

支持構造物の降伏後変形強度が配管系地震応答に与える影響

Impact of Deformation Stiffness beyond the Yield Point of Steel Pipe Support Structures on Seismic Response of Piping Systems

高橋 常夫 (Tsuneo Takahashi)*¹ 前川 晃 (Akira Maekawa)*¹

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した。配管系が設計想定を超える大きな地震力を受けると、支持荷重によりサポートが弾塑性振動しつつ配管が振動すると推測される。この配管系を評価するためには、サポートの弾塑性変形を加味して地震応答解析を行なうことが必要と考えられる。サポートの弾塑性特性を初期勾配と2次勾配からなる2直近似でモデル化したサポートモデルを作成し、このサポートモデルを3次元の配管系に加味した地震応答解析を行なった。解析結果の比較から、サポートのモデル化における2次勾配の影響を調べ、2次勾配を零とする弾完全塑性体によるモデル化の適用性を検討した。本研究の範囲内では、サポートの荷重変位曲線の2次勾配は、配管系の応答加速度、サポートの弾塑性振動、配管に生ずる荷重、固定端反力にほとんど影響しなかった。サポートモデルは、荷重変形曲線の2次勾配の違いによらず弾完全塑性体モデルで一様に扱えることが示唆された。

キーワード 配管系支持構造物, 弾塑性振動, 塑性変形, 地震応答, 弾塑性モデル

Abstract Modeling of pipe support structures beyond the yield point for seismic response analysis of piping systems was discussed. Piping system shaking in extremely large seismic loads over the design level can be exposed in plastic deformation of pipe support structures. As a method for the seismic response evaluation, seismic response analysis with support point displacement arising from the plastic deformation of pipe support structures is available. Finite element analyses were conducted using a small bore piping system with an elastic-plastic support structure, which was shaped in a three dimensional arrangement. The support structure was modeled using a bi-linear model. Findings for elastic-plastic modeling of pipe support structures were evaluated by comparison of seismic responses between the models. The results showed that the secondary stiffness of the load-displacement curve of the support structure had little effect on the distribution of response acceleration, the elastic-plastic vibration beyond the yield point, the section forces of the piping, the reaction forces at fixed ends. It was concluded that the plastic deformation behavior of the pipe support structures could be modeled by using elastic fully plastic model.

Keywords Pipe Support Structure, Elastic-Plastic Vibration, Plastic Deformation, Seismic response, Elastic-Plastic Model.

1. 緒言

原子力プラントの配管系の健全性評価では、配管系モデルを用いた解析が広く用いられる。その解析において、配管系支持構造物（以下、サポート）は弾塑性変形しないとして通常扱われる。近年発生した地震のいくつかでは、設計想定を超える地震力が報告されており、今後、極端に大きな地震が発生しサポートに永久変形を生じるような地震荷重が加わることも推測さ

れる。この場合の評価手法として、サポートの弾塑性変形を反映した地震応答解析を配管系で行うことが考えられる。

強い地震動による大きな加振振幅を受けた配管系では、ガタ・摩擦の他に構造物の塑性変形による減衰の増加が、振動実験で示されている⁽¹⁾。配管については、圧力バウンダリとしての重要性の観点から弾塑性変形をした場合の挙動を対象とした研究が多く行われている^{(2)~(7)}。一方で、サポートが塑性変形した場合

* 1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

の配管系地震応答に関する研究はあまり行われていない(8)(9)。

2011年3月に発生した福島第一原子力発電所の事故以降、これまでの設計時の評価に加えて、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つながる。配管系の設計基準外事象の一つとして、サポートの弾塑性変形を考慮した健全性評価が可能になれば、余裕の合理的な評価にも寄与すると思われる。

本研究では、強い地震動を受けたサポートの弾塑性振動のモデル化を検討した。サポートの降伏後の変形強度が配管系地震応答に及ぼす影響の検討を通して、広範囲にかつ簡易に扱えるモデル化方法を調べた。サポートのモデル化では、多様なサポート形状への対応が必要と考えられるが、ここでは、初期勾配および2次勾配からなる2直線近似でサポートの荷重変位関係をモデル化した(図1)。このサポートモデルを加味した3次元配管系の地震応答解析を行ない、設計想定

を超えた強い地震時における地震応答解析のための配管系サポートの合理的なモデル化法を考察した。

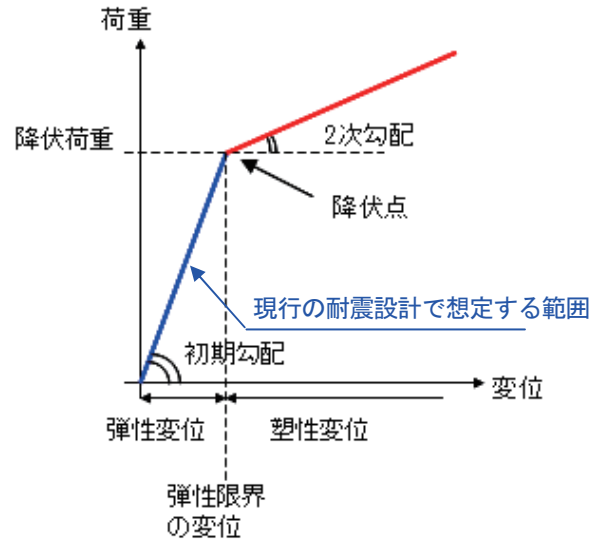


図1 サポートの荷重変位関係

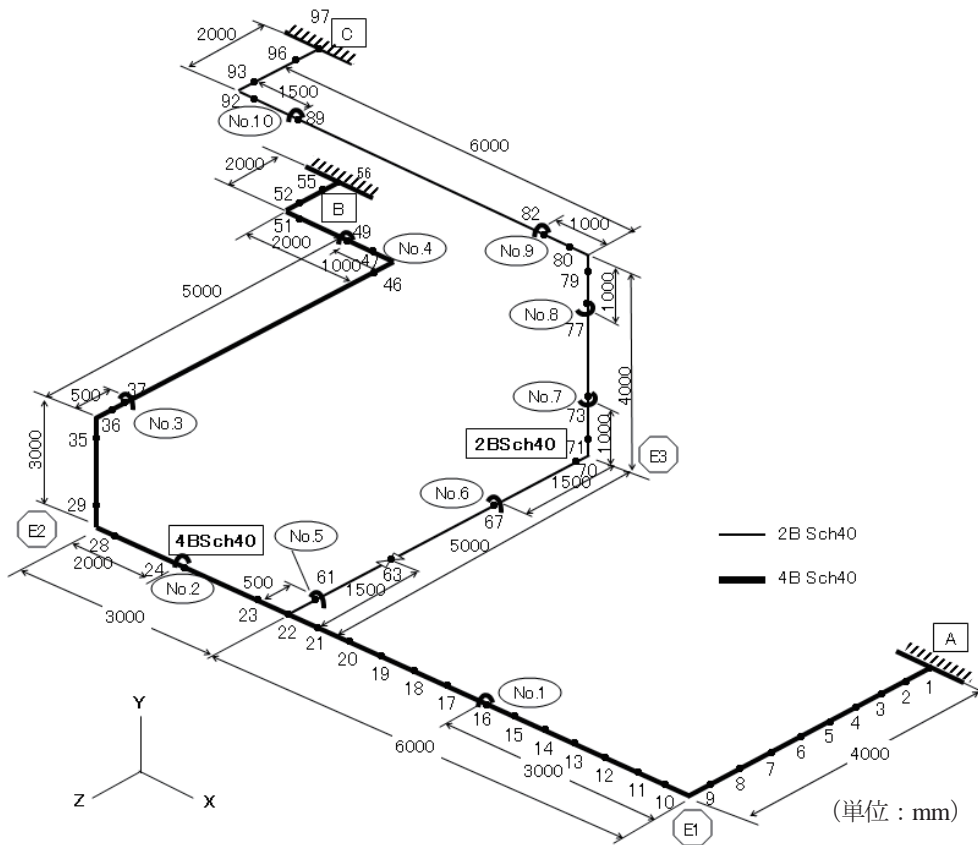


図2 配管系解析モデル

2. 配管系の地震応答解析

2.1 配管系モデルの仕様

配管系モデルを図2に示す。配管は2B配管（外径，60.5mm；肉厚，3.9mm）および4B配管（外径，114.3mm；肉厚，6.0mm）からなる。No.1からNo.10は配管の中間支持点を示し，中間支持点の自由度は配管軸直角方向の並進成分を固定した。AからCは配管固定端を示し，固定端の境界条件は完全固定とした。配管の横の数値はモデルの節点番号を示す。配管は炭素鋼製配管（STPG370）としヤング率を195GPaとした。配管は弾性体とし塑性変形を考慮していない。配管とサポートの間に生ずるガタ・摩擦等による減衰特性は，構造減衰として減衰比0.01を入力した。

配管系の固有振動数は，サポートが塑性変形しないケースA-1（表1）において，6.2Hz（1次固有振動数）であった⁽¹⁰⁾。ケースA-1の高次の固有振動数は，後述（図4）の入力地震波の床応答スペクトルに図示した。

実際の配管系のサポートはそれぞれの降伏荷重に到達したのから順次，塑性変形すると考えられるが，本検討は基礎検討のために，全ての支持点を弾性ばねでモデル化した弾性計算を行って支持点反力を確認した後，最大反力点1箇所のサポートのみの塑性変形を考慮することとした。ケースA-1の結果からは，図2の配管系モデルのT字配管付近のNo.5サポートが弾塑性変形するサポートに相当する。

2.2 最大反力点のサポートのモデル化方法

Shiraiらは繰返し振幅漸増試験による静的荷重試験および振動台による動的荷重試験を行い，鋼材柱脚部の局部変形，床面剥離，基盤の浮上り，基礎ボルトの伸び等のサポート破損とサポートの荷重変位曲線との関係を示した⁽¹¹⁾。本検討の配管系解析モデルの最大反力点に取付けたサポートの荷重変位曲線は，Shiraiらの実験で観察された柱脚部の局部変形時の曲線形状を参考に，初期勾配および2次勾配からなるバイリニアモデルによりモデル化した。

No.5サポートのモデル化方法を図3に示す。水平荷重に対しては，柱の曲げ変形への変形抵抗および塑性変形によるエネルギー吸収を考慮したバイリニアモデルでモデル化した。上下荷重に対しては，柱の圧縮

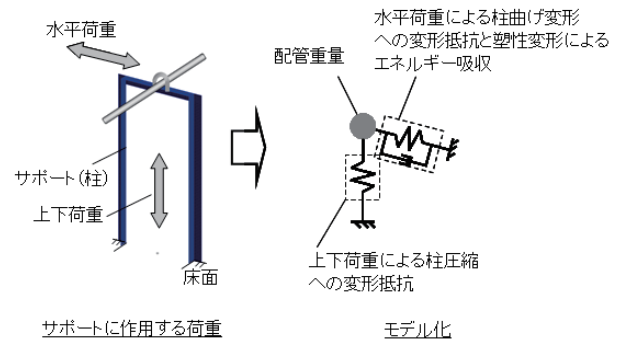


図3 No.5サポートのモデル化

表1 解析条件

解析ケース	初期勾配 (N/mm)	2次勾配 (N/mm)	降伏荷重 (kN)	No.5支持構造物の状態
A-1	436	-	-	弾性
A-2		0	6.2	弾塑性
A-3		43.6		
A-4		100		
B-1	10000	-	-	弾性
B-2		0	2.5	弾塑性
B-3		500		
B-4		1000		

変形への変形抵抗のみをモデル化した。柱の圧縮に対する変形抵抗は，曲げ変形に対する変形抵抗に比べて十分大きく圧縮変形し難いと仮定した。配管とサポートは配管軸の直角2方向のそれぞれの自由度を各々剛体結合とし，摩擦等の減衰機構を考慮していない。

2.3 解析ケース

解析ケースで用いたNo.5サポートの仕様を表1に示す。サポートのモデル化の影響を調べるために，荷重変位曲線の初期勾配および2次勾配を変えた解析を行なった。

ケースA-1からケースA-4の初期勾配および降伏荷重は，サポート単体モデルの有限要素法解析結果の荷重変位曲線を参考に定めた。サポート単体モデルは図3に示した門型形状であり，幅500mm×高さ1000mm，各部材は50mm×50mmのL型鋼部材である。サポートの固定条件は，床面に完全固定とした。ケースA-2からケースA-4の2次勾配は，弾完全塑性状態のケース，初期勾配の1/10のケース，初期勾配の約1/4としたケースである。

ケース B-1 からケース B-4 は、ケース A に比べて初期勾配が相対的に大きい、つまり弾性変形が生じにくい補強されたサポートを想定したケースである。

以上の解析を行い、配管系地震応答を比較した。サポートの荷重変位曲線は、柱脚部の局部座屈による初期勾配の低下や繰返し負荷による最大強度の低下のように負荷途中で変わることがあるが、本検討では基礎的検討を行なうために考慮しない。また、サポート単体の静的荷重試験の結果を参考にしたモデル化を用いており、サポートの弾塑性変形と配管系応答の連成効果は考慮していない。

2.4 地震応答解析

地震応答は前述した 2.1 から 2.3 の条件で作成した解析モデルに地震波を入力する弾塑性時刻歴応答解析により求めた。地震波には図 4 に示す改良標準化波を用いた。図 4(c) および図 4(d) の床応答スペクトル中の一点破線は、ケース A-1 の配管系の固有振動数を示す。固有振動数は 20Hz 以下となる 1 次振動から 15 次振動を示した。図 2 のモデルの X 方向（水平）および上下 Y 方向（上下）に地震波を入力した。サポートに塑性変形を生じさせるために、図 4(a) およ

び図 4(b) に示す入力地震波の最大加速度を比例倍（検討では 3 倍）して入力した。解析には汎用有限要素法解析コード ABAQUS Ver.6.8 を用いた。

応答解析の結果のうち、設計評価で用いる配管断面の合モーメント⁽¹²⁾、固定端反力、最大応答加速度を比較した。また、骨組のエネルギー吸収能力の研究が古くから行われており、その崩壊の基準としてエネルギー吸収量を用いることが提案されている⁽¹³⁾。近年では大地震を経験した構造物が「どれほどの健全性を維持しているか」を評価する方法が検討されており疲労損傷度と地震エネルギー吸収の関係に着目した地震時の構健全性評価⁽¹⁴⁾が提案されつつある。建物のような 1 質点系で検討されているこの概念を多質点系である配管系へ展開させることを考え、サポートの吸収エネルギーを比較した。本検討での吸収エネルギーは累積吸収エネルギー (E) で示し、式 (1) により求めた。

$$E = \sum_i \frac{1}{2} \cdot \delta d_i \cdot \delta F_i \quad (1)$$

ここで、 δd_i は微小時間 Δt_i の間の変位増分、 δF_i は荷重増分を示す。累積吸収エネルギーは、No.5 サポートの荷重変位履歴から求めた。

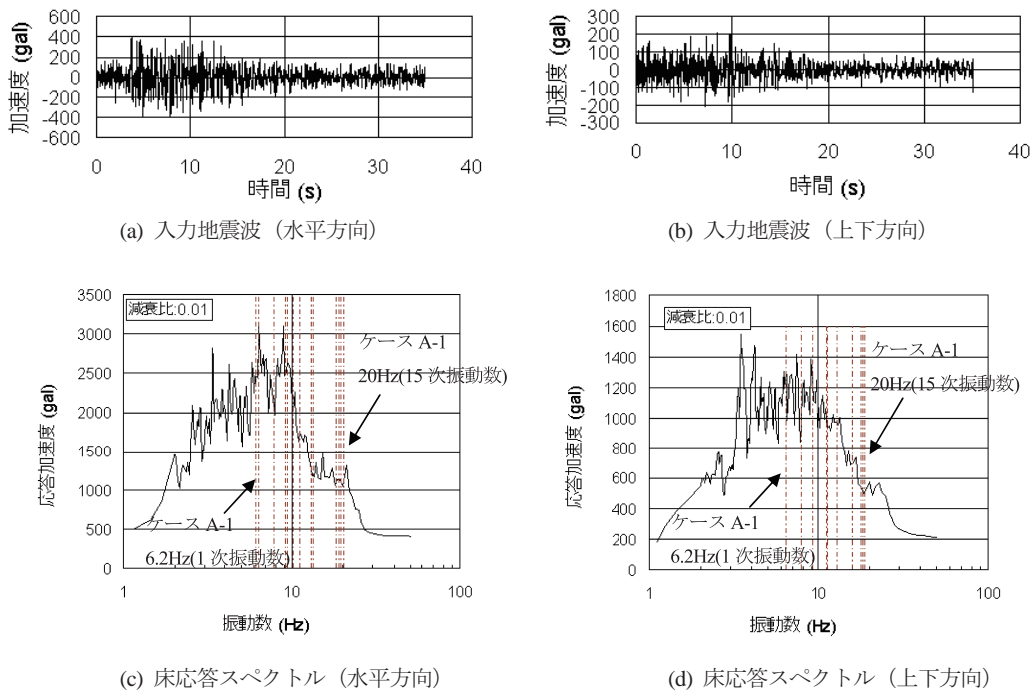


図 4 検討に用いた入力地震波

3. 解析結果と考察

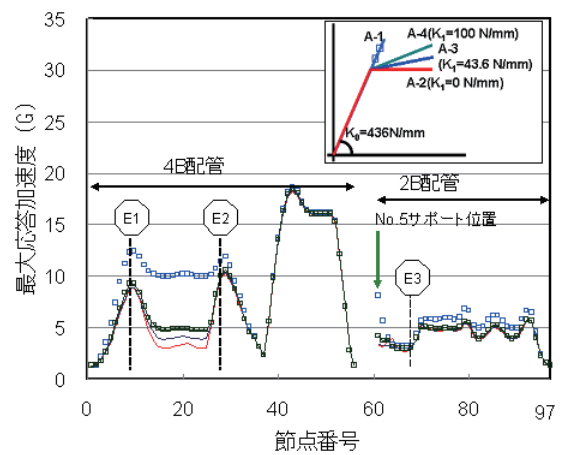
3.1 配管系の最大応答加速度の比較

ケース A の最大応答加速度を図 5(a)に示す。横軸の数値は、図 2 の節点番号を示す。縦軸の最大応答加速度は、各時点の x, y, z の 3 方向の成分から二乗和平方根で求めた時刻歴応答の最大値を示した。緑色の矢印は、No.5 サポートの取付け位置 (節点 61) を示す。E1 から E3 は図 5(b)のエルボ E1 から E3 の位置を示す。また、図中には、ケース A-1 からケース A-4 の No.5 サポートに用いた荷重変位曲線の形状を示した。

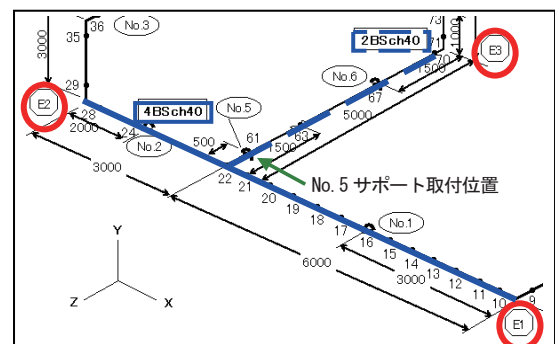
ケース A-2 からケース A-4 の最大応答加速度は、エルボ E1 からエルボ E2 の間の 4B 配管と、T 字管からエルボ E3 の間の 2B 配管において、ケース A-1 と比べて低下した。最大応答加速度の低下した範囲は、ケース A-2 からケース A-4 で同じであった。ケース A-4 からケース A-2 へと No.5 サポートの荷重変位曲線の二次勾配が小さくなるにつれて、この範囲の最大応答加速度は小さくなり、弾完全塑性モデルのケース A-2 で最も小さくなった。しかし、ケース A-2 とケース A-4 の最大応答加速度の差は、ケース A-2 とケース A-1 の差に比べて小さかった。すなわち、サポートの荷重変位曲線の 2 次勾配を考慮することは、サポートの降伏を考慮することに比べて最大応答加速度の低下に与える影響が小さいことが分かった。

解析ケース B の結果を図 6 に示す。エルボ E1 からエルボ E2 の間の 4B 配管と、T 字管からエルボ E3 の間の 2B 配管において、ケース B-2 の最大応答加速度はケース B-1 と比べてわずかに低下し 2 次勾配の影響が若干見られた。低下量は前述のケース A-1 からケース A-2 への低下量と比べて少なかった。ケース B-3 とケース B-4 の最大応答加速度はケース B-1 とほとんど同じであり、最大応答加速度が下がらなかった。ケース B-2 からケース B-4 の最大応答加速度がケース B-1 に対してほとんど下がらなかった理由は、後述の 3.2 で示すように塑性変形量が小さくなったためである。

ケース A の 4B 配管と 2B 配管の一部において、ケース A-2 からケース A-4 の最大応答加速度はケース A-1 に比べて下がった。最大応答加速度が低下した理由は、No.5 サポートの塑性変形により生じた履歴減衰のためである。一般に、履歴減衰の大きさは塑性



(a) 最大応答加速度



(b) エルボ位置

図 5 最大応答加速度の比較 (ケース A)

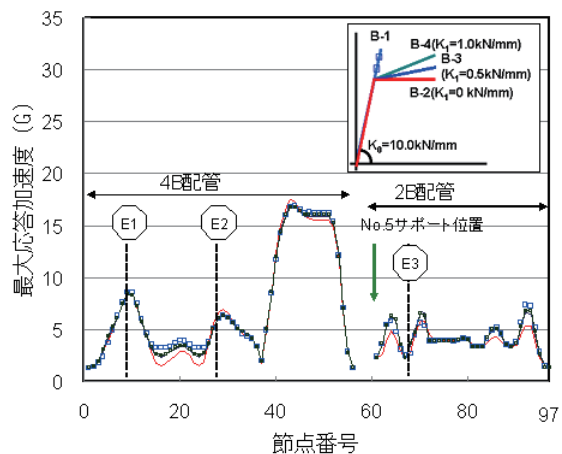


図 6 最大応答加速度の比較 (ケース B)

変形の大きさ (塑性変形率) に依存する。本研究では、No.5 サポートの取付け点の X 方向変位を用いて式 (2) に従って塑性変形率を求めた。

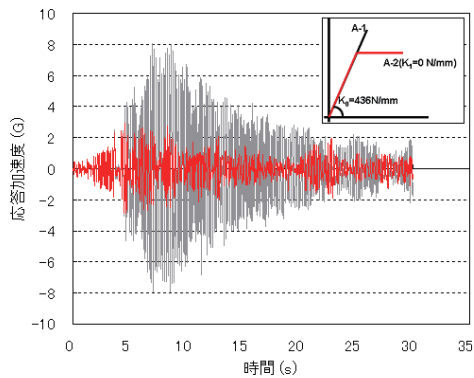
$$\mu = \frac{\text{弾塑性時刻歴解析の最大応答変位}}{\text{弾性限界の変位}} \quad (2)$$

本研究のサポートの塑性変形の検討範囲は、塑性変形率にして概ね 2 であり、例えばケース A-2 の塑性変形率は 1.7 であった。

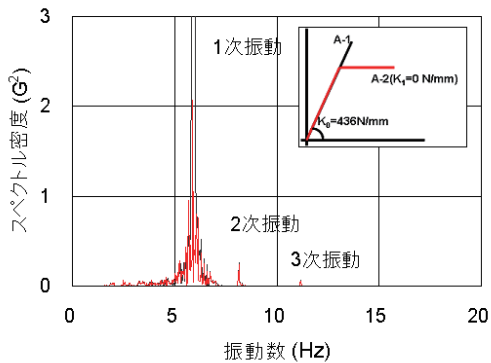
以上のケース A の結果からは、本検討のサポートで行なった塑性変形率（約 2）の範囲内では、サポートの荷重変位曲線の 2 次勾配の大きさは、最大応答加速度の変化への影響が小さいことが分かった。また、ケース B の結果からも 2 次勾配は最大応答加速度の変化に与える影響が小さいことが分かった。

3.2 サポートの弾塑性振動

ケース A-2 のサポート取付け点の応答加速度を図 7(a) に示す。応答加速度は図 2 の No.5 サポートの曲げ変位量を表す水平方向変位（X 方向）で示した。ケース A-2 の応答加速度は、履歴途中の約 4 秒後からケース A-1 に比べて低下した。これは No.5 サポートへの荷重が降伏荷重を上回り、応答荷重が頭打ちになるためである。



(a) 応答加速度波形



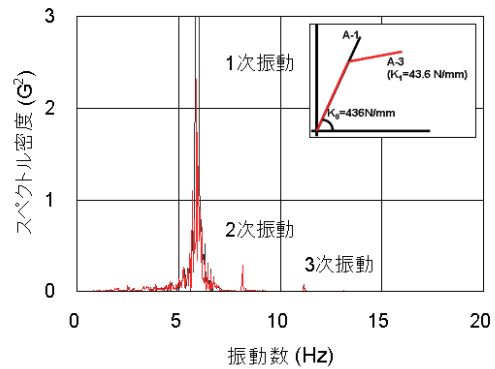
(b) 振動数分析

図 7 No.5 支持点の応答加速度（ケース A-2）

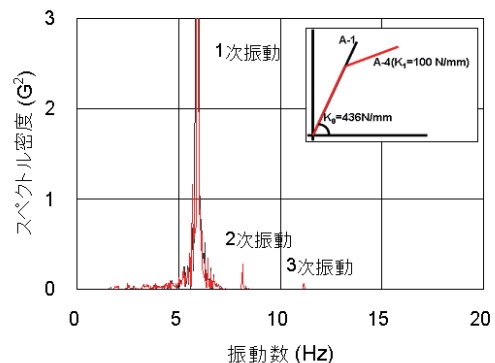
次に、これら波形の振動数分析の結果を図 7(b) に示す。ケース A-1 の応答加速度には、約 6Hz（以下、1 次振動）、約 8Hz（以下、2 次振動）、約 11Hz（以下、3 次振動）の 3 つの振動数にピークが見られた。これら 3 つのピークの内、1 次振動のスペクトル密度が 2 次振動あるいは 3 次振動に比べて大きかった。従って、サポートの振動に占める 1 次振動の影響が大きいと考えられる。ケース A-2 の結果においても、3 箇所のピークがあること、1 次振動が 2 次振動および 3 次振動に比べて大きく影響が大きいことは、ケース A-1 と同じであった。

これら 3 箇所のピークの内、1 次振動の振動数はケース A-1 の 6.2Hz からケース A-2 の 5.9Hz に約 5% 下がった。ケース A-2 の 1 次振動のピーク高さは、No.5 サポートの塑性変形により生じた履歴減衰のために、ケース A-1 に比べて下がった。一方で、2 次振動、3 次振動のピーク高さに変化は見られなかった。

ケース A-3、A-4 の振動数分析の結果を図 8 に示す。スペクトル密度に 3 箇所のピークがある事、1 次振動のピーク高さが 2 次振動および 3 次振動に比べて



(a) ケース A-3



(b) ケース A-4

図 8 No.5 支持点の加速度の振動数分析

大きく影響が大きい事は、前述のケース A-1 およびケース A-2 と同じであった。

以上の結果において、ケース A-1 に比べてケース A-2 の 1 次振動数が低下していた。1 次振動数の低下は No.5 サポートの見かけ剛性の低下により説明することができる。見かけ剛性とは、振動する構造物の応答荷重と応答変位を考慮した剛性である。ケース A-2 の No.5 サポートの荷重変位履歴を図 9 に示す。支持点反力が降伏荷重を超えると、荷重変位履歴はヒステリシスを描く。振動中の剛性は、例えば、最大支持点反力と最大支持点変位から求めた剛性 a で表される。振動中の見かけ剛性は、支持点変位が弾性範囲内である場合の剛性 b と剛性 a との平均値となることから弾性剛性 b に比べ小さくなる。一方、ケース A-1 の No.5 サポートは弾性変形であるため、見かけ剛性は図 9 の剛性 b と同じである。従って、ケース A-2 のサポートの見かけ剛性はケース A-1 と比べて小さくなる。すなわち、ケース A-2 の No.5 サポートの見かけ剛性はケース A-1 と比べて柔らかくなり、ケース A-2 の振動数がケース A-1 の振動数に比べて

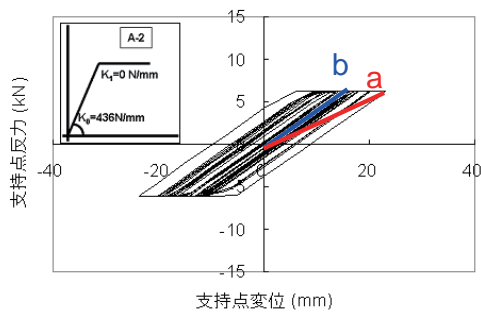


図 9 荷重変位履歴 (ケース A-2)

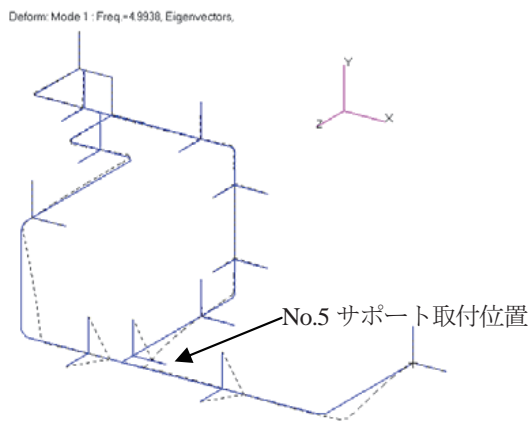
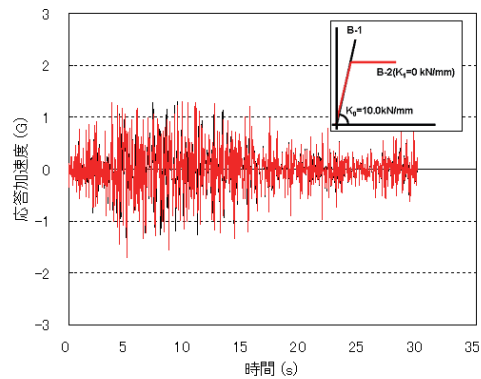


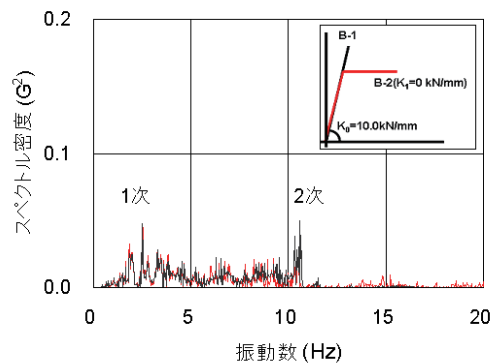
図 10 1 次振動の振動形状

下がったことに対応する。図 9 の剛性 a の算出に用いた支持点反力と支持点変位をもとに No.5 サポートの等価剛性と等価減衰を求めて配管系の固有振動解析⁽¹⁰⁾を行なった。1 次振動の振動形状を図 10 に示す。配管系の 1 次振動数は約 5.0Hz となり、時刻歴波形の周波数分析から得られた結果と比べて低めの値となった。この理由は、No.5 サポートの見かけ剛性を支持点反力および支持点変位の最大値から求めたため、見かけ剛性を振動中の平均的な値より柔らかめに評価したためと考えられる。

ケース B-2 の No.5 サポートの応答加速度を図 11 (a) に示す。ケース B-2 とケース B-1 はほぼ同じ波形を示した。ケース B-2 の振動数分析の結果を図 11 (b) に示す。図 7 (b) のケース A と比べて、ケース B-1 およびケース B-2 の応答加速度には、共振を示す明らかなピークは見られなかった。他のケース B-3、ケース B-4 も同様の傾向であった。ケース B の特徴を明瞭に示す例として、ケース B-3 の結果を示した。ケース B-3 の No.5 支持点の変位は、小さな振動を繰り返しながら 5 秒程度まで一方向に進んだ後、

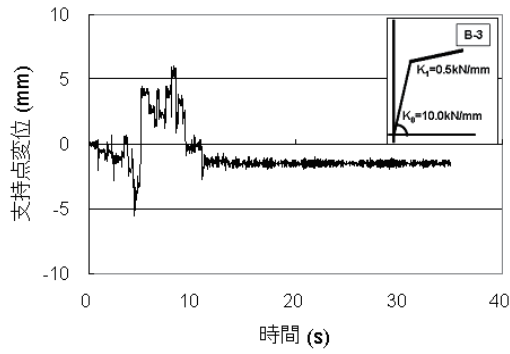


(a) 応答加速度波形

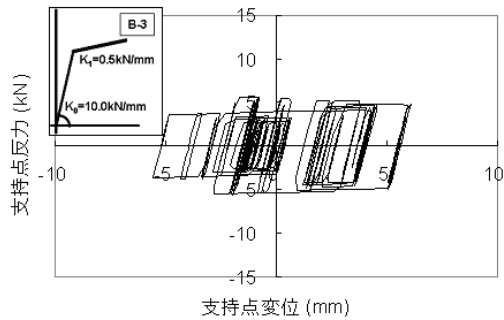


(b) 振動数分析結果

図 11 No.5 支持点の加速度応答 (ケース B-2)



(a) 支持点変位



(b) 荷重変位履歴

図 12 No.5 サポートの応答 (ケース B-3)

大きく反転し振動した。支持点変位量の大きさがケース A と比べて小さいのは、サポートの初期剛性がケース A に比べて大きいためである。荷重変位曲線は、図 12(b)に示すように、はじめに原点付近で履歴ループを描いた後、ループの中心が移動して履歴を描くことを繰り返した。

以上のケース A の結果から、応答加速度は 1 次振動の振動数において低下したことおよび荷重変位曲線の 2 次勾配はサポートの弾塑性振動の挙動に影響していないことが分かった。また、ケース B においても、荷重変位曲線の 2 次勾配はサポートの振動の挙動に影響していないことが分かった。

3.3 配管に生ずる荷重の比較

サポートの荷重変位曲線の 2 次勾配が配管応力に与える影響を検討した。配管応力は、配管断面に生じる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合モーメントを用いて評価される⁽¹²⁾。ここでは、配管応力の代わりに合モーメントを用いて比較した。比較部位は、固定端、エルボ端、T 字配管

の交点および中間支持点とした。

ケース A の 4B 配管に生ずる合モーメントを図 13 に示す。合モーメントの値は時刻歴応答解析結果の最大値である。ケース A-2 の各点の合モーメントは、弾性解析結果であるケース A-1 より小さくなり、多くの節点で、今回の解析ケースの中で最も低くなった。ケース A-3 およびケース A-4 の合モーメントはケース A-2 とほぼ同じ値となり、今回の検討範囲においては、2 次勾配が配管に生ずる荷重に与える影響はほとんど見られなかった。

ケース B の配管の合モーメントを図 14 に示す。ケース B-2 からケース B-4 の結果に差は見られず、弾性解析結果であるケース B-1 とほぼ同じであった。ケース B においても 2 次勾配が配管に生ずる荷重に与える影響はほとんど見られなかった。

以上の結果から、今回検討を行なったサポートの塑性変形率 2 程度の変形の範囲では、配管に生ずる荷重は 2 次勾配の影響をほとんど受けないことが分かった。

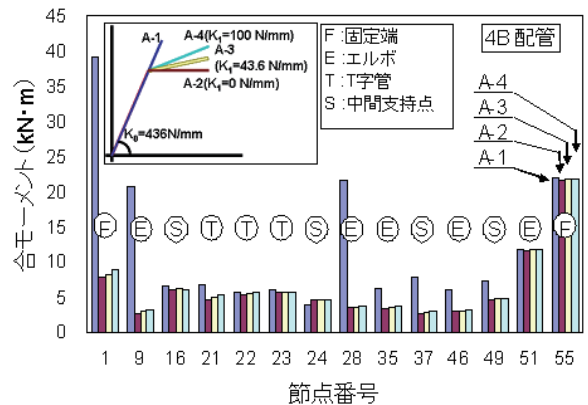


図 13 配管代表点の合モーメントの比較 (ケース A)

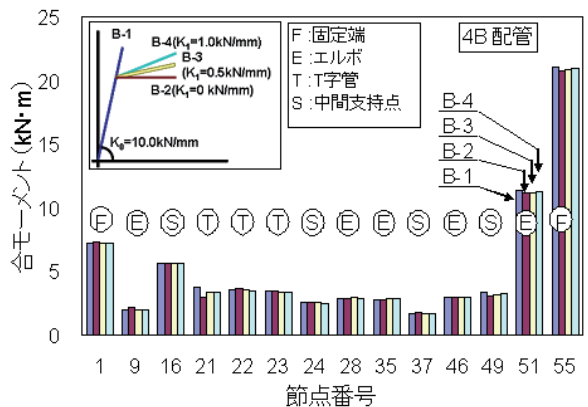


図 14 配管代表点の合モーメントの比較 (ケース B)

た。従って、サポートの荷重変形特性は、弾完全塑性体モデルで一様に扱えることが示唆された。

3.4 固定端反力の比較

配管に接続される機器への作用力として固定端反力是用いられるため、サポートのモデル化の影響を検討した。固定端反力の比較を図 15 に示す。固定端反力は、 x , y , z の 3 方向の曲げモーメントの 2 乗和平方根から求めた合力とし、時刻歴応答解析結果の最大値を示した。

ケース A の固定端反力を図 15(a) に示す。すべての固定端において、ケース A-2 の固定端反力はケース A-1 と比べ小さくなった。ケース A-2 から A-4 へと 2 次勾配が増加するにつれて、固定端反力はわずかに増加したがケース A-2 の結果とほぼ同じを示した。今回の検討範囲においては、固定端反力への 2 次勾配の影響はほとんど見られなかった。

ケース B の結果を図 15(b) に示す。ケース B-2 の

固定端反力はケース B-1 とほぼ同じであった。ケース B-2 からケース B-4 の比較においても 2 次勾配の違いによる差は見られなかった。従って、ケース B においても 2 次勾配が固定端反力に与える影響はほとんど見られなかった。

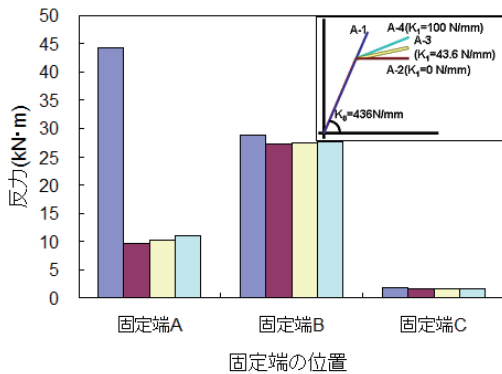
以上の結果から、検討したサポートの塑性変形率 2 程度の変形の範囲では、固定端反力は 2 次勾配の影響をほとんど受けないことが分かった。固定端反力の観点から、サポートの荷重変形特性は弾完全塑性体モデルで一様に扱えることが示唆された。

3.5 塑性変形によるエネルギー吸収の比較

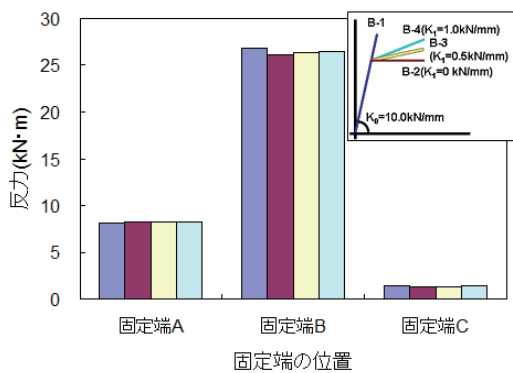
図 16(a) はケース A の累積吸収エネルギーの履歴を示す。No.5 サポートの塑性変形によるエネルギー吸収は、最大応答振幅を向かえる 7 秒以前にほとんどの増加を終えた。ケース A-2 からケース A-3 の吸収エネルギーの履歴は、この時点までケース間の違いがほぼ見られない。吸収エネルギーの飽和値については、サポートを弾完全塑性としたケース A-2 で最大となり約 $910\text{kN}\cdot\text{mm}$ 、ケース A-4 で約 $830\text{kN}\cdot\text{mm}$ となり、両者の差は約 10% 程度となった。また、2 次剛性を初期剛性の 1/10 としたケース A-3 はケース A-2 とほぼ同じ飽和値であった。従って、吸収エネルギーの推移は本研究の検討範囲内において 2 次勾配の違いによる影響をほとんど受けていないと考えられる。

図 16(b) はケース B の累積吸収エネルギーを示す。吸収エネルギーは、入力地震波が最大値を示す 10 秒程度以降も徐々に増加し、図 16(a) のケース A と異なる傾向を示した。吸収エネルギーの飽和値については、サポートを弾完全塑性としたケース B-2 で最大となり約 $830\text{kN}\cdot\text{mm}$ 、2 次剛性を初期剛性の 1/10 としたケース B-4 で約 $170\text{kN}\cdot\text{mm}$ となった。

以上から、サポート構造を模して初期勾配を決めたケース A において、2 次勾配は吸収エネルギーの推移にほとんど影響を与えないことが分かった。また、ケース B の結果からは、弾性剛性が大きいサポートの場合には、吸収エネルギーの推移は 2 次勾配に影響を受けることが分かった。

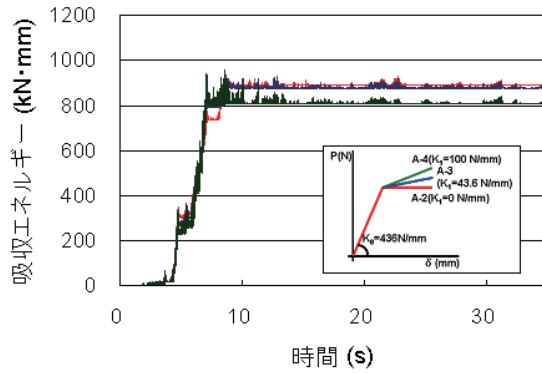


(a) ケース A

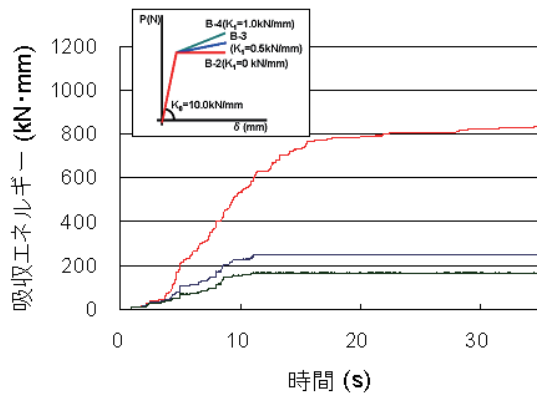


(b) ケース B

図 15 固定端反力



(a) ケース A



(b) ケース B

図 16 吸収エネルギー履歴の比較

4. 結言

本研究は、強い地震動での配管系地震応答解析モデル確立のために、大振幅荷重を受ける配管系サポートの地震応答モデルを検討した。サポートの荷重変形曲線をバイリニア形状にモデル化し、初期勾配および2次勾配をパラメータとした解析を行なった。以下の結論を得た。

- (1) 検討の範囲内（塑性変形率 約2程度）では、配管系の応答加速度、サポートの弾塑性振動、配管に生ずる荷重、固定端反力について、2次勾配の違いを考慮せず弾完全塑性体モデルで一様に扱えることが示された。
- (2) 地震応答加速度の下がる範囲および低下量は、2次勾配の大きさにほとんど影響しないことが示された。
- (3) エネルギー吸収については、2次勾配の与える影響が初期勾配の大きさにより大きく異なる。

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。ここに謝意を表す。

文献

- (1) 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).
- (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 (Part I : Simulation for PWR Main Steam Piping)”, Trans.SMiRT 14, K15-1, (1997).
- (3) 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).
- (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 (Test Results on Piping Component and Simplified Piping System)”, ASME PVP, Vol.445-1, pp.99-106, (2002).
- (5) 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).
- (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)”, Trans.SMiRT 17, K15-2, (2003).
- (7) E. Yamazaki and N. Kojima, “Investigation on Ultimate Strength Evaluation of Snubber in Piping System of Japanese NPP”, Trans.SMiRT

- 19, K18-3, (2007).
- (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) 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に関する考察", INSS JOURNAL, Vol.18, (2011).
- (11) 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).
- (12) 日本機械学会編, "発電用原子力設備規格 設計・建設規格", (2008).
- (13) 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).
- (14) 皆川佳祐, 藤田聡, "エネルギーによる耐震性評価", 日本機械学会年次大会, (2011).