



## 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	Non-Member
MHI NS エンジ	蒲谷 拓郎	Takuro KABAYA	Non-Member
MHI NS エンジ	荒井 雅史	Masashi ARAI	Non-Member
MHI NS エンジ	廣内 悟	Satoru HIROUCHI	Non-Member
MHI NS エンジ	板東 雅嗣	Masatsugu BANDO	Non-Member

This report describes an elasto-plastic analysis method which can be applied for the actual aseismic design of nuclear carbon steel piping systems. This analysis method follows the one developed by the related JSME tasks. Using this analysis method, the test result has been reproduced to the safe side for the strain range used as the intensity evaluation index of carbon steel piping. Furthermore, fatigue life has also been reproduced to the safe side 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 seismic integrity assessment for the preservation after an earthquake since this elasto-plastic analysis method can grasp the elasto-plastic behavior of carbon steel piping analytically.

In addition, this paper improves the content announced at the 15th academic lecture meetings [1].

**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2018年まで実施された。

本論文は、このベンチマーク解析において実施した解析結果、及び日本機械学会で策定した弾塑性解析手法[2][3]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[4]~[6]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われてきたが、これらの手法は、解析的検討なので、設計規格の値は使用されていない。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解析手法を検討した。なお、検討は炭素鋼配管を対象として実施した。

### 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[7]の中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Fig.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Fig.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、配管系を加振させるために最大振動加速度1850 Galの人工地震波が使用された。Fig.2に地震波を示す。

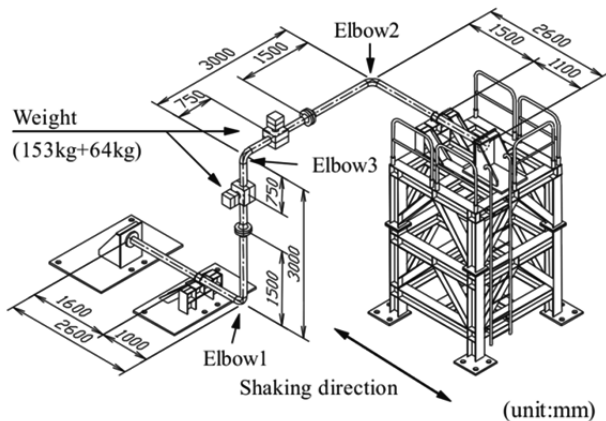


Fig. 1 3-D piping model for piping system test

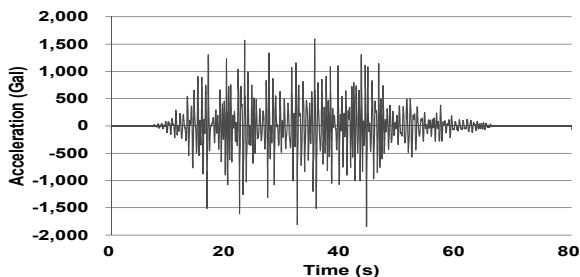


Fig. 2 Seismic wave with maximum acceleration of 1850 Gal

### 3. 評価手順

弾塑性解析評価は Fig. 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。

### 4. 解析条件

各ステップにおける共通の解析条件を Table 1 に示す。地震波は Fig. 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。密度は、配管の内部水を含めた等価質量を考慮した値である。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。

## 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 (Fig. 1) を Fig. 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、試験結果と比較した。固有振動数の比較を Table 2 に示す。Table 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。

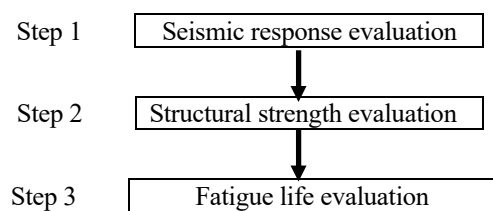


Fig. 3 Evaluation flow

Table 1 Analytic conditions for a pipe

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 <sup>3</sup> *

\* : This value is the equivalent density which is taken into consideration of the steel pipe and the inside water.

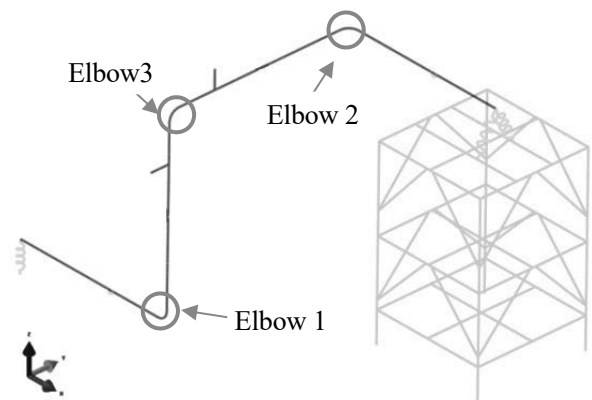


Fig. 4 Beam element model (Red: Pipe, Green: Frame, Blue: Support and anchor)

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 Fig. 5 及び Table 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 材料規格[8]にある値を用いた。また、降伏点は設計降伏点の 1.2 倍とした。理由としては、炭素鋼の降伏点の平均値が約 1.2 程度であり、基準地震動  $S_s$  に対する支持構造物の許容限界として降伏点の  $1.2S_y$  を使用しているからである。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%[9]を用いた。

Fig. 4 の配管解析モデルに Fig. 2 の地震波を入力した地震動応答解析結果から、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 Fig. 6 に示す。

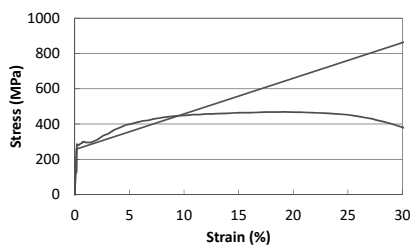


Fig. 5 Stress-strain diagram

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 (1.2 $S_y$ )
Poisson's ratio	0.3

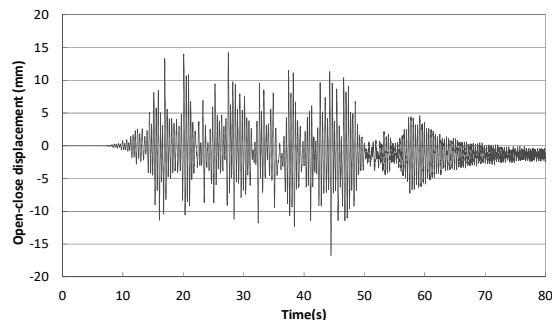


Fig.6 Elbow1 open-close displacement

## 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 Fig. 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。材料特性は地震動応答解析と同一である。地震動応答解析で得られたエルボ 1 の変位時刻歴を、Fig. 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 (Fig. 8 参照)。

参考として、エルボ 1 の外面の相当塑性ひずみを Fig. 9 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 Fig. 10 のようになった。Fig. 9 と Fig. 10 によれば、エルボ 1 の内面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。

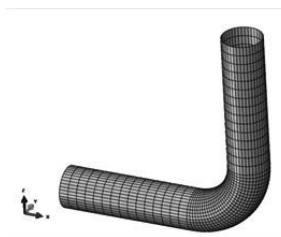


Fig. 7 Elbow1 shell element model



Fig. 8 Location of fatigue crack in Elbow1



Fig. 9 Elbow1 outer face equivalent plastic strain

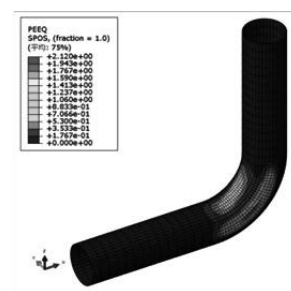


Fig. 10 Elbow1 inner face equivalent plastic strain

## 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 Fig. 11 (丸印箇所) 及び Fig. 12 に示す。Fig. 11 は、断面 A-A での最大相当塑性ひずみの分布を示す。Fig. 11 及び Fig. 12 より最大相当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は、振動試験結果と同じであり、周方向ひずみは軸方向ひずみと比べ大きいという Fig. 13 に示すひずみ履歴の結果も振動試験結果と同様である。

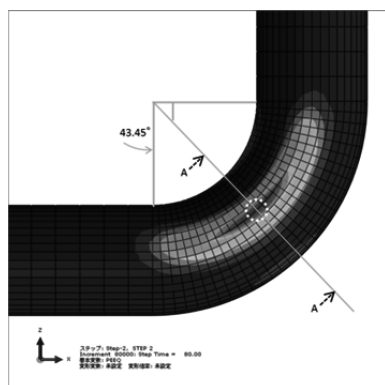


Fig. 11 Maximum equivalent plastic strain point (Inner face)

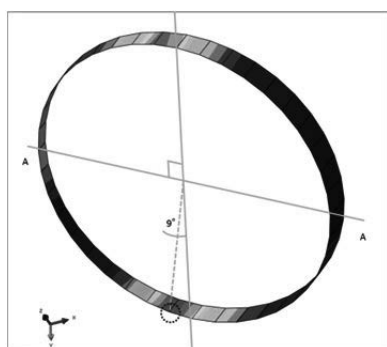


Fig. 12 Maximum equivalent plastic strain point (Inner face) (Section A-A)

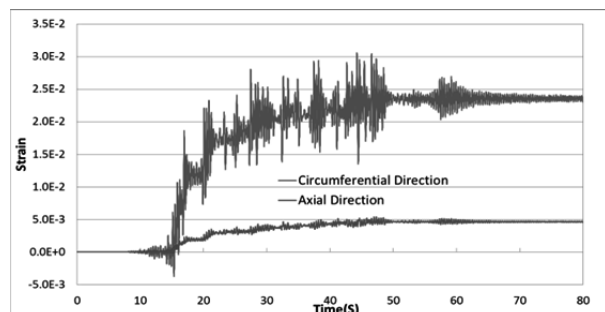


Fig. 13 Strain history (Maximum equivalent plastic strain point)

## 7. 疲労寿命評価

### 7.1 ひずみ範囲算出

疲労寿命評価では、Fig. 13 に示すひずみ履歴から周方向ひずみの影響が支配的であるので、周方向ひずみを対象にひずみサイクル毎にひずみ範囲を求め、その結果を Fig. 14 に示した。

### 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 Fig. 15 に示す[10]。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。既往研究は、NUPEC の「配管系終局強度」、「減肉配管」及び防災科研等において実施された配管要素の破壊試験である。

今回の評価では、日本機械学会で策定した弾塑性解析手法に基づき JSME S NC-1[11]の設計疲労曲線を用いて、マイナー則により累積疲労損傷係数を算出した。マイナー則による累積した疲労損傷 UF 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  $\epsilon_i$  を与えられたときの疲労寿命、 $n_i$  は  $\epsilon_i$  の繰り返し回数である。 $(n_i/N_i)$  はひずみ範囲  $\epsilon_i$  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 0.183 で、6 回目の加振でエルボ 1 が破損する結果となり、試験結果では 14 回目の加振でエルボ 1 が破損していることから、日本機械学会で策定した弾塑性解析評価法は安全側な評価であることが分かる。

しかしながら、疲労評価の合理化のためには、疲労曲線に裕度を持たせた試験結果平均-3 $\sigma$  の赤色の疲労曲線を使用することが考えられる。こ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 0.101 であり、10 回目の加振でエルボ 1 が破損する結果となった。この結果から、この疲労曲線は、保守性を保持していることから、今後の合理化においてこの疲労曲線を使用することは一つの選択肢であると考えられる。

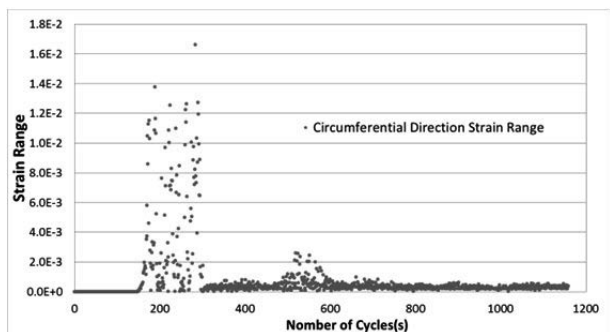


Fig. 14 Strain range (Maximum equivalent plastic strain point)

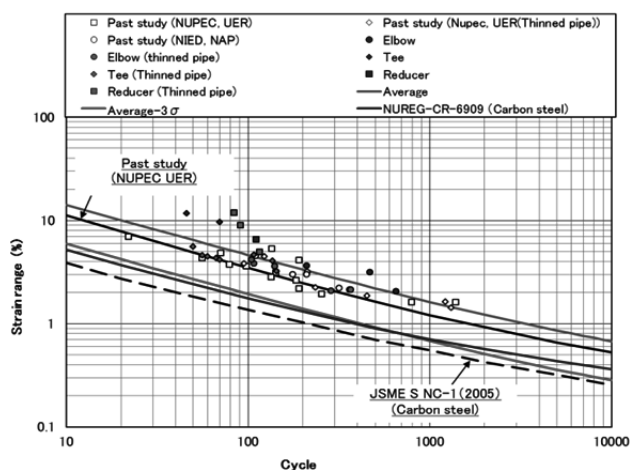


Fig. 15 Fatigue life curve

## 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 フェーズ 2 で検討及び策定された配管系の弾塑性解析評価手法は、安全側な評価できることが確認された。また、疲労評価の合理化のためには、既往研究の試験結果から設定した疲労曲線（疲労曲線に裕度を持たせた試験結果平均 $-3\sigma$ の赤色の疲労曲線）の使用が考えられ、この疲労曲線を用いても安全側な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] 小島 信之, 蒲谷 拓郎, 荒井 雅史, 廣内 悟, 板東雅嗣, 配管系の弾塑性解析手法の検討 (その1), 日本保全学会 第15回学術講演会要旨集, P227-231 (2018).
- [2] M. Morishita, A. Otani, T. Watakabe, T. Shibutani and M. Shiratori, “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 (2017).
- [3] A. Otani, T. Shibutani M. Morishita, I. Nakamura, T. Watakabe, and M. Shiratori, “Seismic Qualification of Piping Systems by Detailed Inelastic Response Analysis PART 2- A Guideline for Piping Seismic Inelastic Response Analysis”, PVP2017-65190 (2017).
- [4] Y. Namita, K. Suzuki, H. Abe, I. Ichihashi, M. Shiratori, K. Tai, K. Iwata and A. Nebu, “Seismic Proving Test of Eroded Piping (Status of Eroded Piping Component and System Test)”, PVP2003-2097, PVP-Vol. 466 (2003).
- [5] Satoshi Tsunoi, Akira Mikami, Izumi Nakamura, Akihito Otani, Masaki Shiratori, “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 (2007).
- [6] Izumi Nakamura, Akihito Otani, Masaki Shiratori, “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 (2007).
- [7] Izumi Nakamura, Akihito Otani, Masaki Shiratori, “Study on Fracture Mechanics of Eroded Pipes under Seismic Loading”, Technical Note of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention No.306, March 2007.
- [8] 日本機械学会：発電用原子力設備規格 材料規格（JSME S NJ1-2012）, 2012年.
- [9] 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術規程（JEAC4601-2008）, 2008年.

- [10] Masashi Arai, Nobuyuki Kojima, Takuro Kabaya, Satoru Hirouchi, Masatsugu Bando, “Investigation on Method of Elasto-plastic Analysis for Piping System”, PVP2016-63186 (2016).
- [11] 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.

(2019 年 3 月 29 日受理、2019 年 7 月 5 日採択)