

配管系の弾塑性解析手法の検討（その1）

Investigation on Method of Elasto-plastic Analysis for Piping System (No.1)

MHI NS エンジ	小島 信之	Nobuyuki KOJIMA
MHI NS エンジ	蒲谷 拓郎	Takuro KABAYA
MHI NS エンジ	荒井 雅史	Masashi ARAI
MHI NS エンジ	廣内 悟	Satoru HIROUCHI
MHI NS エンジ	板東 雅嗣	Masatsugu BANDO

This report proposes an elasto-plastic analysis method to be used for practical aseismic designing of nuclear piping system made of carbon steel. This elasto-plastic analysis method is based on the elasto-plastic analysis method which has been decided by JSME. By using this analysis method, the test result has been reproduced with sufficient accuracy for the strain range used as the intensity evaluation index of carbon steel piping. Furthermore, fatigue life has also been reproduced with sufficient accuracy by using the curve of fatigue of carbon steel piping upon which it decided in a cooperative study among electric power companies and manufacturers in Japan.

It seems that this analysis technology is applicable also to the preservation after an earthquake since this elasto-plastic analysis method can grasp the elasto-plastic behavior of carbon steel piping analytically.

Keywords: elasto-plastic analysis method, carbon steel piping, strain range, fatigue life, curve of fatigue

1. 緒言

日本では、2011年3月11日の東日本大震災以降、耐震設計地震動のレベルが増加し、耐震設計に弾塑性挙動を導入する動きが出てきた。このような背景から、日本機械学会 発電用設備規格委員会 原子力専門委員会 耐震許容応力検討タスク フェーズ2 では、ベンチマーク解析による配管系の弾塑性解析手法の検討が2014年から実施された。

本論文は、このベンチマーク解析の一環として実施してきた解析結果、及び策定した弾塑性解析手法^{[1][2]}についてまとめたものである。

従来の配管の弾塑性解析の研究^{[1]~[3]}は、試験結果の再現性を目的に、材料試験結果および形状計測結果に基づいて解析的な検討が行なわれてきたが、これらの手法は、実際の設計では使用できない。そこで、本検討では、実設計への適用を考慮し、極力規格・基準に規定された数値を使用し、安全側な評価が導き出せる配管系の弾塑性

して実施した。

2. 解析対象試験

ベンチマーク解析は、1996年度から実施している経年劣化を有する配管系の耐震安全性に関する検討の中^[6]で実施されたエルボ要素試験及び配管系振動試験を対象としている。本検討では、配管系振動試験を対象に解析検討を実施した。振動試験体の形状を図1に示す。配管系はエルボ部と直管部から構成されており、各エルボ部を図1の通りエルボ1、エルボ2、エルボ3とする。

この振動試験は、配管系の構成要素の中で脆弱であるエルボ部を破損させることを目的として実施された試験であり、配管系を共振させるために1850 Galの人工地震波が使用された。図2に地震波を示す。

連絡先：小島 信之、〒652-8585 兵庫県神戸市兵庫区
和田崎町一丁目1番1号、MHI-NS エンジニアリング、
E-mail: nobuyuki_kojima@nseng.mhi.co.jp

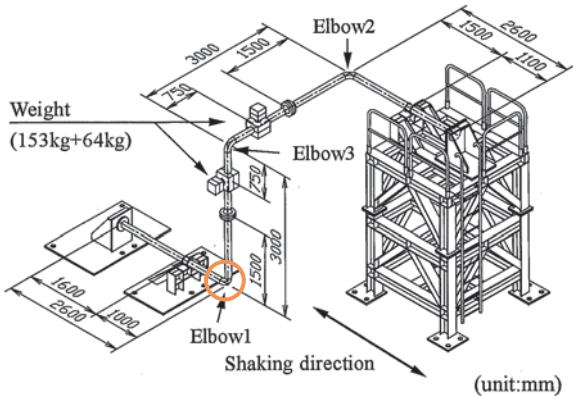


Fig.1 3-D piping model for piping system test

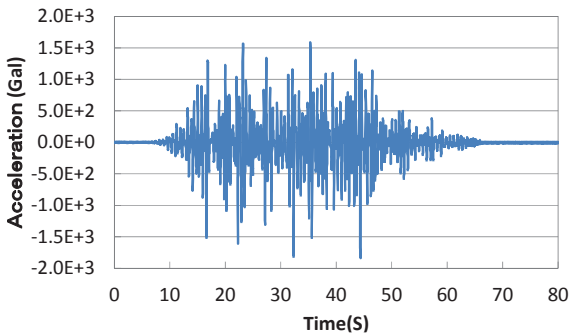


Fig.2 Seismic wave 1850Gal

3. 評価手順

弾塑性解析評価は図3に示す手順で実行した。各ステップの詳細は以降の章に示す。地震応答評価では、試験体全体の挙動を把握し、塑性変形を生じるエルボ両端での変位を求める。構造強度評価では、エルボ部を含む部分モデルを作成し、その両端に地震応答評価で得られた変位を入力し、相当塑性ひずみが最大となる部分でのひずみ履歴を求める。疲労寿命評価では、構造強度評価で得られたひずみ履歴からひずみ範囲を求め、配管が破損に至る加振回数を算出する。

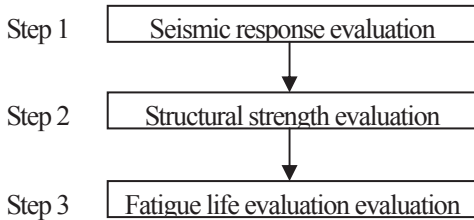


Fig.3 Evaluation flow

4. 解析条件

各ステップにおける共通の解析条件を表1に示す。地震波は図2を用いた。配管の種類、温度、内圧、入力地震波は試験と共通である。地震応答評価では直接積分時刻歴解析、構造強度評価では静解析を用いた。解析コードは汎用有限解析コードであるAbaqus6-13-1を用いた。

Table 1 Analysis condition

Type	Carbon steel pipes for high temperature service (STPT370)
Outside diameter	114.3 mm (100A)
Thickness	8.6 mm (sch80)
Temperature	25 °C
Internal pressure	10 MPa
Density	1.04E+4 kg/m ³

5. 地震応答評価

5.1 固有値解析

地震応答評価では、試験体(図1)を図4に示すようなはり要素とエルボ要素でモデル化した。

このモデルの弾性域での固有振動数を算出し、試験結果¹⁾と比較した。固有振動数の比較を表2に示す。表2より、解析結果と試験結果の固有振動数は概ね一致した。

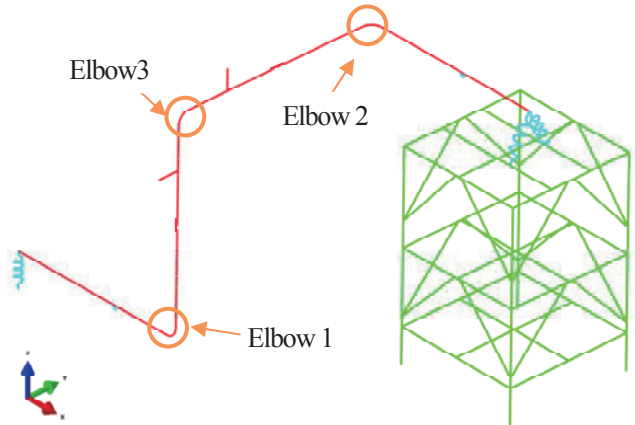


Fig.4 Beam element model

(Red: Pipe, Green: Frame, Blue: Support and anchor)

Table 2 Eigen value

	Eigen value (Hz)
Experiment	2.74
Analysis	2.72

5.2 弾塑性解析

弾塑性解析を実施するために材料特性を選定した。塑性域を考慮した材料特性を図5及び表3に示すが、弾塑性特性は二次勾配をヤング率の1/100として2直線近似したバイ・リニアモデルを採用した。なお、実設計への適用を考慮し、設計降伏点とヤング率はJSME設計・建設

規格を用いた。また、降伏点は設計降伏点の1.2倍とした。設計降伏点が降伏点として使用される場合、塑性変形は実際の塑性変形に比べてより早く発生し、解析結果は実際の地震動応答をシミュレートすることができない。そこで、設計降伏点の1.2倍の降伏点を用いた。硬化則はBauschinger効果を考慮するため、移動硬化則とした。減衰比の設定には、低振動数範囲と高振動数範囲を考慮するためRayleigh減衰を用いた。減衰比は配管設計用減衰の0.5%^[7]を用いた。

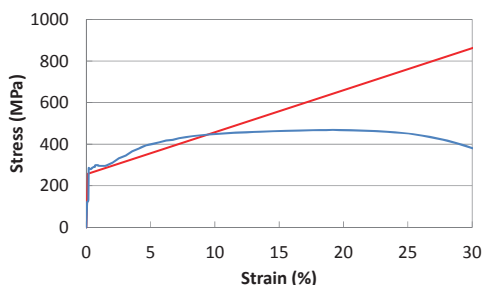


Fig.5 Stress-strain diagram

Table 3 Material property

Elasto-plastic property	Bi-linear
Hardening rule	Kinematic hardening rule
Young's modulus	202000 MPa
Second Gradient	2020 MPa (1/100 of young's modulus)
Yield point	258 MPa (1.2Sy)
Poisson ratio	0.3

図4の配管解析モデルに図2の地震波を入力した地震応答解析結果から、次項の構造強度評価の入力となるエルボの開閉変位については、エルボ1がエルボ2とエルボ3に比べ、大きな開閉変位を示しており、これは試験結果と一致している。エルボ1の開閉変位を図6に示す。

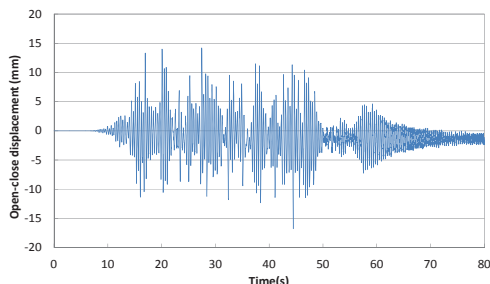


Fig.6 Elbow1 open-close displacement

6. 構造強度評価

6.1 ひずみ評価

構造強度評価では、塑性変形によりき裂が生じたエルボ1を図7のようなシェル要素でモデル化した。シェル要素は4節点完全積分シェル要素とした。材料特性は地震応答解析と同一である。地震応答解析で得られたエル

ボ1の変位時刻歴を、図7のエルボ両端に入力し、ひずみ分布を求め、き裂発生位置を特定した結果、ほぼ試験結果と同じ位置となった。

参考として、エルボ1の外面の相当塑性ひずみを図8に示す。試験では、内面からのき裂が貫通した結果となっており、エルボ1の内面に相当塑性ひずみ分布を表すと図9のようになった。図8と図9によれば、エルボ1の面内の相当塑性ひずみは、外面の相当塑性ひずみに比べ大きいことがわかった。

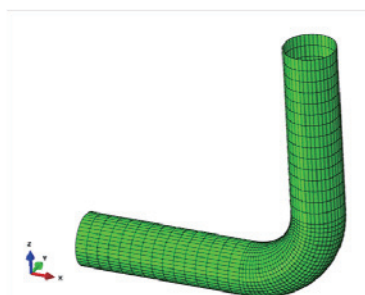


Fig.7 Elbow1 shell element model

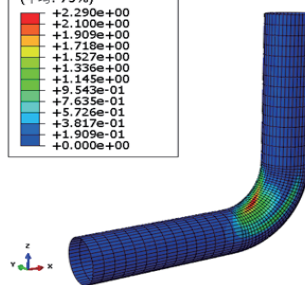
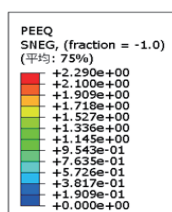


Fig.8 Elbow1 outer face equivalent plastic strain.

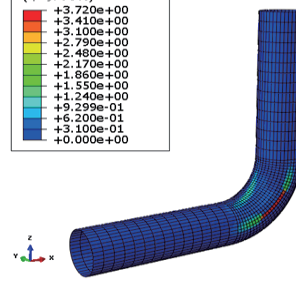
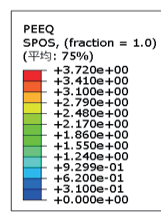


Fig.9 Elbow1 inner face equivalent plastic strain

6.2 最大塑性ひずみ

エルボ1面内の最大相当塑性ひずみが発生する箇所を図10(丸印箇所)及び図11に示す。図11は、断面A-Aでの最大相当塑性ひずみの分布を示す。図10及び図11より最大塑性ひずみはエルボの中央から3.1°、エルボ腹側から90°の配管脇部で発生した。最大相当塑性ひずみ発生箇所のひずみ履歴を図12に示すが、周方向ひずみは、軸方向ひずみと比べ大きいことが明らかで、試験結果を裏付ける結果と言える。

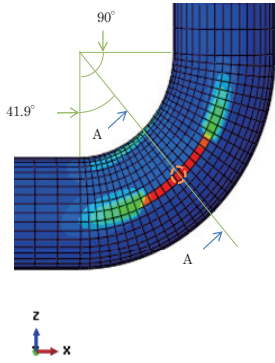


Fig.10 Maximum equivalent plastic strain point (Inner face)

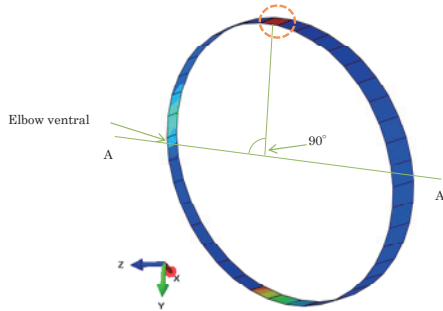


Fig.11 Maximum equivalent plastic strain point (Inner face) (Section A-A)

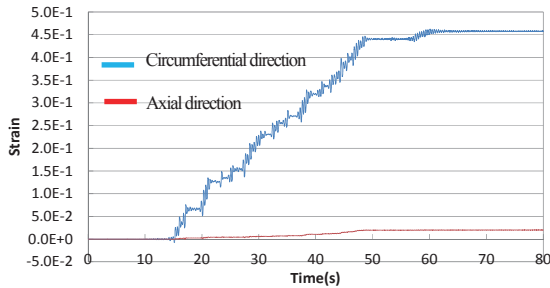


Fig.12 Strain history (Maximum equivalent plastic strain point)

7. 疲労寿命評価

7.1 ひずみ範囲算出

疲労寿命評価では、図 12 に示すひずみ履歴からひずみサイクル毎にひずみ範囲を求め、その結果を図 13 に示した。

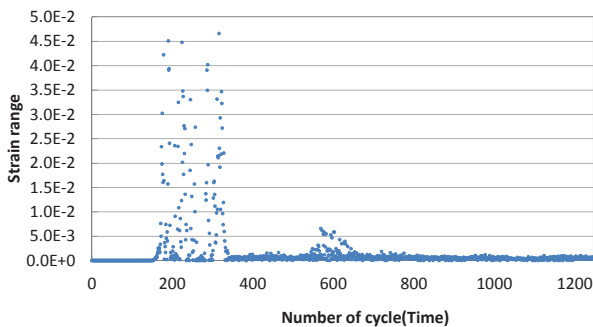


Fig.13 Strain range (Maximum equivalent plastic strain point)

7.2 累積疲労損傷係数算出

累積疲労損傷係数算出のため使用した疲労曲線を図 14 に示す^[8]。この曲線はこれまで国内で実施された既往研究の試験結果に基づき、統計処理を行い得られたものである。今回の評価では、緑色の曲線で平均値を示し、マイナー則により累積疲労損傷係数を算出した。マイナー則は以下の式で表される。

$$UF = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

ここで、 N_i は一定ひずみ範囲 ϵ_i と与えられたときの疲労寿命、 n_i は ϵ_i の繰り返し回数である。 (n_i/N_i) はひずみ範囲 ϵ_i による疲労損傷度を表す。

上記により累積疲労損傷係数を算出した結果、1850 Gal 一回の加振では 0.0744 で、14 回目の加振でエルボ 1 が破損する結果となり、試験結果と同じ結果を導き出すことが出来た。

また、使用した疲労曲線に裕度を持たせた試験結果平均 3σ の赤色の疲労曲線を使用すると、1850 Gal 一回の加振で累積疲労損傷係数は 0.451 であり、3 回目の加振でエルボ 1 が破損する結果となった。

これまでの既往研究の試験結果から算定した疲労曲線 (図 14 の赤線) は、試験結果を安全側に評価可能と言えるが、JSME S NC-1^[9]で規定されている設計疲労曲線は、さらに安全側評価となる。

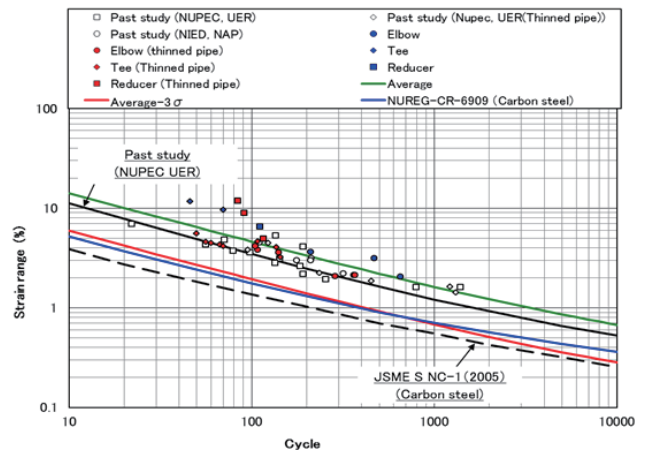


Fig.14 Fatigue life curve

8. 結言

日本機械学会 発電用設備規格委員会 原子力専門委員会 耐震許容応力検討タスクで策定した配管系の弾塑性解析評価手法は、同タスク フェーズ 2 の検討により、精度良く損傷部位を評価できることが確認された。また、

規格・基準に規定された数値（降伏点、ヤング率）を設計として評価した場合でも、既往の試験結果から設定した疲労曲線を用いれば安全側評価が可能であることが確認された。

この弾塑性解析評価手法は、炭素鋼配管の弾塑性挙動を解析的に把握することが可能であるので、この解析評価手法は、炭素鋼配管に生じる経年変化事象である減肉（EC（エロージョン・コロージョン）、全面腐食）を想定した場合の耐震安全性評価や、地震後の予防保全にも適用できると期待される。

参考文献

- [1] M. Morishita, A. Otani, T. Watakabe, T. Shibutani and M. Shiratori, 2017, “Seismic Qualification of Piping Systems by Detailed Inelastic Response Analysis PART 1- A Code case for Piping Seismic Evaluation Based on Detailed Inelastic Response Analysis”, PVP2017-65166.
- [2] A. Otani, T. Shibutani M. Morishita, I. Nakamura, T. Watakabe, and M. Shiratori, 2017, “Seismic Qualification of Piping Systems by Detailed Inelastic Response Analysis PART 2- A Guideline for Piping Seismic Inelastic Response Analysis”, PVP2017-65190.
- [3] Y. Namita, K. Suzuki, H. Abe, I. Ichihashi, M. Shiratori, K. Tai, K. Iwata and A. Nebu, 2003, “Seismic Proving Test of Eroded Piping (Status of Eroded Piping Component and System Test)”, PVP2003-2097, PVP-Vol. 466.
- [4] Satoshi Tsunoi, Akira Mikami, Izumi Nakamura, Akihito Otani, Masaki Shiratori, 2007, “Comparison of Failure Modes of Piping Systems with Wall Thinning Subjected to In-plane, Out-of-plane and Mixed Mode Bending under Seismic Load - Computational Approach”, PVP2007-26476.
- [5] Izumi Nakamura, Akihito Otani, Masaki Shiratori, 2007, “Comparison of Failure Modes of Piping Systems with Wall Thinning Subjected to In-plane, Out-of-plane and Mixed Mode Bending under Seismic Load - An Experimental Approach”, PVP2007-26497.
- [6] Izumi Nakamura, Akihito Otani, Masaki Shiratori, “Study on Fracture Mechanics of Eroded Pipes under Seismic Loading”, March 2007, Technical Note of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention No.306.
- [7] 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術規程（JEAC4601-2008）, 2008年
- [8] Masashi Arai, Nobuyuki Kojima, Takuro Kabaya, Satoru Hirouchi, Masatsugu Bando, “Investigation on Method of Elasto-plastic Analysis for Piping System”, PVP2016-63186.
- [9] 日本機械学会：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 NC1-2012）, 2012年

