等価線形化法による配管系の簡易的な弾塑性地震応答解析*

飯 島 唯 司^{*1}, 小 野 悟^{*2}Simplified Analysis of Inelastic Seismic Response of Piping System
by Equivalent Linearization MethodTadashi IJIMA^{*3} and Satoru ONO^{*3} Hitachi, Ltd., Mechanical Engineering Research Laboratory,
502 Kandatsu-machi, Tsuchiura-shi, Ibaraki, 300-0013 Japan

We have developed a simplified analysis method based on equivalent linearizations for calculating inelastic seismic responses of piping systems. The linearizations of inelastic load-deformation relationships make it possible to take advantage of a conventional method for elastic seismic design, such as modeling using elastic beam elements and the modal response spectrum analysis. To linearize the stiffness equivalently, we modified the flexibility factors of the elastic beam elements used in a conventional design. As a result, we can apply the conventional design code in the developed method. By doing so, we found that the calculated seismic responses of a simple piping system agree fairly well with those from nonlinear time-history analysis. This agreement verifies that the simplified analysis method can efficiently evaluate inelastic responses.

Key Words: Seismic Response, Piping System, Equivalent Linearization Method, Elastic Beam Element, Flexibility Factor, Response Spectrum Analysis

1. 結 言

原子力施設などの各種施設の耐震設計では、多くの場合、地震時の機器・配管系の部材の変形を弾性域に留める弾性設計が適用されている。この弾性設計で想定する変形量に対して、機器・配管系が機能喪失に至る変形量ははるかに大きく、機器・配管系は大きな耐震裕度を持っている。そこで近年、原子力施設の合理化のため、塑性変形を許容する弾塑性設計が検討されており、地震時の機器・配管系の弾塑性応答評価法の確立が必要となっている。

弾塑性応答評価のための代表的な応答解析手法としては、非線形時刻歴解析がある。これは、時刻歴波形として定義された地震入力に対して、時々刻々の応答を評価していく手法である。この手法は解析精度が高く、詳細な評価が可能な反面、計算コストが非常に大きくなる欠点がある。このような非線形時刻歴解析による弾塑性応答評価は、多くの場合、例えば ABAQUS^①, ADINA, MARC などの汎用解析コードを用いて行われる。そして、これらの汎用解析コードの幾つかでは、配管をモデル化するための弾塑性ビーム要素が提供されている。これらのビーム要素は、配管のモデル化で重要な曲管部の幾何学的非線形特性を精度良くモデル化できるため、

配管系の弾塑性応答評価に利用されている。

一方、前述の弾性設計の考え方に基づく耐震設計で使われる代表的な応答解析手法としては、線形モーダル解析手法を利用するモーダル時刻歴解析法及び応答スペクトル解析法があり、経済的に地震応答を評価できる^②。このうち、応答スペクトル解析法は、固有振動数、減衰比をパラメータとする 1 自由度系の最大応答値で定義される応答スペクトルを入力条件として使い、最大地震応答を評価する手法である。そのため、応答スペクトルによって地震入力条件を一般的に定義でき、モーダル時刻歴解析法と比較しても、より経済的なため、設計解析手法として広く使われている。そして、これらの線形解析手法を配管系の応答評価に適用する場合、一般的に、配管は弾性ビーム要素でモデル化される。このとき、曲管などは直管に比べて剛性が低くなるため、フレキシビリティファクタと呼ばれる剛性の補正係数を用いて、直管部分に対して剛性を補正している^{③④}。

そこで今後、耐震設計に適用する弾塑性応答評価手法としては、計算コストや設計解析手法との一貫性という観点から、弾性ビーム要素で配管をモデル化し、応答スペクトル解析法で応答を評価できるような簡易的な弾塑性解析手法が望まれる。配管系の弾塑性応答評価のための簡易解析手法としては、例えば、配管の塑性部分を塑性ヒンジでモデル化するインクリメンタルヒンジ法^⑤や、塑性した部分の剛性、減衰を等価な線形剛性、線形減衰に置換する

* 原稿受付 2001 年 10 月 24 日。

^{*1} 正員、(株)日立製作所機械研究所(〒300-0013 土浦市神立町 502)。^{*2} (株)日立製作所原子力事業部(〒317-8511 日立市幸町 311)。
E-mail: tadashi@merl.hitachi.co.jp

等価線形化法⁹⁾を利用した評価法などが提案されている。このうちの等価線形化法では、配管本体のうちの曲管部分が塑性変形する配管系の応答評価に適用し、塑性変形する曲管部分を、回転自由度のばね要素でモデル化している。

前述の既往研究に対して、本研究の目的は、現行の耐震設計で使われている応答解析手法、解析モデル化手法に等価線形化法を適用し、配管本体の弾塑性変形を考慮できる簡易的な弾塑性地震応答解析法の開発である。そこで本報告では、現行の耐震設計の設計解析手法である(1)フレキシビリティファクタで剛性を補正する弾性ビーム要素による解析モデル化手法と、(2)地震入力条件として応答スペクトルを用いる応答スペクトル解析法を用いた簡易的な弾塑性解析手法を提案する。この提案手法では、塑性した部分の剛性低下と減衰増加を考慮するために等価線形化法を適用し、弾性ビーム要素の要素剛性、要素減衰を、等価的に線形化した剛性、減衰（以降、それぞれ等価剛性、等価減衰）に置換する。そして線形化した配管系モデルに対して、応答スペクトル解析法を適用し、地震応答を評価する。提案手法によれば、現行の耐震設計で使われている解析モデル化手法と応答解析手法を利用でき、従来の配管設計解析コードを用いた簡易評価が可能となる。

2 等価線形化法による応答評価方法

2.1 配管系のモデル化方法

2.1.1 従来のモデル化方法

従来の配管設計における地震応答評価では、一般的に、外径、肉厚などの配管形状、ヤング率、ポアソン比という弾性域の材料特性値、要素長さなどで要素剛性行列が定義される弾性ビーム要素を用いて配管系をモデル化している⁹⁾。ただし、配管系のうちの曲管、分岐管などの部分は、変形時の管断面の扁平化によって、直管部分に比べて剛性が低くなる。そのため、次式のように、フレキシビリティファクタと呼ばれる剛性の補正係数を用いて、要素剛性行列のうち剛性が低下する成分を補正している。

$$K_e = \frac{K_s}{k_{LIN}} \quad (1)$$

ここで K_s は直管に対して導出される要素剛性、 K_e は補正後の要素剛性、 k_{LIN} は弾性域のフレキシビリティファクタ（以降、弾性フレキシビリティファクタ）である。直管部分の弾性フレキシビリティファクタは、1.0 に相当する。そして曲管、分岐管など

については、配管形状毎に弾性フレキシビリティファクタの導出式が設定されている⁹⁾。後述する提案手法の適用例では、直管と曲管から構成される配管系を検討対象としており、外径、肉厚に加えて曲率半径で形状が定義される曲管の弾性フレキシビリティファクタ k_{LIN} の導出式を以下に示す。

$$k_{LIN} = \frac{1.65}{h} \frac{1}{1 + 6P/Eh \left(\frac{R}{t}\right)^3} \quad (2)$$

ここで t は肉厚、 R は曲率半径、 P は内圧、 E はヤング率、 $h = Dt / [(D-t)/2]^2$ 、 D は外径である。

減衰については、原子力施設などの従来の配管設計では、配管サポートの種類、数量に応じて設定される設計用減衰定数を、全振動モードのモード減衰比として応答解析に用いている⁹⁾。したがって応答スペクトル解析法の場合は、設計用減衰定数の応答スペクトルを計算し、これを地震入力条件として地震応答を評価している。

2.1.2 提案手法のモデル化方法

本報告では、簡易的な弾塑性応答評価のため、前述した従来のモデル化手法に対して、等価線形化法を適用したモデル化手法を提案する。この提案手法では、式(2)の弾性フレキシビリティファクタ k_{LIN} の代わりに、弾塑性変形による剛性低下を考慮するための剛性補正係数 k_{NON} を弾性フレキシビリティファクタ k_{LIN} に乗じたフレキシビリティファクタ k_{eq} （以降、等価線形フレキシビリティファクタ）を用いる。

$$k_{eq} = k_{LIN} \times k_{NON} \quad (3)$$

後述する提案手法の適用例では、 k_{LIN} として、曲管部分には式(2)で導出した値、直管部分には 1.0 を用いた。そして k_{NON} は、塑性による剛性低下を考慮するための補正係数であり、次式で定義される。

$$k_{NON} = \frac{K}{K'} \quad (4)$$

ここで K は弾性域の剛性、 K' は塑性後の等価剛性である。本提案手法によれば、従来の設計解析コードの要素剛性行列の定義部分のうち、フレキシビリティファクタ k_{LIN} に対応する部分を式(3)のように修正するだけで、容易に塑性変形による剛性低下を考慮したモデル化が可能となる。したがって本手法では、塑性部分のモーメントヒンジやばね要素への置換は不要であり、適用が容易なことが特徴である。

減衰については、弾塑性応答の場合、塑性部分のエネルギー吸収による減衰の増加を考慮する必要がある。

あり、提案手法では次のように取り扱う。配管系モデルを構成する弾性ビーム要素毎に要素減衰比を設定して、これらをモード解析手法を用いて組み合わせることで、配管系としてのモード減衰比を導出する。このとき、塑性化した部分の要素減衰比は、後述する手法によって減衰の増加を反映した等価減衰比とする。そして各要素毎の減衰比は、次式によりひずみエネルギー比例型減衰の考え方で組み合わせ、配管系の*i*次のモード減衰比 h_i を導出する⁹⁾。

$$h_i = \frac{\sum_{j=1}^n h_e^j E_i^j}{E_i} \quad (5)$$

ここで h_e^j は*j*番目の要素の要素減衰比、 E_i^j は*i*次の振動モードによる*j*番目の要素のひずみエネルギー、 E_i は*i*次の振動モードによる系全体のひずみエネルギー、*n*は要素の総数である。この方法の場合、式(5)で各振動モード毎のモード減衰比を求め、これをもとに、地震入力条件となる各振動モード毎の応答スペクトル値を計算して、地震応答を評価する。

2.2 評価の流れ

以下に、提案する等価線形化法の全体の流れを説明する。提案手法では、塑性部位の応答(回転角)を仮定して等価線形化を行う。そして所定の地震入力条件で応答評価を行い、その評価結果が仮定値と一致するまで、仮定値を補正して計算を繰り返す収束計算を行う。図1には、この流れをフローで示す。

(1) 線形解析モデルの応答スペクトル解析

はじめに、従来の設計解析と同様に、所定の地震入力条件で線形解析モデルによる応答スペクトル解析を行う。そして配管要素の回転角を評価して降伏回転角と比較し、配管部材の降伏を判断する。

(2) 塑性化した要素の応答の仮定

ステップ(1)で配管が塑性変形すると判断した場合、以降のステップで等価線形化法を適用するために、塑性変形する要素の応答を仮定する。この応答としては配管要素の回転角を用いる。後述のように、提案手法では収束計算を行うが、その収束計算の各ステップ毎に式(6)によって、塑性部分の全ての回転角を仮定していく。

$$\{x\}_{i+1}' = \{x\}_i' + \alpha(\{x\}_i - \{x\}_i') \quad (6)$$

ここで $\{x\}_{i+1}'$ は*i*+1回目の仮定値、 $\{x\}_i'$ は*i*回目の評価結果、 $\{x\}_i$ は*i*回目の仮定値、 α は仮定値の補正の程度を表すパラメータであり、本検討では0.5とした。必要に応じて α を調整し、収束計算を行なう。

また収束計算の最初の仮定では、線形解析モデルの応答評価結果を、そのまま仮定値として用いた。

(3) 塑性した要素の等価線形化

塑性した要素について、ステップ(2)で設定した回転角の仮定値をもとに、要素の剛性、減衰を等価線形化する。ここで、回転角と等価剛性、等価減衰の関係は、あらかじめデータベースとして設定しておく必要がある。本検討では、あらかじめ配管の部分要素モデルの弾塑性解析を行うことで、回転角と等価剛性、等価減衰の関係をデータベース化した。

(4) 等価線形モデルの固有値解析

塑性変形した要素を等価線形化した配管系モデル(以降、等価線形モデル)の固有値解析により、等価線形モデルの固有振動数(以降、等価振動数)とモード減衰比を導出する。そして、各要素毎の要素減衰比をもとに、式(5)のひずみエネルギー比例型減衰の考え方によってモード減衰比を導出する。

(5) 応答スペクトルの計算

ステップ(4)の固有値解析で求めた等価振動数、モード減衰比の応答スペクトル値を計算する。本提案手法では、収束計算の各ステップ毎に、等価振動数、等価減衰比の応答スペクトルの値を計算していく必要がある。そのため、以下のいずれかの方法で、応答スペクトルを計算していく。

(a) 入力地震波形データを用いる方法

入力地震波の時刻歴波形データを用いた1自由度系の地震応答解析で直接、各振動モード毎の等価振動数、モード減衰比の応答スペクトル値を計算する。

(b) 複数の減衰比の応答スペクトルデータベースを用いる方法

あらかじめ、複数の減衰比について、想定される振動数範囲の応答スペクトルを計算してデータベース化しておく。そして振動数、減衰比に関する内挿、外挿で、各振動モード毎のスペクトル値を計算する。

後述の提案手法の適用例では、これら2つの方法のうち、入力地震波形から直接、等価振動数、等価減衰比のスペクトル値を計算する(a)の方法を用いた。

(6) 等価線形モデルの応答スペクトル解析

ステップ(5)で計算した各振動モード毎の応答スペクトル値を地震入力条件とし、応答スペクトル解析法によって等価線形モデルの地震応答を評価する。

(7) 等価線形モデルの応答評価結果と仮定値の比較

全ての塑性部分について、ステップ(6)の応答評価結果とステップ(2)の仮定値を比較する。これらの差異が、あらかじめ設定した収束条件を満たした場合、その評価結果を最終的な応答とする。そうで

ない場合には、回転角の仮定値を再設定し、収束条件を満たすまで、収束計算を行う。本検討では、次式の収束条件式を用いた。

$$\frac{x_i' - x_i}{x_i} \leq \varepsilon \quad (7)$$

ここで x_i' は i 回目の仮定値、 x_i は i 回目の評価結果である。また本検討では、上限値 ε を 3% とした。

(8) 収束計算

等価線形モデルの応答評価結果と仮定値の差異が、式(7)で定義される収束条件を満たすまで、ステップ(2)からステップ(7)を繰り返す。そして、応答評価結果と仮定値の差異が収束条件を満たした場合、収束計算を終了する。なお、配管部材の降伏の判断は、各収束計算毎にあらためて実施する。

3. 提案手法の適用

3.1 解析条件

3.1.1 解析ケース

提案する等価線形化法による応答評価方法（以下、提案手法）を、配管系の地震応答評価に適用する。本報告では、提案手法の精度を検証するため、より解析精度が高い非線形時刻歴解析と提案手法の評価結果を比較した一適用例を示す。また参考のため、従来の線形解析モデルによる応答スペクトル解析の評価結果とも比較する。表1に、それぞれの手法の解析条件をまとめる。提案手法では、配管系を弾性ビーム要素でモデル化している。特に曲管部分は、式(2)のフレキシビリティファクタで剛性を補正した弾性ビーム要素を用いる。そして塑性部位には等価線形化法を用いて応答スペクトル解析法を適用する。一方の非線形時刻歴解析には、汎用解析コード ABAQUS (Ver. 5.8)¹⁰⁾を用いた。このとき配管系のモデル化は、ABAQUSのエルゴ要素 (ELBOW31) と呼ばれる弾塑性ビーム要素を用いる。このエルゴ要素とは、配管断面の楕円化による幾何学的非線形特性を考慮できるビーム要素であり、シェル要素と同等な詳細評価が可能となる¹⁰⁾。そして応答解析手法としては、直接積分法による時刻歴解析を用いる。

Table 1 Analysis cases

Case	Element	Analysis method
Equivalent Linear	Elastic beam and linearized beam	Iteration of response spectrum analysis
Nonlinear Time history	ABAQUS ELBOW31	Direct time integration
Conventional	Elastic beam	Response spectrum analysis

Fig.1 Flow of equivalent linearization method

3.1.2 解析モデル

図2に、検討対象の配管系の解析モデルを示す。このモデルは、両端で完全固定であり、Support(Y+Z)でY方向とZ方向、Support(Z)でZ方向の並進自由度が固定されている。表1の各解析ケースともに、モデルの要素分割は同じである。ただし曲管部分は、等価線形化法では現行の耐震設計における一般的なモデル化にならない1つの要素でモデル化する。一方、非線形時刻歴解析では、より厳密なモデル化とするため、さらに5つに等分割している。

材料特性は、仮想的にヤング率 203GPa、塑性域の降伏値 300MPa、2次剛性 35GPa となる2直線近似の応力-ひずみ関係を用いる。そして材料硬化則には移動硬化則モデルを用いる。また弾性域の減衰比は 2.0% とする。非線形時刻歴解析では、弾性域で、1次、2次のモード減衰比が 2.0% となるレーリ一減衰行列を与える。

表2に、配管系モデルの固有値解析結果を示す。

Table 2 Eigen frequency of piping system

Mode	Eigen frequency	Direction
1st	3.7 Hz	X
2nd	9.4 Hz	Z
3rd	16.2 Hz	Y

3.1.3 入力条件

本検討では、配管に内圧 10.7MPa を負荷した条件で、卓越振動数を配管系の弾性範囲の 1 次振動数に調整した人工地震波を入力する。この入力地震波の最大加速度振幅は 20m/s^2 とし、加振方向は図 2 の X 方向とする。図 3 には、この入力地震波の時刻歴波形と応答スペクトルを示す。

3.2 等価剛性、等価減衰比の導出

等価線形化法では、あらかじめ塑性部位の応答と等価剛性、等価減衰比の関係を設定し、データベース化しておく必要がある。ここでは、その等価剛性、等価減衰比の評価方法、及び評価結果を示す。

本検討では、図 2 に示すように、曲管と直管からなる配管系モデルを検討対象とし、そのうちの曲管部分が塑性変形する。そのため、図 2 に示す配管系の全ての曲管部分を対象に、部分解析モデルによる静的な弾塑性解析を行い、曲管部分の回転角と等価剛性、等価減衰比の関係を導出する。この評価には、非線形時刻歴解析の場合と同様、汎用解析コード ABAQUS を用いる。また解析要素としては、計算の簡単化と、非線形時刻歴解析との一貫性のため、ABAQUS のエルボ要素 (ELBOW31) を用いる。図 4 に、本検討で用いた曲管の部分解析モデルを示す。この解析モデルの一端に繰り返し型の強制変位を加えて、曲管部分の回転角—モーメント関係の評価する。そして、この回転角—モーメント関係に等価線形化法を適用し、回転角と等価剛性、等価減衰比の関係を導出する。これらの導出方法としては、幾つかの考え方が提案されている⁹⁾。本検討では、それらの考え方のうち、概念が明確で、適用が容易という理由から、最大変形点で等価剛性、等価減衰を定義する方法を用いる。この方法では、図 5 に示すように、等価剛性 K_{eq} を最大変形点間の傾きから求める。そして等価減衰比を次式によって導出する。

$$h_{eq} = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{\Delta E}{K_{eq} \cdot \theta_{\max}^2 / 2} \right) \quad (8)$$

ここで ΔE は回転角—モーメント関係のヒステリシスループ面積、 K_{eq} は等価剛性、 $\theta_{\max}$ は最大回転角である。図 6 に、エルボの回転角と等価剛性、等価減衰比の評価結果を示す。ここでは、×で表す等価剛性、等価減衰比の導出値を、線で結んでいる。弾性ビーム要素の剛性補正係数 k_{NON} は、この等価剛性の評価結果をもとに、式(4)によって導出する。また、ここでの等価減衰比には、式(8)で導出した減衰比に、さらに弾性域の減衰比 2.0% を加えている。

Fig.2 Analysis model of piping system

Fig.3 Artificial seismic wave

Fig.4 Analysis model of elbow

Fig.5 Schematic diagram of equivalent linearization

3.3 提案手法の適用結果

本検討では、図2に示した配管系について、提案する等価線形化法による応答評価を行い、非線形時刻歴解析や、従来の応答スペクトル解析による評価結果と比較した。図7に、以下の応答について、各解析ケースの評価結果を示す。

- ・集中質量位置の応答変位
- ・曲管部分のモーメント
- ・曲管部分の回転角

ここで時刻歴解析結果については、曲管の楕円化による開側、閉側での非対称性を区別するため、開側、閉側（正側、負側）のそれぞれの最大応答値を示す。図8には、参考のため、非線形時刻歴解析による集中質量位置の応答変位波形、エルボ1でのモーメント-回転角関係の評価結果を示す。

本検討では、等価線形化法による最大変位の評価結果は、非線形時刻歴解析と比較して、15%程度の過小評価となった。ただし非線形時刻歴解析による評価結果では、図8に示すように、エルボの開側、閉側で変形が非対称となり、エルボの変形が開側にシフトしていく傾向がある。そのため、変形の向きによって最大値が異なっており、逆方向の最大変位で比較した場合の差異は、3%未満であった。さらに等価線形化法によるエルボのモーメント、回転角の評価結果は、非線形時刻歴解析と比較して、最大で15%程度の差異となった。しかしながら、各エルボでのモーメント、回転角の分布の傾向は、良く一致した。一方、地震入力条件として弾性域の減衰比2.0%の応答スペクトルを用いる応答スペクトル解析法による評価結果は、塑性変形による減衰の増加を考慮していない。そのため非線形時刻歴解析に比べて、2~3倍程度、応答を過大評価する安全側の結果となった。

(1) Linearized stiffness

(2) Linearized damping ratio

Fig.6 Linearized stiffness and damping ratio

4 結 論

配管系の簡易な弾塑性地震応答解析方法として、等価線形化法による評価方法を提案し、さらに配管系の応答評価に適用して、以下の結論を得た。

(1) 等価線形化法による配管系の簡易弾塑性応答評価方法を提案した。この提案方法では、現行の配管設計と同様に、フレキシビリティファクタで剛性を補正する弾性ビーム要素でモデル化した配管系モデルを用いて、応答スペクトル解析法によって、簡易的な配管系の弾塑性応答評価が可能となる。

(2) 提案する手法を配管系の弾塑性地震応答評価に適用し、より詳細な評価が可能な非線形時刻歴解析による評価結果と比較した。本検討条件では、非線形時刻歴解析結果と比較して、従来の応答スペクトル解析法による評価結果が2~3倍程度、応答を過大評価したのに対し、等価線形化法による簡易評価結果は、最大15%程度の差異で一致した。

今後は、非線形時刻歴解析のみではなく、振動試験による提案手法の比較検証等も行ない、提案手法の適用性の把握、精度向上を図る予定である。

文 献

- (1) Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., ABAQUS/Standard User's Manual, Version 5.7, 1, (1999), 6.3.2-1.
- (2) 電気技術基準調査委員会, 電気技術指針原子力編 JEAG4601-1991 原子力発電所耐震設計技術指針, (1991), 561, 日本電気協会.
- (3) 鷲津久一郎・宮本博・山田嘉昭・山本善之・川井忠彦, 有限要素法ハンドブック I 基礎編, (1981), 226, 培風館.
- (4) ASME, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, (1971), 185.
- (5) Jaquay, K. R., Castle, W. R. and Larson, J. E., Incremental-hinge Piping Analysis Methods for Inelastic Seismic Response Prediction, Nuclear Engineering and Design, 111(1989), 311.
- (6) Park, Y. J. and Reich, C. M., Non-linear 3D Piping Analysis under Stochastic Dynamic Loads, Nuclear Engineering and Design, 126(1991), 233.
- (7) 柴田明徳, 最新耐震構造解析, (1981), 120, 森北出版.
- (8) 文献(1)の 15.4.1-1 頁
- (9) Iwan, R. D. and Gates, N. C., Estimating Earthquake Response of Simple Hysteretic Structures, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 105-EM3(1979), 391.

(1) Displacement

(2) Moment

(3) Rotation angle

Fig.7 Comparison of results

(1) Displacement

(2) Moment-rotation at ELBOW1

Fig.8 Results of time-history analysis