

I-A 59

曲がり管の動的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
齋藤 潔
正会員 萩原 豊

1. はじめに

現在、原子力施設の耐震設計には、応力照査に有限要素解析利用されているが、線形弾性解析に限っての利用であり、特別な場合を除いては弾塑性解析は設計評価に利用されない。しかし、比較的薄肉な構造を特徴とする高速増殖炉（FBR）などでは、構造設計合理化と安全性確保のために塑性挙動を適切に考慮する必要がある、将来的には弾塑性大変形解析を設計に利用していく必要があると考えられる。そのためには種々の機器構造について試験との比較により、大変形解析におけるモデル化手法の整備と解析精度の確証を進めていく必要がある。本件は、我が国のFBR実証炉の主要な構成機器であるトップエントリー配管を想定した曲がり管（薄肉ショートエルボ）について、振動台加振による試験およびFEMによる動的シミュレーション解析を実施し、比較評価したものである。

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図1に示す。本試験は薄肉ショートエルボ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。試験体は、ステンレス製のエルボ部（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。

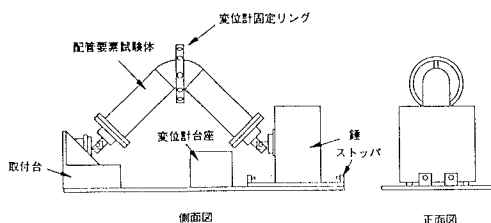


図1 試験装置の概要

加振波はFBR原子炉据え付けレベルの地震動としてとして算出された ENVELOPE 波を使用した。加振レベルは実機条件に対応したものではなく、1～3回の加振で疲労破壊を起こさせる観点から十分に大きなものとした。

2.2 試験結果

各加振ケースで計測されたロードセルの最大荷重、錘の最大応答変位を表3に示す。同レベルの加振を繰り返し行くと最大荷重は徐々に低下し、応答変位は増大していくのがわかる。また、代表的な加振ケースでのロードセルの荷重と錘の変位の関係を図2に示す。この図よりエルボ側面で最大荷重の発生とそれに続く荷重の低下がみられるが、応答変位は発散に至ることなく、応答は安定である。

表1 加振結果一覧

Specimen No.	Case	Input Acc. cm/s ²	Load kN	Disp. mm
C-500	C500-1	529.0	18.5	104.0
	C500-2	520.2	17.4	122.2
	C500-3*	541.6	16.9	184.3
C-600	C600-1	601.9	19.9	146.5
	C600-2*	659.3	18.3	201.5

*エルボ側面両側にき裂発生

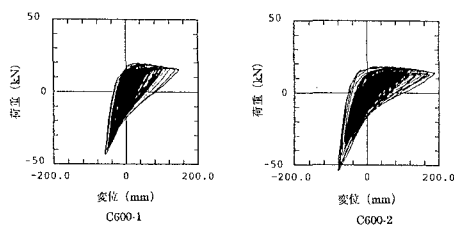


図2 荷重-変位関係

代表的な計測点（エルボ側面下側：頂点より120°位置）におけるひずみと錘の変位とのリサージュ図（図3）を示す。同図より累積ひずみが顕著に進行している様子がわかる。最終的なき裂発生箇所（エルボ両側面：頂点より90°位置付近）では、数%まで計測後ゲージが剥離または破断したため計測不能であっ

た。エルボの崩壊挙動を明らかにするためには、詳細なひずみ分布を把握するための解析を行う必要がある。

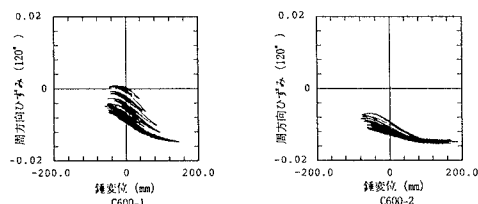


図-3 エルボ中央断面120°のひずみ履歴

3. 数値シミュレーション解析

3.1 解析方法

本解析では汎用有限要素解析コードABAQUSを用いて一般シェル要素によりエルボのモデル化を行い、地震波入力による動的応答解析を行った。解析では試験条件を正確に再現するようにモデル化を行い、試験結果との比較より解析コードの精度を確認し、詳細なエルボの崩壊挙動を調べた。モデル化はシェル要素(S8R5)を用い、対称性を考慮して、1/2モデルでの要素分割を行った。材料物性値は材料試験結果に即して、図4に示す相当応力-相当塑性ひずみ関係を用いた。材料硬化則は等方硬化を与えた。

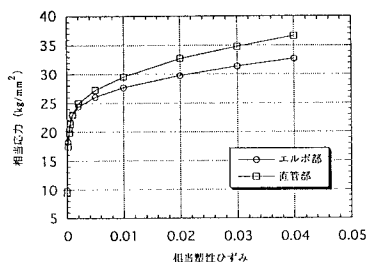


図4 応力-ひずみ関係

3.2 解析結果

解析結果一覧を表2に、ロードセルの荷重と錘の変位の関係を図5に示す。試験結果と比較して、最大変位はやや小さな値となったものの、基本的な履歴特性はよく再現されている。

主要な計測点（エルボ側面下側：頂点より120°位置）に対応するひずみと錘変位とのリサージュ図を図6に示す。この図から顕著な累積ひずみの進展が認められ、エルボ側面に最終的に生じる疲労き裂に影響しているものと推測できる。

表-2 解析結果一覧

Case	Input Acc. cm/sec ²	Load kN	Disp. mm
C500-1	529.0	20.0	64.3
C500-2	520.2	20.1	70.2
C500-3	541.6	20.2	77.5
C600-1	601.9	21.0	86.2
C600-2	659.3	21.3	86.6

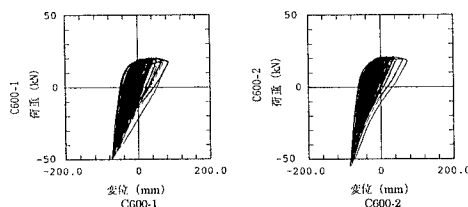


図-5 荷重-変位関係（解析結果）

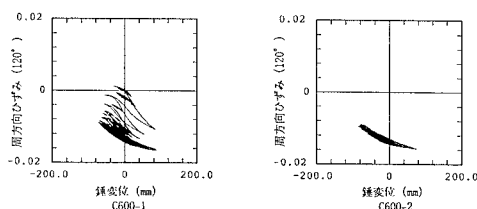


図-6 エルボ中央断面120°のひずみ履歴（解析結果）

解析精度は、最大荷重、ひずみに関して良い精度であると言えるが、錘の最大応答がやや小さな結果となった。誤差の原因としては、摩擦力や減衰の評価の誤差、材料構成則、板厚のモデル化の単純化などが考えられる。特に材料構成則については、本解析では単純な等方硬化を用いており、解析精度の向上のためにステンレスの混合硬化等の検討は大きな課題である。

4. 結論

本研究では、曲がり管の面内曲げを対象として、振動台加振試験およびFEMモデルによる動的シミュレーション解析を行った。この結果、FEM解析コードの精度が確認され、局部ひずみの累積などのエルボの詳細な崩壊挙動がわかった。今後はこれらの結果を用いて、エルボの最終的な破壊モードである低サイクル疲労破壊の評価を行う予定である。

【参考文献】

酒井, 山本, 萩原: 曲がり管の崩壊挙動に関する検討, 第51回土木学会年次学術講演会, 1-A, 1995.9, pp.142-143