

支持構造物の塑性変形を考慮した配管系地震応答

Seismic Response of Piping Systems Utilizing Plastically Deformable Pipe Support Structures

高橋 常夫 (Tsuneo Takahashi)* 前川 晃 (Akira Maekawa)*

要約 配管および配管支持構造物は、設計条件を上回る強地震動において永久変形が残留する塑性変形を生じる。このような地震応答に関連する実験的研究、解析的研究は圧力バウンダリとなる配管の研究については多くあるが、支持構造物の塑性変形に関連したものはあまり見られない。そのため、支持構造物の塑性変形を考慮した配管系の地震応答の特徴を明らかにすることや解析のモデル化方法を含めた地震応答評価法の開発は、強地震動下の配管系の現実的な応答評価のために必要と考えられる。本研究は、配管系に取付けた支持構造物の塑性変形による地震応答特性について調べた。応答加速度および揺れ方の変化を支持構造物の荷重変位曲線の変形勾配と関連づけて明らかにした。配管系の地震応答は有限要素法を用いて弾塑性時刻歴応答解析により求めた。検討は2B配管と4B配管からなる配管系を用いて行った。解析の結果、支持構造物の荷重変位曲線の初期勾配の大きさは、配管系の主要な揺れ方に大きく影響した。支持構造物に初期勾配の小さい柔らかい構造を用いた場合には、配管系は只一つの基本的な揺れ方で揺れるようになった。支持構造物の2次勾配の大きさは、今回の検討範囲では、地震応答加速度の下がる領域および低下量に影響していない。この結果から、支持構造物のモデル化においては、多様な支持構造物の荷重変位曲線に見られる2次剛性の違いを弾完全塑性体モデル（降伏荷重以降の耐力力の増加を見込まないモデル）で一様に扱えることが示唆された。また、配管系の地震応答は、支持構造物の塑性変形を伴う振動により、支持構造物の取付け点の近傍のみならず近接エルボまで広範囲で低下することが分かった。

キーワード 配管系、配管系支持構造物、地震応答、耐震設計、塑性変形

Abstract Pipes and pipe support structures deform plastically to become permanently deformed when they are vibrated in a large earthquake above the seismic design condition. Regarding the seismic response as related to the plastic deformation, there have been many studies on pipes because of the importance of the structural integrity of the pressure boundary. But there have been few studies on the pipe support structures. It is necessary to clarify the seismic response characteristic of piping systems on the plastically deformable pipe support structures and to develop a seismic response evaluation method including the pipe support modeling for improved evaluations of seismic response over the design condition level.

This study describes the seismic response characteristic of a piping system made of 2B pipe and 4B pipe regarding the plastic deformation of the pipe support structures. Change in seismic response acceleration or vibration behavior was identified in relation to the deformation slope of the load-displacement curve of pipe support structures. The seismic responses of the piping system were calculated by the finite element method. The elastic plastic time history analysis was used to obtain the seismic response. From the results, the amount of the initial slope of the load-displacement curve of the pipe support structures largely influenced the difference of the change in the major vibration deformation of the piping system sitting on the plastically deformable pipe support structures. In the case of using a soft support structure, the piping system became to vibrate only in a major vibration mode. The amount of the secondary slope had little affected on the amount and area of the decrease of the seismic response acceleration due to the plastic deformation of the pipe support structures. This result suggested that the secondary gradient of the load-displacement curve could be modeled in elastic-plastic model in a unified manner in modeling various types of pipe support structures. The seismic response of the piping system was reduced not only near the support point but also in a wide area surrounding nearby elbow elements due to the plastic deformation of the pipe support structures.

Keywords Piping System, Pipe Support Structure, Seismic response, Seismic Design, Plastic Deformation

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

1. 緒言

配管系の耐震設計は、配管系支持構造物も含めて構造物に永久変形を残さない弾性設計により行われる。一方で、実際の配管系は、設計条件を上回る強地震動を受けると配管や配管系支持構造物に永久変形を残す塑性変形をしながら地震応答することが考えられる。近年、巨大地震が頻発するようになり、想定した設計条件を超えた場合の耐震設計のあり方が課題となってきた。支持構造物が塑性変形する状態の配管系の耐震裕度研究はあまり行われておらず、そのため配管系支持構造物を含む配管系全体の振動特性が十分に把握されているとは言い難い。

配管系の塑性変形の関与する地震応答については、圧力バウンダリの維持の重要性から配管自体の終局強度に関する研究^{(1)~(6)}が多く行われている。一方、支持構造物に関する研究はあまり見られない。また、支持構造物の研究においても、地震応答を抑えることを主たる機能とするメカニカルスナバに関する研究⁽⁷⁾

やダンパーに関する研究^{(8)・(9)}などは行われてきているが、レストレイント等の配管系に多用されている鋼構造の支持構造物に関する研究は少ない^{(10)・(11)}。そのため、鋼構造の支持構造物の塑性変形を伴う地震応答を明らかにすることは、強地震動下における配管系耐震評価の信頼性を向上させると思われる。従って、塑性変形を伴う地震応答の特徴を明らかにし、解析のモデル化方法を含めた地震応答評価法を開発することは、強地震動下の配管系の応答評価のために必要である。

支持構造物のような鋼構造物の形状は多様であるが、力学的特性の面からは、構造物に付加された荷重とその時の変形量からなる荷重変位曲線により統一的に表される⁽¹²⁾。本研究は、支持構造物の塑性変形による地震応答の変化を支持構造物の荷重変位曲線に見られる変形勾配と関連づけて明らかにする。検討では、有限要素法を用いた数値計算を利用して、2B配管と4B配管からなる配管系を対象とした弾塑性地震応答解析を行い、応答特性を分析した。

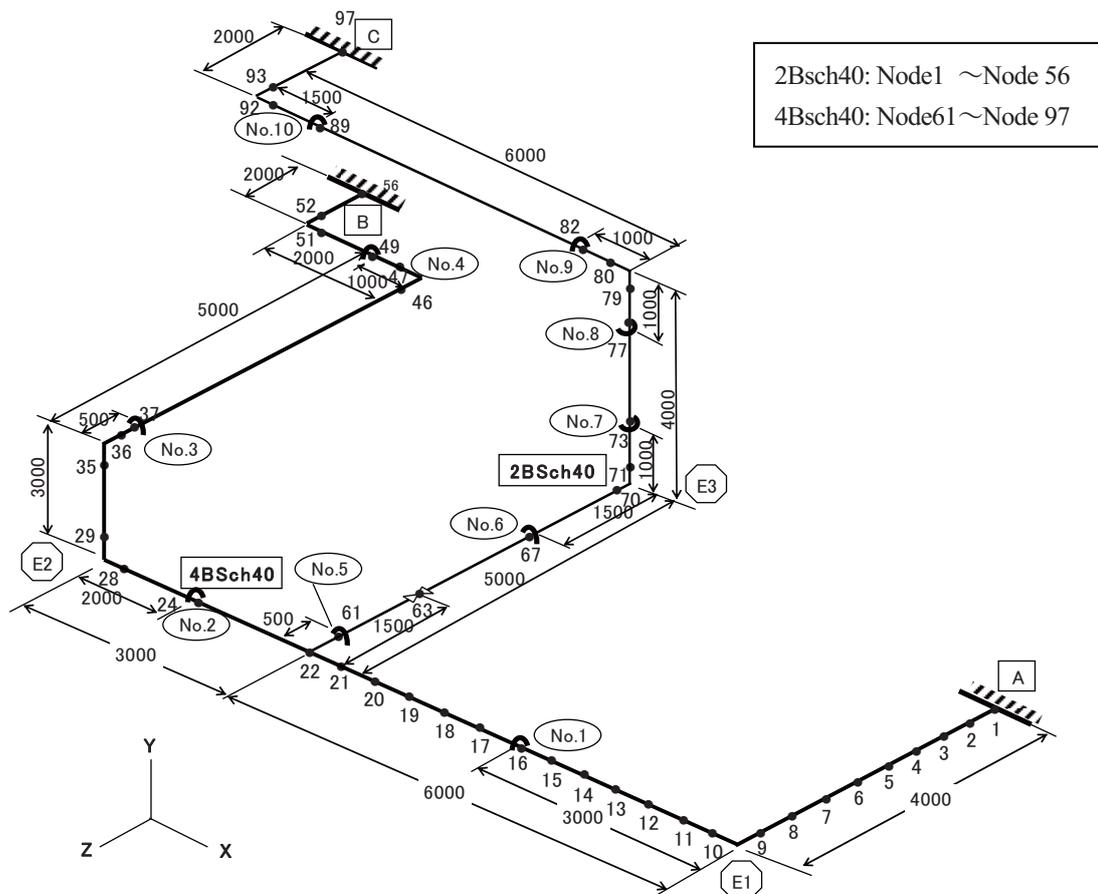


図1 配管系モデル

表1 検討ケース

ケース	支持構造物の荷重変位曲線特性のモデル化方法	支持構造物の荷重変位曲線の特性		
		初期勾配 (N/mm)	2次勾配 (N/mm)	降伏荷重 (N)
1	弾性変形	440	0	-
2		10000		
3	弾塑性変形	440	0	6200
4		440	44	6200
5		10000	1000	2500

2. 数値解析による検討

2.1 解析モデル

図1は地震応答解析に用いた配管形状を示す。配管系は2B配管(外径:60.5mm,肉厚:3.9mm)と4B配管(外径:114.3mm,肉厚:6.0mm)からなり,1箇所のティーを含む。配管系の支持点はNo.1からNo.10の10箇所のピン支持点とAからCの3箇所の固定端支持点からなる。本研究では配管系の地震応答と配管系に取付けられた支持構造物の塑性変形との関係を明らかにすることを目的とし,解析では最大反力点に代表される1箇所の支持構造物(図1中の位置No.5)の影響を調べた。

支持構造物の荷重変位曲線は,図2に示すように,変形の初期勾配と塑性変形の生じ始める降伏荷重を超える部分の2次勾配で特徴づけられる。そのため,本研究では,初期勾配と2次勾配からなる2直線近似モデルで支持構造物をモデル化した。表1は検討ケースを示す。検討ケースではこの2つの勾配をパラメータとした。支持構造物の荷重変位曲線の形状は,支持構造物の破損箇所に依存する^{(13)・(14)}。本検討では支持構造物の柱脚部に局所的な塑性変形が生ずるときの形状を支持構造物の荷重変位曲線に用いた。

ケース1およびケース2は,支持構造物の塑性変形による地震応答の変化を示すために行った比較ケースである。

ケース3から5では支持構造物の塑性変形による地震応答への影響を求めた。ケース3と4は,実際の支持構造物に用いるような部材断面形状,構造寸法などの荷重変位曲線から得た初期勾配を使い,実際に近い状態での応答評価のケースである。このときの荷重変位曲線の初期勾配および2次勾配は,有限要素法解析(FEM)の解析結果から求めた。解析に用いた支

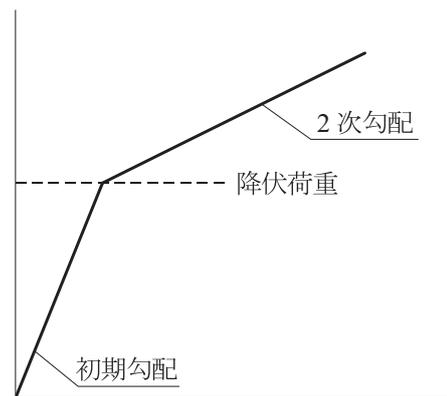
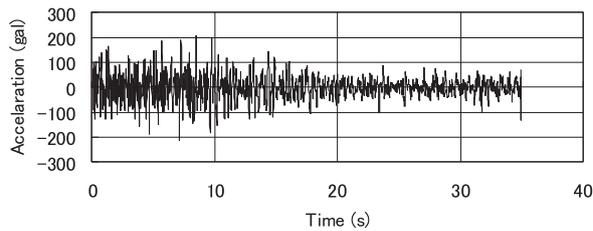


図2 支持構造物の荷重変位関係

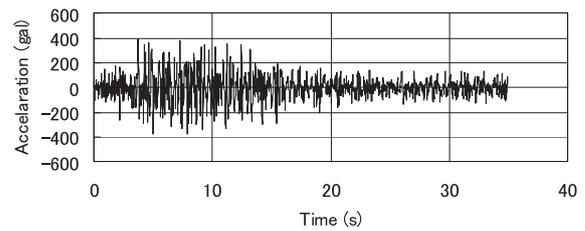


図3 門型タイプの支持構造物モデル

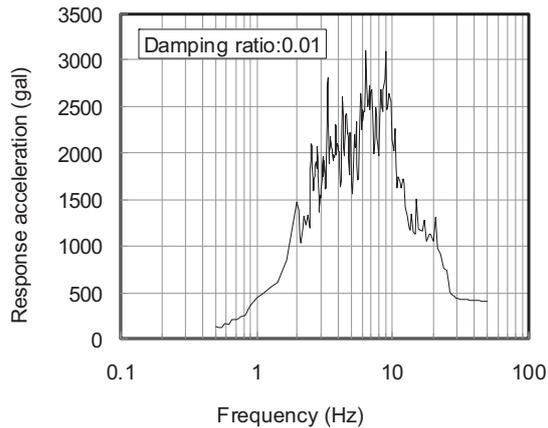
持構造物の形状を図3に示す。支持構造物は500mm幅×1000mm高さの門型構造とし,各部材には50mm×50mmのL型鋼部材を用いた。支持構造物の荷重変位曲線をFEMで求めることは,例えば白井ら⁽¹⁵⁾の研究を始め多数行われており,今回の支持構



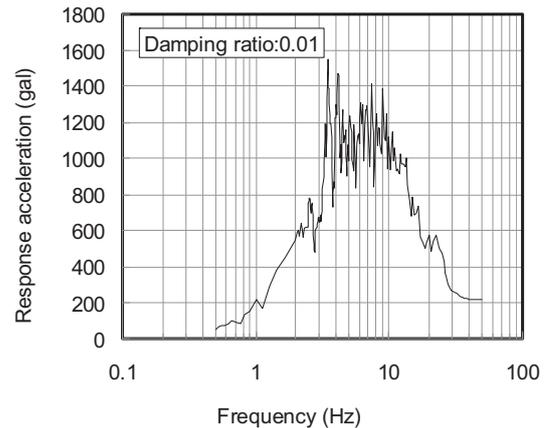
(a) 入力地震波（水平方向）



(c) 入力地震波（上下方向）



(b) 床応答スペクトル（水平方向）



(d) 床応答スペクトル（上下方向）

図4 検討に用いた入力地震動の波形

造物の変形特性の検討に用いるような初期勾配と2次勾配に関して解析結果と実験結果は比較的良好に一致している。ケース3は、降伏荷重以降の2次勾配が一定で表される弾完全塑性型であり、鋼構造剛接骨組がこれに近い特性を示すとされている⁽¹²⁾。鋼造物の荷重変位曲線の形状は破損箇所に応じて異なり、初期勾配と降伏荷重以降の2次勾配で特徴付けられる⁽¹²⁾。白井ら^{(13)・(14)}は、鋼構造の配管系支持構造物の静的載荷実験を行ない、破損箇所に応じた荷重変位曲線を測定した。支持構造物の柱脚部の鋼材の座屈変形や基礎ボルトの永久変形の関与する荷重変位曲線から、2次勾配の大きさと初期勾配の大きさとの比率を求めることが出来る。ケース4は、鋼材の柱脚部に局部的曲げ変形を生じた実験結果を参考に支持構造物の荷重変形曲線を定義し、2次勾配は初期勾配の1/10の値としたケースである。

ケース5は、図3のような支持構造物に比して剛性が高く変形し難い構造を用いた時の配管系の応答を対象としたものである。

2.2 配管系の地震応答計算

地震荷重に対する配管系の応答は、支持構造物に永久変形を生じる塑性変形を扱える弾塑性時刻歴応答解析により求めた⁽¹⁷⁾。今回の検討では、支持構造物の塑性変形の影響を明らかにすることから、配管は永久変形を生じない弾性体とした。配管と支持構造物の間に生ずるガタ・摩擦による減衰は配管系内に一様に分布するとした。

地震荷重は、図4に示す時刻歴波形を図1中の水平方向および上下方向（Y）に同時に与えた。地震荷重の大きさは、図4の地震波形の加速度振幅を比例倍して支持構造物に塑性変形を生ずるような値とした。解析は、汎用有限要素法解析コード ABAQUS Ver.6.8⁽¹⁵⁾を用いて行った。

2.3 配管系の振動性状

配管の支持条件が支持構造物の塑性変形により変化すると、配管系の振動形状は変化する。構造物の振動形状は、固有振動数解析から得られる構造物に特有な

基本振動形状（以下、振動モード）の重ね合せで表される⁽¹⁶⁾。ここでは、支持構造物の塑性化による振動形状への影響を、振動モードと振動モードに固有なモード減衰比を用いて検討した。検討に用いた方法の詳細は文献⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾に拠った。

3. 結果

3.1 配管系の地震応答

支持構造物の荷重変位曲線の変形勾配（2次勾配および初期勾配）の違いが、配管系の地震応答に与えた影響を以下に示す。

(1) 2次勾配の影響

図5はケース3の最大応答加速度の分布を示す。図6はケース4の結果を示す。

図の横軸は、配管の流れに沿って番号付けした節点番号を示す。縦軸は最大応答加速度を示す。最大応答加速度は、各節点の X, Y, Z 方向加速度の3成分の最小二乗和として求めた値を示す。図中の赤色の実線はケース3あるいはケース4の最大応答加速度の分布を示し、青色の□記号は支持構造物を剛設計としたケース1の最大応答加速度の分布を示す。配管系の塑性変形による損傷の程度は、No.5支持構造物の塑性変形の程度を示す塑性率 μ で示した。塑性率 μ は、支持構造物の頭頂部の配管取合い点の配管軸に直角方向の変位を用いて、弾性変形の限界変位に対する地震時最大応答変位の比として定義した。図中の緑色の矢印はNo.5支持構造物の取付け位置を示す。

塑性化した支持構造物上の配管系の地震応答に与える影響は、各図中の青点（支持構造物の塑性化なし）と赤線（支持構造物の塑性化あり）の比較で示される。配管系の各点の最大応答加速度は、ケース3、ケース4ともに部分的に低下した。この時の最大応答加速度の低下する範囲は、塑性変形の生じたNo.5支持構造物を取り囲んで最寄りのエルボE1~E3に囲まれた広い範囲となった。ケース3とケース4の最大応答加速度の低下量及び範囲は、ほぼ同じであった。

図7はケース3とケース4の配管応力の分布を示す。横軸は配管経路に沿って付けた節点番号を、縦軸は最大応力を示す。配管応力は、式(1)に従い曲げモーメントとねじりモーメントの二乗和平方根として求めた。式(1)において、 σ は配管応力、 M_i は曲げあるいはねじりモーメントの成分、 Z は配管の断面定数を示す。

$$\sigma = \frac{\sqrt{M_i^2}}{Z} (i=1\sim 3) \quad (1)$$

支持構造物の荷重変形曲線の2次勾配の大きさを変えたケース3とケース4の最大応力分布の比較からは、最大応力の大きさ、分布ともに違いは見られなかった。

今回は支持構造物の静的載荷実験⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾で確認された鋼材の柱脚部の局部曲げ変形を取り上げ、降伏荷重以降の2次勾配が異なったときの配管応答への影響を検討した。検討の範囲内では、支持構造物の荷重変位曲線の2次勾配の影響は、配管系の最大応答加速度および発生応力に見られていない。この結果から、支持構造物のモデル化では、支持構造物の荷重変位曲線の

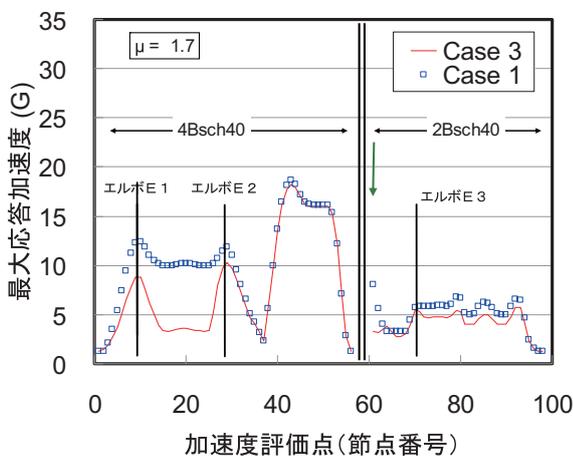


図5 配管系の最大応答加速度の分布（ケース3）

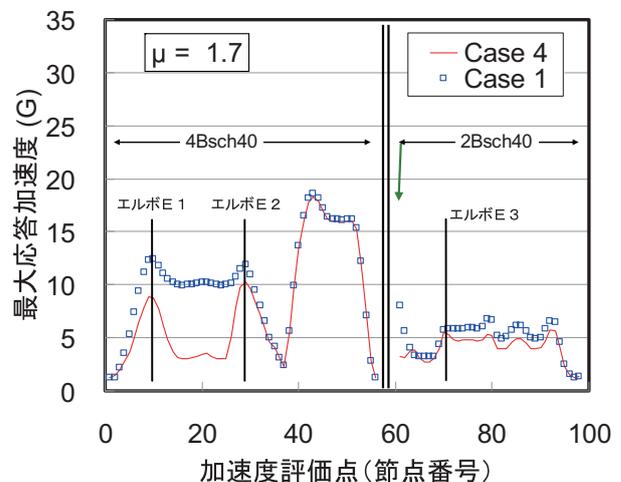


図6 配管系の最大応答加速度の分布（ケース4）

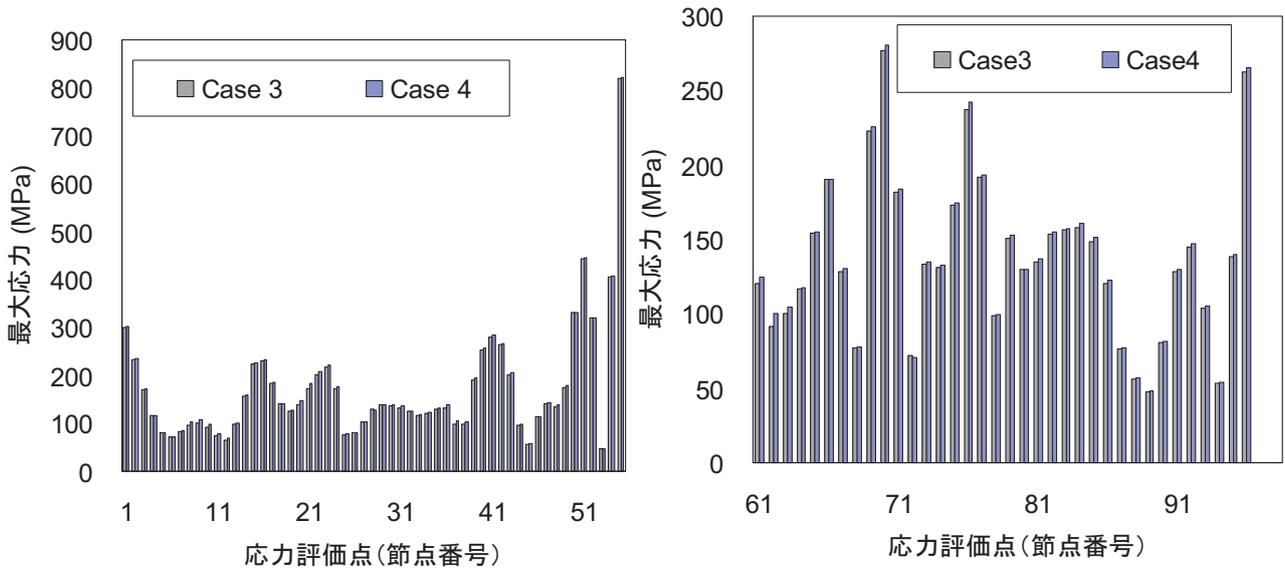


図7 配管系の最大応力分布の比較 (ケース 3, 4)

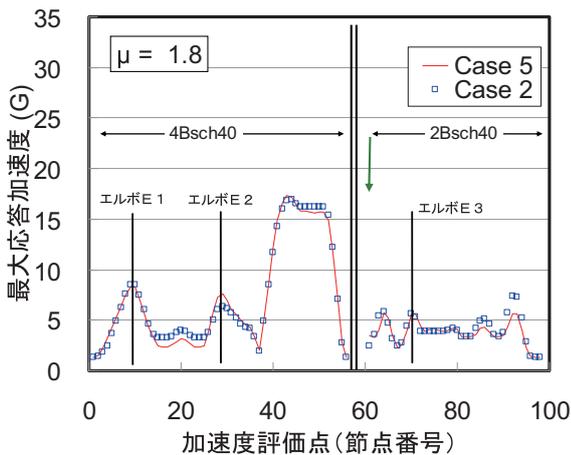


図8 配管系の最大応答加速度の分布 (ケース 5)

2次勾配の大きさの違いを統一して同じ値で扱えることが示唆される。

(2) 初期勾配の影響

解析ケース5の結果を図8に示す。塑性化した支持構造物上の配管系の地震応答に与える初期勾配の影響は、図中の青点(支持構造物の塑性化なし)と赤線(支持構造物の塑性化あり)との比較で示される。荷重変位曲線の初期勾配の大きい、すなわち、荷重に対して変形し難い支持構造物を用いた時の支持構造物の塑性化による応答加速度の低下量はわずかであった。なお、支持構造物が塑性化しない状態(青点で表示)の最大応答加速度は、ケース3, 4に比べて低下した。

これは、ケース5の支持構造物の初期剛性がケース3, 4に比べて相対的に大きく同じ外力の大きさに対して変形し難いため、配管系の変形を抑えた結果、応力が下がったことによる。

3.2 配管系の振動性状

配管系の振動性状は、支持構造物の荷重変位曲線の大きさに依存し2通りに分かれた。1つは、支持構造物の塑性化により主要な振動モードが1つに集約されるケースであり、もう1つは、支持構造物の塑性化した以降も塑性化する前と同様に複数の振動モードで揺れるケースである。

まず、支持構造物の塑性化により主要な振動モードが1つに集約されるケースについて示す。図9は、ケース4のモーダル減衰比の増加倍率を示す。

増加倍率は、支持構造物の塑性変形以外のガタ・摩擦により生じる減衰比0.01に対する比で示した。支持構造物の塑性化の影響は、地震入力に対する最大応答変位とこれに対応する荷重から等価線形化手法により求めた等価減衰および等価剛性で支持構造物をモデル化⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾して固有値解析に反映した。横軸の有効質量比は、振動モード間の重み付けを示し、有効質量比の大きい振動モード程、振動振幅に対する寄与が大きくなることを示す。

今回の検討で用いた2B配管と4B配管からなる配管系と門型支持構造物の取付け方法では、1次振動モ

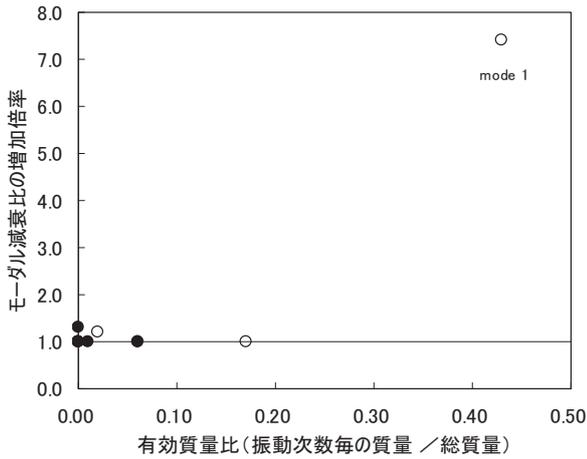


図9 地震力低減効果の増加倍率 (ケース4)

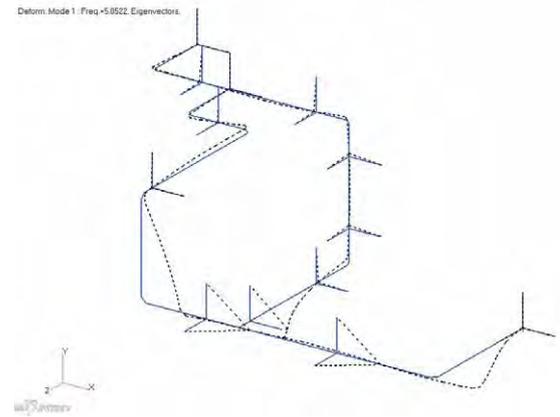


図10 固有振動モード図 (ケース4, 1次)

ードのモーダル減衰比は支持構造物の塑性変形していない状態に比べて7倍程度に増加した。この時の1次固有振動数は、支持構造物の塑性変形前後において5.7Hz から5.0Hzに約15%低下した。図10は、ケース4の1次固有振動の振動モードを示す。図10に示した1次振動モードの変形量の大きい部位は、図6で示した配管系の応答加速度の低下した領域に一致している。以上から、今回のような2Bと4B配管系にL型鋼で作られた門型支持構造物を取付けた系においては、支持構造物の塑性変形に起因した減衰の増加は唯一つに集約された主要な振動モードに対して起こり、配管系の応答加速度を低減することが分かる。

次に、支持構造物が塑性化した以降も塑性化する前と同様に複数の振動モードで揺れるケースを示す。図11は、ケース5のモーダル減衰比の増加倍率を示す。増加倍率は、図9と同様に支持構造物の塑性変形以外のガタ・摩擦により生じる減衰比0.01に対する比で示した。モーダル減衰比は、塑性変形した支持構造物の揺れに関係する複数の振動モードで増加していた。また、モーダル減衰比は、5次振動モードで最大5倍増加した。表2は、配管系の固有振動数の変化を示す。配管系の固有振動数は、支持構造物の塑性変形によっても大きな変化はみられない。

モーダル減衰比の増加した3つの振動モードを図12に示す。個々の振動モードにおける振動変位(実線と破線の差)の大きい領域は、図8の配管系の応答加速度の低下領域に一致する。しかしながら、前出のケース4とは異なり、応答加速度の低下に関与した振動モードの有効質量比は複数に分散し且つそれぞれの値が小さくなっている。このため、個々の振動モードに見

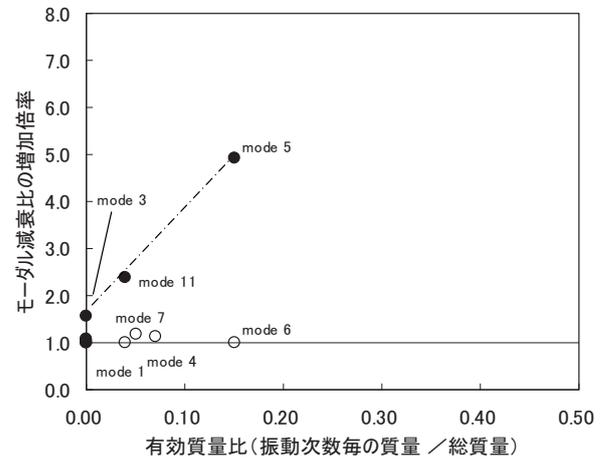


図11 モーダル減衰比の増加倍率 (ケース5)

表2 配管系の固有振動数の変化

振動次数	振動数(Hz)	
	ケース2	ケース5
1	6.2	6.2
2	6.4	6.4
3	7.9	7.8
4	9.2	9.2
5	9.5	9.0
6	10.3	9.5
7	11.2	11.1
8	11.4	11.4
9	13.1	13.1
10	13.6	13.6

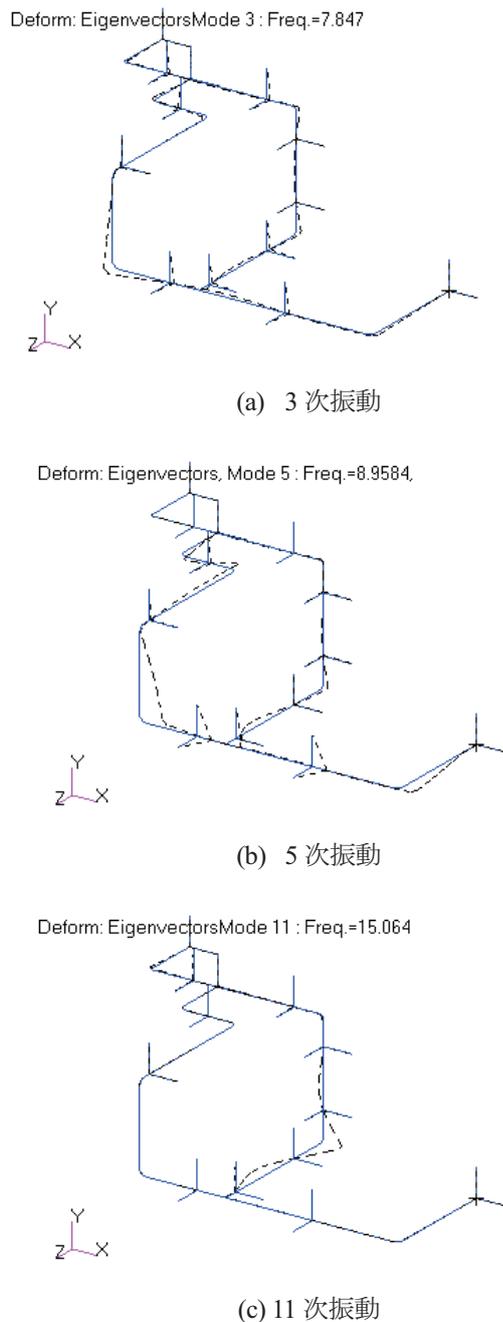


図12 固有振動モード図 (ケース5)

られたモーダル減衰比の増加も応答加速度の低下に結びつかなかったと考えられる

5. 結言

塑性変形応答する支持構造物上の配管系応答を明らかにすることを目的に有限要素法を用いた地震応答解析による検討を行なった。配管系の地震応答を配管系支持構造物の荷重変位曲線の変形勾配と関連づけて検

討し、以下の結論を得た。

- (1) 支持構造物の2次勾配の大きさは、今回の検討範囲では、地震応答加速度の下がる領域および低下量に影響していない。支持構造物のモデル化においては、荷重変位曲線の2次剛性の違いを弾完全塑性体モデルで一様に扱えることが示唆された。
- (2) 支持構造物の初期勾配の大きさは、塑性変形応答する支持構造物上で起こる主要な振動モードに大きく影響した。今回のような2Bと4B配管の配管系にL型鋼で作られた門型支持構造物を取付けた系では、配管系は唯一つの振動モードのみで揺れる振動性状に変化した。
- (3) 配管系の地震応答は、支持構造物の塑性変形を伴う振動により、支持構造物の取付け点の近傍のみならず近接エルボまで広範囲で低下した。

6. 今後の展開

小規模配管系を用いた加振実験により支持構造物が塑性化し終局状態に至るまでの振動挙動を実験的に明らかにする。これと同時に実験の再現解析方法を確立することで、配管系構造健全性確認に資する耐震性評価方法を提案したい。

7. 謝辞

本研究において、川崎重工業株式会社 鈴木道明氏から原子力発電所の耐震評価方法に関し幅広く助言を頂いた。ここに記して感謝します。

文献

- (1) K. Tai, et al., "Proving test on the seismic reliability of the main steam piping system", ASME PVP, Vol.345, pp.119-124, (1997).
- (2) 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)", 14th SMiRT, Vol. K15-1, (1997).
- (3) Y. Namita, et al., "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).
- (4) K. Suzuki, et al., "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).
- (5) K. Suzuki, et al., "Seismic Proving Test of Ultimate Piping Strength (Simulation Analysis of Simplified Piping System Test)", ASME PVP, Vol.466, pp.22-30, (2003).
- (6) 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)", 17th SMiRT, K15-2, (2003).
- (7) E.Yamazaki and N.Kojima, "Investigation on Ultimate Strength Evaluation of Snubber in Piping System of Japanese NPP", K18-3, Trans. SMiRT 19, (2007).
- (8) Park Y.J., DeGrassi G., Hofmayer C.H., Bezler P. and Chokshi N.C., "Analysis of Nuclear Piping System Seismic Tests with Conventional and Energy Absorbing Supports", K15-3, Trans. SMiRT 14, (1997).
- (9) Park Y. J., Hofmayer C. H. and Chokshi N. C., "Application of Equivalent Linearization Approaches to Nonlinear Piping Systems", K17-4, Trans. SMiRT 14, (1997).
- (10) E.Shirai, K.Eto, A.Umemoto, 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).
- (11) E.Shirai, T.Yamada, K.Ikeda, T.Yoshii, M.Kondo, K.Tai and T.Ogo, "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, PVP2010-25392, (2010).
- (12) 秋山宏, "エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計 (Earthquake-Resistant Design Method for Buildings Based on Energy Balance)", 技報堂出版, (2002).
- (13) E.Shirai, K.Eto, A.Umemoto, T.Yoshii, M.Kondo, H.Shimizu and K.Tai, "Inelastic Seismic Test of The Small Bore Piping and Support System (Part2: Static Failure Test for Piping Support Equipment)", Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2008-61351, (2008).
- (14) 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).
- (15) ABAQUS Users Manual, Version 6.8, ABAQUS Inc., (2008).
- (16) 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).
- (17) 高橋常夫, 前川晃, "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", INSS JOURNAL, Vol.18, p.118, (2011).
- (18) T. Takahashi and A. Maekawa, "Effect of Elastic Plastic Property of Support Structure on Seismic Response of Piping System", 282, Trans. SMiRT 21, (2011).