

Q

オーステナイト系ステンレス鋼の設計疲労線図は、 10^6 回を超えると 3 種類の線図を使用している考え方を教えてください。

参照 QNo.: FC-04、FC-05

A

日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格⁽¹⁾の「図 添付 4-2-2(1) オーステナイト系ステンレス鋼および高ニッケル合金の設計疲労線図」では、 10^6 回を超えると、溶接継手からの距離(つまり溶接残留応力の影響)と解析方法により 3 種類の線図を使い分ける必要がある。

図1の設計疲労線図に示すように、許容繰返し回数が 10^6 回から 10^{11} 回の範囲で、繰返しピーク応力強さの振幅の大きい順に A 線図、B 線図および C 線図の 3 種類の線図が定義されている⁽¹⁾。曲線の使い分けを図2に示す⁽¹⁾。A 線図は、許容繰返し回数が 10^6 回までの線図(オリジナルの Langer 式)を延長したものであり、ひずみ制御疲労試験データに基づき設定された線図であり⁽²⁾、ASME 規格 Section III⁽³⁾では、弾塑性解析の場合にも用いることができるとしている。B 線図は、A 線図の 10^6 回疲労強度、荷重制御疲労試験データの 10^8 回疲労強度の平均値の $1/2$ (設計係数としての 2 を考慮)およびこの点から傾きを A 線図の傾きの 2 倍として延長して得られた 10^{11} 回疲労強度の 3 点から設定された。C 線図は、B 線図に対して $S_u = 648 \text{ MPa}$, $S_y = 303 \text{ MPa}$ として修正 Goodman 式により平均応力補正をして設定された。

ここで、 (P_L+P_b+Q) 範囲に対する制限の 188 MPa は、荷重制御疲労試験に基づく C 線図の 10^{11} 回疲労強度(94 MPa)に対して、応力強さの範囲で規定するため、その 2 倍とした値である。参考文献(2)および ASME 規格 Section III では、二次応力 Q には熱応力の曲げ成分を含めない(以降、 Q^* とする)とされている。したがって、 (P_L+P_b+Q) 範囲は一次応力的な性質を持ち、例えば、 $(P_L+P_b+Q^*)$ が $3S_m$ を超える場合はラチェットを生じる(塑性ひずみが進行する)と解釈して、簡易弾塑性解析は適用できないとしている。この $(P_L+P_b+Q^*)$ 範囲をひずみ制御疲労試験データベースか荷重制御疲労試験データベースかの判定に用いており、 $(P_L+P_b+Q^*)$ 範囲が荷重制御疲労試験データに基づく 188 MPa を下回れば、ひずみ制御疲労試験データに基づく A 線図を使用してよいとしている。したがって、A 線図は負荷がひずみ制御である場合に使用できる。負荷が荷重制御の場合は、応力側に平均応力補正をしていれば B 線図、していなければ C 線図を使用する。

日本機械学会の設計・建設規格では、上記の Q に対して熱応力の曲げ成分を含めないという注記はなく、解析で得られた二次応力を用いる必要がある。国内で、オーステナイト系ステンレス鋼に対する 10^6 回以上の設計疲労線図の使用を始めて取り込んだのは、通商産業省告示第 501 号「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」(以降、告示 501 号という)に対する「質疑応答集」の昭和 63 年改訂版である。この質疑応答集の 2-46 設計疲れ線図として、「機械振動や流体関連振動のような高サイクル疲労の解析に使用する適当な設計疲れ線図はどのようなものがあるか。」という質問に対する回答として、ASME 規格 Section III の 10^6 回以上の 3 種類の設計疲労線図を取り込んだ。その内容は、図2のフロー図と同じである(単位換算、 $19.1 \text{ kg/mm}^2 \rightarrow 188 \text{ MPa}$)。その後、告示 501 号には平成 6 年改正の際にこの質疑応答の内容が取り込まれ、日本機械学会の設計・

建設規格では、初版(2001年版)の際に告示 501 号の設計疲労線図を取り込み、現在もそのフロ一図を用いている。したがって、質疑応答集の昭和 63 年改訂版で、Q に対して熱応力の曲げ成分を含めないという注記が取り込まれなかったため、現在もそのままの状態となっている。また、Q に対して熱応力の曲げ成分を含めた場合の方が、保守側になる。

なお、材料には溶接継手の残留応力だけでなく、材料の製造時、機器の製作時に残留応力を発生する可能性があり、残留応力の値を設計時点で設定することは困難である。図2では、 (P_L+P_b+Q) 範囲が 188MPa 以下の場合には B 線図を使用してよいとしているが、その場合に平均応力補正を行う必要がある。また、平均応力がある場合の変動荷重の取扱いは必ずしも明確ではない。これらを踏まえ、一般的には C 線図が用いられる。

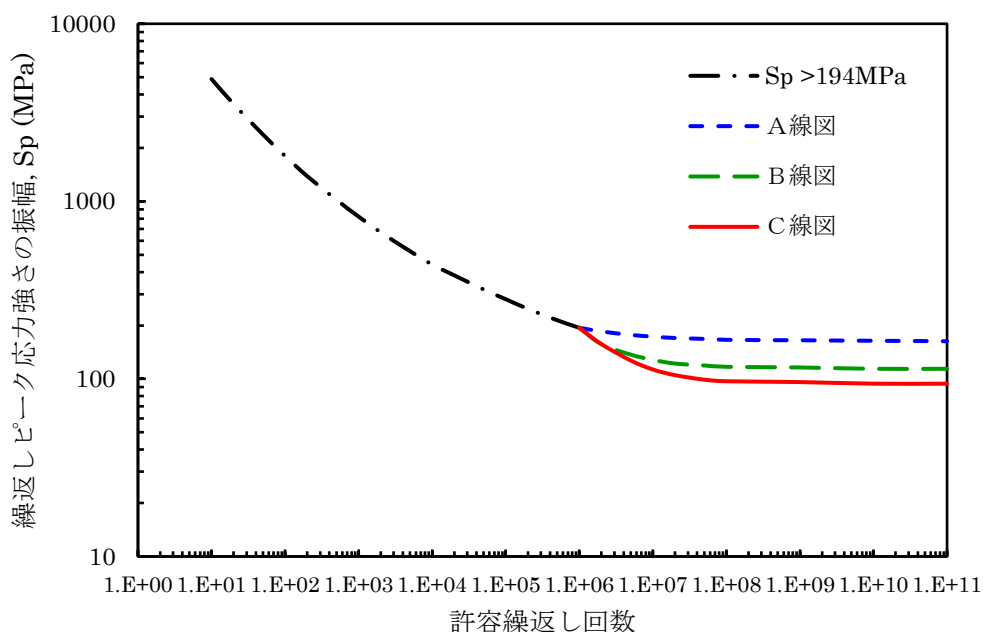
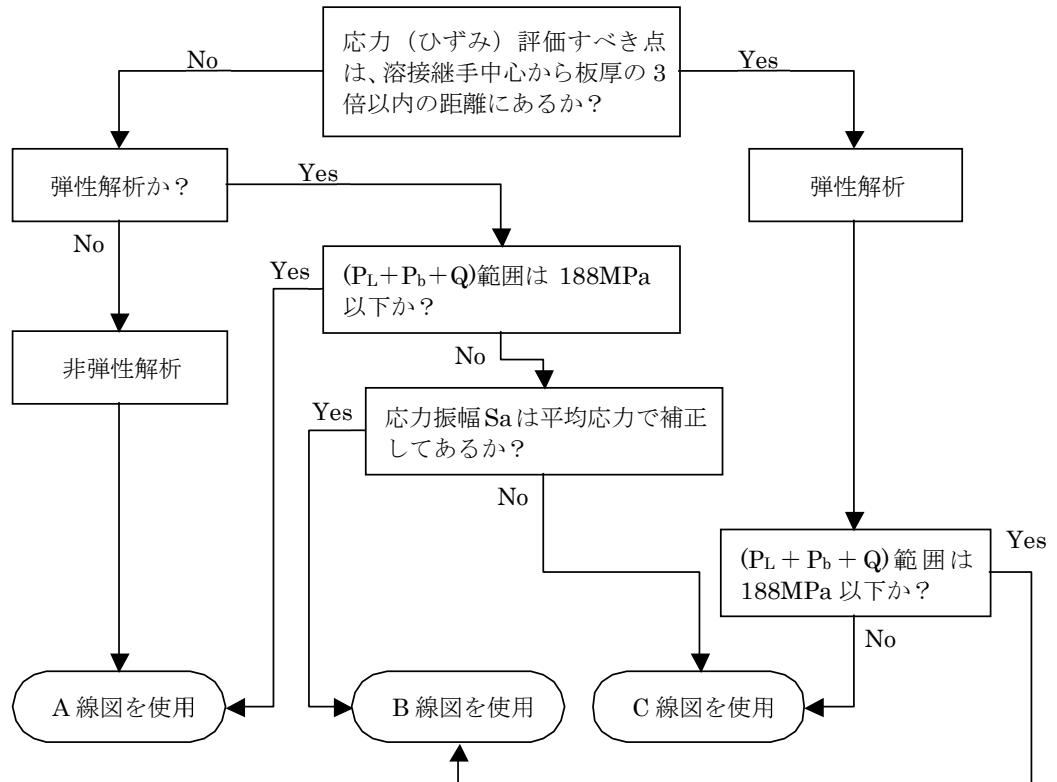


図1 オーステナイト系ステンレス鋼の設計・建設規格における設計疲労線図⁽¹⁾



(注) P_L :一次局部膜応力, P_b :一次曲げ応力, Q :二次応力

図2 繰返しピーク応力強さが 194MPa 以下の場合におけるオーステナイト系ステンレス鋼の設計疲労線図 曲線 A, B, C の使い分け⁽¹⁾

[参考文献]

- (1) 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 第 I 編 軽水炉規格, JSME S NC1, 日本機械学会, (2016).
- (2) Manjoine, M. J., et al., 'Proposed Design Criteria for High Cycle Fatigue of Austenitic Stainless Steel', ASME International Conference on Advances in Life Prediction Methods, ASME, (1983).
- (3) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Mandatory Appendix I, (1983 Winter Addenda)