研究所強度研究室

*3 原動機技術センターボイラ技術部ボイラ構造グループ

*4 火力プラント設計部陸用ボイラ設計一課

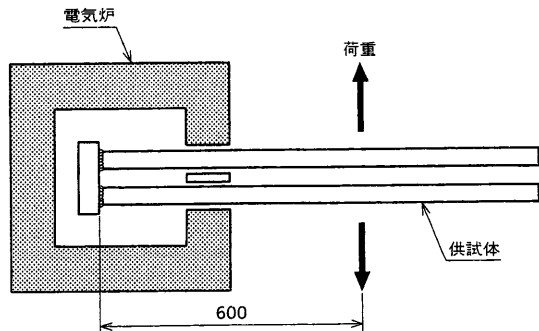


図3 試験方法の模式図 供試体の溶接部を電気炉中で加熱し、炉外で荷重をかけて試験を行う方法の模式図。
Schematic figure of test method

変位を制御しながら繰返しストロークを与えた。繰返しひずみ波形は、最大ひずみにおいて10～60 minのひずみ保持を行い、この間に供試体にクリープ損傷が蓄積するような波形とした。

供試体の溶接部は図3に示すように電気炉内に入れて所定の温度に加熱し、供試体表面温度を計測して炉内温度の制御を行いながら試験を行った。き裂はいずれの場合も管側の溶接止端部の熱影響部に発生し、実機と同位置であった。き裂の検出は、あらかじめ設定した繰返し数に達するごとに電気炉を開放して温度を下げ、約10倍の拡大鏡を用いて、目視でき裂長さを計測した。そしてき裂長さが5 mmになったときをき裂発生と定義して、このときの繰返し数をき裂発生繰返し数とした。

2.3 試験条件

試験条件をまとめて表1に示す。温度2ケース、応力レベル3ケース、保持時間は保持なしも含めて4ケースとした。

表1 試験条件
Test condition

温度 (℃)	等価弾性 応力範囲 (kg/mm ²)	保持時間 (min)			
500	85	0	10	20	60
	51	0	10	20	60
	34	0	10	—	—
550	83.5	0	10	20	60
	50.1	0	10	20	60
	33.4	0	10	20	—

ここで応力は曲げモーメントを管の断面係数で割った公称の等価弾性応力範囲で表示している。クリープ疲労の評価は当該部位のピーク応力を用いて行うのが一般的であるが、実機の溶接ビード形状は必ずしも一定ではなくピーク応力も異なるのに対して、実機適用に当たって個々のビード形状を計測することはほとんどできないこと、またピーク応力は比較的早期に緩和するであろうことを期待して、公称応力を採用した。したがってビード形状の影響は強度のばらつきとなって若干出てくる。

2.4 試験結果

図4に試験結果を示す。前述の理由から通常の試験に比べばらつきが大きいことは否めない。図中○及び●で示す保持なしの試験結果は、500℃と550℃で有意差はないと見られる。しかし保持ありの結果には差が見られ、黒塗りのシンボルで示す550℃の結果は、白抜ききのシンボルで示す500℃の結果より寿命が短くなる傾向にあり、クリープの影響により寿命が低下したことを示唆してい

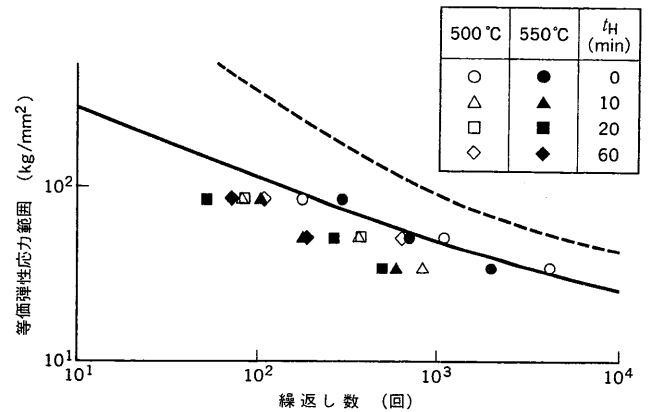


図4 試験結果 全試験データをプロットしたS-N曲線を示す。
Test results

る。なお、図中の実線は、500℃と550℃の保持なしのデータをまとめて、最小二乗法にて近似した疲労曲線である。また、破線は500℃、保持なしの母材のデータ⁽²⁾で参考のため併記した。

3. クリープ疲労寿命評価法

3.1 クリープ疲労損傷解析法

クリープ疲労損傷評価は従来から良く使われている線型損傷則に基づいて行った。ただし、損傷と1.0を破損限界とするのではなく、その値は実験結果から求めた。

線型損傷則を適用するには、ひずみ保持中の応力緩和過程におけるクリープ損傷の計算が重要である。ここでは当該部の応力-ひずみ状態を、定ひずみ状態での単軸応力緩和に単純モデル化して、次式により保持中のクリープ損傷を計算した。

$$D_c = \frac{\sigma^{1-n+m} - \{\sigma^{1-n} - (1-n)E \cdot K \cdot t\}^{\frac{1-n+m}{1-n}}}{(1-n+m)C \cdot E \cdot K} \quad (1)$$

ここで、

σ : 塑性を考慮した初期応力

E : ヤング率

t : 保持時間

K, n : クリープ速度を $\dot{\epsilon} = K\sigma^n$ と表すときの材料定数

C, m : クリープ破断強度を $t_r = C\sigma^{-m}$ と表すときの材料定数

この式で1サイクル当りのクリープ損傷を求めるのであるが、応力の大きさによっては、サイクルごとに D_c の値が変化することがある。その場合は D_c が一定値に収束するサイクルまで計算を行う必要がある。

次に疲労損傷は、次式によって求めた。

$$D_t = 1/N_0 \quad (2)$$

ここで、

N_0 : 保持なしの破損繰返し数

クリープ損傷の計算が N_s サイクルで収束したとすると、クリープ疲労寿命 N は次式によって推定できる。

$$N = N_s + \frac{D - \sum D_c - N_s \cdot D_t}{D_c + D_t} \quad (3)$$

ここで、

N_s : 計算したサイクル数

D : 損傷限界値

$\sum D_c$: N_s サイクルまでの累積クリープ損傷

D_c : N_s サイクル目の1サイクル当りのクリープ損傷

D_t : 1サイクル当りの疲労損傷

3.2 損傷限界値

試験した各条件について、式(1)を用いた方法でクリープ損傷を計算し、また同条件のひずみ保持なし試験の結果を参照して疲労損傷 ($N_{hold}/N_{no\ hold}$) を求め、損傷線図を描いた。き裂の発生が熱影響部であったことから、クリープ速度、クリープ破断強度のデータとしては2¼ Cr-1Mo 鋼の HAZ 再現熱処理材のものを用いた。また保持なし疲労曲線としては、図4に実線で示すカーブを用いた。

結果を図5に示す。ばらつきはあるが、500℃では疲労損傷優位、550℃ではクリープ損傷優位の傾向が見られる。損傷和 $D_c + D_f$ の全供試体についての平均値は0.572となったのでこれを損傷限界値とした。このやり方では疲労損傷のみ、あるいはクリープ損傷のみの場合に、損傷率が1にならないという不都合はあるが、実用上の利便を考えて、損傷限界は直線で表示することにした。

3.3 クリープ疲労寿命の推定

ここでは計算で推定した寿命と、実測寿命との対応について考察する。

図6はすべての実験結果について、損傷限界値を0.572として計算により求めた推定寿命と、試験で得られた実測寿命の関係を

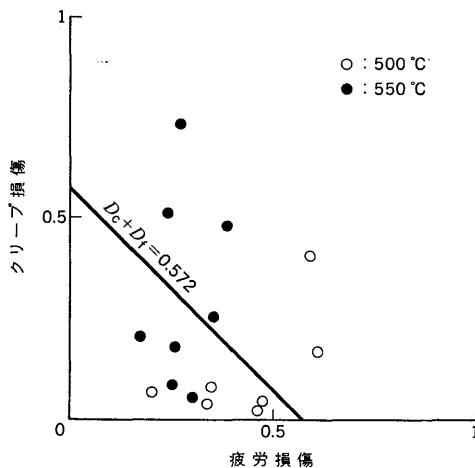


図5 損傷線図 各供試体についてクリープ損傷と疲労損傷を計算しプロットした。
Damage diagram

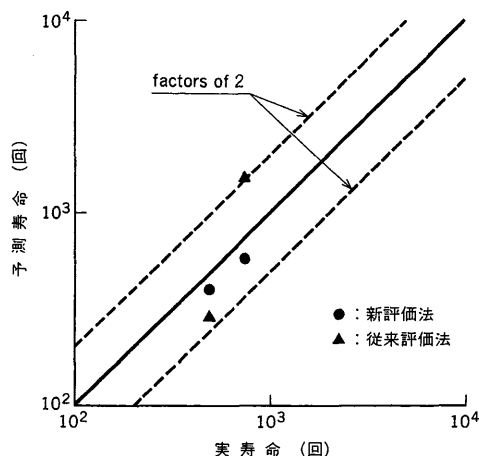


図6 推定寿命と実測寿命の比較 供試体について計算で求めた推定寿命と試験で判明した実測寿命をプロットし相関性を示す。
Comparison with predicted life and observed life (test specimen)

プロットしたものである。推定寿命はほとんど実測寿命の1/2～2倍の間 (factors of 2) のバンド内に入っており、クリープ疲労寿命推定の精度としては、まずまずの結果であると考えられる。

4. 実機管台のシミュレーション

4.1 実機管台のシミュレーションコード

これまで述べてきた結果は温度、ひずみが一定に保持されている場合についてであったが、実機では起動停止に伴って温度、ひずみ共に変動する。したがって実機管台の解析のためには、ひずみ履歴に従って時々刻々の応力を弾塑性クリープ計算によって追いかけて、そのときの温度に対応するクリープ破断強度を参照してクリープ損傷を求める必要がある。これはかなり面倒な計算を必要とするため、電算機を用いた解析コードを開発した。解析コードのフローチャートを図7に示す。

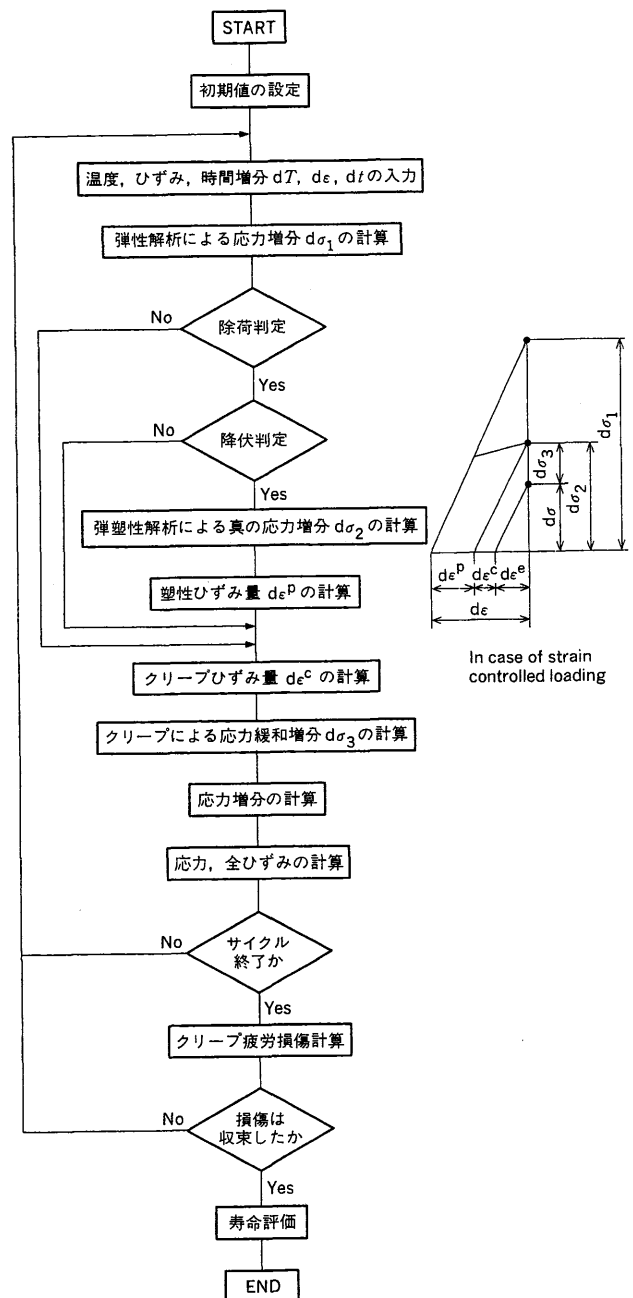


図7 解析コードのフローチャート 開発した解析コードの内容を示す。
Flow-chart of code

4.2 実機管台の逆解析

ここでは、実機で損傷が生じた管台を例に採って、今回開発したコードを用いてシミュレーションを行ってみる。解析は次の二例について行った。

● A ボイラ・板型過熱器出口管台

発停回数 741 回, 運転時間 164 714 h

● B ボイラ・二段再熱器出口管台

発停回数 484 回, 運転時間 101 604 h

これらのプラントはいずれも定期検査において、管台溶接部にき裂が発見されたものである。両プラント共き裂発生部に近接した位置の温度、ひずみ（公称応力相当）が実測されていたので、これをシミュレーションのための元データとして用いた。もちろん設計段階ではこのようなデータはないが、その場合は応力解析によってひずみを推定して、シミュレーションに供すればよい。

シミュレーションは計測されていた運転曲線に従って各起動モードごとに行い、寿命消費率を計算した。計算に必要なクリープ速度、クリープ破断強度、保持なし疲労曲線などは、実験結果の逆解析に用いたデータと同じものを用いた。また、損傷限界値も実験で得られた 0.572 とした。結果を表 2 に示す。なお、ここで損傷率とは、

$$\text{損傷率} = \frac{\text{各起動モードでの発停回数}}{\text{各起動モードでの予測寿命}} \times 100 (\%)$$

と定義している。

これによると A ボイラ、B ボイラとも全損傷率が 100 % を超えており、き裂が見つかった事実と良く対応している。

4.3 従来評価法との比較

ここで、全損傷率が 100 % となる発停回数、すなわち計算上の予測寿命を求めてみる。各起動モードの発生頻度が同じと仮定すれば、全損傷率が 100 % となる発停回数は以下によって求められる。

● A ボイラ $(497+160+84) \times 100 / 127.6 = 581$ 回

● B ボイラ $(294+190) \times 100 / 120.5 = 402$ 回

ところでこの問題に対する従来の評価のやり方は、何がしかのひずみ保持効果を含む疲労曲線に対し、過去の実機実績を反映して求めた係数を掛けて実績ベースの疲労曲線を作り、起動停止回数だけで評価を行っていた。このやり方は各起動モードにおける最大応力範囲を求めれば直ちに許容繰返し数が求まるという簡便さのため、クリープ損傷のカウントにやや厳密さを欠く嫌いはあったが、これまで広く用いられてきた。今回シミュレーションの対象としたボイラについて、この従来の評価法を用いて許容繰返し回数を求めると以下のとおりとなった。

● A ボイラ 1 537 回

● B ボイラ 291 回

以上の二種類の寿命予測結果と、実寿命を比較して図 8 に示す。今回開発した寿命評価法による予測寿命は、実寿命と非常に良く一致しているのが分かる。また、従来の評価法による予測寿命も多少精度が落ちるとはいえ、クリープ疲労寿命評価法の精度とし

表 2 寿命消費計算結果

Computed results of life consumption

プラント	起動モード	クリープ損傷	疲労損傷	損傷和	予測寿命(回)	発停回数(回)	損傷率(%)	全損傷率(%)
A ボイラ	DSS	1.224 E-03	1.423 E-05	1.238 E-03	462	497	107.6	127.6
	WSS	3.560 E-04	1.383 E-04	4.943 E-04	1157	160	13.8	
	COLD	3.343 E-04	8.657 E-05	4.209 E-04	1359	84	6.2	
B ボイラ	DSS	1.472 E-03	1.546 E-04	1.627 E-03	352	294	83.6	120.5
	COLD + WSS	7.406 E-04	3.713 E-04	1.112 E-03	514	190	36.9	

B ボイラの WSS のデータはなかったので COLD のデータで代用した。

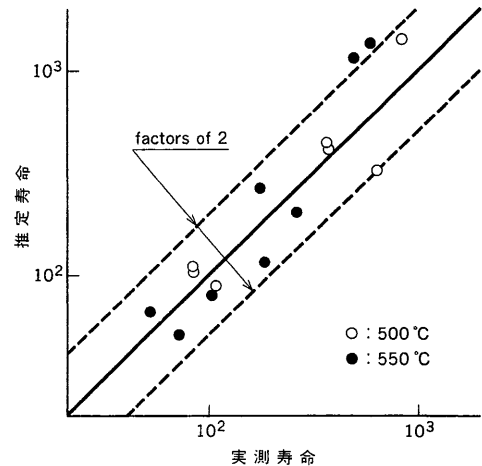


図 8 実機の寿命予測結果と実寿命の比較 実機について計算で寿命を予測した結果と実際の寿命とを比較し相関性を示す。
Comparison with predicted life and observed life (actual component)

て一般的に許容される factors of 2 の範囲には入っている。

5. む す び

火力発電プラントの中間負荷運用移行に伴って顕在化してきた、ボイラ管寄せ管台溶接部のクリープ疲労寿命評価法の精度向上を意図し、実物大実機模擬供試体のクリープ疲労試験を行い、その逆解析を通して、まず試験片ベースでの寿命評価法を確立した。次に、同じコンセプトに従って温度、ひずみ変動下の応力履歴を計算し、クリープ疲労寿命を推定する電算コードを開発し、実機損傷管台のシミュレーションを行った。その結果、本コードを用いて求めた予測寿命と実寿命は非常に良く一致し、本コードの有用性が証明できた。

参 考 文 献

- (1) 時政勝行, 高温クリープ疲れ, 日本鉄鋼協会西山記念技術講座テキスト (1982)
- (2) 金属材料技術研究所, 金属材料技術研究所疲労データシート No.62 (1989)