

曲がり管の崩壊挙動に関する検討

（財）電力中央研究所 正会員 ○酒井 理哉
正会員 山本 広祐
正会員 萩原 豊

1. はじめに

高速炉機器の構造設計においては過大な熱応力を回避しつつ耐震安全性を確保するために、弾塑性挙動を考慮した合理的な耐震設計手法を整備する必要がある。高速炉の主要な機器構造としては配管が挙げられるが、薄肉な配管の地震時の弾塑性挙動についての研究例は極めて少ない。このため本研究では、高速炉1次系配管を想定した配管モデルについて、地震力による動的な荷重が作用した場合の弾塑性挙動を把握することを目的とする。

本報告では、90°曲がり管モデルの面内方向動的曲げ試験および、FEMを用いた試験シミュレーション解析を行い、試験と数値解析結果を比較し、崩壊荷重、荷重変位関係、局所ひずみの累積などの崩壊挙動を解明する。

2. 90°曲がり管モデルの振動台加振試験

2.1 試験の概要

試験体を含めた試験装置の概要をFig.1に示す。本試験は曲がり管試験体の一端を支持し、他端には重錘（5014kg）を負荷して、単純な非線形の一質点系を構成し、これを振動台で加振することにより実施した。配管要素試験体は、ステンレス製の曲がり管部（SUS304 10BSch 5S 90°ショートエルボ）、直管部（SUS304 10BSch 5S 直管）および両端部フランジから構成される。直管部の長さは、フランジの拘束がエルボに大きな影響を及ぼさないよう管径の2.5倍とした。試験体は1体である。

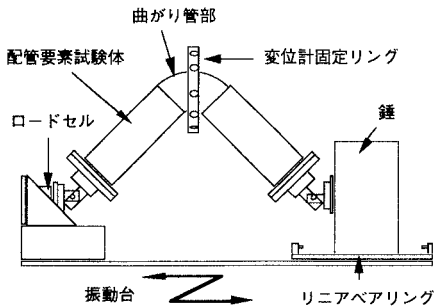


Fig.1: Test Apparatus

試験は、微小加振から段階的に入力レベルを上げていく漸増加振試験（D30～D530）を行い、加振レベルによる応答特性の変化を調べた。加振波は、FBR原子炉建屋における、原子炉容器据え付けレベルの地震動として計算されたENVELOPE波を使用した。

2.2 試験結果

Figure 2に代表的な加振ケースでの錘変位とロードセ

ルの反力の関係を示す。曲がり管は面内曲げの閉方向において最大荷重に達し、曲げ崩壊に至った。本試験で得られた崩壊荷重を既往の研究例、及び大坪ら^[1]による数値解析に基づく簡易式と比較して、Fig.3に示す。本試験では最大荷重発生前に著しい荷重変位履歴を受けているにも関わらず、面内曲げ崩壊荷重は静的崩壊荷重と同等以上であり、崩壊荷重については動的効果は特に認められない。

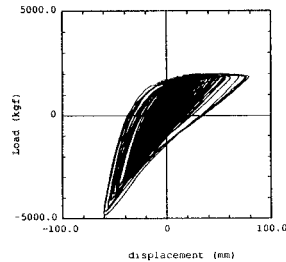


Fig.2: Load-displacement hysteretic

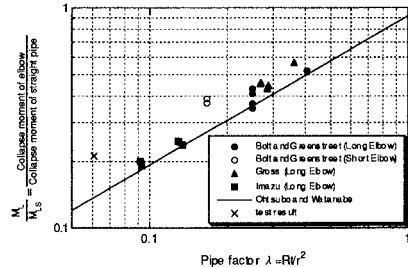


Fig.3: Bending strength of elbows

3. 数値シミュレーション解析

3.1 解析条件

試験シミュレーション解析では汎用有限要素解析コードABAQUSを用いて、弾塑性大変形解析を行った。試験は漸増加振試験であるため動的な弾塑性大変形解析が困難であることから、ここでは一定変位サイクル負荷による静的繰り返し荷重下における解析を行った。要素分割はシェル要素（S8R5）を用い、対称性を考慮して1/4モデルを用いた。材料物性値は材料試験結果に則して、Fig.4に示す相当応力-相当塑性ひずみ関係を用いた。載荷条件は単調載荷時のエルボの面内曲げの閉方向の最大荷重点変位 δ_{cr} について、 $\pm \delta_{cr}$ の1サイクルの繰り返し載荷解析を行った。

3.2 解析結果

解析より得られた、錘の変位とロードセルの反力による荷重-変位関係をFig.5に示す。初期剛性、曲がり

管の開側の最大荷重は試験結果とほぼ一致した。初期荷重方向に関しては、ケース1とケース2で、開側の荷重変位の経路に多少差が生じたものの、閉側の荷重変位曲線の形や最大荷重はほぼ一致した。

最大荷重発生点付近での曲がり管中央断面の変形図及び周方向ひずみ分布図をFig. 6に示す。同図より、エルボ閉側に荷重が作用する時に、エルボ横腹部のやや下側が膨らむ変形が現れ、変形が局所化して尖った形に成長していくことが判る。ひずみ分布についても同様に周方向ひずみがエルボの横腹部の軸方向に筋状に局所集中する傾向を示した。この周方向ひずみの集中部は、試験で亀裂が発生した箇所と一致している。

Figure 7にケース1におけるエルボ断面90°方向における表面の周方向ひずみ・軸方向ひずみの履歴を荷重変位に対して示す。同図によれば、解析におけるひずみの範囲は同程度の最大変位を示した試験ケースD450におけるひずみの範囲（周方向ひずみ2.2%、軸方向ひずみ0.9%）とほぼ同レベルとなった。

4. 考察

解析による崩壊荷重は試験で得られた値よりわずかに小さく、試験値の91%であった。解析誤差の主な原因は、解析においてエルボ部の板厚に平均値を用いていること、エルボ部における製作時の加工硬化と熱処理の影響（材料試験片はエルボと同一条件で熱処理を行った母材より採取した）等が考えられる。また、本解析において荷重経路を変えた2つの荷重ループにおいて最大荷重が多少異なることから、試験における多数回の荷重-変位履歴による材料の硬化が試験と解析の間の崩壊荷重に影響している可能性も類推される。加工硬化の影響については、今後材料構成則にも配慮した動的解析により評価を行う必要がある。

以上のような精度向上の余地はあるものの、本解析は高い精度で崩壊荷重を求めることができたと言える。

一方、局部変形・局部ひずみについては、試験結果と整合した結果が得られている。特に最大ひずみの範囲がほぼ試験結果と一致する結果が得られたことから、今後さらに検証を重ねることにより、弾塑性解析によるひずみレベルの推定に基づいて、支配的破壊モードである疲労破壊に対して現実的な評価を行うことが可能になるものと期待される。

5. 結論

本研究では、曲がり管の面内曲げを対象として、振動台加振による動的耐荷力試験およびFEMモデルによる試験シミュレーション解析を行った。これらの結果を比較することにより、FEM解析コードの精度が確認され、試験から直接得られない局所ひずみのデータより曲がり管の崩壊挙動を詳細に把握することができた。

今後はこれらの結果をもとに弾塑性挙動を考慮した合理的な耐震設計法開発の検討²⁾³⁾を行っていく予定である。

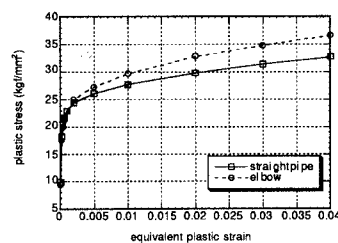


Fig.4: Stress-strain curve

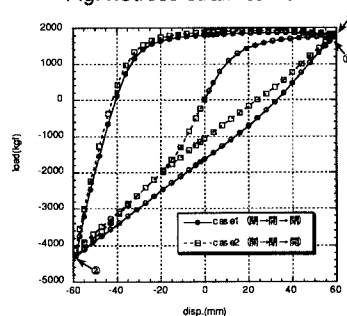


Fig.5: Load-displacement relation

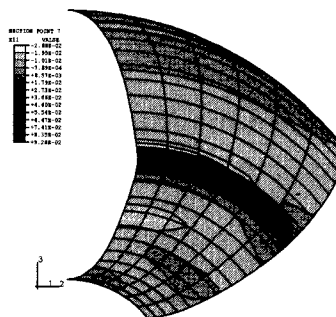


Fig.6: Hoop strain distribution

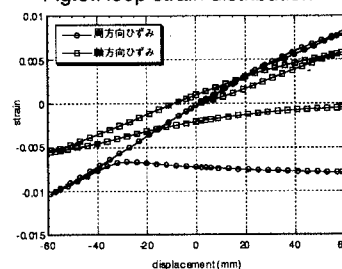


Fig.7: Strain-displacement relation

参考文献

- [1] Ohtsubo, H. et al.: "Elastic-Plastic Analysis of Pipe Bends Subjected to In-Plane Bending", Proc. of the 26th Japan National Congress for Appl. Mech., 1976, pp.103-117
- [2] 酒井, 萩原: "地震荷重下における配管要素の動的耐荷力特性に関する検討", 機械力学・計測制御講演論文集 [Vol. A], 1994, pp.437-440
- [3] Sakai, M. et al.: "Ultimate Strength of Thin-Walled Short Elbows during Earthquakes", The Third International Conference on Nuclear Engineering, 1995.4, Now Publishing