

非弾性解析モデルの改良と実用高速炉用構造設計基準への導入

背景

現在、高速炉プラントと関連する核燃料サイクルの実用化を目指した検討が幅広く実施されているが、このなかでは安全性確保とともにプラント建設コストの削減が重要な課題となっている。全体的な建設コスト削減に大きく寄与するものとして、機器の小型化や簡素化が強く指向されているが、このために発生応力が増大し、従来の構造設計基準では規定を満足できない領域が発生している。このため、過剰な裕度を排しつつも、実負荷条件下での機器の健全性を適確に評価しうる非弾性解析ベースの設計技術の実用化が強く望まれている。

目的

実負荷条件を見据えた上で、高速炉用代表的構造材料である改良 SUS316 鋼 (316FR 鋼) を対象に様々な条件下の変形特性を十分な精度で予測しうるよう、当所開発の既存の非弾性解析モデルを改良するとともに、保守性の確保に留意した設計評価用モデルを構築する。

主な成果

1. 非弾性解析モデルの改良

当所開発の非弾性解析モデルは非線形硬化則を採用しており、一般の有限要素コードで利用できる古典的なモデルに比べると格段に良い精度で繰返し荷重下での金属材料の変形挙動を表現することができるが、非対称波形状など、負荷条件によっては実挙動との間に満足すべき一致が得られないことが明らかとなってきた。設計評価に適用するためにはこれを改善しておくことが必要であるため、精度低下原因の分析と改良策の検討を進めてきた。この結果、従来モデルの長所を維持しつつ、変形の非対称性や温度変動などを含む幅広い負荷条件に対して満足しうる精度を示すモデルを構築することに成功した(図 1、図 2)。

2. 設計用モデルの構築

構造設計では、材料特性の統計的変動を適切に考慮することが肝要である。このため、炉容器の設計で重要な累積変形量を保守的に推定するという観点から上記モデルの定数を見直し、既存のデータ回帰式に基づいて材料特性の下限を与える設計用モデルを構築した(図 3、図 4)。これを従来のクリープ変形解析モデルと合わせて、実用高速炉用構造設計方針(案)付録の非弾性解析ガイドラインとしてとりまとめた。

3. 有限要素解析への適用

様々な機器に対する非弾性解析が実施できるよう、豊富な機能を備えた 2 種の汎用有限要素プログラム (MSC.MARC 及び ABAQUS) 用のユーザーサブルーチンを開発した。これらを炉容器のナトリウム液面近傍を模擬した熱ラチェット試験に適用したところ、改良モデルによって予測された変形量は試験結果と良好に一致し、設計用モデルは適度に保守的な予測を与えるなど、これらの妥当性が確認された(図 5)。

本研究は、経産省プロジェクトの一部として、日本原子力発電株式会社からの受託研究として実施した。

今後の展開

近年、316FR 鋼に替わって一部の構造に使用されることが検討されている高クロム系フェライト鋼に対しても同様な非弾性解析モデルを整備し、損傷評価法と合わせて構造健全性評価法の整備を図っていく。

主 担 当 者 材料科学研究所 構造材料評価領域 上席研究員 高橋 由紀夫

関連報告書 Y. Takahashi et al., "Improvement of Inelastic Constitutive Model for Austenitic Stainless Steel for Design Use", 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, August 7-12, 2005

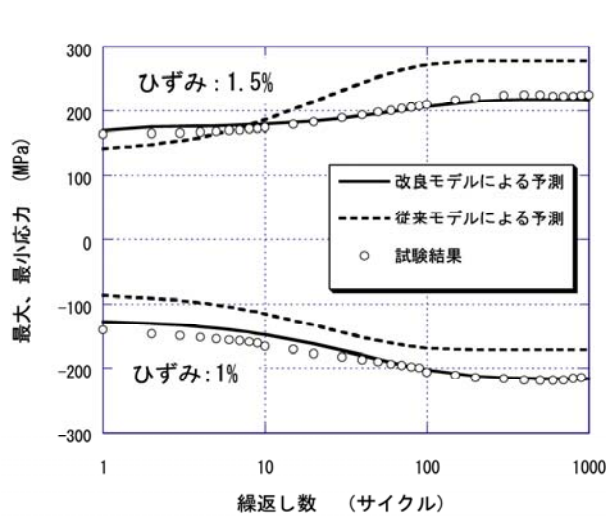


図1 非対称疲労試験に対する解析と試験の比較

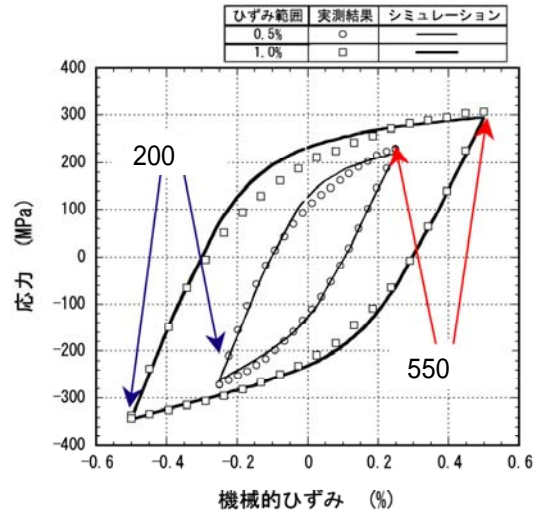


図2 熱疲労試験に対する解析と試験の比較

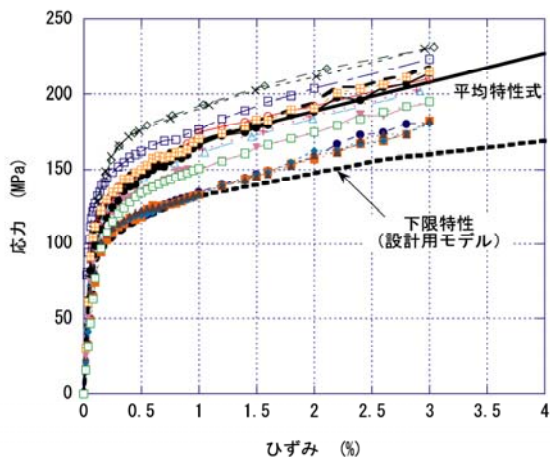


図3 単調引張特性データと設計用モデルの比較

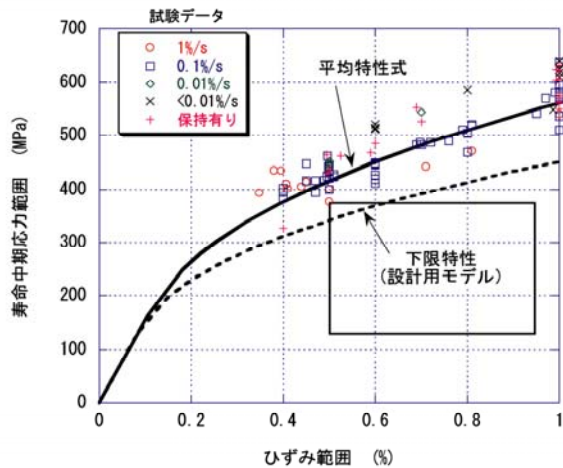
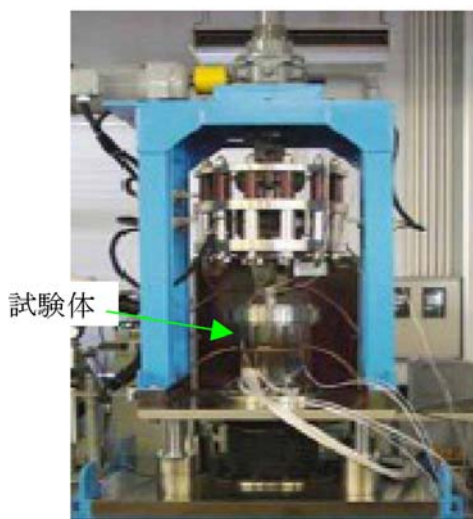
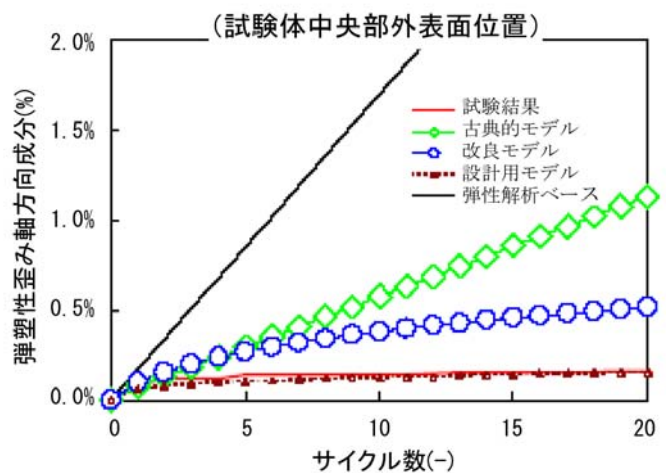


図4 繰返し変形データと設計用モデルの比較



(a) 熱ラチェット試験装置



(b) サイクル数と累積変形量の関係

図5 熱ラチェット試験に対する試験結果と解析結果の比較