

# サポート付配管系の耐震性評価手法に関する研究 (弾性振動試験における共振振動数および 応答低減に対する入力加速度の影響)

Seismic Response Evaluation for Piping Systems with Support Structures  
(Effect of Input Acceleration Amplitude on Resonance Frequency and Response Reduction  
in the Elastic Vibration Test)

高橋 常夫 (Tsuneo Takahashi)

前川 晃 (Akira Maekawa)

**要約** 本研究は、強い地震力を受ける配管系の地震応答解析で用いる支持構造物（以下、サポート）のモデル化法を検討する目的で実施し、配管のすべりが配管系の振動挙動に与える影響を調べた。門型形状のサポート上に敷設された鍾付配管系に対する振動試験を行い、共振振動数および減衰定数の入力加速度に対する依存性を調べた。その結果、入力加速度に対する依存性が水平方向の振動モードと鉛直方向の振動モードとは異なることを実験的に明らかにした。具体的には、まず、共振振動数は概して入力加速度が増すにつれて低下した。水平方向の振動モードの共振振動数は、入力加速度が増すにつれて徐々に低下した。一方、鉛直方向の振動モードの共振振動数は水平方向の場合より大きな入力加速度において低下したが、今回の入力加速度の範囲内では鉛直方向の振動数はほぼ一定と見なせた。従来の手法で行ったモーダル解析の固有振動数と比較すると、水平方向の振動モードに対しては、数値計算の振動数は実験値より低くなった。一方、鉛直振動の振動モードに対しては、数値計算の振動数は実験値より高くなった。次に、減衰定数は入力加速度が増すと増加した。水平方向の振動モードの減衰定数は、入力加速度が増すと、増加した後、入力加速度200gal以上ではほぼ一定値の3%となった。一方、鉛直方向の振動モードの減衰定数は、入力加速度が増すと単調に増加した。400gal加振における減衰定数は2.5%であり、試験範囲内では一定値に収束する傾向は見られなかった。設計用減衰定数0.5%に比べて、実験で得られた減衰定数は全ての入力加速度範囲で大きくなった。これらの実験結果は、巨大地震に対する配管系地震応答をより実現象に近い解析をするために振動特性の入力加速度に対する依存性の考慮が必要であることを示す。

**キーワード** 配管, 配管支持構造物, 振動, ランダム波, 弾性, 共振, 減衰定数, 加速度依存性, 振動試験

**Abstract** This study investigated the effect of pipe slide on vibration behavior of piping systems to consider modeling of pipe support structures beyond the yield point for seismic response analysis. A piping system with frame-type support structures and a lumped mass was vibrated on a shaking table with random waves which had maximum accelerations from 30gal to 400gal. The acceleration dependencies of resonance frequency, response reduction and damping factor were measured. As a result, the acceleration dependencies of the piping vibration behavior were demonstrated. Moreover, it was clarified that the acceleration dependencies differed between resonance modes in the horizontal directions and the resonance mode in the vertical direction. First, the resonance frequencies decreased when the input acceleration increased. The resonance frequencies for the horizontal vibration modes were decreased when the input acceleration increased. On the other hand, the resonance frequency for the vertical vibration mode was decreased more at the large input acceleration than for the horizontal vibration modes. Within the acceleration of this study, however, the resonance frequencies for the vertical vibration mode were almost the same values. In a comparison with the natural frequency of modal analysis performed in a conventional manner, the analysis results for the horizontal vibration modes were estimated to be lower than the experimental result. On the other hands, the analysis result for the vertical vibration mode was estimated to be higher than the experimental result. Next, the damping factor increased when the input acceleration increased. The damping factors for the horizontal vibration modes were increased to 3% at the 200gal input acceleration. On the other hand, the damping factors for the vertical vibration mode were also increased but did

not show a constant value as occurred for the horizontal vibration modes. Moreover, all of the damping factors measured in this study were larger than the design damping factor of 0.5% for all of the input accelerations. These results demonstrated that considering the input acceleration dependencies of damping factor is needed to evaluate the seismic response accurately of piping systems vibrating with large displacement of pipes during large scale earthquakes.

**Keywords** Pipe, Pipe Support, Vibration, Elasticity, Random Wave, Resonance, Damping Factor, Acceleration Dependency, Shaking Test

## 1. 緒言

原子力プラントの配管系では、新潟県中越沖地震に遭遇した柏崎刈羽原子力発電所において、復水補給水管(100A)のサポート取付け部の損傷、タービン建屋取合部酸素注入ライン計装配管の変形、屋外トレンチ内配管のサポートの変形が地震後のウォークダウン結果として報告されている。これら配管やサポートの損傷はいずれも耐圧等の設計時の機能が維持されているため安全上の問題はなかったが、強地震動により配管支持部の変形が生じたことが報告されている。

一方、2011年3月に発生した福島第一原子力発電所の事故以降、設計想定を超えた状態における安全性評価が求められている。機器・配管系のより現実に近い地震応答計算は、設計基準外事故(BDBA, Beyond Design Basis Accident)の評価基準の設定根拠として用いられる地震応答の合理的な算定に貢献すると考えられる。配管系の設計基準外事象への対応の一つとして、サポートの弾塑性変形の影響を考慮した健全性評価が可能になれば、耐震安全裕度の合理的な評価に寄与する。さらに、最近では地震PRAの精度向上が要求されている。地震PRAの精度を向上させるためには、強地震動に対する配管系地震応答データを拡充することが必要である。稀に発生する損傷事象のデータを拡充するためには、サポートの弾塑性変形の影響を考慮した地震解析に頼らざるを得ない。このためにも、鋼構造のサポートの塑性変形を伴う地震応答を明らかにすることは、耐震安全性評価の信頼性向上にも寄与すると考えられる。

従来、原子力プラントの配管については、設計の妥当性を確認するために多くの実証試験<sup>(1)-(5)</sup>が行われてきた。一方で、配管サポートに用いる鋼製の架構が塑性化した状態の配管系地震応答に関する研究は著者らの知る範囲ではあまり行われていない<sup>(6)-(11)</sup>。配管に対する知見に加えて、鋼構造のサポー

トの弾塑性変形を伴う配管系地震応答を明らかにすることにより、強地震動における配管系の耐震健全性評価をより実挙動に近く行うことが可能になると考えられる。

本研究は、強地震動における配管系の耐震裕度評価の向上のために、配管サポートを含む配管系の地震応答を実験により把握すること、配管サポートの弾塑性変形の影響を考慮した数値解析手法を検討することを目的としている。数値解析手法の検討に関しては、これまでに配管サポートの2次剛性の影響に着目した検討を行い、単一の配管サポートが弾塑性変形するような状況では配管サポートの塑性変形挙動を2次剛性の違いを考慮しないで弾完全塑性体モデルで一様に扱え得ることを示してきた<sup>(11)</sup>。今後、配管サポートを含む配管系の地震応答の実験データを取得し、配管サポートの弾塑性変形の影響を考慮した数値解析手法の検証を行う予定である。研究対象である配管サポートの弾塑性変形は、強い地震力に対して弾塑性範囲の応答におけるエネルギー吸収を期待して応答加速度の低減、減衰を利用しようとするものであるが、一方で配管系の地震応答においては弾性振動範囲でも、加振力が大きくなり配管変位が増加したときの配管系の減衰定数の増加<sup>(12)</sup>や、減衰に影響を与える一因子である配管-架構サポート系間の摺動による卓越振動数の低下<sup>(13)</sup>などの入力加速度に依存した振動特性の変化が報告されている。本研究の振動試験においても影響すると考えられる。

本論文は、弾塑性範囲での試験に先立ち実施した、弾性範囲内の加振試験について、入力加速度を変えたときの、配管系の共振振動数と応答加速度への影響を報告する。試験では門型の配管サポート上に敷設された配管に対して、最大加速度400galまでのランダム波弾性加振を行った。

## 2. 試験方法

### 2.1 試験体

試験体には100ASch40配管（外径114.3mm，肉厚6.0mm）を用いた。配管系の概略寸法を図1に示す。配管の材質は高温配管用炭素鋼管STPT370とした。配管途中には弁等を模擬した重さ約600kgの錘を取付けた。錘は分割して配管を挟むように取付けた後に配管の周方向に隅肉溶接して配管と一体構造としている。試験体は図2に示すように振動台に据え付けて、振動試験に供した。振動試験中の配管には水圧により1MPaの内圧を負荷した。

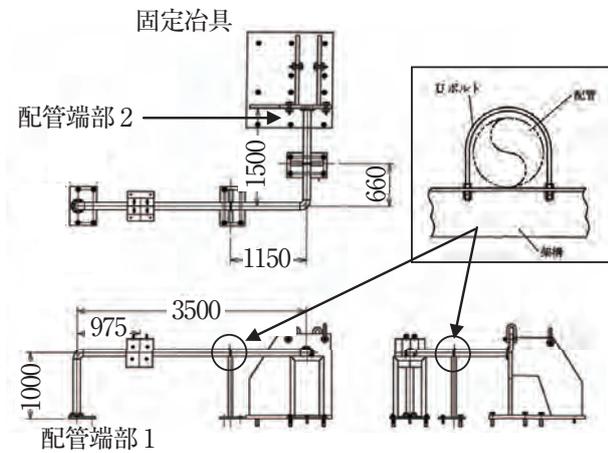


図1 試験体構造図

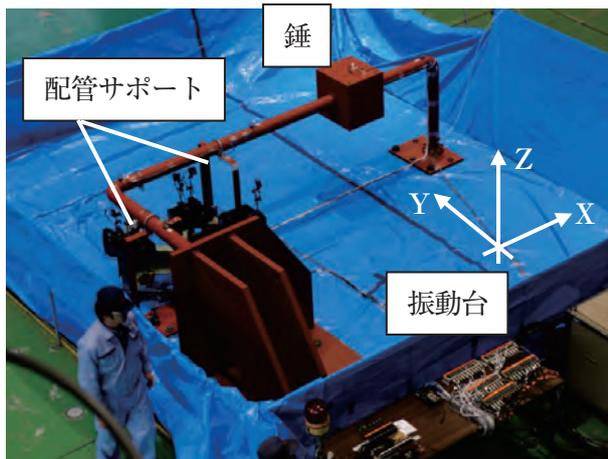


図2 試験体全景

配管は2台の配管サポートにより中間で支えられ，端部の一方はベースプレートを介して振動台に固定されている。他端は固定治具を介して振動台に固定されている。また，配管はサポートの上辺に直接載せられ，鋼製Uボルトにより配管軸直角方向

の変位が束縛されている。配管とUボルトの間には2mmの隙間を設けた。

配管サポートには，幅50cm，高さ100cmの門型形状のサポートを用いた。サポートの各部はL65mm×65mm×6mmの等辺山型鋼材で作られている。サポートの柱脚部の下端は板厚20mmのベースプレートに隅肉溶接で固定され，ベースプレートは基礎ボルトで振動台に固定されている。サポートは一般構造用炭素鋼SS400で製作した。

### 2.2 試験装置

振動試験には（株）IHI所有の振動台を用いた。試験装置の諸元を表1に示した。

表1 試験装置 諸元

項目	仕様
振動台寸法	4.0m × 4.0m
積載重量	20tf
加振軸	並進3軸(水平2,鉛直1), 回転3軸
最大振幅	水平±200mm, 鉛直±100mm
最大速度	水平±100cm/s, 鉛直±50cm/s
最大加速度	水平±1.0G(10tf), 鉛直±1.0G(10tf)
周波数範囲	DC～50Hz
駆動方式	電気油圧サーボ式
加振波形	規則波, 不規則波
制御方式	加速度, 変位

### 2.3 計測項目

試験では配管と振動台の応答加速度，配管支持点における配管の管軸方向のすべり変位を含む支持点の変位および，配管と配管サポートのひずみを計測した。

試験結果に示す共振振動数は配管の応答加速度から求めた。配管表面に取り付けた加速度計の配置図を図3に示す。加速度計の取付け位置は，配管表面のA1～A6と振動台表面のATとした。後述の試験結果では，応答加速度にS-1サポート近傍の加速度計A3の値を用いて整理した。配管の管軸方向のすべり変位については，配管と配管サポートの配管軸方向の応答変位成分を非接触変位計で計測して算出した。加速度，変位およびひずみのサンプリング周期は200Hzとした。

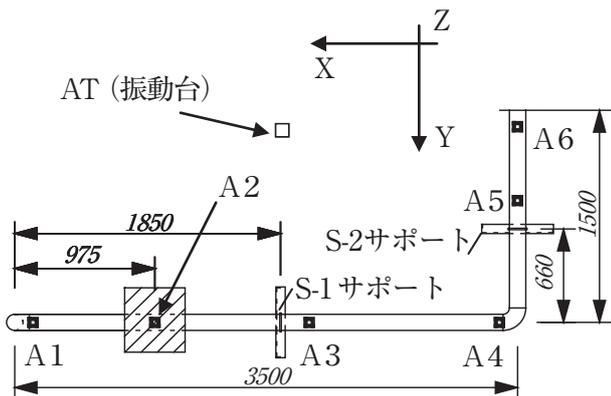


図3 加速度計則位置

### 2.4 試験条件

試験体は水圧により内圧1MPaに加圧後、広帯域ランダム波(図4, 3Hz-35Hz)による加振試験に供した。S-1サポートが取り付けられた水平配管の振動挙動とその振動特性(共振振動数, 減衰定数)の入力加速度依存性を調べるために, 振動試験を表2に示す加振条件で行った。

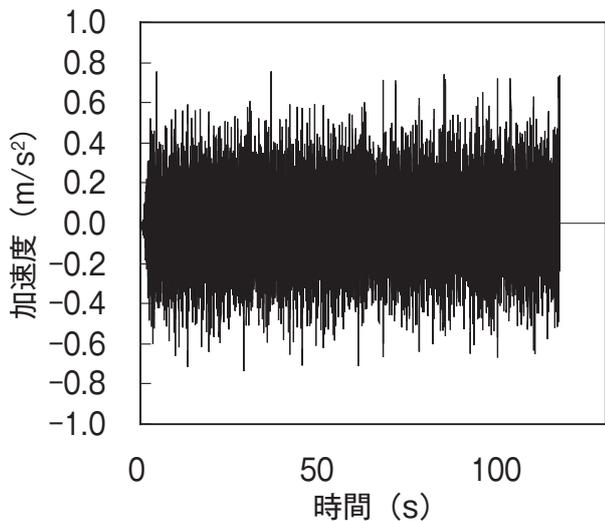


図4 入力波

表2 加振条件

波 形	加振方向			最大加速度 (gal)
	X	Y	Z	
ランダム波	○	-	-	30, 60, 80, 200, 400
	-	○	-	
	-	-	○	

### 2.5 配管試験体のモーダル解析

振動試験にあたり, 配管試験体のモーダル解析を行い固有振動数と振動モードを求めた。解析モデルの全体寸法は図1の構造図の寸法に従い, 配管肉厚は規格の公称値を用いた。配管端部1はベースプレートを模擬した剛性のばねで振動台に固定した。ばね剛性はベースプレートのFEM解析により求めた。配管端部2については固定治具を十分剛なばねでモデル化して振動台に固定した。配管の中間にあるサポートについては, サポート単体のFEM解析から求めたばね剛性を入力した。配管の管軸方向は, 通常的设计で行われるように, サポートに対して自由にすべる条件とした。FEM解析には汎用有限要素法解析コードABAQUS Ver.6.12を用いた。

### 3. 試験結果

#### 3.1 実配管と配管解析の振動モードの比較

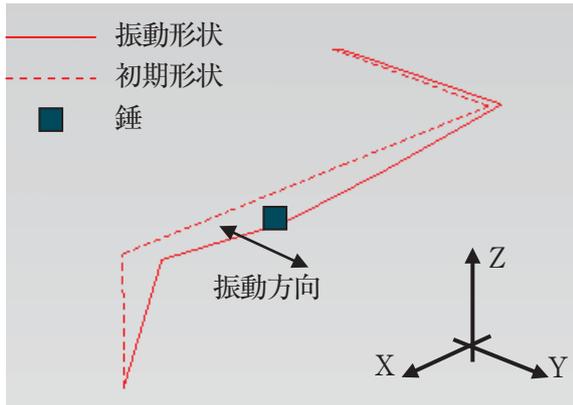
試験体をランダム波で加振して得たX,Y,Z各々の方向の振動モードを図5に示す。図には最大加速度が30galの結果を示す。振動モードの変位倍率については, 変形が見やすいように調整してあり振動モード間の変位量の大小関係は実際と異なる。1次振動は水平Y方向の撓み振動となり, 共振振動数は8.5Hzであった。2次振動は主として水平配管の管軸方向の振動であるが, 水平配管の鉛直方向の振動も生じていた。2次振動の共振振動数は11.3Hzであった。3次振動は主として水平配管の鉛直方向の振動であるが, 水平配管の管軸方向の変位も生じていた。3次振動の共振振動数は15.9Hzであった。

次に, モーダル解析により求めた振動モードを図6に示す。1次振動は水平配管のY方向撓みの振動となり, 固有振動数は8.2Hzであった。2次振動は水平配管の管軸方向振動となり, 固有振動数は10.0Hzであった。また, 3次振動は水平配管の鉛直方向振動であり, 固有振動数は17.3Hzとなった。

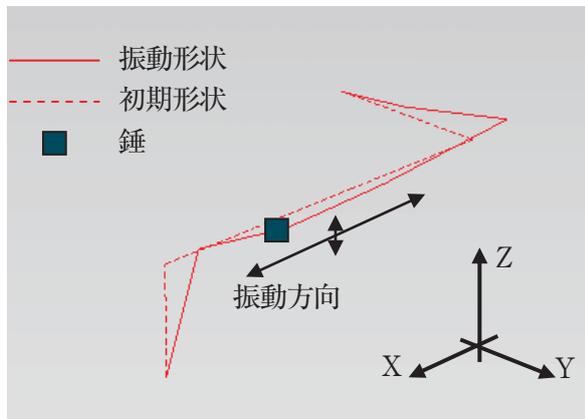
振動試験とモーダル解析の共振振動数の比較を

表3 共振振動数の比較

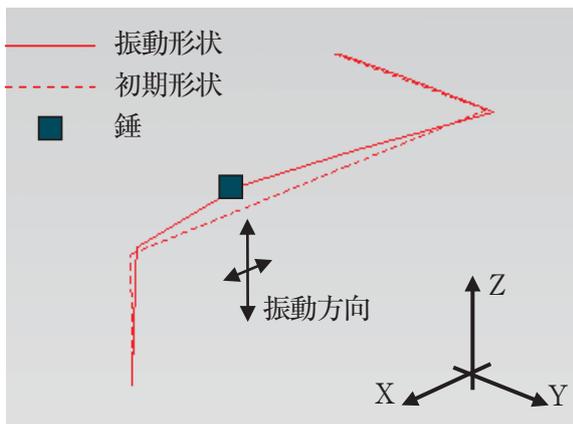
手 法	共振振動数 (Hz)		
	1次振動	2次振動	3次振動
振 動 試 験	8.5	11.3	15.9
モーダル解析	8.2	10.0	17.3



(a) 1次振動モード (8.5Hz)



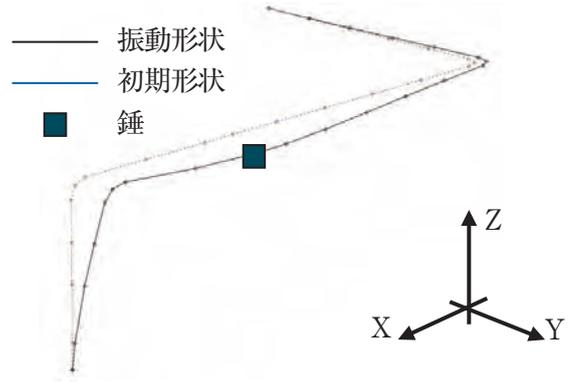
(b) 2次振動モード (11.3Hz)



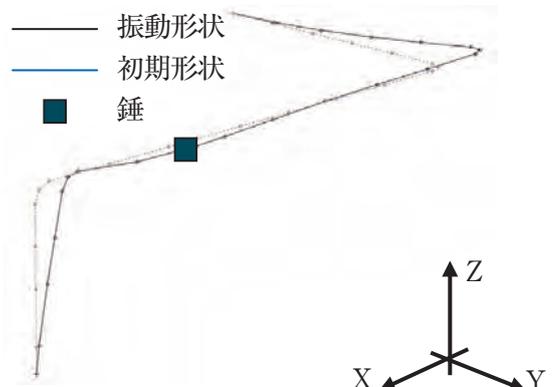
(c) 3次振動モード (15.9Hz)

図5 振動実験の振動モード (入力: 30gal加振)

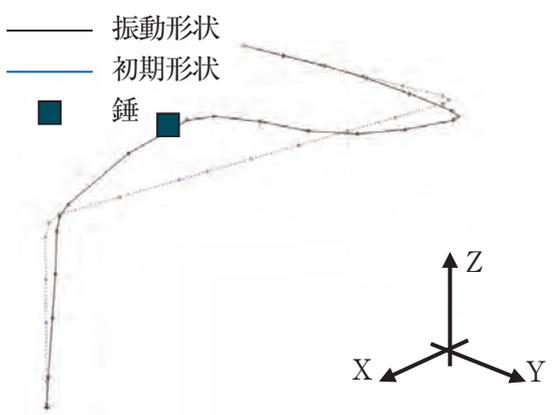
表3に示す. 実測値の1次振動数(8.5Hz)はモーダル解析による1次振動数(8.2Hz)にほぼ一致するが若干高くなった. また, 実測値の2次振動数(11.3Hz)はモーダル解析による2次振動数(10.0Hz)にほぼ一致するが, 1次振動数と同様に若干高くなった. これらの結果から, 水平面内の振動モード



(a) 1次振動モード (8.2Hz)



(b) 2次振動モード (10.0Hz)



(c) 3次振動モード (17.3Hz)

図6 モーダル解析による振動モード

であった1次振動と2次振動については, モーダル解析に比べて実際の配管の共振振動数は若干高めとなる傾向を示した. 一方, 鉛直方向の振動であった3次振動については, 実測値(15.9Hz)は解析値(17.3Hz)に比べて低めの値であった.

上記の共振振動数の評価に用いた伝達関数を図7

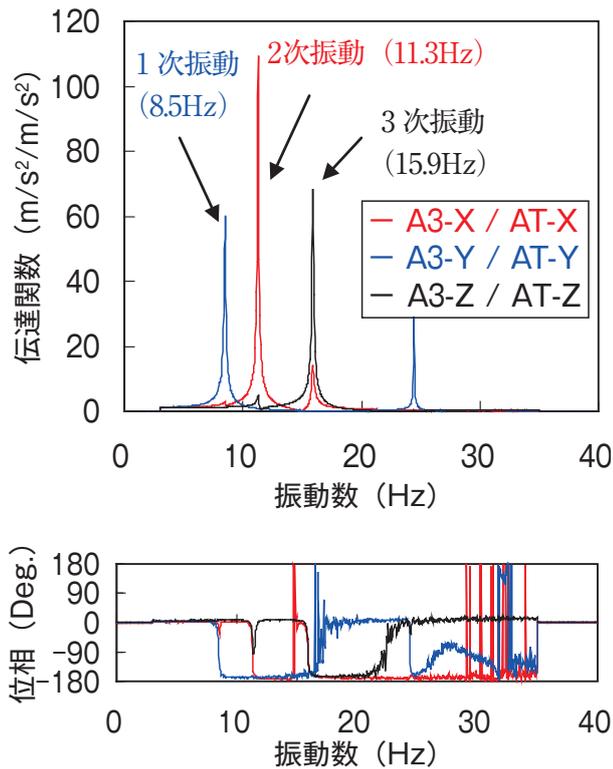


図7 伝達関数 (入力: 30gal加振, 加速度計A3)

に示す。伝達関数はS-1サポート近傍に取付けたA3加速度計の加速度から求めた。図中のA3-X/AT-Xは水平配管軸方向(X方向)に振動台を加振して得た伝達関数を示す。同様にA3-Y/AT-YとA3-Z/AT-ZはそれぞれY方向(水平配管の管軸直角方向)とZ方向(鉛直方向)に加振した結果である。

先に示した振動試験の振動モードにおいて、2次振動(水平配管の管軸方向振動)では水平配管の管軸方向の主要な振動の他に鉛直方向の振動も見られていた。同様のことが3次振動においても生じていた。図7の青実線で示したA3-Y/AT-Yでは水平配管の水平撓みの共振振動数が8.5Hzに見られる。この振動数においては他のA3-X/AT-XやA3-Z/AT-Zのピークは見られなかった。すなわち、水平配管の水平撓みの振動は、配管軸方向の振動や配管鉛直方向の振動と相関がないといえる。一方、赤実線で示したA3-X/AT-Xでは水平配管の軸方向振動の共振振動数が11.3Hzに見られるとともに、水平配管の鉛直方向振動である15.9Hzの共振振動数のピークも見られる。同様に、黒実線で示したA3-Z/AT-Zでは15.9Hzの共振ピークのほかに11.3Hzの共振ピークも示しており、水平配管の管軸方向振動と鉛直方向振動が相互に関係する共振振動が見られた。以上から、試験体に用いた配管系では、水平撓

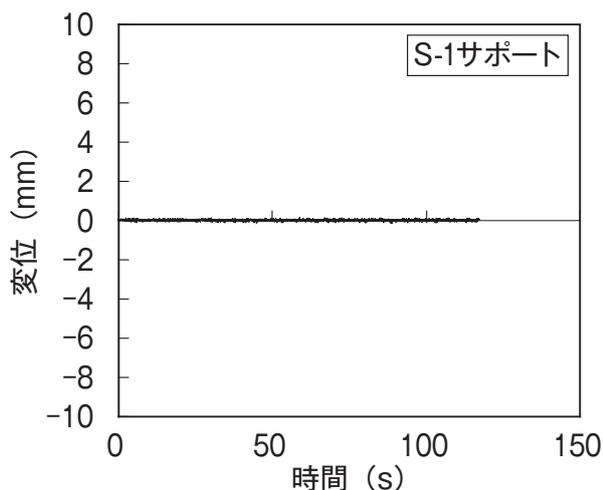
みの振動(1次振動)は独立に生じ、管軸方向(X方向)の振動(2次振動)と鉛直方向(Z方向)の振動(3次振動)は相互に関係して生じることが分かった。管軸方向(X方向)の振動と鉛直方向(Z方向)の振動が相互に関係した理由は、配管と配管サポートの間の摩擦力がサポートの管軸方向の撓みに要する力よりも大きく、配管と配管サポートが一体となって管軸方向に振動し、配管サポートの弾性変形を介して2方向の連成が生じたのではないかと考えられる。

上記の実験と解析の比較から、入力加速度30gal程度の加振力では、水平面内の振動モードである1次振動と2次振動の共振振動数では、実測値がモーダル解析に比べて高くなること、鉛直振動である3次振動では、実測値が解析値に比べて低くなる結果が得られた。また、応答加速度の点では、本試験体は水平配管の管軸方向と鉛直方向の伝達関数に互いの共振振動数の応答が見られ、相互に影響することが分かった。一方、水平配管の管軸直角方向の伝達関数には、他の2方向との相互の影響は見られなかった。この理由は、配管と配管サポートの間の摩擦力がサポートの管軸方向の曲げ撓みに要する力よりも大きく、配管と配管サポートが一体となって管軸方向に振動し、配管サポートの弾性変形を介して2方向の連成が生じたと考えられた。

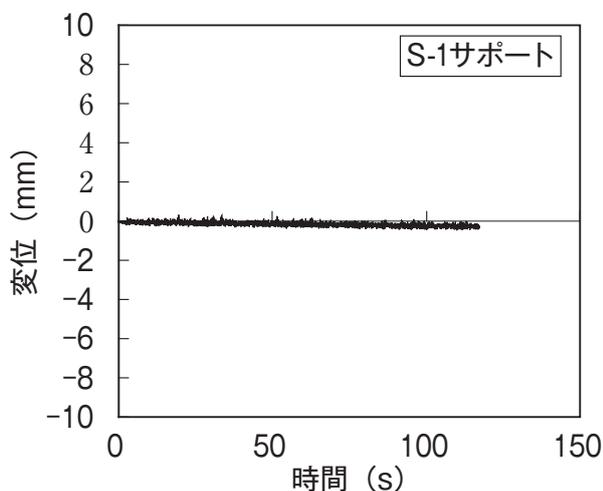
### 3.2 配管支持部の管軸方向すべり変位

試験体では配管をサポート上に固定せず直置きしているために配管とサポートの間に摺動がある。摺動と共振振動数との関係を調べた既往研究によると、配管がサポート上を摺動することにより配管系の管軸方向の共振振動数は低下すると考えられている<sup>(12)</sup>。今回の試験体での共振振動数の低下と配管のすべりとの関係を明らかにするために、配管支持部のすべり変位を示した。S-1支持点における配管の管軸方向すべりの変位量を図8に示す。入力加速度80gal~400galにおけるS-1支持点でのすべり変位を示す。

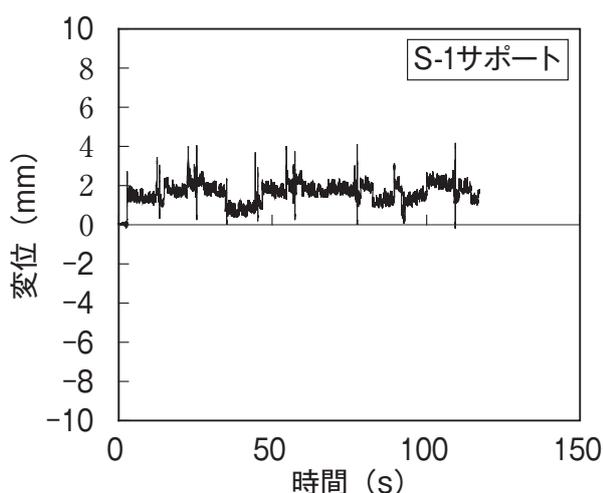
管軸すべりは、入力加速度80galでは $t=0$ の初期位置近傍において微小振動し、入力加速度200galへと加速度が増すにつれて振動振幅がわずかに増加した。一方、入力加速度400galでは管軸すべりの様相が変わり、すべり変位の振動の他に振幅2mm程度の間欠的なすべりが生じていた。従って、入力



(a) 入力加速度80gal



(b) 入力加速度200gal



(c) 入力加速度400gal

図8 配管の管軸すべり変位 (X方向加振)

加速度200gal以下では配管とサポートが一体となつて配管系が振動をしたと考えられ、入力加速度が

400galを超えると配管はサポート上を振動変位の中心移動を伴うすべりが生じたと考えられる。この傾向は、図8に示したX方向のランダム波加振以外のY方向加振、Z方向加振でも見られた。

以上の結果から、本試験体の配管と配管サポートの間のすべり状態は入力加速度の大きさにより変化していた。2.5項で述べた配管モデルでは、管軸方向について自由にすべる条件で配管とサポートの取合い点をモデル化していた。配管のすべり状況の観点からは、大きな入力加速度条件の時には配管とサポートの取合い点のモデル化を考える必要があると思われる。

### 3.3 共振振動数への配管すべりの影響

S-1支持部の配管管軸すべり変位の結果から、入力加速度が400galになると配管と配管サポートのすべり状況が変化することが分かった。このため、共振振動数に対する影響を調べるため、入力加速度を変化させたときの共振振動数を調べた。

まず、入力加速度に対する共振振動数の変化についてモーダル解析の固有振動数と比較した。比較結果を図9に示す。図中の水平の破線はモーダル解析による固有振動数を示す。1次振動数は概してモーダル解析の1次振動数を若干上回り、400gal加振においてモーダル解析の結果とほぼ同じ振動数となった。また、1次振動と同様に水平振動である2次振動でも、いずれの入力加速度においてもモーダル解析の1次振動数を上回り、400gal加振において10%程度高い振動数となった。一方、鉛直振動である3

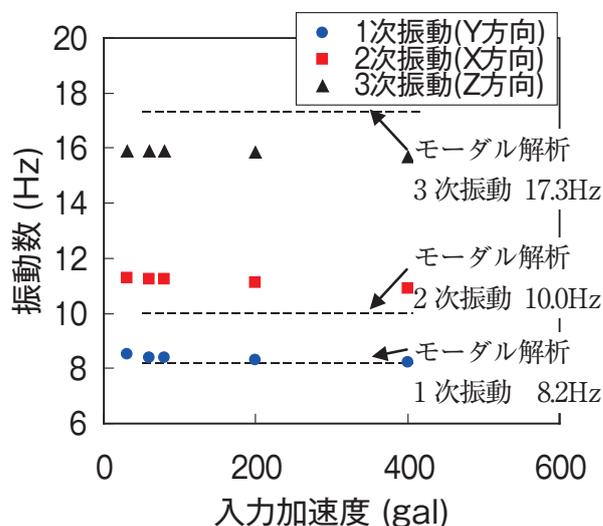


図9 振動試験と解析の共振振動数の比較

次振動はいずれの入力加速度においてもモーダル解析を下回り、400gal加振において10%程度低い振動数となった。この理由には、モーダル解析に用いた質量や振動台への固定点となる配管端部や固定治具の剛性の影響、また既往研究<sup>(12)</sup>からは配管と配管サポート間の摺動条件の影響も考えられる。この内、質量については、試験体に用いた配管の公称肉厚による質量、錘の実測データによる質量を用いており影響は少ないと考えられる。また、剛性については、配管端部1およびS-1,S-2サポートの剛性評価をFEMにより結果を用いた。摺動条件の影響評価は、今後の検討課題である。

次に、入力加速度に対する共振振動数の変化を図10に示す。縦軸の振動数比は入力加速度30galの共振振動数（1次振動数8.5Hz、2次振動数11.3Hz、3次振動数15.9Hz）に対する比である。水平面内（XY面）の振動モードである1次振動と2次振動の共振振動数は、振動台への入力加速度を増すと、次第に低下した。1次振動数は8.5Hz（30gal）から8.2Hz（400gal）へ約4%低下した。また、2次振動数は11.3Hz（30gal）から10.9Hz（400gal）へと1次振動数と同様に約4%低下した。一方、鉛直方向の振動モードである3次振動については、入力加速度200galまでの共振振動数はほぼ同じで下がり、400gal加振になると15.9Hz（30gal）から15.7Hzへと1%程度下がる傾向を示した。

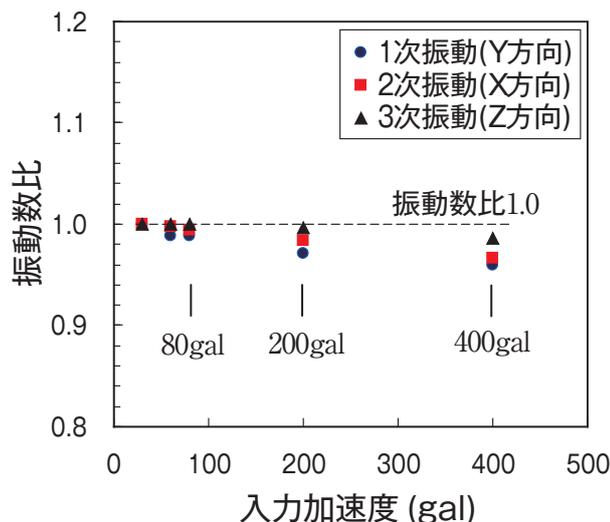


図10 入力加速度に対する共振振動数の変化

上記の入力加速度を変えたときの共振振動数の実験結果から、共振振動数は入力加速度が増すにつれて低下すること、水平面内（XY面）の共振振動数の低下傾向は鉛直振動数の低下傾向と異なることが

分かった。また、モーダル解析の固有振動数との比較から、水平方向（X方向、Y方向）の振動モードでは数値解析は振動数を低く評価し、鉛直振動の振動モードでは数値解析は振動数を高く評価する傾向を示した。振動試験とモーダル解析の比較において、水平方向振動と鉛直方向振動の傾向が異なる理由は今後の検討課題である。

### 3.4 加速度応答倍率、減衰定数に対する入力加速度の影響

3.2項に示したように、入力加速度が増すと配管のすべり状況が変化していた。配管とサポートの間の摺動は配管の応答加速度および配管系の減衰定数に影響すると考えられる。

図11は入力加速度に対する応答倍率の変化を示す。縦軸の応答加速度の倍率は図7に示したような伝達関数の1次から3次の共振振動数のピークの値である。入力加速度30galのときと同様、加速度計A3の応答加速度の結果を用いて伝達関数を求めた。入力加速度が増すと、1次から3次の全ての振動モードの応答倍率は下がる傾向を示した。このうち、水平方向の振動である1次振動（Y方向）の応答倍率は入力加速度80galまでは下がり、以降の応答倍率ではほぼ一定あるいは低下する勾配が小さくなった。もう一つの水平方向の振動である2次振動（X方向）の応答倍率は、入力加速度200galまで下がり、その後はほぼ一定となる傾向を示した。一方、鉛直方向の振動である3次振動（Z方向）の応答倍率は水平方向の振動と異なる傾向を示し、入力加速度が

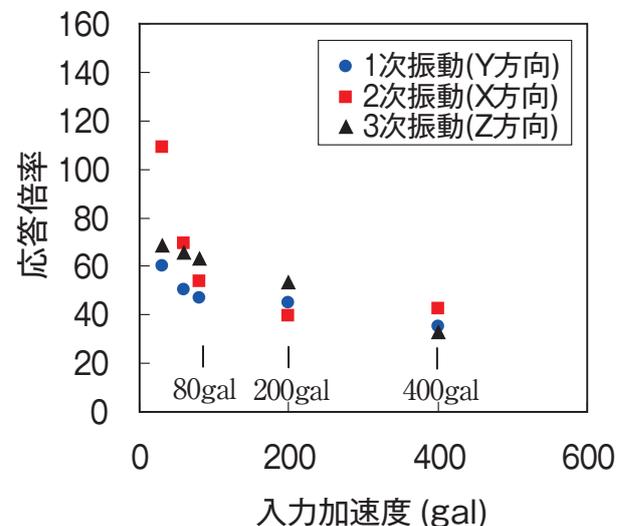


図11 加速度応答倍率の入力加速度依存性

増すにつれて400galまで単調に低下した。

以上から、応答倍率の低下傾向は水平方向の振動と鉛直方向とは異なることが分かった。配管サポート上に直置きされた配管の水平振動に対する応答倍率は入力加速度が200galから400gal程度で一定値に落ち着く傾向を示し、一方、鉛直振動である3次振動は、入力加速度が増したときの一定値への収束は見られず低下し続ける傾向を示した。この応答倍率の推移の違いは、配管と配管サポート間の撓動条件の影響によると考えられるが、詳細は、今後の検討課題としたい。

次に、図11で示した応答倍率の低下について、配管系の減衰定数を評価した。結果を図12に示す。減衰定数はFFTから求めた伝達関数に半値法<sup>(14)</sup>を適用することにより評価した。半値法とは、図13に示すような共振曲線（今回の場合は図7に示したような伝達関数）の共振振動数 ( $f_0$ ) と共振振動数の両側の振動数 ( $f_1, f_2$ ) から減衰定数を推定する方法である。 $f_1, f_2$ は $f_0$ における振動エネルギー ( $f_0$ の振動振幅の二乗) の半分の値となる振動数である。

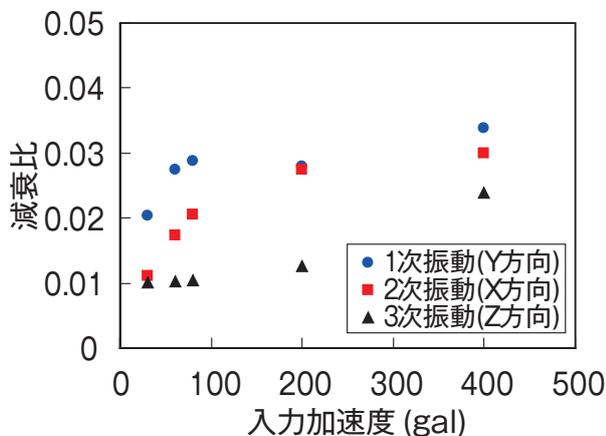


図12 減衰定数の入力加速度依存性

全ての次数の減衰定数は入力加速度が増すと増加した。1次振動の減衰定数は入力加速度30galの2%から80galで3%となり、80gal以上では約3%であった。2次振動の減衰定数は30gal時の1%から200galで約3%となり、その後もほぼ同じ値であった。水平方向の振動である1次振動と2次振動の減衰定数は30gal時の値が異なるものの、その後の増加を経て共にほぼ3%となった。一方、3次振動の減衰定数は入力加速度80galまでは約1%で推移し、その後は入力加速度が増すにつれて減衰定数は増え400galで約2.5%であった。鉛直方向の振動モード

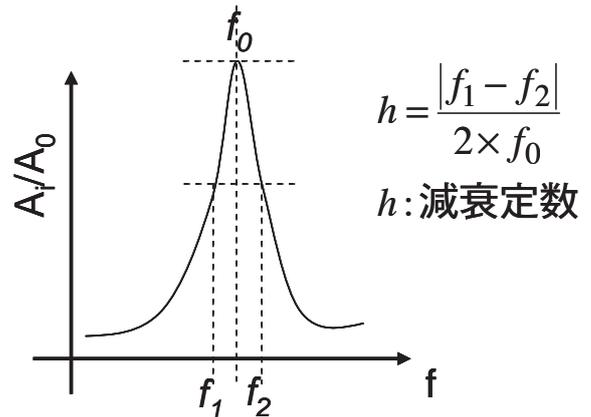


図13 減衰定数の推定に用いた半値法の説明

に対する減衰定数は、水平方向の場合と異なり、入力加速度が増すにつれて単調に増加した。

以上から、水平方向の振動モードに対する減衰定数と鉛直方向の振動モードに対する減衰定数は、入力加速度の大きさに対して異なる増加傾向を示すことが分かった。

#### 4. 考察

##### 4.1 減衰定数への入力加速度の影響、設計用減衰定数との比較

今回の振動試験で得られた減衰定数について、原子力発電所の配管系の耐震設計に用いる原子力発電所耐震設計技術規程 (JEAC4601-2008)<sup>(15)</sup>に記載されている設計用減衰定数と比較検討した。本試験体は配管に取り付けられた支持具の種類及び数量からJEAC4601-2008に規定された配管区分IVに属し、設計用減衰定数は0.5%となる。

ランダム波加振試験で得られた減衰定数は、入力加速度30galにおける減衰定数1%を最小値として入力加速度が増すと大きくなった。また、入力加速度が増すと、設計用減衰定数は安全側評価である一方で試験体の減衰定数とかい離した。今回の結果によれば、設計用減衰定数を用いて地震応答を解析すると、大きな入力加速度 (今回の試験では400gal) に対する評価は小さな入力加速度 (今回の試験では30gal) に対する評価よりもより安全側の評価となっていると考えられる。入力加速度に対する依存性を考慮できれば、実際の配管で観測された、入力加速度を上げると減衰定数が増加した現象に近い減衰定数を用いることができる。今回の結果は、巨大地震に遭遇して大きな配管変位を生ずる地震応答評価を

合理的に行うためには、配管と配管サポートの間のすべりあるいは、これを反映した減衰定数を考慮することが必要であることを示している。

## 5. 結言

本研究は、強地震動における配管系の耐震裕度評価の向上のために、配管サポートを含む配管系の地震応答を実験により把握すること、配管サポートの弾塑性変形の影響を考慮した数値解析手法の検討を目的としている。

本論文は、弾塑性範囲での試験に先立ち実施した、弾性範囲内での加振試験について報告した。試験では門型の配管サポート上に敷設された配管に対して、最大加速度400galまでのランダム波弾性加振試験を行い、配管系の共振振動数と応答加速度について入力加速度の影響を調べた。

- (1) 共振振動数は概して入力加速度が増すにつれて低下した。水平面内の共振振動数の低下傾向は鉛直方向の振動数の低下傾向と異なった。入力加速度が30galから400galに増すと、水平面内の共振振動数は約4%低下した。一方、鉛直方向の振動数は約1%低下した。
- (2) 従来手法で行ったモーダル解析の固有振動数と実験の共振振動数を比較すると、数値解析は、水平面内の振動モードの共振振動数を低く評価する一方、鉛直振動の振動モードの共振振動数を高く評価する傾向があった。
- (3) 減衰定数は入力加速度が増すと増加した。入力加速度に対する減衰定数の増加傾向は水平面内の振動モードと鉛直振動の振動モードで異なった。水平面内の振動モードの減衰定数は200gal以上ではほぼ一定値の3%となった。一方、鉛直方向の振動モードの減衰定数は単調に増加した。
- (4) 実験で得られた減衰定数は、JEAC4601-2008に記載された設計用減衰定数0.5%に比べて、全ての入力加速度で大きくなった。入力加振力に対する依存性を考慮できれば、実際に観測された傾向に近い減衰定数を用いることができる。配管と配管サポートの間のすべりあ

るいは、これを反映した減衰定数を考慮することが必要であることを示すと考えられる。

## 6. 今後の予定

今後、配管サポートを含む配管系の地震応答の実験データを取得し、配管サポートの弾塑性変形の影響を考慮した数値解析手法の検討を行う予定である。

## 謝辞

振動試験実施にあたり、(株)石川島検査計測株式会社 計測事業部の片岡威氏、露木敦氏、岩船正明氏にご協力頂いたことに謝意を表す。また、元川崎重工株式会社 鈴木道明氏からは配管サポートの耐震評価方法に関し幅広く助言を頂いた、ここに記して謝意を表す。

## 文献

- (1) K. Tai, T. Ito, K. Suzuki, Y. Sasaki, H. Abe and K. Kuroda, "Proving Test on the Seismic Reliability of the Main Steam Piping System (Part1 : Simulation for PWR Main Steam Piping)", Trans.SMiRT 14, K15-1, (1997) .
- (2) Y. Namita, K. Suzuki and H. Abe, "Seismic Proving Test of Ultimate Piping Strength (Piping Component Test Result and Simplified Piping System Test Planning)", ASME PVP, Vol.428-1, pp.13-19, (2001) .
- (3) K. Suzuki, Y. Namita, H. Abe, I. Ichihashi, K. Suzuki, M. Ishiwata, T. Fujiwaka and K. Tai, "Seismic Proving Test of Ultimate Piping Strength (Test Results on Piping Component and Simplified Piping System)", ASME PVP, Vol.445-1, pp.99-106, (2002) .
- (4) K. Suzuki, Y. Namita, H. Abe, I. Ichihashi, K. Suzuki, M. Ishiwata, T. Fujiwaka, and K. Tai, "Seismic Proving Test of Ultimate Piping Strength (Simulation Analysis of Simplified Piping System Test)" ASME PVP, Vol.466, pp.22-30, (2003) .

- (5) K. Suzuki, Y. Namita, H. Abe, I. Ichihashi, K. Suzuki, T. Sakakida, T. Sato and H. Yokota, "Seismic Proving Test of Ultimate Piping Strength (Status of Design Method Confirmation Test)", Trans.SMiRT 17, K15-2, (2003) .
- (6) E. Shirai, T. Yamada, K. Ikeda, T. Yoshii, M. Kondo, H. Okamoto and K. Tai, "Seismic Design Margin of the Piping and Support System Part1: Static Loading Test of the Support", Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2010-25524, (2010) .
- (7) I. Nakamura, "Seismic Safety Capacity of a Piping System with Pipe Supports Based on the Shake Table Test", Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2013-97852, (2013) .
- (8) T. Takahashi and A. Maekawa, "Effect of Elastic Plastic Property of Support Structure on Seismic Response of Piping System", Trans.SMiRT 21, 282, (2011) .
- (9) T. Takahashi and A. Maekawa, "Seismic Response Reduction in Piping Systems Using Plastic Deformation of Pipe Support Structures", Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2012-78052, (2012) .
- (10) T. Takahashi and A. Maekawa, "Analytical Study on Effect of Failure of Pipe Support Structure on Seismic Response of Piping System", Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2013-97222, (2013) .
- (11) T. Takahashi and A. Maekawa, "Impact of Deformation Stiffness beyond Yield Point of Pipe Support Structures on Nonlinear Seismic Response Analysis", Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2014-28371, (2014) .
- (12) E. Shirai, K. Eto, A. Umamoto, T. Yoshii, M. Kondo, M. Monde and K. Tai, "Inelastic Seismic Test of the Small Bore Piping and Support System Part1: Seismic Proving Test of the Small Bore Piping System", Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2008-61342, (2008).
- (13) 渡邊鉄也, 三森友彦, 鈴木浩平, 清水信行, 小川信行, 箕輪親宏, "摩擦サポートを有する配管系の振動実験", 日本機械学会論文集 (C編), Vol.58, 552号, 1992.
- (14) 藤田勝久, "振動工学-振動の基礎から実用解析入門まで-", 森北出版, (2005).
- (15) (社) 日本電気協会 原子力規格委員会 "原子力発電所耐震設計技術規定 JEAC4601-2008", 日本電気協会, (2008).