

配管用支持構造物の弾塑性特性と配管の地震応答との相関に関する考察

Effect of Elastic-Plastic Property of Support Structure
on Seismic Response of Piping System

高橋 常夫 (Tsuneo Takahashi) 前川 晃 (Akira Maekawa)
鈴木 道明 (Michiaki Suzuki)



株式会社 **原子力安全システム研究所**

Institute of Nuclear Safety System, Incorporated

〒919-1205 福井県三方郡美浜町佐田64号

Tel 0770-37-9100 Fax 0770-37-2008

URL <http://www.inss.co.jp>

配管用支持構造物の弾塑性特性と配管の地震応答との相関に関する考察

Effect of Elastic-Plastic Property of Support Structure on Seismic Response of Piping System

高橋 常夫 (Tsuneo Takahashi)*¹ 前川 晃 (Akira Maekawa)*¹ 鈴木 道明 (Michiaki Suzuki)*²

要約 原子力発電所耐震技術規程が発行⁽¹⁾され、配管系の耐震設計において、塑性変形によるエネルギー吸収を利用した配管用支持構造物（以下、サポート）の設計が可能となった。これにより、サポートの塑性変形を利用して、配管の地震応答を低減することが期待される。本研究では、既設配管を想定した配管系に塑性変形を許容するサポートを取り付けた時の配管の振動状態を検討した。サポートの塑性変形を1箇所だけ許容した配管を用いた数値計算を行い、サポートの弾塑性挙動が配管の地震応答に与える影響を検討した。3次元配置の配管モデルを用いた弾塑性時刻歴応答解析と複素固有値解析（固有振動数毎の減衰比が求まる）を行い、地震応答および固有振動数における振動の形（振動モード）と減衰比（モード減衰比）を求めた。サポートの塑性変形を許容することにより、モード減衰比は増加し個々の振動モードの揺れが治まりやすくなることが分かった。モード減衰比の増加の程度は振動モード毎に異なった。減衰比の増加の程度は個々の振動モードの揺れやすさを示す指標（有効質量比）に概ね比例した。サポートの塑性変形を許容することにより、配管が受ける地震力を特定の振動モードに対して低減することができる。

キーワード 配管, 支持構造物, 地震応答, 減衰, 固有値解析, 耐震設計

Abstract Technical code for seismic design of nuclear power plants was endorsed. Support structure that allows plastic deformation is available for piping system design. Using the support structure, it is hoped that seismic response of piping system is reduced. The objective of this study is to discuss the effect of the support structure's plastic deformation on the damping coefficient of the piping system. Simulation analysis of a piping system provided at one position with a support structure that allows plastic deformation was conducted. Focusing on three-dimensional piping system, relation between elastic-plastic behavior of support structure and seismic response of piping system was studied using non-linear time history analysis and complex eigenvalue analysis. Vibration modes and modal damping ratio were discussed. The modal damping ratio was increased when the plastic deformation of the support structure was allowed. The modal damping ratio did not uniformly increase for all vibration modes, but drastically increased for a few modes. The vibration modes had relatively high modal effective mass ratio and unique mode shape in which the piping vibrated in the direction as supported by the elastic-plastic support. The increase of the modal damping ratio was approximately proportional to the size of the modal effective mass ratio. This shows the effect of elastic-plastic behavior of the support structure, by which the damping of piping system increases and the seismic response decreases, depends on the dominant vibration modes excited by seismic motion.

Keywords Piping System, Support Structure, Seismic response, Damping, Eigenvalue Analysis, Seismic Design

1. 緒言

原子力プラントの耐震設計では、地震時の機器・

配管の変形を弾性範囲に収める弾性設計法が採られてきている。この耐震設計と設計用地震動により評価される機器・配管は、機能喪失に対して大きな裕

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

*2 川崎重工工業株式会社

度を有することが実証試験研究⁽²⁾で確認されている。一方で、耐震裕度向上の対策が、機器・配管の耐震安全性を一層向上させるために行われている。発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針の改訂により設計用地震動の大幅な変更が行われ、配管についてはサポート補強が行われてきている。しかしながら、更に設計用地震動が大きくなる場合は、配管については配管用支持構造物（以下、サポートと呼ぶ）として架構タイプのサポートを弾性設計して追設する従来の考え方では設置スペースの問題から対応できなくなる可能性が考えられる。将来的には、配管の弾塑性の応答挙動を利用した設計手法の適用が望まれるが、現状では配管の応答をサポートの弾塑性応答挙動のみを考慮して低減させる方法が考えられる。

サポートが弾塑性変形するような原子力配管の地震応答は、片持ち梁形状の配管およびやや複雑な配管を用いた試験研究が行われ、サポートの支持反力と変位量の関係についてヒステリシス形状やその安定性⁽¹⁾が検討されている。また、弾塑性変形をするサポートの終局強度については、小口径配管でよく使われる定ピッチスパン設計法⁽³⁾で設計した配管の加振試験の中で、耐震裕度とサポートの破損状態⁽⁴⁾が確認されている。塑性変形するサポートに支持された配管の応答がS₂地震動（設計用最強地震動）⁽⁵⁾の9倍程度の地震力に対して調べられている。これらの研究は、強い地震動を受けてサポートが弾塑性応答するような配管を扱い、配管の耐震裕度の把握に有益である。一方、配管の一部に、塑性変形を許容するようなサポートを取り入れた場合の応答、すなわち既設配管に適用した時の振動状態の検討をしたものは見られない。既設配管の地震応答の低減の観点からは、弾性設計されたサポートを有する既設配管に、塑性変形しやすいサポートを耐震裕度向上策として付けた配管の振動状態を検討するのは有用と考えられる。

本研究では、弾性設計されたサポートを有する既設配管を想定した配管モデルに、塑性変形を許容するサポートを耐震裕度向上策として取り付けた時の配管の振動特性を、数値解析により検討した。

2. 数値解析

図1に配管の形状を示す。配管は2BSch40配管と4BSch40配管の分岐を有する3次元形状である。

配管端部の境界条件は固定とした。サポート位置の境界条件は、Uボルトによる支持とし配管軸直角2方向の並進成分以外は自由とした。配管およびサポートの材質は炭素鋼とした。

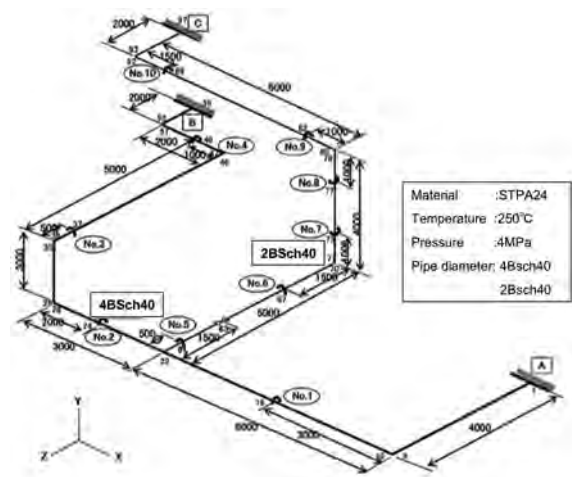


図1 解析モデル

表1 解析条件

Case	塑性変形を許容するサポートの荷重変位の関係
1	弾性
2	弾塑性

塑性変形を許容するサポートを有する配管の地震応答は、時刻歴応答解析により求めた。解析ケースを表1に示す。

過大な変形を受けるサポートは、支持反力-変形量の関係にヒステリシスを示す。このヒステリシス形状はサポートの破損状態⁽⁵⁾に依存する。塑性変形を許容するサポートの支持反力-変形量の関係は、サポート柱脚部が塑性化するような変形に見られる形状をモデル化した。図2に数値解析に用いた支持反力-変形量の関係を示す。サポートの支持反力と変形量の関係はバイリニアモデル⁽⁵⁾で表し、第1剛性を10kN/mm、第2剛性は第1剛性の1/10の1kN/mm、降伏力を2.5kNとした。サポートが塑性変形をして、配管の地震応答を低減する効果を検討するために、弾性解析で最大反力となった1箇所をサポート（図1中のNo.5サポート）のみに弾塑性特性を与え、その他のサポートは弾性特性として

モデル化した。No.5 サポート以外のサポートと配管の減衰はレーリー減衰によりモデル化した。レーリー減衰のパラメータ⁽⁶⁾は、配管の1次と2次の固有振動数における減衰比が0.01となるよう設定した。地震動は原子力施設の耐震設計で標準的に用いられる波形を用い、No.5 サポートが有意な塑性変形をする大きさの加速度を与えた。地震波形を図3に示した。

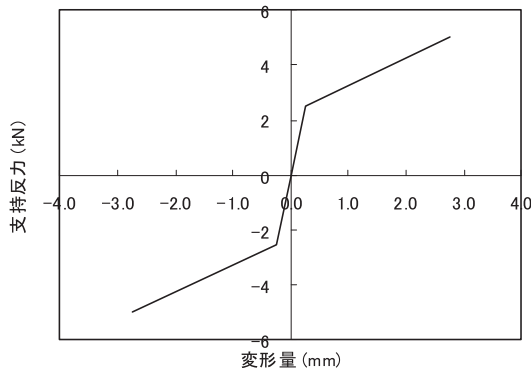
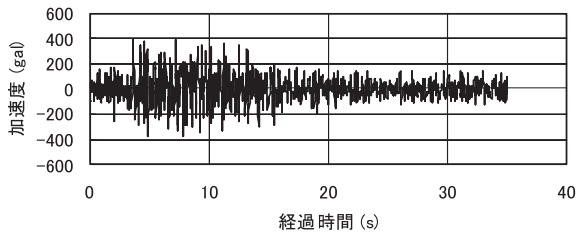
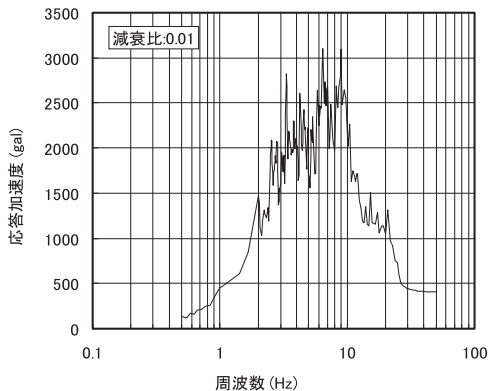


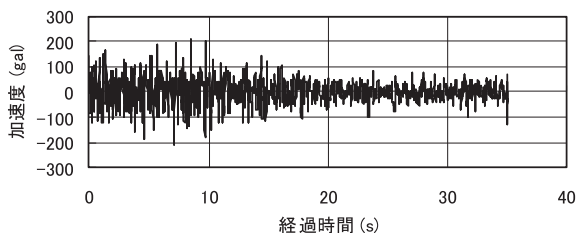
図2 一方向荷重を受けたサポートの支持反力と変形量の関係



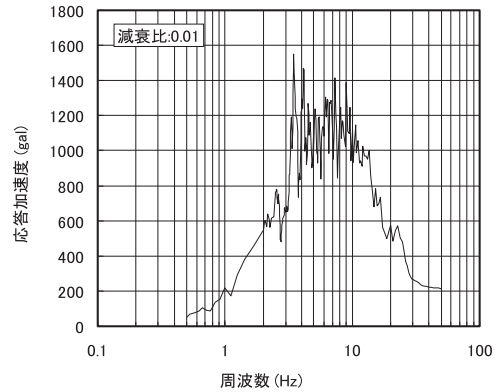
(a) 水平方向 入力波形



(b) 水平方向 床応答スペクトル



(c) 鉛直方向 入力波形



(d) 鉛直方向 床応答スペクトル

図3 解析に用いた地震動

No.5 サポートが塑性変形することにより付与される減衰力が、配管の振動特性に与える影響について、固有値解析で得られる固有振動数毎に求まる減衰比(モード減衰比)を用いて検討した。No.5 サポートは、地震力による繰返し変形を受けるとヒステリシスを示す非線形な応答をする。固有値解析を行うにあたり、この非線形な応答を等価線形化法⁽⁷⁾により処理し、No.5 サポートの非線形応答を等価剛性と等価減衰比によりモデル化した。図4に示す繰返し変形を受けるサポートの支持反力-変形量の関係の模式図を用いて、等価剛性と等価減衰比の定義を説明する。図は繰返し変形によりサポートが $\pm \delta_{max}$ の最大変形を受ける例を示す。塑性変形する程の外力を受けるサポートは、まず、降伏前のばね定数 K_1 で塑性変形を生じ始める変形量 δ_e まで変形する。その後、降伏後のばね定数 K_2 で外力の最大値に対応する最大の応答変位 δ_{max} まで変形する。 δ_{max} 到達後、サポートの変形量は外力の低下に連れて初期剛性であるばね定数 K_1 で減少する。その後はこれまでの逆方向の荷重を受けて変形する。このようにして、一定振幅の繰返し変形を受けているサポートの支持反力-変形量の関係は、図中の実線で示されるループ形状の履歴形状を描く。この履歴形状において、等価剛性 K_{eq} は最大変形量 δ_{max} と原点とを結ぶ勾配により定義される。また、等価減衰比 h_{eq} はこのループ形状の面積として求まる履歴減衰の吸収エネルギー ΔE と等価剛性、変形量 δ を用いて式(1)により定義される。

$$h_{eq} = \frac{\Delta E}{\frac{1}{2} \cdot 4\pi K_{eq} \delta^2} \tag{1}$$

本検討では δ の値に δ_{max} を用いて等価減衰比を求めた。固有値解析に用いた等価剛性および等価減衰比を表 2 に示す。

数値解析は ABAQUS ver6.8 を用いて行った。配管を ELBOW31 要素，弾塑性特性を示すサポートを T3D2 要素（トラス要素）によりモデル化した。繰返し変形に対する硬化則には移動硬化則⁽⁸⁾を用いた。

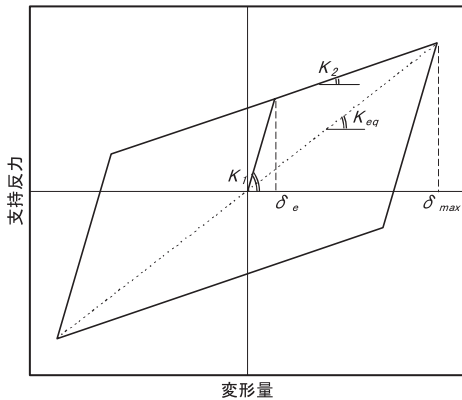


図 4 繰返し変形を受けるサポートの支持反力-変形量の関係

表 2 固有値解析に用いた No.5 サポートの等価剛性および等価減衰比

等価線形化に用いた動的応答値の諸元						等価線形化法	
変形量			剛性			等価剛性 K_e [kN/mm]	等価減衰比 h_{eq} [-]
δ_{max} [mm]	δ_e [mm]	δ_{max}/δ_e [-]	K_s [kN/mm]	K_T [kN/mm]	K_s/K_T [-]		
1.75	0.25	7.0	1	10	0.1	2.3	0.17

3. 数値解析結果

塑性変形を許容したサポート（サポート No.5）の取付け位置の応答値の比較を表 3 に示す。サポート No.5 のサポート方向の変位（X 方向）は、ほぼ同じ値を示した。サポート点反力は、サポートの弾塑性特性を考慮することにより低下した。

配管の固有値解析結果を表 4 に示す。各列は、振動次数、No.5 サポートが弾性変形する Case 1 の固有振動数、No.5 サポートに塑性変形を許容する Case2 の固有振動数とモード減衰比、およびモード減衰比の増加率を示す。モード減衰比の増加率は、配管全体を弾性系とした場合の減衰比 $h_e=0.01$ に対する増加率を示す。

各振動次数の固有振動数の変化は小さいが、モー

ド減衰比は 5 次モードで約 5 倍，11 次モードで約 2 倍に増加した。図 5 は、塑性変形を許容するサポートの影響により生ずる固有振動数における振動形状（固有振動モード）の変化を示す。図の左側は、No.5 サポートに塑性変形を許容しない時の振動モード，右側は塑性変形を許容する時の振動モードを示す。図は、個々の振動モードの揺れやすさを示す指標（有効質量比⁽⁴⁾）の大きさを参考に、振動モードは主要なものを示した。各振動モードで振動する配管部位は、有効質量比の相対的に大きい 5 次，6 次モードを除いてほぼ同じであった。

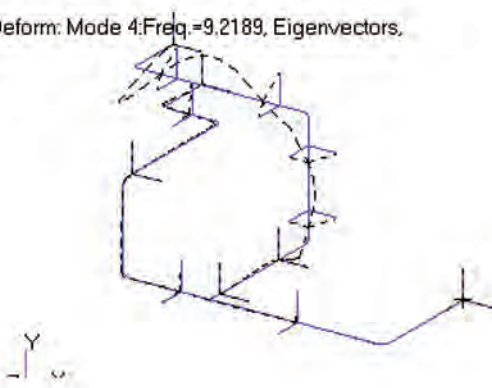
表 3 No.5 サポート取付点の地震応答の比較

Case	最大変位(mm)			最大反力(N)
	X 方向	Y 方向	Z 方向	
1	2.22	0.90	1.92	3166
2	2.28	0.89	1.90	2731

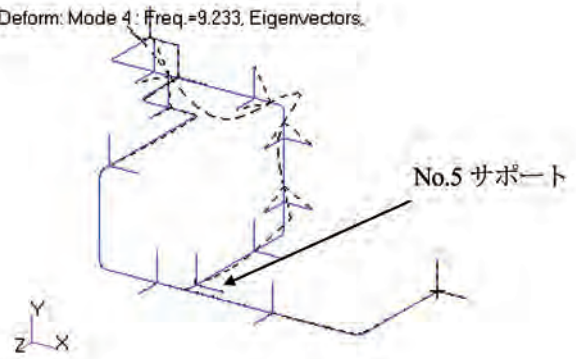
表 4 配管の固有振動数および減衰比の増加率

振動次数	No.5 サポートの荷重変位の関係			
	弾性	弾塑性		
	振動数 (Hz)	振動数 (Hz)	モード減衰比 h (-)	モード減衰比の増加率 $(h/h_e, h_e=0.01)$
1	6.2	6.2	0.010	1.00
2	6.4	6.4	0.010	1.00
3	7.9	7.8	0.016	1.56
4	9.2	9.2	0.011	1.13
5	9.5	9.0	0.049	4.93
6	10.3	9.5	0.010	1.01
7	11.2	11.1	0.012	1.17
8	11.4	11.4	0.010	1.01
9	13.1	13.1	0.010	1.05
10	13.6	13.6	0.010	1.01
11	16.1	15.1	0.024	2.37
12	18.1	18.1	0.010	1.00
13	18.5	18.5	0.011	1.07
14	19.1	19.1	0.010	1.02
15	19.7	19.7	0.011	1.06
16	20.6	20.3	0.016	1.60

Deform: Mode 4: Freq.=9.2189, Eigenvectors.

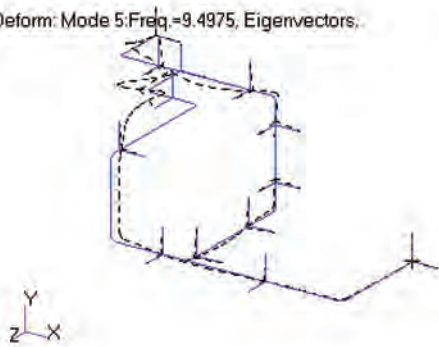


Deform: Mode 4: Freq.=9.233, Eigenvectors.

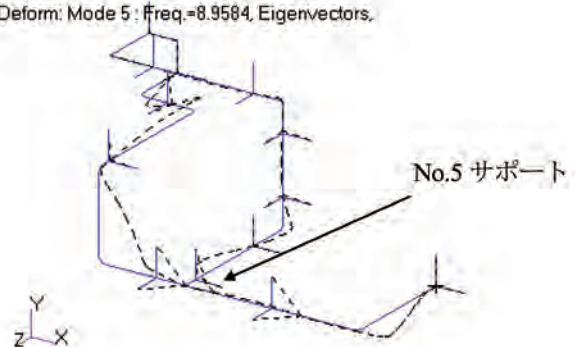


(a) 4次振動モード (有効質量比 :0.07)

Deform: Mode 5: Freq.=9.4975, Eigenvectors.

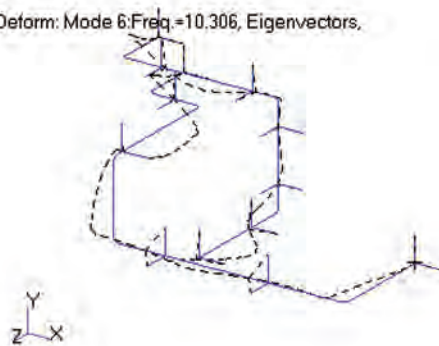


Deform: Mode 5: Freq.=8.9584, Eigenvectors.

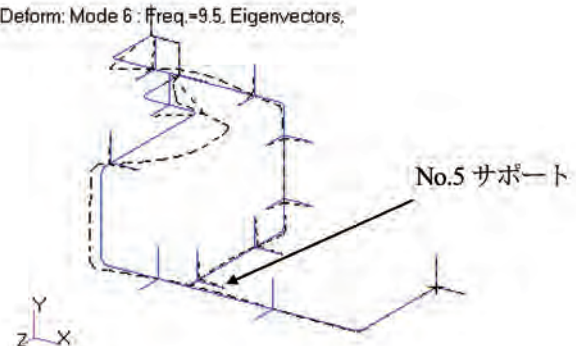


(b) 5次振動モード (有効質量比 :0.15)

Deform: Mode 6: Freq.=10.306, Eigenvectors.

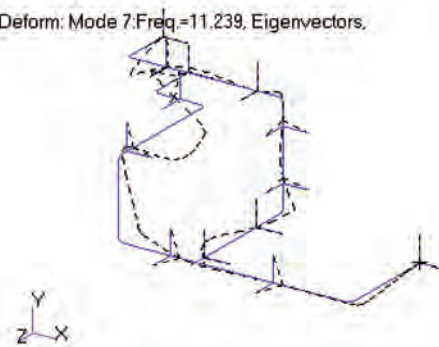


Deform: Mode 6: Freq.=9.5, Eigenvectors.

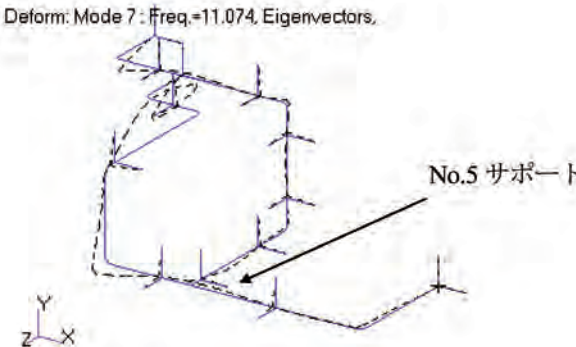


(c) 6次振動モード (有効質量比 :0.15)

Deform: Mode 7: Freq.=11.239, Eigenvectors.



Deform: Mode 7: Freq.=11.074, Eigenvectors.



(d) 7次振動モード (有効質量比 :0.05)

図5 振動モード図 (左: Case 1, 右: Case2)

4. 考察

塑性変形を許容したサポートにより、どのような場合にモード減衰比が増すのかについて、有効質量比および振動モードを用いて検討した。各モード次数の有効質量比を図6に示す。

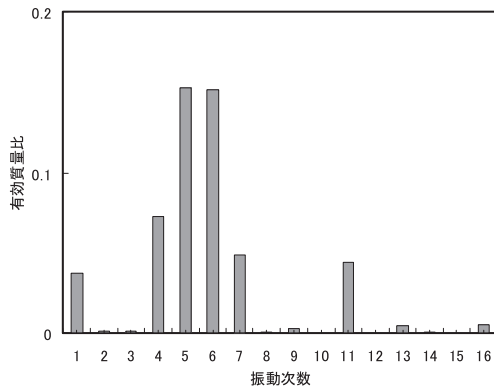


図6 配管系の振動次数毎の有効質量比

モード減衰比は、表3に示したように、3次、5次、7次、11次および16次で増加した。相対的に大きな有効質量比を示す次数は、モード減衰比の増加の見られた次数に概ね一致する。したがって、有効質量比がモード減衰比の増加を予測する因子である可能性がある。ただし、6次モードのモード減衰比は増加しておらず、有効質量比のみがモード減衰比の

増加予測因子ではないことを示唆している。そこで、図7に示す6次モードの固有値解析結果から他の予測因子を検討する。

図の左上は鳥瞰図、他は各軸方向の投影図を示す。図中の矢印は固有値解析において弾塑性特性を与えたNo.5サポートの位置を示す。弾塑性サポート取付け位置の変位は、サポートNo.5の弾塑性特性を示すX方向の振動変位ではなく、配管の管軸方向への振動変位である。このため、サポートNo.5の弾塑性挙動による減衰の増加に効果が無かったものである。モード減衰比は弾塑性サポートの支持方向に振動する振動モードにおいて増加する。

今回のように、弾塑性特性を示すサポートを1箇所のみに取り付けた場合、モード減衰比は、そのサポートの関連する振動モード全てにわたり一様に増加するわけではなく、振動モードにより増加するものとそうでないものがある。従って、弾塑性挙動によって地震エネルギーの吸収を期待するサポートは、想定する地震波によって卓越する振動モードに対して大きなモード減衰比を持つ必要がある。数値解析の結果から、有効質量比とサポート変形量が配管耐震設計にサポートの弾塑性特性を取り込んだ場合の評価指標になり得ると考えられる。従って、有効質量比に加えて、振動モードと弾塑性サポートの支持方向の関係が評価指針に必要と考えられる。

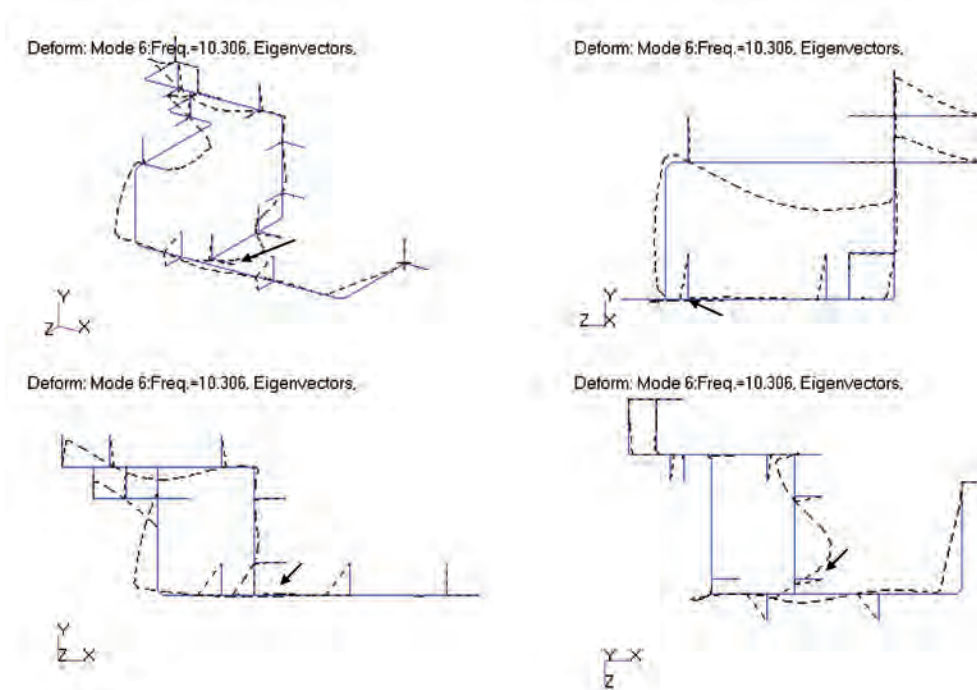


図7 6次振動モード図

5. 結言

弾性設計されたサポートを有する既設配管を想定した配管モデルに塑性変形しやすいサポートを導入した時の配管の振動特性を、数値解析により検討した。3次元配置の配管に対する非線形時刻歴応答解析と複素固有値解析を行い、サポートの弾塑性挙動による減衰比の増加を配管の振動モードと関連付けて示した。

配管のそれぞれの固有振動モードに対応する減衰比は、塑性変形しやすいサポートを使うことにより増加するが、増え方は固有振動モード毎に異なる。また、塑性変形を許容するサポートを配管系の1箇所に取り付けた今回のケースでは、配管の固有振動数の変化は小さかった。減衰比は、塑性変形しやすいサポートが揺れる固有振動モードにおいて増え、増加率の大きさは固有振動数毎の有効質量比の大小関係に概ね合う傾向を示した。

既設配管に塑性変形しやすいサポートを取り付けると、全ての固有振動モードの減衰比を増やすわけではないが部分的に増加する。サポートを適切に取り付けければ、特定の固有振動モードに対応する応答加速度を下げることに利用できると思われる。

6. 今後の課題

今回は入力地震動の大きさを変えずに解析を行っている。振動特性の入力加速度依存性の検討は今後の課題である。

文献

- (1) 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程 JEAC4601-2008”, 日本電気協会, (2008).
- (2) (財)原子力発電技術機構, “原子力発電施設耐震信頼性実証に関する報告書 その1 配管系終局強度”, 平成15年度報告書.
- (3) 日本電気協会 原子力規格委員会, “原子力発電所耐震設計指針 JEAG4601-1984”, 日本電気協会, (1984).
- (4) E.Shirai, et al., “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).

- (5) E.Shirai, et al., “Seismic Design Margin of the Piping and Support System Part3:Evaluation of Seismic Margin of the Piping System”, Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2010-25932, (2010).
- (6) 藤田勝久, “振動工学”, 森北出版, (2005).
- (7) (社)土木学会編, “動的解析と耐震設計”, 技報堂出版, (1989).
- (8) ABAQUS Users Manual, Version 6.8, ABAQUS Inc., (2008).