クリープ疲労損傷を受ける構造部材の信頼性設計線図による 材料選択方法[†]

藤 山 一 成^{*}

A Method for Materials Selection in Reliability-Based Design Diagram of Structural Components under Creep-Fatigue Damage Mode

by

Kazunari FUJIYAMA^{*}

A new method for materials selection in reliability-based design was applied to the high temperature structural components under creep-fatigue damage mode. The creep-fatigue interaction law was formulated in terms of creep time fraction (creep damage) and fatigue cycle fraction (fatigue damage) using pure creep and pure fatigue material properties referring NIMS creep and fatigue datasheets for ferritic heat resistant steels such as 1Cr-1Mo-0.25V steel forging, 12Cr-1Mo-1W-0.3V steel bar and 2.25Cr-1Mo steel plate. The statistical distribution under the creep-fatigue damage mode was fitted well with the two-dimensional log-normal distribution function but the scatter bands of creep-fatigue data were considerably larger compared with the cases using pure creep and pure fatigue damage distributions. Once the ratio of creep damage to fatigue damage was fixed, the confidence limit could be restricted within more reasonable range for design application. The diagram was expressed by the relationship between creep stress vs. fatigue strain range for those three materials and the apparent superiority of 12Cr-1Mo-1W-0.3V steel bar to other materials was demonstrated. Thus this diagram was proved to be an effective tool for decision making of materials selection and structural reliability-based design even at the very initial stage of design process, that is, the front-loading design of components.

Key words : Reliability-based design, Materials selection, Two-dimensional log-normal distribution, Creep-fatigue interaction, Creep damage, Fatigue damage.

1 緒 言

機械システム設計において、設計の初期段階から構造寸法の決定と材料選択を最適に行うことは、後戻りによるロスを低減する上で極めて有効であると考えられる。そこで、筆者らは材料の選択と構造寸法の設定を同時に行う手段として、Ashbyによる材料選択マップ¹⁾の概念に統計的信頼区間を考慮した“統計的材料・構造選択マップ”を提案した。²⁾このマップでは、構造強度が応力・ひずみなどの負荷と肉厚などの構造・形状寸法の組合せによって決まることから、種々の材料の強度特性をもとに構造寸法パラメータによる設計可能領域を表示することができる。構造寸法には、例えば配管内径のように流量要求によって変えられないものと、外径のように自由に変えられる自由変数パラメータとがあり、後者が設計可能領域の表示のために用いられる。通常、設計には複数の材料特性を用いた評価が行われるが、複数の要求性能が相反する場合には、最も妥当と考えられる組合せを決定する必要がある。

高温で使用される蒸気タービンなどの機器においては、クリープと疲労が重畳するクリープ疲労現象が生じ、部材の寿命を規定していることから、このような複合する因子による損傷を考慮した設計法の適用が必要

である。これまでの方法では、複数の因子を組み合わせで評価してはいるが、因子間に相互作用がある場合の取り扱いが行っていない²⁾また、クリープ疲労に関しては、従来から多くの研究が蓄積されており、設計コードにも取り入れられている³⁾が、クリープ疲労損傷則には、データの統計的处理による信頼区間の設定など、信頼性設計に不可欠な取扱いが十分に行われているとはいえない。

そこで、本研究では、代表的なフェライト系耐熱鋼について、物質・材料研究機構のデータシートに公開されているひずみ保持サイクルのクリープ疲労試験データを用いて、クリープ疲労の相互作用を考慮した2次元確率分布形を用いた信頼区間の設定を試みる。さらに、2次元確率分布特性に基づくクリープ疲労条件下での材料選択と構造設計を同時に行うことのできる信頼性設計線図を構成し、初期段階における設計支援ツールとしての適用法を示す。

2 方 法

2・1 信頼性設計線図の作成法と材料選択方法

本研究で作成する信頼性設計線図は、相互作用関係を有する複数の設計パラメータを用いて構造部材の形状寸法決定と材料選択を同時に行うための設計支援ツールであり、選択可能範囲を材料特性の統計的信頼区

[†] 原稿受理 平成 21 年 9 月 1 日 Received Sep. 1, 2009 © 2010 The Society of Materials Science, Japan

^{*} 正 会 員 名城大学理工学部機械システム工学科 〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口, Dept. of Mech. Eng., Meijo Univ., Tempaku-ku Nagoya, 468-8502

間によって設定したものである。すなわち、クリープ疲労損傷のように、複合する2つの損傷因子A, Bの相互作用によって構造部材の寿命が規定される場合、その相互作用則をクリープ損傷と疲労損傷を表す変数を用いた関数として表し、この関数に対して2因子の2次元統計分布を考慮することによって統計的設計可能領域を表示する。2次元分布を求めるにはそれぞれの因子に対する周辺分布が必要となり、これを相互作用則の縦偏差および横偏差から求めるか、各因子が単独に作用した時の材料特性から求めるかによって2種類の計算方法が考えられる。周辺分布を各単独の材料特性で求めるとき、相互作用の効果は相関係数にのみ反映される。

2・2 クリープ疲労特性

クリープ疲労特性の表式に要求される条件としては、クリープ単独、または疲労単独のとき、それぞれの損傷量が1となり、他は0となることである。そこで相互作用の近似式として、次式を仮定する。

$$\phi_f^m + \phi_c^n = 1 \quad (1)$$

$$\text{ただし、} \phi_f = \sum_i \frac{n_i}{N_{fi}}, \quad \phi_c = \int \frac{dt}{t_r}$$

ϕ_f : 疲労損傷, ϕ_c : クリープ損傷, n_i : i なるモードでの繰返し数, N_{fi} : i なるモードでの全ひずみ範囲に対応する疲労破損回数, t : 時間, t_r : クリープ破断時間, 積分は温度・応力の変化に応じて時間に対して行う。最も基本的な線形損傷則は、 $m=1, n=1$ において得られるが、ここではデータの最適近似によって定める定数とする。式(1)は $(\phi_f, \phi_c) = (1, 0)$ または $(0, 1)$ を通る曲線の中でも、多様な近似ができる点で統計処理に適した形式と考えられる。

2・3 クリープ破断特性

クリープ破断特性については、フェライト系耐熱鋼などでは室温引張強度とある程度の相関が認められることから、ロットごとに引張強度が異なることを反映して、室温引張強さ σ_{BRT} によって規格化した応力 σ/σ_{BRT} を用いて次式で近似する。²⁾

$$P \equiv T(C + \log t_r) = \sum_{i=0}^k A_i \left\{ \log \left(\frac{\sigma}{\sigma_{BRT}} \right) \right\}^i \quad (2)$$

ただし、 P : ラーソンミラーパラメータ, T : 温度 (K), t_r : クリープ破断時間 (h), C, A_i : 近似定数, k : 近似式の次数。

式(2)に寿命 t_r なるデータ点の試験条件に対応する応力・温度を代入して平均寿命 t_{r0} を求め、規格化寿命 t_r/t_{r0} を求める。この t_r/t_{r0} を対数正規分布で近似する。

2・4 低サイクル疲労特性

低サイクル疲労特性については、温度依存性とロットの影響を反映するため、弾性ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_e$ に Universal slope 法⁸⁾と類似の試験温度における引張強度 σ_B による修正ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_{tmod}$ を用い、次式で表す。²⁾

$$\Delta \varepsilon_{tmod} \equiv \frac{\Delta \varepsilon_e}{100 \sigma_B / E} + \Delta \varepsilon_p = C_1 N_f^{-\alpha_1} + C_2 N_f^{-\alpha_2} \quad (3)$$

ただし、 $\Delta \varepsilon_e$: 弾性ひずみ範囲 (%), $\Delta \varepsilon_p$: 塑性ひずみ範囲 (%), σ_B : 試験温度での引張強さ (MPa), E : 試験温度でのヤング率 (MPa), N_f : 破損繰返し数, $C_1, C_2, \alpha_1, \alpha_2$: 近似定数。

式(3)に寿命 N_f なるデータ点の試験条件に対応するひずみ範囲・温度を代入して平均寿命 N_{f0} と規格化寿命 N_f/N_{f0} を求める。この N_f/N_{f0} を対数正規分布で近似する。

2・5 2次元統計分布解析

2つの確率変数 X と Y が独立でない場合、次の2次元対数正規分布特性を用いて統計解析を行う。 X, Y の結合密度関数 $f(x, y)$ は次式で表される。⁴⁾

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} \exp \left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left\{ \frac{(\ln x - \mu_{Le1})^2}{\sigma_{Le1}^2} - 2\rho \frac{(\ln x - \mu_{Le1})(\ln y - \mu_{Le2})}{\sigma_{Le1}\sigma_{Le2}} + \frac{(\ln y - \mu_{Le2})^2}{\sigma_{Le2}^2} \right\} \right] \quad (4)$$

ただし、 μ_{Le1}, μ_{Le2} : $\ln X, \ln Y$ の平均値, $\sigma_{Le1}^2, \sigma_{Le2}^2$: $\ln X, \ln Y$ の分散, ρ : 相関係数。

累積確率 $F(Q)$ は以下の式で与えられ、 F に所定の確率値を与えることにより Q の値が定まり、等確率楕円を描くことができる。

$$F(Q) = 1 - \exp \left(-\frac{Q}{2} \right) \quad (5)$$

$$Q = \frac{1}{1-\rho^2} \left\{ \frac{(\ln x - \mu_{Le1})^2}{\sigma_{Le1}^2} - 2\rho \frac{(\ln x - \mu_{Le1})(\ln y - \mu_{Le2})}{\sigma_{Le1}\sigma_{Le2}} + \frac{(\ln y - \mu_{Le2})^2}{\sigma_{Le2}^2} \right\} \quad (6)$$

ここで、 X, Y に対する平均値と分散の値は、式(1)のクリープ疲労特性において、横偏差（クリープ損傷に対する偏差）と縦偏差（疲労損傷に対する偏差）をとる場合と、式(2)によるクリープ破断特性単独および式(3)による低サイクル疲労特性単独の各横偏差から求める方法の2通りについて検討する。相関係数 ρ は、いずれの場合もクリープ疲労特性から求めた同一の値を用いる。

3 結果および考察

3・1 クリープ疲労特性

Fig. 1 に、式(2)によって整理した3種類の耐熱鋼のクリープ疲労特性を示す。^{5)~10)} 2.25Cr-1Mo 鋼については図示したデータ以外にさらにクリープ損傷が大きい(2を超える)データも3点存在するが、ここでは省略した。2.25Cr-1Mo 鋼の近似線は線形損傷則に近い直線的な形状を示している。この近似線上の点 (ϕ_{ces}, ϕ_{fes}) とクリープ損傷および疲労損傷の各データ点 (ϕ_{ces}, ϕ_{fes}) との比を縦偏差・横偏差としてとり、Fig. 2 および Fig. 3 に対数正規確率紙上に示す。いずれも概ね対数正規確率分布によって近似可能である。Fig. 2 に示すクリープ損傷比の分布では、分散が大きく、特に1Cr-1Mo-0.25V 鍛鋼と2.25Cr-1Mo 鋼板材においてその傾向が顕著である。一方、Fig. 3 に示す疲労損傷比の分布では、比較的分散が小さく、クリープ損傷比に比べばらつきが小さい傾向を示している。

3・2 クリープ破断特性

Fig. 4 および Fig. 5 に、各材料のクリープ破断特性と、式 (2) による最適近似線を示す。ラーソンミラーパラメータ P の定数 C は、12Cr-1Mo-1W-0.3V 鋼棒については 25、その他については 20 を採用した。いずれも室温引張強さ σ_{BRT} で規格化した応力 σ/σ_{BRT} によって、異なるロットを含むデータを良く近似できている。

Fig. 6 に、規格化クリープ破断寿命 t_r/t_0 の対数正規分布プロットを示す。いずれの近似線もデータの分布を

良く近似している。ここでは、12Cr-1Mo-1W-0.3V 鋼棒の分散が最も大きい。

3・3 低サイクル疲労特性

Fig. 7 に、各材料の低サイクル疲労特性を示す。材料特性の温度依存性を補正した式 (3) によって、材料や試験温度によらず、ほぼ同等の特性が得られている。

Fig. 8 に、規格化低サイクル疲労寿命 N_f/N_{f0} の対数正規分布プロットを示す。いずれの近似線もデータの分布を良く近似しており、クリープ破断特性の場合と比較し

Fig. 1 Creep-fatigue diagram for heat resistant ferritic steels.

Fig. 2 Log-normal distribution for relative creep damage.

Fig. 3 Log-normal distribution for relative fatigue damage.

Fig. 4 Creep rupture properties of 12Cr-1Mo-1W-0.3V steel bar (from NIMS data sheet).

Fig. 5 Normalized stress creep rupture properties of 1Cr-1Mo-0.25V steel forging and 2.25Cr-1Mo steel plate SCM4V (from NIMS data sheet).

Fig. 6 Log-normal distribution of creep rupture life ratio.

て分散が小さい。対象とした材料の中では、12Cr-1Mo-1W-0.3V 鋼棒の分散が最も小さい。

3・4 2次元統計分布と材料・構造選択マップ

Fig. 9 ~ Fig. 11 に、式 (5), (6) の2次元対数正規分布の F に 0.90 および 0.99 の確率を与えた 90% および 99% 等確率楕円を、クリープおよび疲労の対数平均と対数分散に Fig. 2 と Fig. 3 から得られた値を適用した場合 (creep-fatigue) と、クリープと疲労の各々単独の特性について Fig. 6 および Fig. 8 から得られた値を与えた場合 (pure creep/pure fatigue based) について、縦軸に疲労損傷比、横軸にクリープ損傷比をとって各材料について示す。なお、Fig. 6 および Fig. 8 の結果を Fig. 9 ~ Fig. 11 にプロットするにあたって、損傷量が寿命の逆数で表されるとしてデータの昇順を反転させ、損傷比の分布として採用した。Fig. 10 に示した 12Cr-1Mo-1W-0.3V 鋼棒の場合は、両者の結果に大差は認められないが、Fig. 9 および Fig. 11 に示した 1Cr-1Mo-0.25V 鍛鋼と 2.25Cr-1Mo 鋼板材の場合は、疲労損傷比は両者で大差無いものの、クリープ損傷比の幅が両者で大幅に異なっている。いずれの場合でも、クリープ損傷比のパラツキは大きいことから、設計上かなりの余裕を見込む必要があると考えられる。

Fig. 12 ~ Fig. 14 に、クリープ疲労曲線上のある設計点に対応するクリープ疲労特性ベースの 90% および 99%

Fig. 7 Low cycle properties of ferritic steels (from NIMS data sheet).

Fig. 8 Log-normal distribution of low cycle fatigue life ratio.

Fig. 9 Comparison of confidence limit contours of two dimensional log-normal distribution for creep-fatigue properties and pure creep/pure fatigue properties of 1Cr-1Mo-0.25V steel forging (from NIMS data).

Fig. 10 Comparison of confidence limit contours of two dimensional log-normal distribution for creep-fatigue properties and pure creep/pure fatigue properties of 12Cr-1Mo-1W-0.3V steel bar (from NIMS data).

Fig. 11 Comparison of confidence limit contours of two dimensional log-normal distribution for creep-fatigue properties and pure creep/pure fatigue properties of 2.25Cr-1Mo steel plate (from NIMS data).

による熱弾性解析が有用である。熱疲労評価に必要なひずみ範囲は、弾性熱応力解析結果をベースとした簡易弾塑性解析法¹¹⁾により計算することができる。このようにして得られた定常運転時の応力と起動停止間のひずみ範囲を、使用最高温度に対して作成されたクリープ疲労信頼性設計線図にプロットする。このプロット点の右上にドット領域で示した部分が許容される領域であり、想定される平均的な年間起動停止回数と年間運転時間から材料ごとに推定される当損傷比経路 ($\phi_f/\phi_c = \text{const.}$) とクリープ疲労限界損傷中央線の交点 (図中の○印) に対して信頼区間下限点 (図中の⊕印) をとり、この下限点が許容領域に含まれる材料を選択する。このとき同時に設計寸法が決定される。もし条件を満たす材料がない場合には、初期形状を修正し、応力とひずみ範囲のレベルを低減して許容範囲に収めるか、あるいは、材料のクリープ疲労限界損傷線の統計的下限における応力とひずみ範囲の値を指定して対応する形状寸法を探索する。このようにすれば、構造形状寸法と材料の初期設定を同時に行うことができ、設計の初期段階で適切な判断を行うことができる。

Fig. 16 An example of the basic procedure for design and material selection of high temperature components under creep-fatigue condition.

4 結 言

高温機器の設計において、クリープ疲労重畳条件下での材料選択が構造設計と同時にできるようにした信頼性設計線図を提案した。ただし、本研究で得られた信頼区間は極めて幅が広いことから、実際の設計に適用するためにはこの区間の幅を狭めていく必要があると考えられる。そのために、本研究で対象としたクリープ疲労損傷評価モデル以外のモデルについても信頼性設計手法の検討を進めていく必要がある。また、信頼性設計手法の観点からのクリープ疲労に関するデータ蓄積はこれまでほとんど行われていないことから、さらなる実験的研究によるデータの集積も必要である。

参 考 文 献

- 1) M. F. Ashby, "Material Selection in Mechanical Design", (1992) Pergamon Press.
- 2) K. Fujiyama, T. Shima, T. Muraoka and Y. Mizuno, "The statistical material selection and structural design maps for high temperature components", Proceedings of PVP2007, ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, CD-ROM, PVP2007-26474, pp.1-8 (2007).
- 3) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. III, Div.1-Subsection NH (2001) ASME.
- 4) G. P. Wadsworth and J. G. Bryan, "Applications of Probability and Random Variables", Second Edition, pp.229-234 (1974) McGraw-Hill.
- 5) NIMS Creep Data Sheet No.11B (1997) National Institute for Material Science.
- 6) NIMS Creep Data Sheet No.9B (1990) National Institute for Material Science.
- 7) NIMS Creep Data Sheet No.10B (1998) National Institute for Material Science.
- 8) NIMS Fatigue Data Sheet No.62 (1989) National Institute for Material Science.
- 9) NIMS Fatigue Data Sheet No.58 (1987) National Institute for Material Science.
- 10) NIMS Creep Data Sheet No.68 (1991) National Institute for Material Science.
- 11) D. C. Gonyea, "Method for low-cycle fatigue design including biaxial stress and notch effects", Fatigue at Elevated Temperatures, ASTM STP 520, pp.678-687 (1973) American Society for Testing and Materials.