

小口径配管の振動応力評価方法に関する研究

Evaluation methods of Vibration Stress of Small Bore Piping

平松 美樹 (Miki Hiramatsu)* 佐々木 亨 (Toru Sasaki)*

要約 原子力発電所の小口径配管で発生するトラブルの主要な原因の一つに振動応力による疲労破壊がある。そこで発電所では、小口径配管の振動加速度を測定し、振動応力を算出して評価するという方法で管理している。本研究では、実際の小口径配管を模擬した2組のモックアップ試験体を用いて、正弦波とプラント実測波による加振試験を行い、その測定データから振動応力を適切に評価できる方法について検討した。測定した加速度から評価応力を算出し、ひずみから求めた応力を計測応力として比較すると、重心位置と母管(系統配管)加速度の影響を考慮した評価式を用いれば、精度良く評価できることを確認した。

キーワード 小口径配管, 振動応力, 疲労破壊, モックアップ試験体, 加振試験

Abstract Fatigue fracture by vibration stress is one of the main causes of troubles which occur at small bore piping in nuclear power plants. Therefore at the plants they manage small bore piping using a method in which their vibration accelerations are measured and the vibration stresses are calculated. In this work, vibration tests for two sets of mock-ups simulating actual piping in the plants by sinusoidal oscillation and by that obtained at an actual plant were carried out, and then an evaluation method was developed to obtain proper value of vibration stress from the measured data by the vibration tests. In comparison of the vibration stress obtained from the measured acceleration with that directly measured using strain gauges, it is confirmed that accurate vibration stress can be evaluated by a formula in which the real center of gravity of small bore piping and the acceleration of main(system) piping are considered.

Keywords small bore piping, vibration stress, fatigue fracture, mock-ups, vibration tests

1. はじめに

加圧水型原子力発電所(PWR プラント)では、母管(系統配管)・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(以下、枝管とする)が数多くあり、その内、枝管の口径が小さいものは、小口径配管と呼ばれ、1プラン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枝管に発生する振動応力による疲労破壊がある。

PWR プラントにおいては、枝管の振動加速度から付け根部の振動応力を算出して、疲労評価を実施する方法で管理している。この場合、枝管に発生する振動応力は、簡易モデル化により算出している。

より精度良く評価するためには、簡易モデルから実際の小口径配管に近づけたモデル化を行い、振動応力を算出することが必要である。

そこで本研究では、小口径配管のモックアップ試験体による加振試験を実施して振動応力の発生状況を調べた。さらに振動応力の簡易モデルを実際の小口径配管に近づけるため以下の2点を考慮した。

枝管先端部の形状によって、重心位置が簡易モデルと異なる。

簡易モデルにおいては、枝管が取り付けられている母管も振動している。

これらの点を考慮したモデル化を行って、測定データから振動応力をより適切に評価できる方法について検討した。

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

2. 加振試験概要

2.1 モックアップ試験体

加振試験に用いた試験体は現場状況の調査（母管・枝管の形状など）とFEM解析から適切な形状と試験条件を設定した。モックアップ試験体を図1、図2に示す。

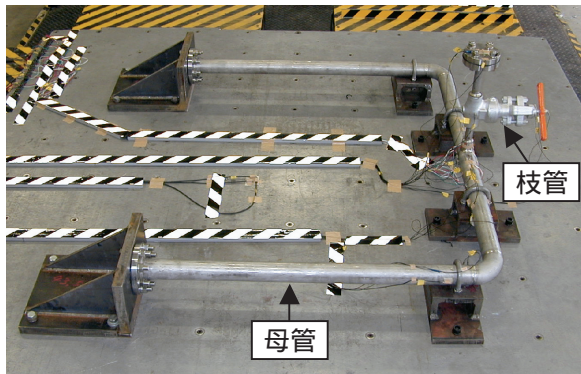


図1 振動台上に設置したモックアップ試験体1（母管径：2B）

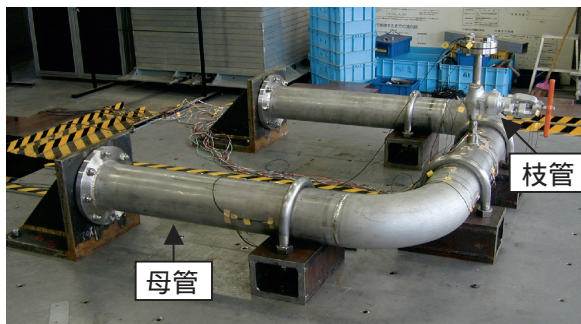


図2 振動台上に設置したモックアップ試験体2（母管径：6B）

枝管は実際に最も多い外径27.2（3/4B）とし、高圧用の玉型弁を取り付け、端部はフランジ形状とした。母管は調査結果から、3/4Bの枝管を持つ母管径として最も多い外径60.5（2B）のもの、母管の振動状況を変化させるために、外径165.2（6B）のものを製作した。いずれの試験体も全体の大きさ及び枝管の形状を同じものとした。なお、配管材質は、原子力プラントの1次系配管を想定してSUS304とした。

試験体の母管端部を固定治具により、母管部を4つのサポートにより振動台に固定した。試験体の寸法を図3に示す。

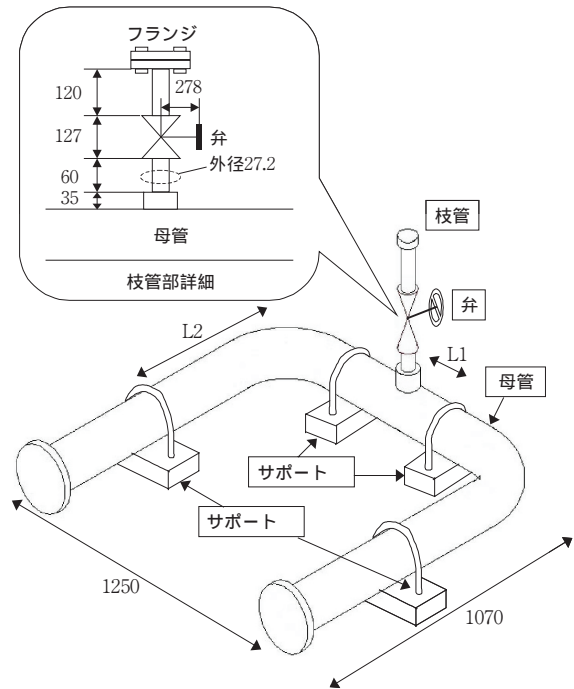


図3 モックアップ試験体

母管径・サポート位置・サポートの締め付け状態を変化させることで母管の振動状況を変化させた。試験体パターンは振動状況を効果的に変化させるためにFEMによる固有振動数解析を行って、合計14パターンを設定した。表1に試験体パターンを示す。

表1 試験体パターン

枝管径 ()	母管径 ()	L1 ()	L2 ()	試験体 ID
27.2 (3/4B)	60.5 (2B)	250	125	2B11F
				2B11R
			375	2B12F
		2B12R		
		1054	2B13F	
			2B13R	
	500	375	2B22F	
			2B22R	
		1054	2B23F	
			2B23R	
	165.2 (6B)	250	375	6B12F
				6B12R
		1048	6B13F	
			6B13R	

注1：L1は枝管軸よりサポートまでの距離
L2はエルボよりサポートまでの距離

注2：添字Fはサポートを締めたパターン
添字Rはサポートを緩めたパターン

2.2 試験装置

関西電力(株)総合技術研究所の3次元振動実験システムを用いて加振試験を実施した。振動台は動電型加振器を3方向に3台使用した3次元振動台である。振動台の仕様を表2に示す。

表2 振動台の仕様

項目	仕様
加振方式	動電型
最大積載重量	2000kgf
寸法	2.5m × 2.5m
最大加振力	5000kgG(3方向とも)
最大加速度	1.0G(2000kg 負荷時)
加振周波数範囲	0.5Hz ~ 100Hz

また加速度計測には圧電型加速度ピックアップを用い、ひずみ計測には電気抵抗式ひずみゲージを用いた。計測器の仕様を表3に示す。

表3 計測器の仕様

計測器	仕様
加速度ピックアップ	型番:AEC-CT-5Q(株電子応用製) 検出方式:圧電型 周波数範囲:~1000Hz 最大加速度:2000m/s ² (ピーク値) 最大横感度比:5%以下
ひずみゲージ	型番:FRA-2-11-5L(株東京測器製) 抵抗素子:Cu-Ni 箔 温度補償範囲:10~80

加速度ピックアップの設置位置を図4に示す。枝管を取り付けている母管の軸方向をX方向、軸直角方向をY方向、鉛直方向をZ方向と設定し、振動台・弁箱・弁ハンドル・フランジ部分にはそれぞれ3方向に加速度ピックアップを取り付けた。サポート、サポートには、母管両側にZ方向の加速度ピックアップを取り付け、母管の回転を測定した。母管にも同様に、母管両側にZ方向の加速度ピックアップを取り付け、母管の上下方向の振動と回転を調べた。さらに母管にはZ方向の加速度ピックアップを枝管に対して対称位置に取り付け、母管のY軸まわりの回転が計測できるようにし、合計27チャンネルを測定した。

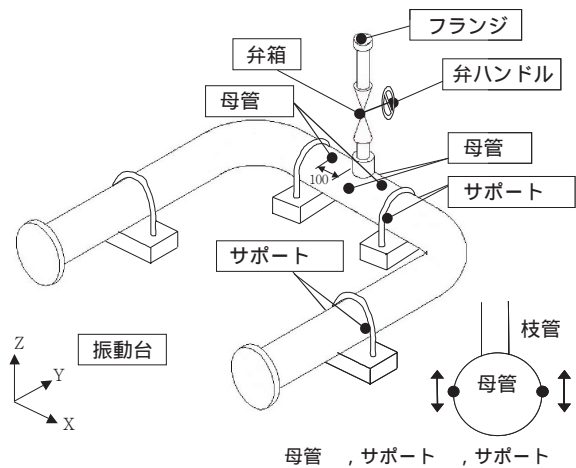


図4 加速度ピックアップ設置位置

ひずみについては図5に示すように枝管の周方向に4箇所、母管の周方向に4箇所それぞれに3軸のひずみゲージを貼り付け、合計24チャンネルを測定した。

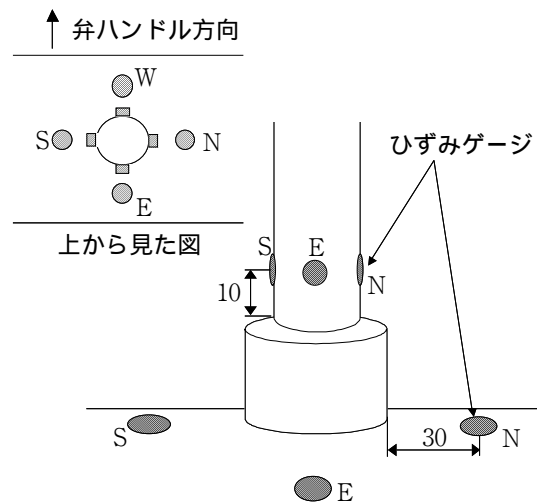


図5 ひずみゲージ設置位置

3. 正弦波加振試験

3.1 正弦波加振試験結果

正弦波加振試験は振動台を正弦波で加振して、試験体の応答を測定した。加振周波数を設定するために、まず各試験体パターンについて打撃試験とスイープ加振試験を行って、X方向とY方向の一次の固有振動数をそれぞれ求めた。その固有振動数と応

答が固有振動数での加振時の約半分になる周波数(固有振動数より低い周波数と高い周波数)の3つの周波数を加振周波数として、X方向とY方向それぞれ個別に(計6種類)加振した。

正弦波加振試験の結果例として試験体 ID が 2B23F の試験体について、1 次の固有振動数である 44.4Hz で X 方向に加振した場合の、弁箱加速度(X 方向)の測定波形を図 6 に、枝管付け根部(N 位置)の軸方向ひずみ測定波形を図 7 に示す。

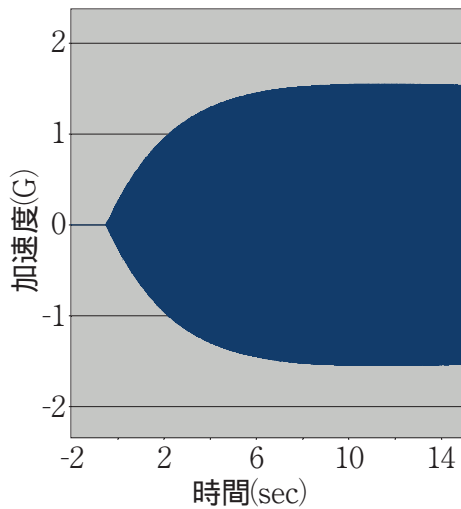


図 6 弁箱加速度(X 方向)

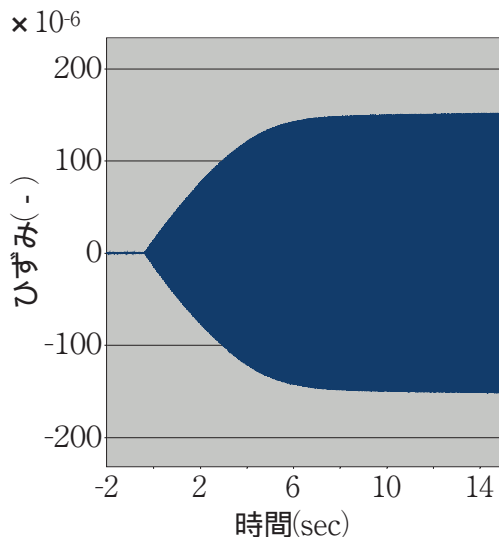


図 7 枝管付け根部(N 位置)の軸方向ひずみ

3.2 応力評価式の検討

測定データから振動応力を算出して、算出モデルの妥当性について検討した。

一般的に、振動応力を算出するためには、小口径配管を図 8 のように簡易モデル化している。

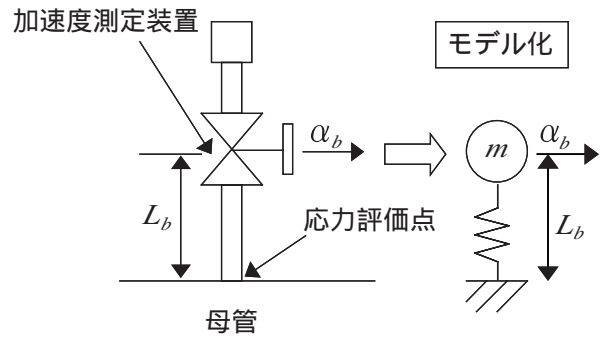


図 8 小口径配管の簡易モデル化

これは加速度測定位置に枝管の全重量分の質点を置いたモデル化で、加速度測定値から枝管付け根部に発生する振動応力を曲げ応力として以下の式で算出できる。

$$\sigma_0 = \frac{9.8m \cdot \alpha_b \cdot L_b}{Z} \quad (1)$$

σ_0 : 簡易評価式で算出した評価応力(N/ 2)

m : 枝管の重量(kg)

α_b : 弁箱での加速度測定値(G)

L_b : 加速度測定位置までの長さ()

Z : 枝管の断面係数(3)

このモデルを実際の小口径配管に近づけ、振動応力をより精度良く算出するために以下の2点を考慮した。

枝管先端部の形状によっては、重心位置が簡易モデルの質点と異なる。

簡易モデルにおいては枝管が取り付けられている母管も振動している。

これらの点を考慮したモデル化の概略図を図 9 に示す。

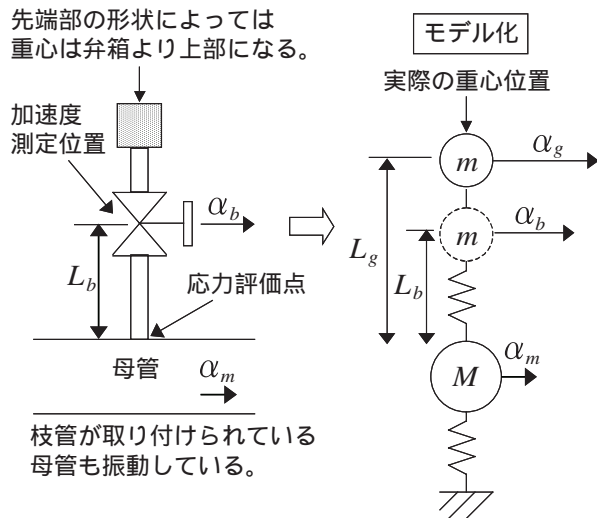


図9 実際の小口径配管に近づけたモデル化

重心位置での加速度 α_g は、枝管付け根部からの長さ L_g と母管・弁箱部の加速度から以下の式、

$$\alpha_g = \frac{L_g}{L_b} (\alpha_b - \alpha_m) + \alpha_m \quad (2)$$

α_g : 重心位置での加速度(G)

α_m : 母管加速度(G)

L_g : 重心位置までの長さ()

枝管付け根部に発生する応力 σ_1 は、

$$\sigma_1 = \frac{9.8m \cdot \alpha_g \cdot L_g}{Z} \quad (3)$$

σ_1 : 改良評価式で算出した評価応力(N/ cm^2)

で求められるので、(2)式より、

$$\sigma_1 = \frac{9.8m \cdot \left\{ \frac{L_g}{L_b} (\alpha_b - \alpha_m) + \alpha_m \right\} \cdot L_g}{Z} \quad (4)$$

となる。

(1)式を簡易評価式、(4)式を改良評価式として評価応力を算出し、ひずみから求めた計測応力と比較した。比較した結果を図10に示す。なお、重心位置は設計図面から算出した値を使用し、配管の材料定数は以下の値を使用した。

$$E = 1.95 \times 10^5 \text{ N/}^2$$

$$\nu = 0.3$$

$$= 7.93 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

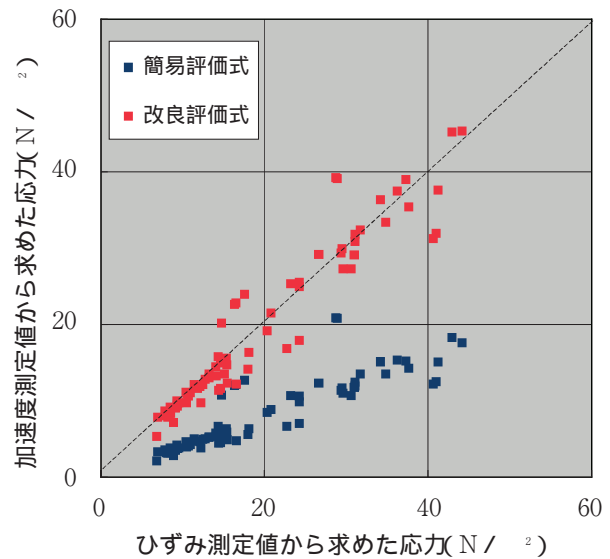


図10 正弦波加振における評価応力と計測応力

算出した応力値を比較すると、簡易評価式を用いた場合は、いずれの試験体でも計測応力より評価応力が低くなった。重心位置の差と母管加速度の影響を考慮した改良評価式を用いた場合は、評価応力と計測応力はほぼよい一致を示し、精度良く評価できることを確認した。

4. 実測波加振試験

4.1 実測波加振試験結果

実測波加振試験では、PWRプラントの小口径配管で測定した母管の加速度波形を実測波として使用した。各試験体パターンについてそれぞれX方向とY方向から個別に加振し、試験体の応答を測定した。実測波加振試験の結果例として試験体ID 2B23Fの試験体について、X方向に実測波で加振した場合の、振動台加速度(X方向)の測定波形(入力した実測波形)を図11に、弁箱加速度(X方向)の測定波形を図12に、枝管付け根部(N位置)の軸方向ひずみ測定波形を図13に示す。

さらに各波形の周波数分析を行った。図11~13の波形を周波数分析した結果を図14~16に示す。図14の周波数分析結果より、実測波として振動台に入力した波形は圧力脈動成分である239Hzが卓越しているが、その他の周波数成分も含まれている。図15の枝管加速度の周波数分析結果では、この試験体の1次の固有振動数である44.3Hzの成分が卓

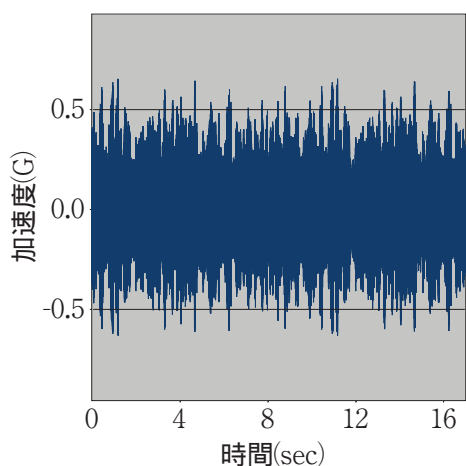


図 11 振動台加速度(X 方向)

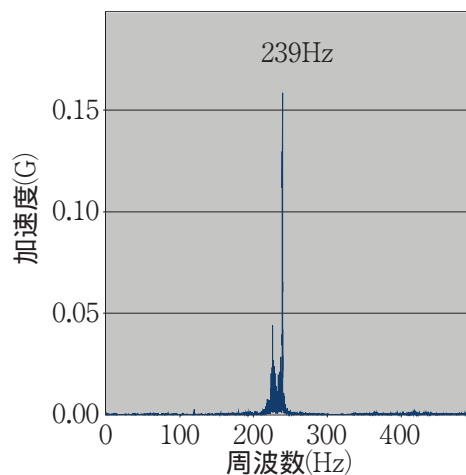


図 14 振動台加速度(X 方向)の周波数分析結果

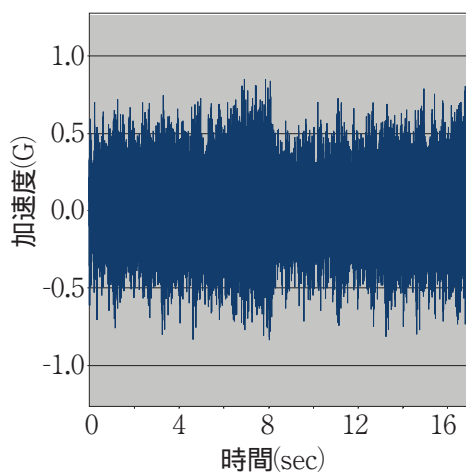


図 12 弁箱加速度(X 方向)

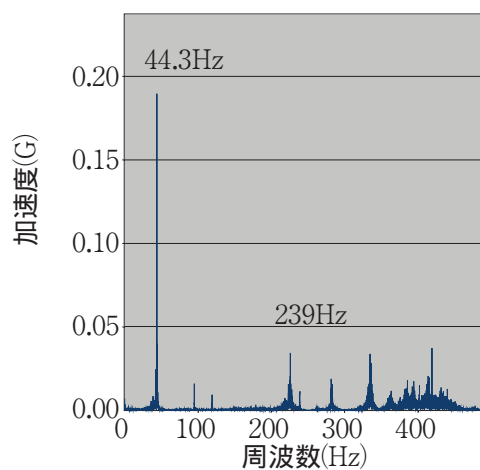


図 15 弁箱加速度(X 方向)の周波数分析結果

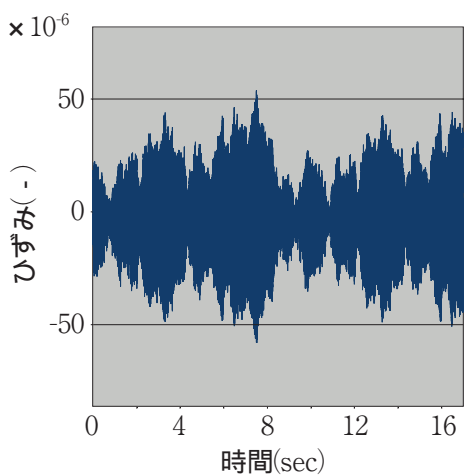


図 13 枝管付け根部(N 位置)の軸方向ひずみ

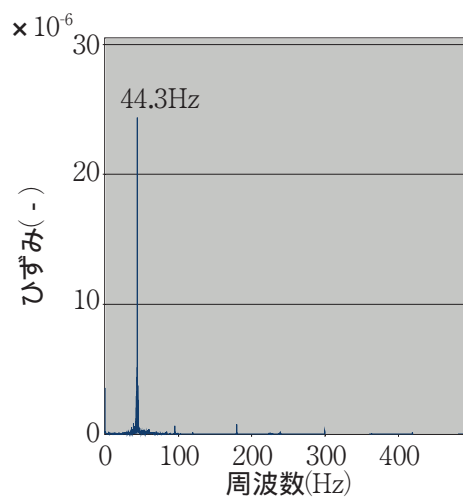


図 16 枝管付け根部(N 位置)の軸方向ひずみの周波数分析結果

越しているが、高周波成分も含まれている。つまり、実測波で加振すると試験体は様々な振動モードを複合した形で振動していることが確認できる。それに対して、図 16 の枝管付け根部ひずみの周波数分析結果では、44.3Hz の成分のみ卓越している。よって曲げ応力に寄与するのは、1 次の固有振動数付近の成分のみであることがわかった。

4.2 応力評価式の検討

正弦波加振試験結果と同様に、実測波加振試験で得られた測定データから評価応力と計測応力を比較した。まず、加速度測定値から応力に寄与する成分(固有振動数付近の成分)を抽出するためにフィルタ処理を行った。例として、2B23F 試験体の弁箱加速度(X 方向)をフィルタ処理した波形を図 17 に、処理後の波形を周波数分析した結果を図 18 に示す。フィルタ処理にはいずれも 60Hz のローパスフィルタを用いた。

フィルタ処理によって、固有振動数付近の成分(44.3Hz)を抽出すると、図 13 のひずみ波形と図 17 の加速度波形の傾向は一致し、図 16 の周波数分析結果と図 18 の周波数分析結果から、この成分がひずみに対応していることがわかる。

同様に各加速度波形をフィルタ処理して、その値から(1)式を簡易評価式、(4)式を改良評価式として、評価応力を算出し、ひずみから求めた計測応力と比較した。算出した応力の最大値を比較した結果を図 19 に示す。なお、重心位置は設計図面から算出した値を使用し、配管の材料定数は以下の値を使用した。

$$E = 1.95 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$\nu = 0.3$$

$$= 7.93 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

図 19 に示すように、簡易評価式を用いた場合は、いずれの試験体でも計測応力より評価応力が低くなった。重心位置の差と母管加速度を考慮した改良評価式を用いた場合は、評価応力と計測応力はほぼよい一致を示し、正弦波加振試験結果と同様な傾向を示した。よって実測波加振においても、改良評価式を用いれば、精度良く評価できることを確認した。

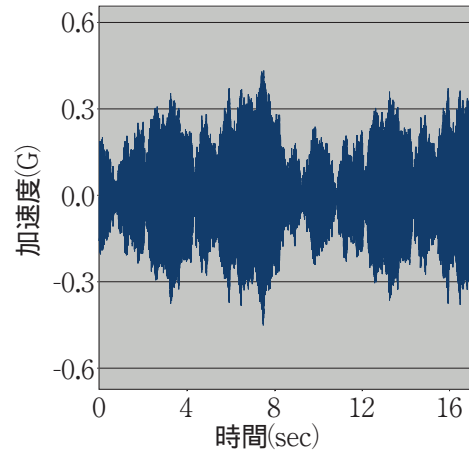


図 17 フィルタ処理後の弁箱加速度(X 方向)

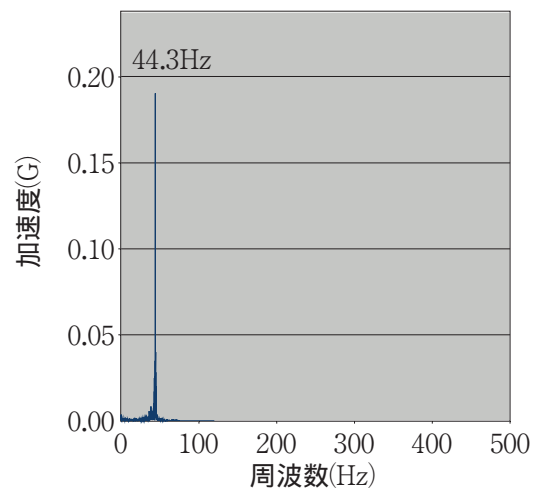


図 18 フィルタ処理後の弁箱加速度(X 方向)の周波数分析結果

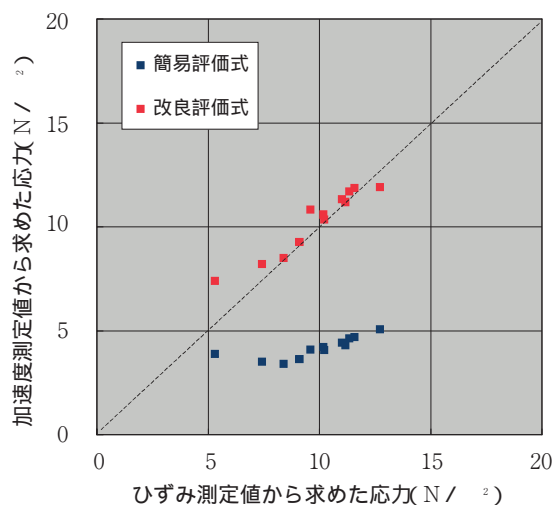


図 19 実測波加振における評価応力と計測応力 (フィルタ処理後)

5. まとめ

本研究では、小口径配管に発生する振動応力の評価方法に着目し、実際の小口径配管を模擬したモックアップ試験体による加振試験を実施して振動応力の発生状況を調べた。一般的に振動応力の算出には簡易的なモデルが用いられているが、より精度良く評価を行うために、枝管の重心位置の違いと母管も振動しているという2点を考慮して小口径配管をモデル化し、改良評価式を検討した。この評価式を正弦波加振試験から得られた測定データに適用すると、評価応力と計測応力はほぼ良い一致を示した。また実測波加振試験の場合についても、曲げ応力に寄与した一次の固有振動数付近の成分をフィルタ処理で抽出した測定データに適用すると、評価応力と計測応力は良い一致を示した。よって枝管の重心位置と母管の振動を考慮すれば、振動応力を精度良く評価できるということを確認した。

謝辞

本研究を行うに当たり、大阪府立大学 藤田勝久教授、関西電力(株)総合技術研究所構築研究室及び関西電力(株)大飯発電所原子炉保修課の方々には多大なるご助言・ご協力を賜りました。ここに心から感謝の意を表します。