

小口径配管系の耐震安全性に関する研究

Study on seismic safety of the small bore piping and support system

| | | |
|-------------|-------|------------------|
| 関西電力株式会社 | 石黒 崇三 | Takami ISHIGURO |
| 九州電力株式会社 | 江藤 和敏 | Kazutoshi ETO |
| 四国電力株式会社 | 池田 和豊 | Kazutoyo IKEDA |
| 北海道電力株式会社 | 吉井 俊明 | Toshiaki YOSHII |
| 日本原子力発電株式会社 | 近藤 正美 | Masami KONDO |
| 三菱重工株式会社 | 平山 大作 | Daisaku HIRAYAMA |

Since seismic safety is one of the major key issues of nuclear power plant safety, it has been demonstrated that nuclear piping system possesses large safety margins by various durability test reports for piping in ultimate conditions. Though the knowledge of safety margin has been accumulated from these reports, there still remain some technical uncertainties about the phenomenon when both piping and support structures show inelastic behavior in extremely high seismic excitation level. In order to obtain the influences of inelastic behavior of the support structures to the whole piping system response when both piping and support structures show inelastic behavior, we examined seismic proving tests and we conducted simulation analyses for the piping system which focused on the inelastic behavior of the support to the whole piping system response. This paper introduces major results of the seismic shaking tests of the piping and support system and the simulation analyses of these tests.

Keywords: earthquake, piping, seismic shaking test, safety margin, inelastic behavior, simulation analyses

1. 緒言

耐震安全性は原子力発電所の運転、設計に関する最も重要な課題の一つである。

既往の研究より、原子力配管系の実際の耐力は、設計条件に対し非常に高いものであることが確認されている。但し、これらの研究の多くは、配管あるいは配管サポートを単独で評価対象とした耐久試験に基づくものであり、サポートと一体となった配管系の振動特性に関する試験検証は十分になされていない。

本研究は、実物大の配管-サポート系の加振試験を実施することで、地震時の配管系の振動特性を把握するとともに、配管-サポート系の持つ耐震裕度を確かめることを目的としたものである。

2. 試験条件

本研究では、地震時におけるサポート単独の挙動に着目したサポート要素試験と配管-サポート系全体の振動特性に着目した加振試験の2種類の試験により検証を実施した。

各試験の試験体および試験条件を以降に示す。

連絡先：平山 大作 〒654-8585 神戸市兵庫区和田崎町 1-1-1
三菱重工(株)神戸造船所 原子力保全技術部 配管経年保全課
電話:070-6508-6350, e-mail:daisaku_hirayama@mhi.co.jp

2.1 サポート要素試験

サポート要素試験では、一般的に適用されるサポート型式として、片持ち型、および門型形状のサポートを試験体とし、繰返し荷重を与えることで、サポートの耐力、損傷形態および荷重-変位特性を確認した。

試験体の概略図を Fig.1 に示す。また、試験条件を Table 1 に示す。

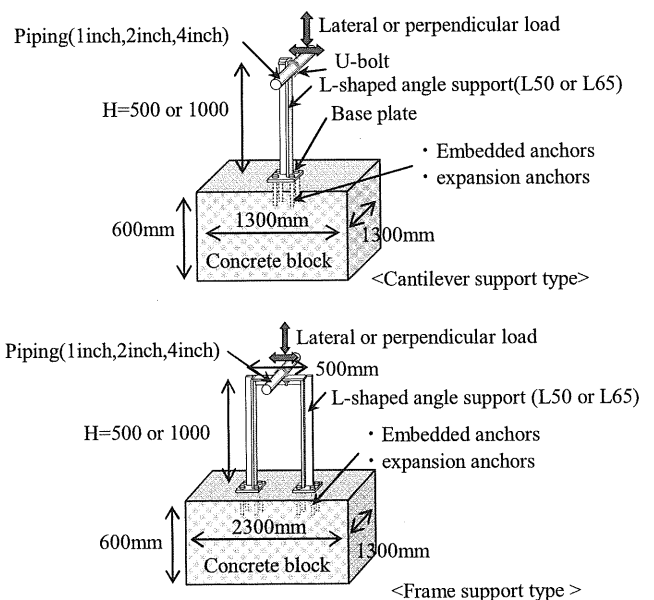


Fig.1 Schematic view of test specimens

Table 1 Test conditions

| Test case | Pipe diameter | Support type | Anchor type | Load direction |
|-----------|---------------|-------------------------|-----------------|----------------|
| Case 1 | 1inch(1B) | Cantilever (L50,H=500) | Expansion (M6) | lateral |
| Case 2 | 2inch(2B) | Cantilever (L50,H=1000) | Expansion (M6) | lateral |
| Case 3 | 2inch (2B) | Cantilever (L50,H=1000) | Embedded (ø16) | lateral |
| Case 4 | 4inch (4B) | Cantilever (L65,H=1000) | Expansion (M12) | lateral |
| Case 5 | 4inch (4B) | Cantilever (L65,H=1000) | Embedded (ø16) | lateral |
| Case 6 | 2inch (2B) | Cantilever (L50,H=1000) | Expansion (M6) | perpendicular |
| Case 7 | 4inch (4B) | Cantilever (L65,H=1000) | Embedded (ø16) | perpendicular |
| Case 8 | 1inch (1B) | Frame (L50,H=500) | Expansion (M6) | lateral |
| Case 9 | 2inch (2B) | Frame (L50,H=1000) | Expansion (M6) | lateral |
| Case 10 | 4inch (4B) | Frame (L65,H=1000) | Expansion (M6) | lateral |
| Case 11 | 2inch (2B) | Frame (L50,H=1000) | Expansion (M6) | perpendicular |
| Case 12 | 2inch (2B) | Frame (L50,H=1000) | Embedded (ø16) | perpendicular |

Table 2 Specification of test specimen

| Element | Quantity | Material or Structure | Remarks |
|----------------|----------------|---|---|
| Pipe | 1 | 4B-Sch40 carbon steel pipe | Total length: approx. 24 m Elbows;9, Tee;1, Nozzles;3 |
| Internal fluid | | Water | Under test: 1.4 MPa |
| Support | 16 | Cantilever-type support (with U- bolts) | Expansion anchor (including concrete fixture) |
| Total weight | Approx. 80 ton | | Base mat size (10.4 m × 6.4 m) |

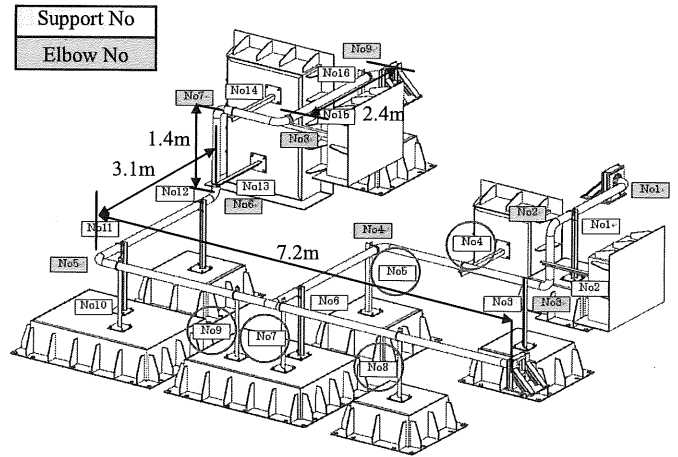


Fig.2 Schematic view of test specimen (Test Model A)

2.2 加振試験

加振試験では、エルボ、T 分岐部等を含む配管構成要素として一般的な 3 次元的な広がりを持つ口径 4 インチの実物大の配管系を試験体とし、加振時における配管-サポート系の振動特性を評価した。また、試験体に与える入力地震動を段階的に増大させることで配管-サポート系の有する耐震裕度を確認した。

試験には防災化学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター (E-ディフェンス) における振動試験装置を使用した。

試験体の諸元および概略図を Table 2、Fig.2 に示す。また、主要な試験条件を Table 3 に示す。Table 3 に示す通り、一部の試験条件においては、試験装置の加振能力以上の地震力を模擬的に与えるため、配管への錘の付与および部分的なサポートの撤去などの措置を施した。

入力地震波の形状 (応答スペクトル) を Fig.3 に示す。同地震波をベースに、試験条件に合わせ振動レベルを調整したものを試験に適用した。

Table 3 Test conditions

| Test case | Input Level* | Test Model | Remarks |
|-----------|--------------------|------------|---|
| Case 1 | S ₂ | Model A | Applied vibration at the design earthquake level (1.5 m/s ²) of the test model. |
| Case 2 | 9 × S ₂ | Model A | Amplified the acceleration of the S ₂ wave by 9 times . |
| Case 3 | α × S ₂ | Model B | Amplified the response of the piping system with an added mass. The shaking waveform was adjusted (with the time axis) to the natural frequency of the piping system. |
| Case 4 | β × S ₂ | Model C | Removed five main supports (supports 4, 5, 7, 8, 9) to make the pipes more sensitive to vibration, and applied vibration at the level to damage the pipes. |

*S₂ : Design earthquake level of the test model

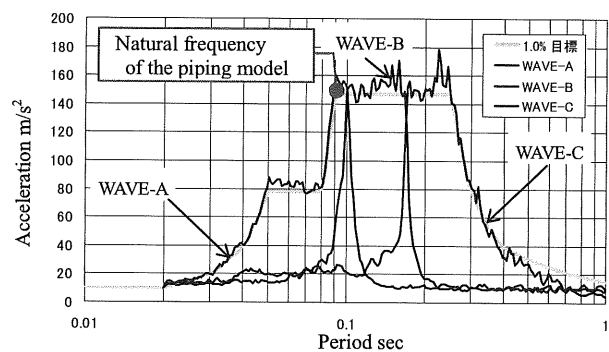


Fig.3 Response spectra of the excitation waves

3.1 サポート要素試験

サポート要素試験により得られた最大荷重および損傷部位を Table 4 に示す。各試験の荷重-変位特性および損傷部位から、損傷形態は Table 4 に示す Category 1～4 の区分に大別できる。各損傷形態の特徴を以下に示す。また、配管支持点における荷重-変位特性および損傷箇所の写真の代表例を Fig.5～12 に示す。

Category 1：定着部損傷タイプ

定着部アンカボルトの破断あるいはコンクリートの破壊による損傷形態である。U ボルト、支持部材等での大規模な塑性変形を伴わず損傷に至るため、荷重-変位特性は、Fig.5 に示す通り線形的な形状を示しており、地震時におけるサポートの変形によるエネルギーの吸収効果は他の損傷形態に比べ限定的といえる。

Category 2：支持部材変形タイプ

支持部材の変形による損傷形態である。荷重-変位特性は、Fig.7 に示す通り非線形的な形状を示しており、弾性限界以上となる入力荷重に対し、高いエネルギーの吸収効果が想定される。

Category 3：U ボルト損傷タイプ

U ボルトに塑性変形が生じた後、損傷に至るタイプである。このタイプでは、Fig.9 に示す通り、変形量の増加に伴いサポートの剛性が上昇する特有の荷重-変位特性が認められる。

Category 4：支持部材およびU ボルト変形タイプ

支持部材とU ボルトの両方に塑性変形が発生した後、支持機能の喪失に至る損傷形態である。Fig.11 の荷重-変位特性は、定着部のアンカボルトの破断が発生したケースであるが、アンカボルトが破断に至る前にU ボルト、支持部材の両方で塑性変形が発生しているため、Category 2～3 を合わせたような特性を示しており、Category 1 の場合に比べ、高いエネルギーの吸収効果が想定される。

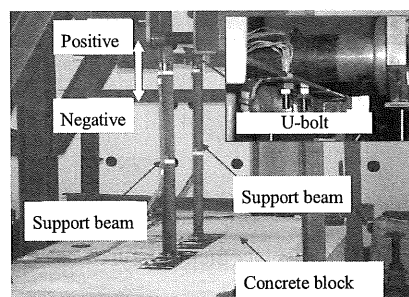


Fig.4 Specimen and test equipment (Test Case 11)

Table 4 Summary of test results

| Category | Test Case | Specifications | Tested failure capacity | | Designed allowable force | | Strength ratio* |
|------------|-----------|--|-------------------------|------|--------------------------|------|-----------------|
| | | | Failure mode | (kN) | Failure mode | (kN) | |
| Category 1 | Case 1 | 1inch, cantilever type, expansion anchor Lateral load | Anchorage | 3.42 | Anchorage | 0.66 | 5.18 |
| | Case 2 | 2inch, cantilever type, expansion anchor Lateral load | Anchorage | 1.56 | Anchorage | 0.33 | 4.73 |
| | Case 8 | 1inch, frame type, expansion anchor Lateral load | Anchorage | 12.3 | Anchorage | 2.05 | 6.00 |
| | Case 9 | 2inch, frame type, expansion anchor Lateral load | Anchorage | 5.49 | Anchorage | 1.07 | 5.13 |
| | Case 10 | 4inch, frame type, expansion anchor Lateral load | Anchorage | 7.91 | Anchorage | 1.07 | 7.39 |
| Category 2 | Case 3 | 2inch, cantilever type, embedded anchor, Lateral load | Support | 2.22 | Support | 0.94 | 2.36 |
| | Case 4 | 4inch, cantilever type, expansion anchor Lateral load | Support | 3.53 | Anchorage | 1.11 | 3.18 |
| | Case 5 | 4inch, cantilever type, embedded anchor, Lateral load | Support | 4.18 | Support | 1.59 | 2.63 |
| Category 3 | Case 6 | 2inch, cantilever type, expansion anchor Perpendicular load | Anchorage | 19.3 | U-bolt | 1.51 | 12.78 |
| | Case 7 | 4inch, cantilever type, embedded anchor, Perpendicular load | U-bolt | 27.0 | U-bolt | 1.15 | 23.48 |
| Category 4 | Case 11 | 2inch, frame type, expansion anchor Perpendicular load | Anchorage | 38.3 | Anchorage | 8.89 | 4.31 |
| | Case 12 | 2inch, frame type, embedded anchor, Perpendicular load | U-bolt | 40.1 | Base plate | 26.4 | 1.52 |

*Strength ratio α = Tested failure capacity / Designed allowable force

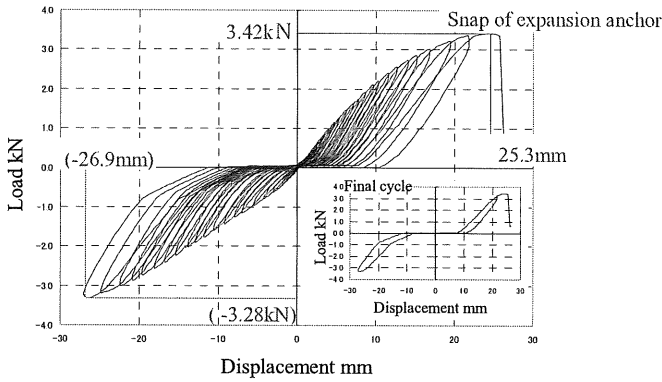


Fig.5 Force and displacement of Test Case 1 (Category 1)

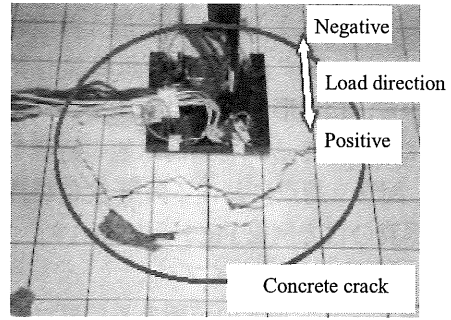


Fig.6 Failure state of Test Case 2 (Category 1)

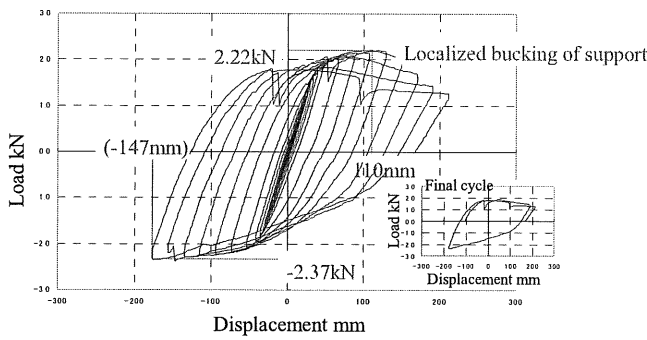


Fig.7 Force and displacement of Test Case 3 (Category 2)

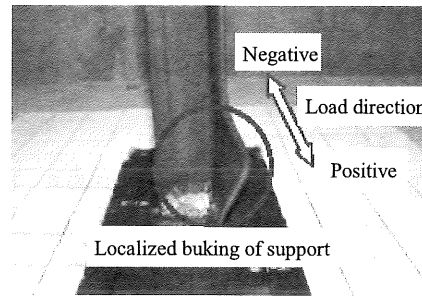


Fig.8 Failure state of Test Case 3 (Category 2) 模式图

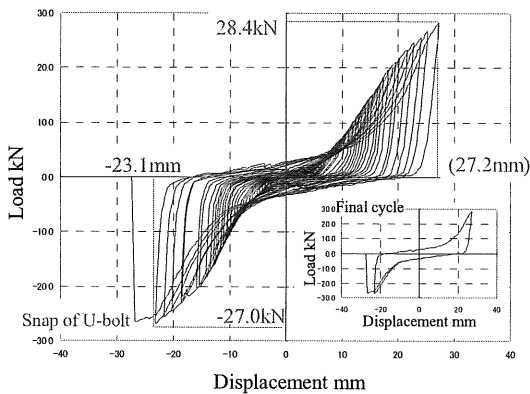


Fig.9 Force and displacement of Test Case 7 (Category 3)

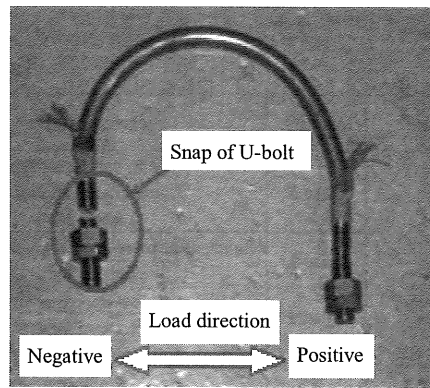


Fig.10 Failure state of Test Case 7 (Category 3)

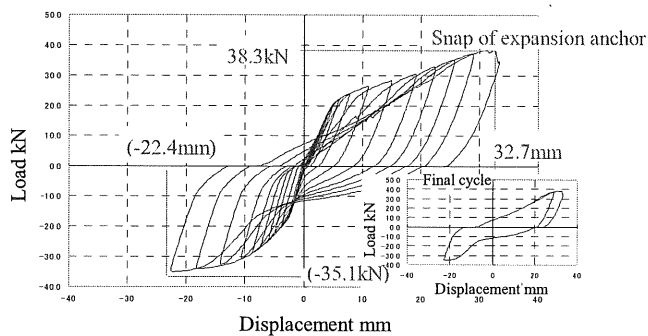


Fig.11 Force and displacement of Test Case 11 (Category 4)

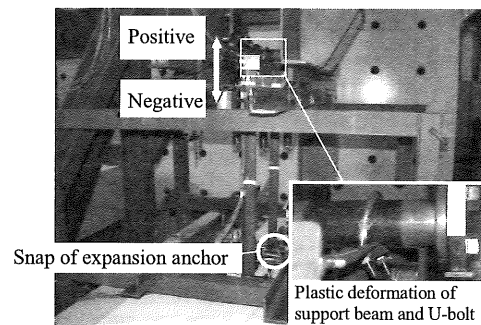


Fig.12 Failure state of Test Case 11 (Category 4)

3.2 加振試験

試験体および振動試験装置の外観写真を Fig.13 に示す。

試験体の固有振動数計測結果を Table 5 に示す。また、試験体の振動モード図を Fig.14 に示す。Fig.14 に示す通り、試験体の1次振動モードでは、配管のT分岐部が水平方向に大きく振動する。

試験では、入力地震に対する試験体の応答を確認するため試験体各所の応答変位およびひずみ量を計測した。試験結果を Table 6 に示す。また、応答変位の計測例を Fig.15 に示す。

試験結果のうち、Table 6 における Test Case 1 は、試験体に対し設計上許容できる限界相当の入力地震波を与えたケース、Test Case 2 は設計許容の約9倍相当の入力地震波を与えたケースである。Test Case 3 は試験体に錘を付加し、配管変位が更に大きくなるよう設定したケースである。Test Case 4 は、錘の追加に加え、一部サポートを撤去し、Test Case 3 以上の配管変位が生じるよう設定したケースである。

結果として、いずれの試験においても内部流体の漏れはなく、少なくとも設計の9倍以上の入力地震波に対し配管の健全性が確認できた。

設計以上の入力波に対し、試験体の健全性が保たれた要因の一つとして、設計条件以上の高い減衰効果が発生していたことが挙げられる。配管系の振動レベルが大きくなるとUボルトと配管の摩擦、あるいは配管、支持部材、Uボルト等の局所的な塑性変形により、減衰効果が向上する。減衰の大きさは配管やサポートの終局レベルを想定するための重要な要素であるため、試験結果に基づき、配管応答変位と減衰の関係を評価した。

ここでは、配管最大応答箇所の加速度と、加振装置床水平加速度の伝達特性から、ハーフパワー法にて減衰比を推定した。結果を Fig.16 に示す。Fig.16 に示す通り、減衰比は振動レベルの増加とともに上昇し、Test Model A では、最大約9%の減衰比が確認された。

また、T分岐部で約240mmの変位が認められた Test Case4 の状況を想定し、配管エルボ部のひずみとT分岐部の変位に着目したシミュレーション解析を実施した。結果を Fig.17~18 に示すが、解析結果は試験時の計測値とよく一致しており、ひずみの大きさと地震の繰返し回数を考慮した累積損傷係数による疲労評価が可能となる見通しが得られた。

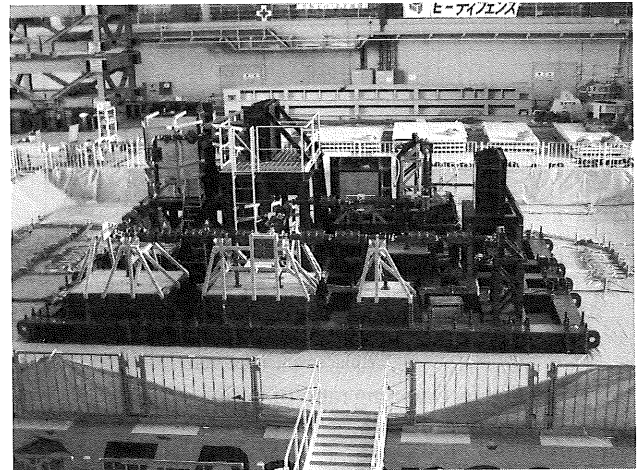


Fig.13 Specimen and test equipment (Test Model B)

Table 5 Natural frequency of piping system

| | Natural frequency Hz | | | | Remarks |
|--------------|----------------------|------|------|------|--|
| | 1st | 2nd | 3rd | 4th | |
| Test Model A | 13.7 | 16.6 | 25.8 | 28.1 | Original test model |
| Test Model B | 6.3 | 10.9 | 15.6 | 18.2 | Amplified the response of the piping system with additional masses |
| Test Model C | 3.5 | 9.6 | 13.5 | 15.2 | Remove five supports |

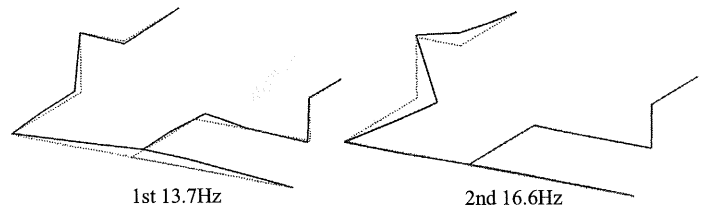


Fig.14 Vibration model of piping system (Test Model A)

Table 6 Max response of piping system

| Test Case | Maximum acceleration of the wave | Maximum displacement of piping system (at tee) | Support displacement (ductility ratio) | | | Maximum Strain range of elbow | Remark |
|-----------|----------------------------------|--|--|----------------|----------------|-------------------------------|---------------|
| | | | Support 7 | Support 8 | Support 9 | | |
| 1 | 1.46m/s ² | 1.7mm | 1.6 mm (0.12) | 1.3 mm (0.1) | 1.6 mm (0.12) | 0.01% | elastic range |
| 2 | 15.3m/s ² | 16.2 mm | 15.9 mm (1.2) | 9.1 mm (0.68) | 15.4 mm (1.16) | 0.04% | |
| 3 | 7.96m/s ² | 51.7 mm | 50.3 mm (3.78) | 31.8 mm (2.39) | 46.6 mm (3.5) | 0.17% | |
| 4 | 13.6m/s ² | 239.8 mm | — | — | — | 1.37% | |

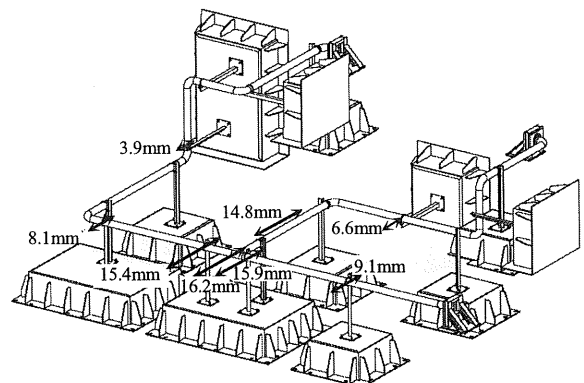


Fig.15 Displacement response (Test Case 2)

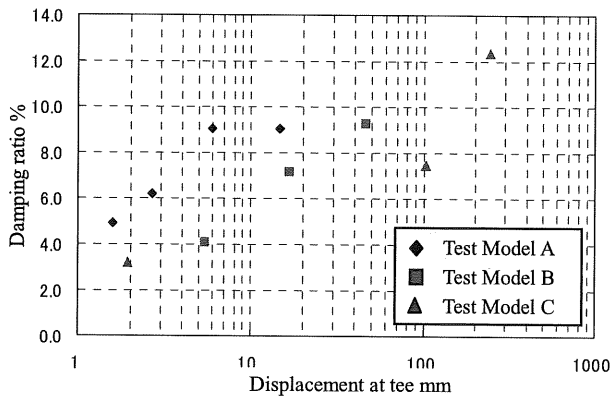


Fig.16 Damping ratio of piping system

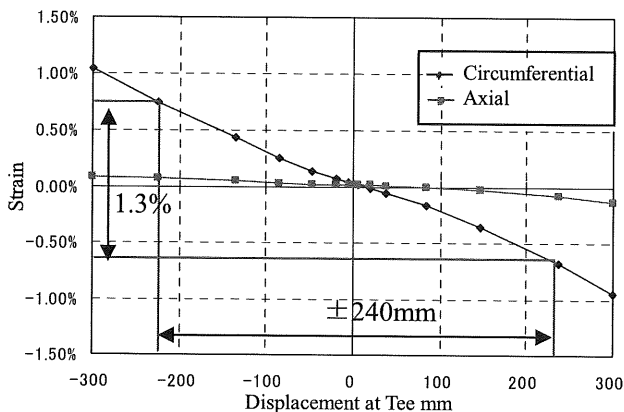
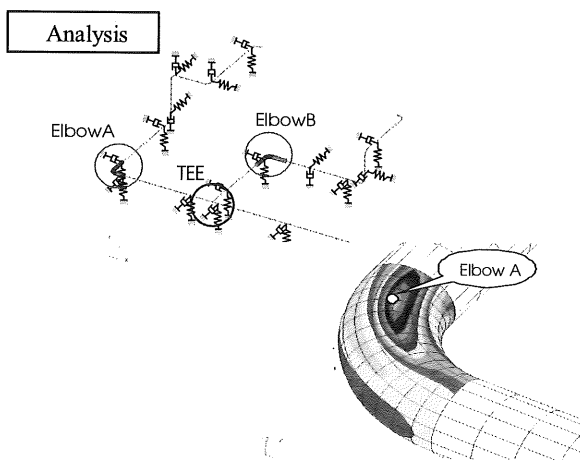


Fig.17 Relation between tee displacement and local strain of Elbow A

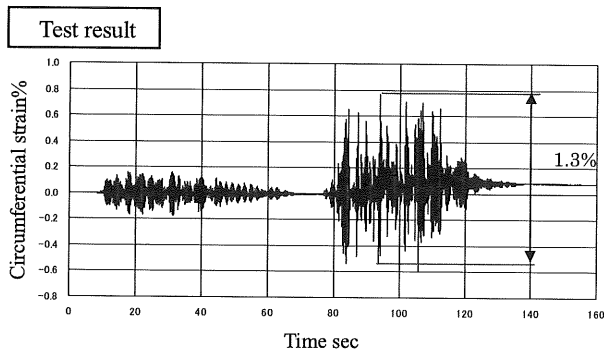


Fig.18 Local strain of Elbow A (Test Case 4)

4. 結言

本研究による結果を以下にまとめる。

- (1) サポート要素試験により、サポートの支持機能喪失までの挙動および実耐力を確認することができた。
- (2) 加振試験により、配管の振動特性を把握するとともに、配管系の持つ耐震裕度の高さを確認することができた。
- (3) 加振試験条件を想定したシミュレーション解析を実施し、試験結果との比較により塑性変形を考慮した解析法の妥当性を確認することができた。

参考文献

- [1] T.Ito et al., Proving Proving Test on the Seismic Reliability of the Main Steam Piping System Part1, ASME PVP, Vol.345, 1997
- [2] K.Tai et al., Proving Proving Test on the Seismic Reliability of the Main Steam Piping System Part2, ASME PVP, Vol.345, 1997
- [3] K.Tai et al., Performance of a Multiple-excitation Simulatro at the Seismic Test of a Piping System Supported by Conventional Snubbers, ASME PVP, Vol345, 1997
- [4] K.Tai et al., Proving Test on the Seismic Reliability of the Main Steam Piping System (Part1: Simulation for PWR Main Steam Piping), 14th SMiRT, Vol.K, 1997
- [5] Y.Namita et al., Seismic Proving Test of Ultimate Piping Strength (Piping Component Test Result and System Test Plan), ASME PVP, Vol.428-1, 2001
- [6] K.Suzuki et al., Seismic Proving Test of Ultimate Piping Strength (Test Results on Piping Component and Piping System Test), ASME PVP, ASME PVP, Vol.445-1, 2002
- [7] K.Suzuki et al., Seismic Proving Test of Ultimate Piping Strength (Simulation Analysis of Sumplified Piping System Test), ASME PVP, Vol.466, 2003
- [8] K.Suzuki et al., Seismic Proving Test of Ultimate Piping Strength (Status of Design Method Confirmation Test, 17th SMiRT, Vol.K5-2, 2003
- [9] T.Ishiguro et al., Study on Seismic Design Margin based upon Inelastic Shaking Test of the Piping and Support System, ICAPP, Paper 9484, 2009