

簡易振動計を用いた小口径配管の振動応力の算出方法

Estimation of Vibration Stress of Small Bore Piping using a Portable Vibrometer

鈴木 道明 (Michiaki Suzuki)*¹ 野田 満靖 (Michiyasu Noda)*¹ 須山 健 (Takeshi Suyama)*²

要約 原子力発電所で発生するトラブルの主要な原因の一つに小口径配管の振動による疲労破壊がある。従来から、発電所では、小口径配管の振動加速度から振動応力を算出して評価する方法で管理している。その振動応力の算出に用いる振動モデルについて改良し、応力算出の精度を向上させた手法を開発するとともに、その手法を拡張して、複数の曲がり部や分岐、継手等を有する小口径配管については、ひずみゲージ等で応力を計測することなく、振動加速度から簡単に振動応力を算出することが可能な有限要素法をベースとした手法が開発されている。本論文では、複数の配管部品から構成されている、さらに複雑な小口径配管に対して、振動応力を算出する手法と適用例について述べる。本手法は、現場での取扱いの容易さに着目して携帯型の簡易振動計で計測した結果から振動応力を算出する。本手法による解析値と測定値を比較したところ、算出応力は十分な結果を得られなかったが、固有振動数はほぼ良い一致を得ることができ、本手法の有効性を確認することができた。

キーワード 小口径配管, システム配管, 疲労破壊, 振動応力, 簡易振動計, 有限要素法

Abstract The vibration induced fatigue failure at small bore piping is one of the common causes of failure at nuclear power plant. This failure is usually prevented by assessing the value of vibration stress using the output accelerometer caused by the vibration. The vibration model used to calculate the value of vibration stress was improved. The improved model can calculate the vibration stress more precisely. Furthermore, this method has been expanded to FEM based method that can be applied to more complex piping such as the one contains bends, branches, or joints that enables the assessment of the vibration stress more easier without measuring the actual stress using strain gages. This paper reports on the method to calculate the vibration stress and it's examples that are applied to a rather complex model consists of numerous parts. In this method, the output of portable vibrometer is used to calculate the value of vibration stress. The portable vibrometer is a handy type measuring equipment and can be easily handled when measuring vibration at the nuclear power plant during operation. The calculation result of the method and measured stress values using strain gages are compared. Both natural frequencies were similar even though stress values were not in good agreement. Thus the validity of this method is confirmed.

Keywords small bore piping, piping work, fatigue failure, vibration stress, portable vibrometer, finite element method

1. はじめに

原子力発電所には、主冷却系配管（母管）・ポンプ・タンク等に取り付けられたベント管・ドレン管・計装配管などの分岐管が数多くあり、そのうち、口径が小さいものは、小口径配管と呼ばれ、1ユニットに数百箇所存在する。これらの配管で発生するトラブルの主要な原因の一つとして、母管の振動によって小口径配管に発生する振動応力による疲労破壊がある。

過去5年間の商用原子力発電所の運転実績を見ても小口径配管が振動応力によって疲労破壊することで原子炉停止に至ったケースが少なくとも3件あり⁽¹⁾、振動応力による小口径配管の疲労破壊の防止策を確立することは原子力発電所の安定運転のために必須の課題である。

加圧水型原子力発電所（Pressurized Water Reactor, PWRプラント）においては、小口径配管の振動加速度から小口径配管付根部の振動応力を算出して、疲労評価を実施する方法で小口径配管の健全性の管理

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

*2 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 現在 関西電力(株)

を実施している。その振動応力の算出に用いる振動モデルには1質点系モデルや2質点系モデルがあり、平松らはそれらの精度を向上させる研究を行っている²⁾。

複数の配管部品から構成される複雑な小口径配管(以下小口径システム配管と呼ぶ)に対しては、今までに、いくつかの方法が提案されている。すなわち、小口径システム配管の振動応力を算出する方法として、田中ら³⁾により、「配管振動診断システム」が開発されているが、運搬が容易とはいえ、パソコンを用いたシステムによる詳細な計測が必要であり、PWRプラントの現場で構造健全性の管理用として採用するには適切ではない。また、配管を簡易な振動モデルにモデル化して振動応力を求める方法として、奥津⁴⁾により空調機用配管を分布質量の梁にモデル化する方法が示されているが、この方法を複雑な小口径システム配管まで拡張することは困難である。その他、小口径配管の付根部の速度あるいは変位を小口径配管の最大応力と関連付けて疲労損傷を管理する方法⁵⁾⁶⁾が示されているが、小口径配管の形状を考慮していないことから、配管口径と材料が同じ配管は同じ制限値になり、配管の形状により応力が異なるという現象を表すことができない。

原子力発電所における小口径配管の振動管理方法を考えると、取扱いが容易で誰もが実施できる手法であることが必要である。発電所の配管設置場所は必ずしも十分な作業スペースが確保されているとは限らない。また、発電所の運転員または保修員が作業を行うことを想定すると、ひずみゲージの取扱いのように熟練した技能を要求することもできない。したがって、振動測定は簡易振動計を利用することとし、その解析は有限要素法(Finite Element Method, FEM)解析をベースとしたシステムにまとめることにより、振動測定から振動解析までの一連の作業が容易に行える手法の構築を目標とした。

本論文では、小口径システム配管に対して、携帯型の簡易振動計の計測結果を用いて、配管の振動応力を算出する方法について提案する。まず、提案する方法の手順について述べ、次に提案する方法で使われる算出式の導出過程について述べる。最後に、提案する方法を比較的簡単な形状の小口径配管に適用した例を示す。適用例の評価において、固有振動数、応答加速度および応力について測定値と解析値との比較結果を示す。

2. 振動応力の算出方法の手順

小口径システム配管の振動応力を算出する手順を図1に示し、以下に説明する。

- 手順1 対象となる配管形状・サポート等の情報を含むFEM配管解析モデルを作成し、その中で配管の問題としている部分の振動応力に影響すると考えられるサポートを選定する。
- 手順2 手順1で作成したFEM配管解析モデルを用いた固有値解析の振動数と、簡易振動計で測定した共振振動数との差が十分小さくなるように、手順1で選定したサポート剛性を調整して、FEM配管解析モデルを調整する。

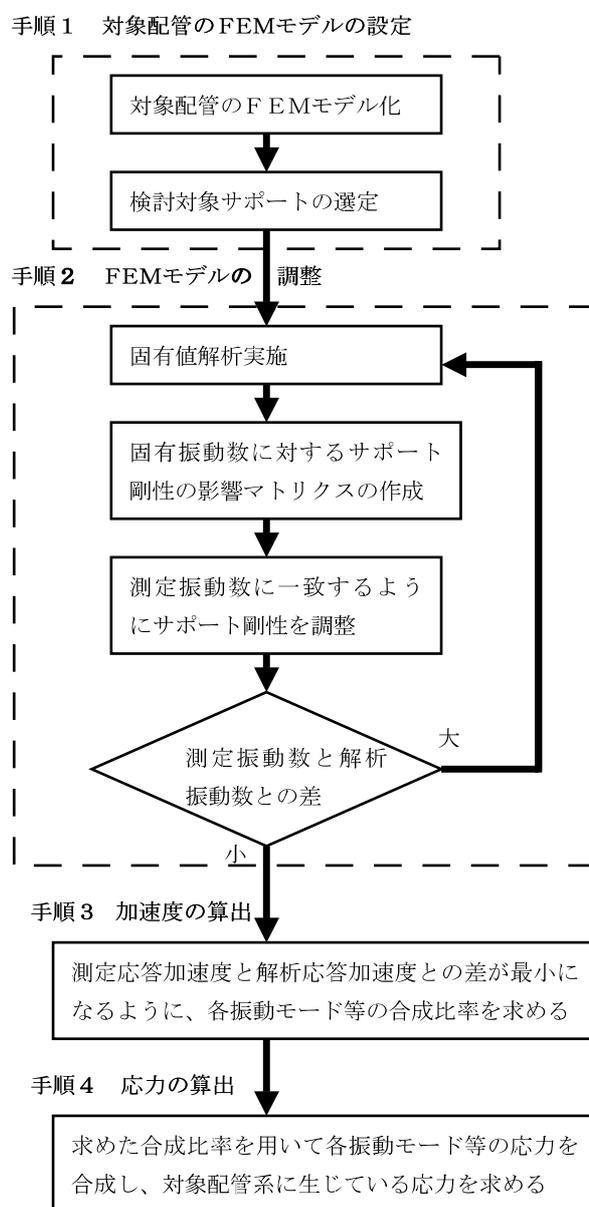


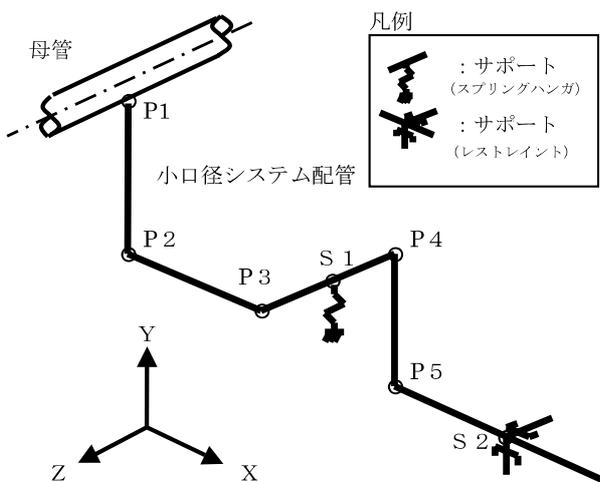
図1 小口径システム配管の振動応力の算出手順

- 手順3 対象となる配管系のうち振動振幅が大きな複数の点について簡易振動計を用いて測定した測定応答加速度と、手順2で調整したFEM配管解析モデルから求める解析応答加速度との差が最小となるように、振動モード等（FEM解析モデルから得られた振動モードに単位加速度を与えた変形モードおよび母管との接続点を単位加速度に対応した変位を与えた場合の静的変形を合わせて振動モード等という）の合成比率を求める。ここで、解析応答加速度は、振動モード等を合成して得られた加速度である。静的変形を考慮するのは、母管が振動して、接続している小口径配管の端部が動くことによる応力を振動モードのみでは考慮することができないためである。
- 手順4 手順3で求めた合成比率は、実際に発生している振動モード等の大きさを示すものであるため、FEM解析モデルから振動モード等の応力を合成比率に従い合成することで、対象配管系に生じる応力を算出することができる。

3. 振動応力の算出式

上記、手順で述べた振動応力算出式の導出について図2に示すモデル図を用いて示す。

図2のP1点が母管と小口径システム配管の接続位



P1、P2、P3点等 : 小口径システム配管上の代表的な点
S1、S2点 : 小口径システム配管のサポート点

図2 システム配管の振動応力算出方法の考え方を示すためのモデル図

置であり、P1点から母管の振動が小口径システム配管に伝達される場合を考える。この小口径システム配管は、P5、S2点の先に小口径配管が連続している長い配管系であると考えられる。

P1、P2、P3点等は小口径システム配管の代表的な点であり、S1、S2点は、小口径システム配管のサポート点である。

手順1では、図2の配管系のFEM配管解析モデルを作成する。手順2では、S1、S2点等のサポートの剛性を仮定して、固有値解析を行う。S1、S2点等のサポート点のサポート剛性を少し変化させた場合の固有値解析を行い、サポート剛性の変化に対する配管系の固有値への影響を計算し、感度マトリクス $[E]$ を作成する。

$$\{\Delta f\} = [E] \cdot \{\Delta k\} \tag{1}$$

ここで、 $\{\Delta f\}$ は、合わせようとする振動モード次数 (n 個) の固有振動数の変化分である。 $\{\Delta k\}$ は、サポート点の剛性変化分であり、固有振動数の変化に対する寄与の大きいサポートから、合わせようとする振動モードの次数 (n 個) を採用している。 $[E]$ は、 $n \times n$ の感度マトリクスであり、 $\{\Delta f\}$ と $\{\Delta k\}$ を関連づけている。

$$\{\Delta f\} = \{\text{測定振動数}\} - \{\text{解析振動数}\} \tag{2}$$

$$\{\Delta k\} = [E]^{-1} \cdot \{\Delta f\} \tag{3}$$

として、サポート剛性を $\{\Delta k\}$ 変化させて固有振動数解析を行う。(1)式から(3)式までを、 $\{\Delta f\}$ が小さくなるまで繰り返す。

$\{\Delta f\}$ が小さくなった時点で、測定振動数が模擬でき、手順3の計算に使用可能なFEM解析モデルが作成できたと考える。

手順3では、まず、P1点をX、Y、Zの3方向に静的に動かした場合（P1点の主要な振動成分の振動数で単位加速度を変位に換算して入力）の解析をそれぞれ行い、P1、P2、P3点等の加速度および応力を求める。

P1点の X、Y、Z方向に単位加速度に対応した変位を与えた場合の静的な解析で得られたPj点 ($j=1,2,\dots,m$) の加速度と応力をそれぞれ ${}_xV_{j,x}$ 、 $\sigma_{j,y}$ 、 ${}_yV_{j,y}$ 、 $\sigma_{j,z}$ 、 ${}_zV_{j,z}$ とする。

次に、P1点を固定した固有値解析および単位加速

度に対する応答を求め、 i 次振動モードのP1, P2, P3点等の加速度および応力を求める。

i 次の振動モードについては、P $_j$ 点 ($j = 1, 2, \dots, m$) の加速度と応力を ${}_iV_j, {}_i\sigma_j$ とする。

いろいろな振動数成分を含む振動がモデルに入力された場合のP $_j$ 点 ($j = 1, 2, \dots, m$) の解析による加速度および応力は次のように表すことができる。

$$V_j = a_x \cdot V_j + a_y \cdot V_j + a_z \cdot V_j + \sum_{i=1}^m a_i \cdot V_j \quad (4)$$

$$\sigma_j = a_x \cdot \sigma_j + a_y \cdot \sigma_j + a_z \cdot \sigma_j + \sum_{i=1}^m a_i \cdot \sigma_j \quad (5)$$

簡易振動計により計測した加速度から (4), (5) 式の a_x, a_y, a_z, a_i ($j=1, 2, \dots, m$) を以下で求める。

P $_j$ 点 ($j=1, 2, \dots, m$) の簡易振動計により計測した加速度を U_j ($j=1, 2, \dots, m$) とし、計測結果と (4), (5) 式の誤差の2乗和が最小になる係数 a_x, a_y, a_z, a_i ($j=1, 2, \dots, m$) を決定する。

$$g = \sum_{j=1}^m (U_j - |V_j|)^2$$

$$\frac{\partial g}{\partial a_x} = 0, \frac{\partial g}{\partial a_y} = 0, \frac{\partial g}{\partial a_z} = 0$$

$$\frac{\partial g}{\partial a_i} = 0, \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

ここで U_j は簡易計測結果であることから、すべて正の値であり、(6) 式では、 V_j に絶対値をつけて差を求める。

手順4は、求めた係数

a_x, a_y, a_z, a_i ($j=1, 2, \dots, m$) を (5) 式に代入して σ_j を求める。応力 ($\pm \sigma_j$) が簡易計測結果から算出される応力である。

4. 振動応力算出方法の適用例

比較的簡単な形状の小口径システム配管に適用した例を示す。対象とした配管を図3に示す。

本研究の振動応力算出方法では、実際に配管を簡易振動計で計測した共振振動数と応答加速度を用いるが、ここでは、測定誤差等の影響を排除して、振動応力を算出する方法の計算部分の検討を行う目的で、測定結果の代わりに、数値的に時刻歴応答計算を行って得られた固有振動数および応答加速度を用いる。したがって、実際の配管では不明な真のサポート剛性 (時刻歴応答解析のモデルのサポート剛性) が把握できており、適用性を検討するために都合が

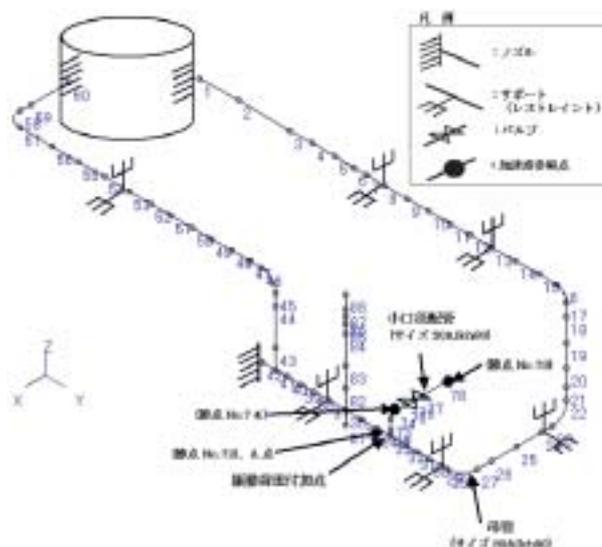


図3 適用例として対象とした配管

良い。手順1では、真のサポート剛性とは異なる適当なサポート剛性を用いて一連の計算を開始した。

表1に測定振動数 (時刻歴応答解析に使用した解析モデルの固有振動数) と真のサポート剛性とは異なる適当なサポート剛性から手順2の収束計算により設定したFEM配管解析モデルの解析振動数を示す。測定振動数と解析振動数はほぼ一致した。サポート剛性の変化が固有振動数の変化に寄与する程度には、サポートにより差があることから、影響の大きいものを優先して調整を行った。収束性はあまり良くなく、実用化するためには、収束方法を改良する必要がある。

次に、手順3に従った解析を行う。適用例では、母管を80Aのライン、小口径配管を20Aのラインと考

表1 測定振動数と解析振動数の比較

振動モード 次数	振 動 数 (Hz)	
	測定振動数	解析振動数
1	17.7	18.0
2	20.1	20.1
3	22.1	22.0
4	24.0	23.3
5	26.0	25.9
6	27.3	27.9
7	30.4	30.0

表2 測定応答加速度と解析応答加速度の比較

加速度を参照する代表点	応答加速度 (G)	
	測定加速度	解析加速度
74-x	9.3	10.0
74-y	8.2	6.5
74-z	13.4	10.7
78-x	9.3	10.0
78-y	9.4	18.0
78-z	11.3	16.8

表3 実際の応力と解析で求めた応力の比較度の比較

応力比較点	応力 (N/mm ²)	
	実際の値	解析値
A	101.6	207.7

え、母管の小口径配管との接合部に振動力を与えた。図3は、図2の例とは少し異なり、母管側のラインもモデルに含めているが、モデル化した配管全体ではなく、小口径配管の接続部の応力を算定することを目的として、本手法を適用した。表2に測定応答加速度（時刻歴応答解析で求めた加速度）と手順3で求めたFEM配管解析モデルの解析応答加速度を示す。結果は、ほぼ一致したが、実用化するためには、安定して一致する解を得るように、加速度を参照する代表点の数および代表点の位置を選定するガイドを作成する必要がある。

次に、手順4に従った解析を行う。手順3で求めた振動モード等の加速度を合成する係数を、手順4で応力に適用し、配管に生じている応力を算出した。本算出方法の計算部分を検討するために、測定値の代わりに、計測誤差等の入らない時刻歴応答解析で求めた応力を用いた。結果を表3に示す。

本算出方法では、小口径配管に生じる大きな応力を算出することを目的としており、適用例の場合の大きな応力は小口径配管と母管との接続部のA点（節点72）に生じる。A点の応力の解析値は実際の値の約2倍と大きめの値になった。本手法を実用化するためには、加速度を参照する代表点の数および代表点の位置を選定するガイドを作成し、加速度を一致させることが必要である。

5. まとめ

小口径システム配管について、携帯型の簡易振動計を用いた計測結果から振動応力を算定し、構造の健全性を評価するための方法を開発した。

比較的簡単な形状の小口径システム配管に適用した結果、手順に従って設定したFEM配管解析モデルの固有振動数は、解析対象とする配管の固有振動数に比較的近い値を得ることができた。加速度を参照する代表点の加速度は、ほぼ一致した。小口径配管の母管との接続部に対応する応力は実際の値の約2倍となった。実用化するためには、安定して一致する解が得られるように、加速度を参照する代表点の数および代表点の位置を選定するガイドが必要である。

今後は、小口径システム配管の振動応力を算出する方法を実用化するために、対象配管の特性に対応して、考慮する振動モードの次数、加速度応答の参照する代表点の数および代表点の位置を適切に設定する方法の検討を行う。

謝辞

小口径システム配管の振動応力算出方法の開発についてご協力いただいたカワサキプラントシステムズ(株)の佐々木亨氏に感謝します。

文献

- (1) 原子力安全委員会(編), 原子力安全白書(平成12年度版~平成16年度版).
- (2) 平松美樹, 佐々木亨, "小口径配管の振動応力評価方法に関する研究," INSS Journal, Vol.8, p.92 (2001).
- (3) 田中守, 猫本善統, 松木一博, "配管振動診断システムの開発," 三菱重工技報, Vol.33, No.4, pp.278-281 (1996).
- (4) 奥津尚宏, "冷凍空調機用銅配管の振動と応力に関する研究," 日本機械学会論文集(C編), 63巻, 611号, pp.2201-2205, (1997).
- (5) Moussou, P., "An Excitation Spectrum Criterion for the Vibration-Induced Fatigue of Small Bore Pipes," IMECE2002-32847, Proceedings of ASME-IMECE (2002).
- (6) Wachel, J.C., "Displacement Method for

Determining Acceptable Piping Vibration Amplitudes," ASME-PVP, 313-2, pp.197-208 (1995).