

# 配管系の弾塑性解析手法の検討（その2）

## Investigation on Method of Elasto-plastic Analysis for Piping System (No.2)

MHI NS エンジ	板東 雅嗣	Masatsugu BANDO
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

This report proposes an elasto-plastic analysis method to be used for practical aseismic designing of nuclear piping system made of austenitic stainless 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 results of has been reproduced with sufficient accuracy for the strain range used as the intensity evaluation index of austenitic stainless steel piping. For the model 1 composed of an elbow, the maximum strain estimated by elasto-plastic analysis using the elasto-plastic characteristics of stainless steel material determined as proposed by the draft code case of JSME agreed well, but on the safe side, with the experiment. However, this is not the case for the model 2 composed of a tee: the maximum strain estimated using the same elasto-plastic characteristics was underestimated compared with the experiment. A possible cause of the underestimate that occurred in the model 2 is, according to the shape data of the tee, that the wall thickness of the tee is so large that its connection with the main and branch pipes has a large, step-like change in thickness, as opposed to the model that was designed without referencing the shape data. Although there is the subject of modeling of a tee, the elasto-plastic behavior of stainless steel piping can be grasped.

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 austenitic stainless steel piping analytically.

**Keywords:** elasto-plastic analysis method, austenitic stainless steel piping, strain range, elbow, tee

### 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<sup>[1][2]</sup>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解析手法を検討した。なお、検討はステンレス鋼配管を対象として実施した。

### 2. 解析対象試験

本検討における解析は、ステンレス配管系の耐震安全性に関する検討の中で実施されたエルボを含む配管系及びティを含む配管系の振動試験<sup>[6][7]</sup>を対象としている。この試験はJAEAにて実施されたものである。2つの振動試験体形状を図1、図2に示す。試験体1はエルボと直管か

ら構成されており、試験体2はティと直管から構成されている。試験体1と2の仕様を表1と2にそれぞれ示す。

これらの振動試験は、共振によってエルボ部及びティ部を破損させることを目的として実施された。使用した地震動を図3、図4に示す。

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よう検討した。

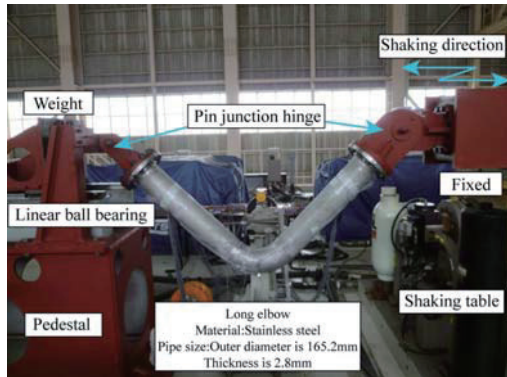


Fig.1 Piping model 1 for piping test

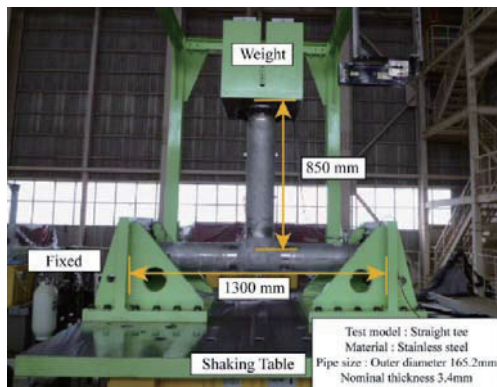


Fig.2 Piping model 2 for piping test

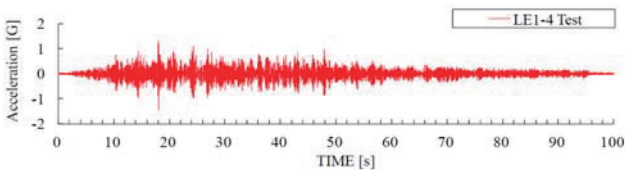


Fig.3 Seismic wave for model 1

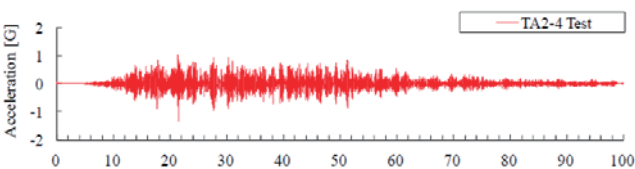


Fig.4 Seismic wave for model 2

Table 1 Specification of model 1

	Elbow	Straight pipe
Type	SUS304TP (Austenitic stainless steel)	
Size	150A.sch5S	
Temperature	20°C	
Internal Pressure	None	
Density	7.98g/cm <sup>3</sup>	

Table 2 Specification of model 2

	Tee	Main straight pipe	Branch straight pipe
Type	SUS304TP (Austenitic stainless steel)		
Size	150A.sch10S	150A.sch20S	150A.sch10S
	165.2 mm, 3.4 mm	165.2 mm, 5.0 mm	165.2 mm, 3.4 mm
Temperature	20°C		
Internal Pressure	22 kPa		
Density	7.93g/cm <sup>3</sup>		

### 3. 評価手順

炭素鋼配管の弾塑性解析評価は図5に示すように3ステップで実行したが、ステンレス鋼の破壊試験結果に関する新たな知見が無いため、Step2までの検討とした。各ステップの詳細は以降の章に示す。

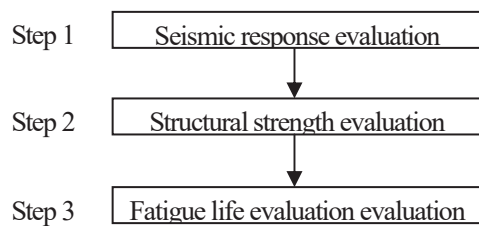


Fig.5 Evaluation flow

### 4. 地震応答解析

#### 4.1 固有値解析

地震応答解析では、試験体1と2は、シェル要素でモデル化した。各々のモデル図を図6と図7に示す。

解析コードは、Abaqus6-13-1を用いた。また、試験体1に使用した要素は、S4R (4節点一次低減積分要素)である。試験体2に使用した要素は、S4R (4節点一次低減積分要素)である。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表3及び表4に示す。表3より、試験体1は解析結果と試験結果の固有振動数は概ね一致するが、試験体2においては試験結果の固有値を大きく下回った。この原因は、試験体の形状データからティ部の肉厚が公称肉厚より約40%程度大きいためであり、ティ部の肉厚を40%厚くした結果、表4の通り固有振動数は概ね一致した。



Fig.6 Analysis model for piping model 1

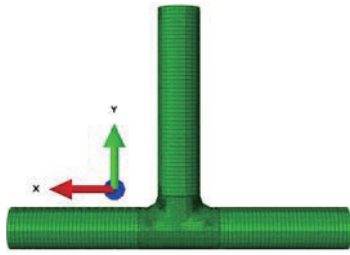


Fig.7 Analysis model for piping model 2

Table 3 Eigen value comparison of test and analysis

	1 <sup>st</sup> eigen value	
	model 1	model 2
Analysis	5.9	6.8
Test	5.8	8.1

Table 4 Eigen value comparison of test and analysis

	1 <sup>st</sup> eigen value	
	model 2	
Analysis	8.0	
Test	8.1	

## 4.2 弾塑性解析

### 4.2.1 試験体 1 (エルボ部) に対する弾塑性解析

弾塑性解析を実施するために材料特性として、以下の3ケースを検討した。

Case-1 : JSME の事例規格案に基づき 2 直線近似で設定したケース

Case-2 : 炭素鋼と同じ考え方のケース (降伏点を設計降伏点の 1.2 倍とし、二次勾配をヤング率の 1/100 として 2 直線近似した)

Case-3 : Case-2 の二次勾配をヤング率の 1/70 として 2 直線近似したケース

各ケースの諸元を表 5 に、弾塑性特性の違いを図 8 に示す。また、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・建設規格を用いている。

Table 5 Material properties and hardening rule of elasto-plastic analyses

	Case-1	Case-2	Case-3
Elasto-plastic property	Bi-linear		
Hardening rule	Kinematic hardening rule		
Young's modulus	195000 MPa	195000 MPa	195000 MPa
Second Gradient	2922 MPa	1950 MPa (1/100 of young's modulus)	2786 MPa (1/70 of young's modulus)
Yield point	252 MPa	246 MPa (1.2Sy)	246 MPa (1.2Sy)
Poisson ratio	0.3	0.3	0.3

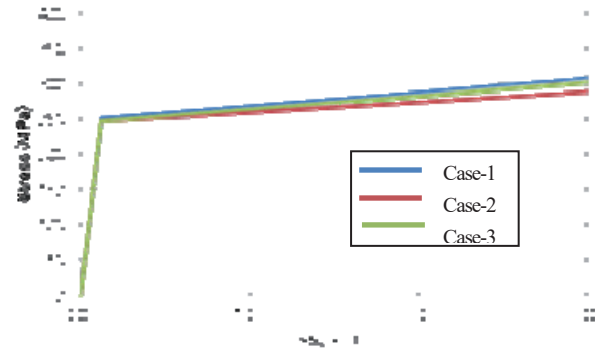


Fig.8 Material characteristics in every case

地震応答解析は、直接積分法 (Newmark $\beta$  法) により積分時間 1ms で実施した。各ケースの相当塑性ひずみの分布を図 9 に示す。試験体に設置されたひずみゲージの位置 (LE1-4 : 軸角度 45°、周角度 90°) でのひずみの時刻歴波形を図 10 に示す。また、各ケースの最大ひずみを表 6 に示す。

図 9 から各ケースとも最大ひずみの発生箇所は試験結果と同じ位置であることが分かる。また、図 10 及び表 6 より各ケースとも弾塑性解析のひずみ時刻歴波形及び最大ひずみは、概ね試験結果を再現できた。また、降伏点と第 2 勾配を変化させて実施した弾塑性解析の結果も同程度であった。これらの結果より、ステンレス鋼の弾塑性解析においても、炭素鋼と同じ弾塑性特性 (設計降伏点の 1.2 倍、第 2 剛性はヤング率の 1/100) を用いれば、概ね弾塑性挙動を把握することが可能と考えられる。

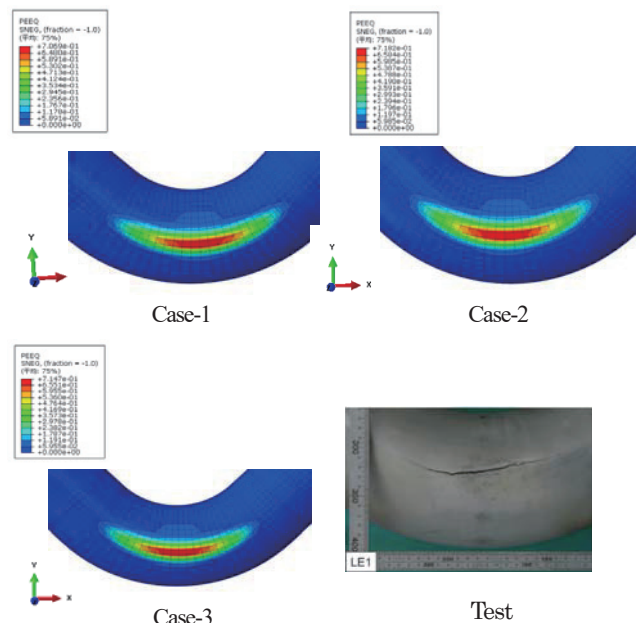


Fig.9 Equivalent plastic strain in every case

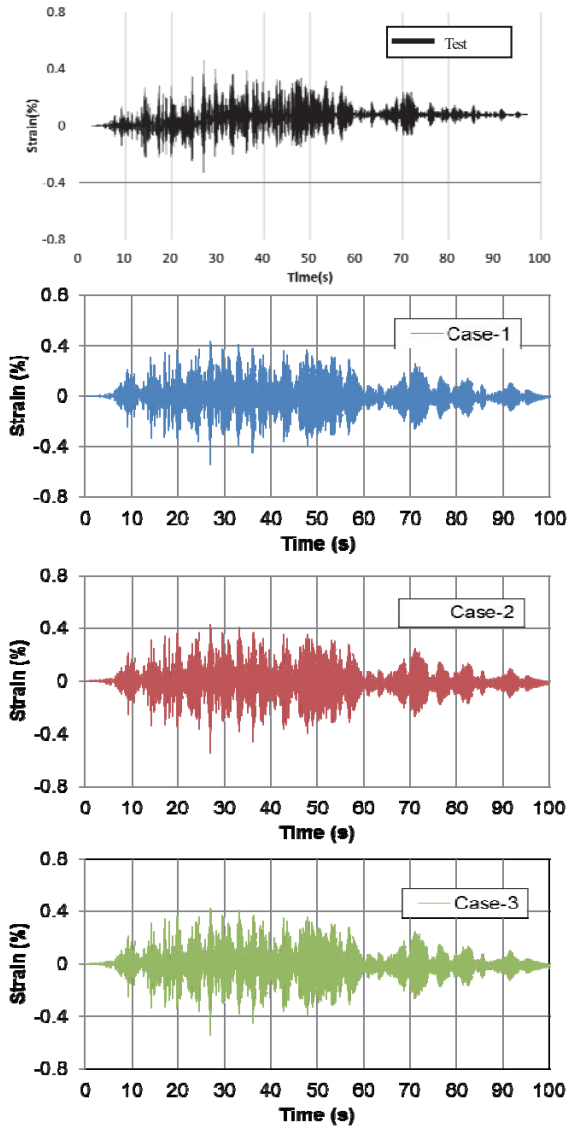


Fig.10 Comparison test result and analyses results

Table 6 Maximum strain in every case

	Test	Case-1	Case-2	Case-3
Maximum strain	0.459	0.543	0.541	0.539
Time(sec)	27.020	26.932	26.932	26.932

#### 4.2.2 試験体2 ( ティ部 ) に対する弾塑性解析

弾塑性解析を実施するために材料特性として、試験体 1 と同様に、以下の 2 ケースを検討した。各ケースの諸元を表 7 に、弾塑性特性の違いを図 11 に示す。

Case-4 : JSME の事例規格案に基づき 2 直線近似で設定したケース

Case-5 : 炭素鋼と同じ考え方のケース (降伏点を設計降伏点の 1.2 倍とし、二次勾配をヤング率の 1/100 として 2 直線近似した)

Table 7 Material properties and hardening rule of elasto-plastic analyses

	Case-4	Case-5
Elasto-plastic property	Bilinear	
Hardening rule	Kinematic hardening rule	
Young's modulus	195000 MPa	195000 MPa
Second Gradient	2922 MPa	1950 MPa (1/100 of young's modulus)
Yield point	252 MPa	246 MPa(1.2Sy)
Poisson ratio	0.3	0.3

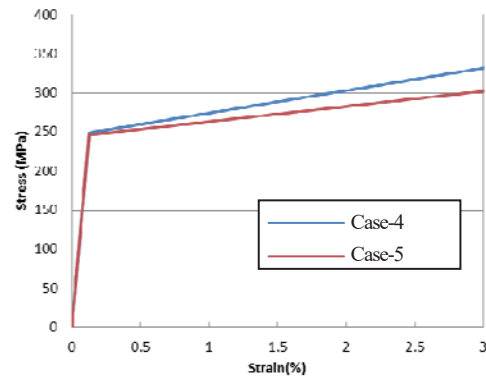


Fig.11 Material characteristics in every case

地震応答解析は、直接積分法 (Newmark $\beta$  法) により積分時間 1ms で実施した。各ケースの相当塑性ひずみの分布を図 12 に、ティ分岐部のひずみの時刻歴波形を図 13 に示す。また、各ケースの最大ひずみを表 8 に示す。

図 12 から各ケースとも最大ひずみの発生箇所は試験結果とほぼ同じ位置であることが分かる。また、図 13 及び表 8 より各ケースとも弾塑性解析のひずみ時刻歴波形及び最大ひずみは、試験結果に比べて過小評価であった。原因は、ティ部の形状データを見るとかなり肉厚が厚く、実物を精度よくモデル化出来ていないためと考えられる。

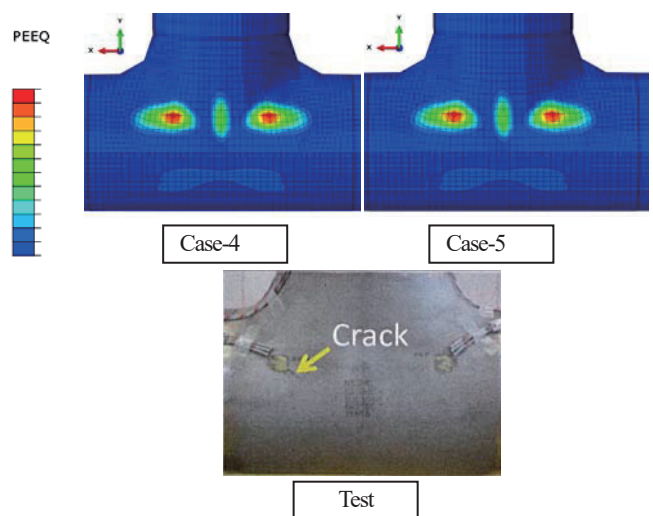


Fig.12 Equivalent plastic strain in every case

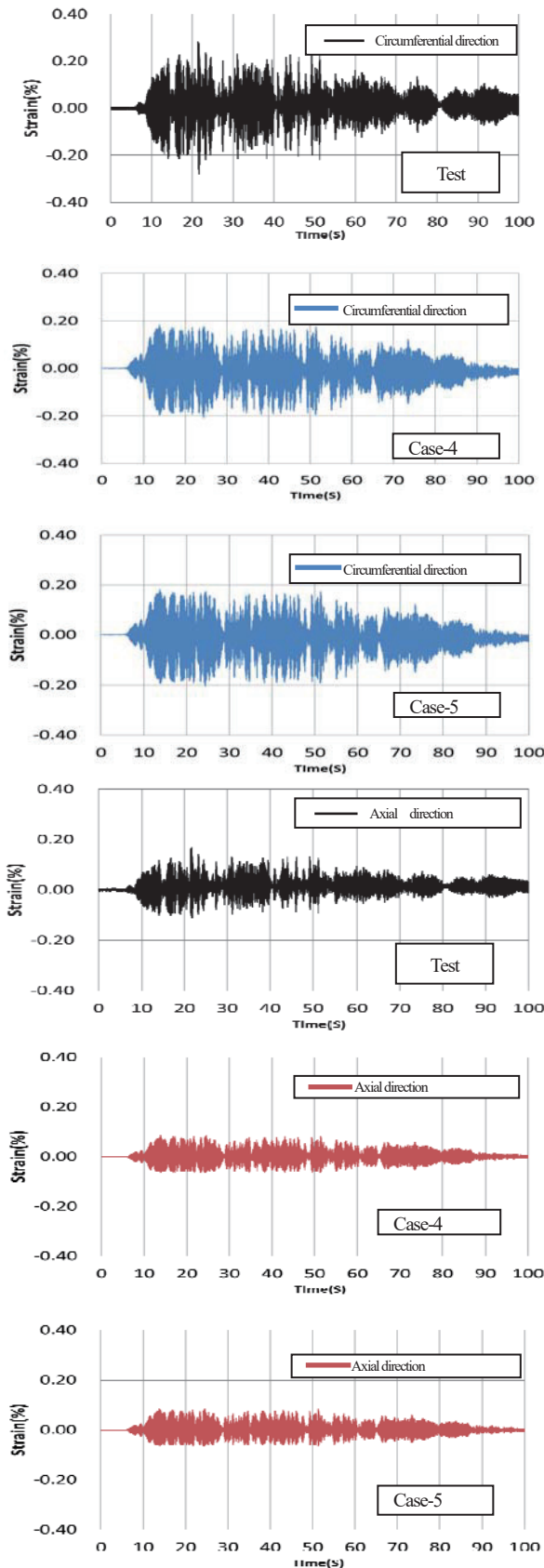


Fig.13 Comparison test result and analyses result

Table 8 Maximum strain in every case

Maximum strain	Test	Case-4	Case-5
Circumferential direction	0.285%	0.208%	0.205%
Time (sec)	21.464	24.480	24.480
Axial direction	0.168%	0.087%	0.087%
Time (sec)	21.728	13.852	13.852

## 5. 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。今後の課題としては、試験体2 (ティ部) においては、実物を精度よくモデル化することで弾塑性挙動を把握できる見通しが確認された。

最後に、本検討 (その2) ではステンレス鋼配管、(その1) では炭素鋼配管を対象として弾塑性解析手法を検討したが、今後、配管系に経年変化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] S. Tsunoi, A. Mikami, I. Nakamura, A. Otani, M. 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] I. Nakamura, A. Otani, M. 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] T. Watakabe, K. Tsukimori, S. Kitamura, M. Morishita, “Ultimate Strength of a Thin Wall Elbow for Sodium Cooled Fast Reactors Under Seismic Loads,” Journal of Pressure Vessel Technology, APRIL 2016, Vol.138.
- [7] T. Watakabe, K. Tsukimori, A. Otani, M. Moriizumi, N. Kaneko, “Study on Strength of Thin-walled Tee Pipe for Fast Breeder Reactors under Seismic Loading”, PVP2014-28619.