

高経年配管系の振動応答特性  
VIBRATION RESPONSE CHARACTERISTICS  
FOR THINNED WALL PIPING SYSTEM

高田一<sup>1)</sup>、中澤瞬<sup>2)</sup>、中村いずみ<sup>3)</sup>、大谷章仁<sup>4)</sup>、  
佐藤祐二<sup>5)</sup>、高橋宏治<sup>6)</sup>、澁谷忠弘<sup>6)</sup>

Hajime TAKADA<sup>1</sup>, Shun NAKAZAWA<sup>2</sup>, Izumi NAKAMURA<sup>3</sup>, Akihito OTANI<sup>4</sup>  
Yuji SATOH<sup>5</sup>, Koji TAKAHASHI<sup>6</sup>, and Tadahiro SHIBUTANI<sup>6</sup>

1) 横浜国立大学 大学院工学研究院 教授 工博

<sup>1</sup> Professor, Yokohama National University, Dr. Eng.

e-mail : takada@ynu.ac.jp

2) 横浜国立大学 大学院工学府 院生

<sup>2</sup> Graduate student, Yokohama National University

3) 独立行政法人 防災科学技術研究所 主任研究員 工博

<sup>3</sup> Senior Researcher, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Eng.

4) (株) I H I 原子力プラント技術部 主幹 工博

<sup>4</sup> General Manager, Nuclear Plant Engineering Dept., IHI Corporation, Dr. Eng.

5) (株) I H I 基盤技術研究所 構造研究部 主任研究員

<sup>5</sup> Senior Engineer, Structural Strength Dept., Research Laboratory, IHI Corporation

6) 横浜国立大学 准教授 工博

<sup>6</sup> Associate Professor Yokohama National University, Dr. Eng.

**ABSTRACT:** Deterioration occurs in the piping used over a long period of time. Therefore, it is necessary to do the proper management and the passing age making measures. In general, deterioration like thinning occurs in the piping system. A large influence occurs in the entire system when deterioration occurs. The influence that deterioration gave to the piping system was investigated so by using the simulation.

**キーワード:** 減肉、配管系、振動モード、エルボ

## 1. 緒論

長期にわたって使用された施設には高経年化に伴い構成機器・配管の劣化が発生すると考えられることから、長寿命化を実現するためには、適切な管理や経年化対策を講じ、安全性を確保する必要がある。一般に、プラント等における主要構成の一つである配管系では、高経年化に伴い、通常の熱疲労だけでなく応力腐食割れや流れ加速型腐食などによる減肉のような劣化が発生する。重要度の高い配管系に破損が生じた場合、システム全体に波及する影響が多いため、その健全性を維持することは重

要であり、配管系に発生するき裂や減肉のような劣化の許容条件の検討においては、実験と解析に基づく合理的な検証データを蓄積する必要がある。このようなことから、本研究では、劣化の存在が配管系の振動応答に影響を与え、荷重条件や劣化条件により複雑な損傷挙動を示す減肉を対象とし、シミュレーションを通じて減肉が配管系に与える影響を明らかにすることと、そのシミュレーション精度の検証を目的とする。

## 2. 実験

減肉が配管系に与える影響を調査するために、分岐管や面内面外曲げを受けるエルボが一つの試験体内に存在するような形状を持つ健全試験体と減肉試験体の二種類を用いて動的加振試験を実施した。加振試験に使用した配管系試験体を Fig.1 に示す。減肉模擬部は薄肉の配管で代用することで、約 50%の全周減肉を模擬している。配管試験体の配管サイズは、健全部においては 100A Sch80 STPT370（公称外径： $\phi$  114.3mm、公称肉厚：8.6mm）、減肉模擬部においては 100A SGP（公称外径： $\phi$  114.3mm、公称肉厚：4.5mm）である。加振試験に用いた入力波は、継続時間が長く、試験で主対象とする振動モードの振動数成分における繰り返し数が多い波である JMA 寿都観測地震波である。ただし、原波では三次元振動台の変位制限にかかるため、1.5Hz ハイパスフィルタ処理を施している。実験では地震波を 2.5 倍及び 7.5 倍に加振し、振動台に入力して実験を行った。また、本実験は株式会社 IHI 所有の三次元振動台を用いて加振試験を実施した。試験中は配管内に水を充填し、3MPa の内圧を負荷した状態で加振を行った。試験体変形の計測には、面内曲げが優勢となるエルボ 2 とエルボ 3 において損傷の可能性が高いと予測されたことから、変位センサを用いて直接開閉変形の計測を行うこととし、その設置治具は試験体に溶接した。

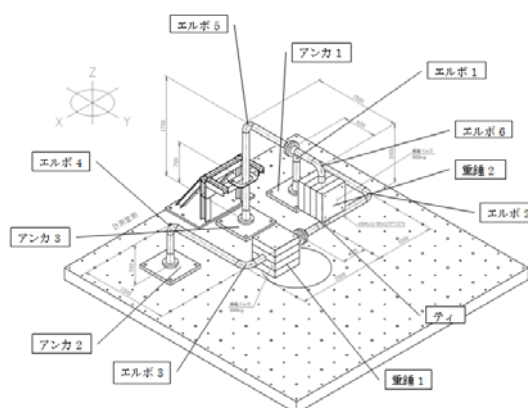


図 1 配管系の実験装置

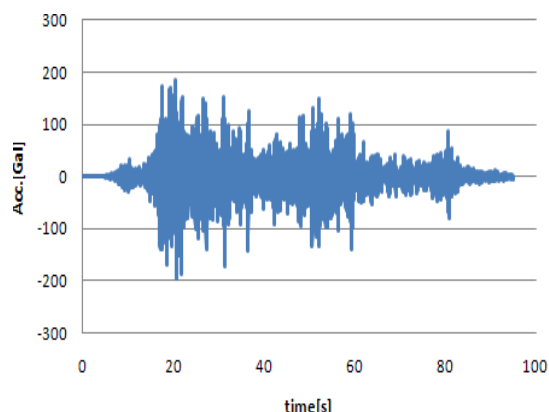


図 2 入力波形(東西)

## 3. 解析

本研究では、エルボ要素を用いて試験体配管系をモデル化し、短時間で様々な配管系のシミュレーションが可能な解析モデルの構築を行った。エルボ要素は一見するとはり要素に見えるが、管の外形や肉厚が設定できることに加え、配管の楕円化や反りによる断面変形を考慮できる要素となっている。よって、局所的に減肉を模擬して形状を変化させている配管系のモデルには最適な要素である。この解析モデルを用いて時刻歴応答解析によりエルボ部やティ部における各節点での応答変位を出力し、三次元開閉量を算出した。この三次元開閉量より配管系の振動応答特性を評価した。解析にあたり、節点要素作成には Microsoft Excel 2007 を、ソルバーには ABAQUS/Standard Ver.6.9.1、ポストプロセッシングには

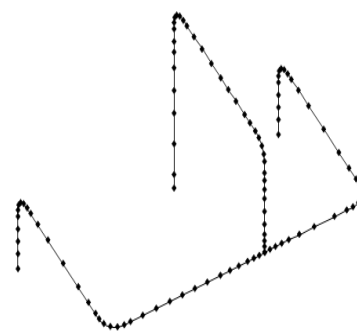


図 3 解析モデル

ABAQUS VIEWER をそれぞれ用いた。材料特性には高圧配管用炭素鋼 STS370 の特性 (ヤング率:202GPa、ポアソン比:0.3、直管部の降伏応力:317MPa、エルボ部の降伏応力:300MPa、ティの降伏応力:286MPa、二次勾配:2000MPa) を用いた。

## 4. 結果

### 4.1 固有振動数と振動モード

健全配管系モデルと減肉配管系モデルの1次から4次までの固有振動数と振動モードを図4～図11に示す。健全配管系、減肉配管系共に、1次モードはX軸方向に、2次モードはZ軸方向に、3次モードはY軸方向に揺れる振動モードとなっている。

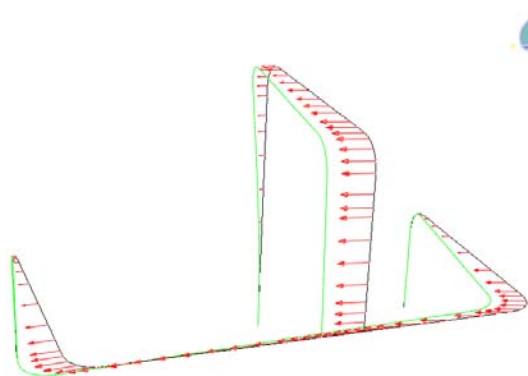


図4 健全配管系の1次モード (4.85Hz)

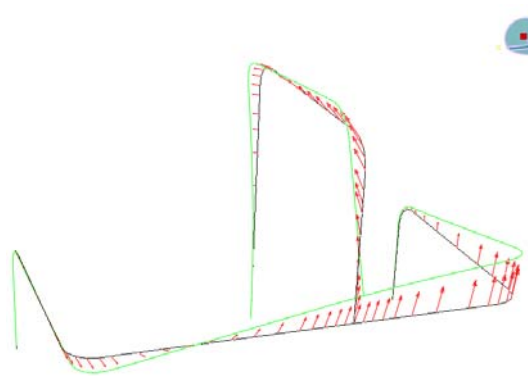


図5 健全配管系の2次モード (7.89Hz)

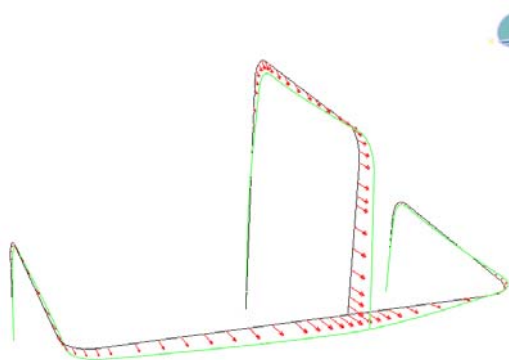


図6 健全配管系の3次モード (12.79Hz)

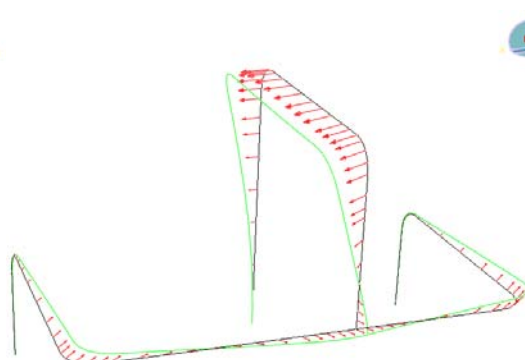


図7 健全配管系の4次モード (21.04Hz)

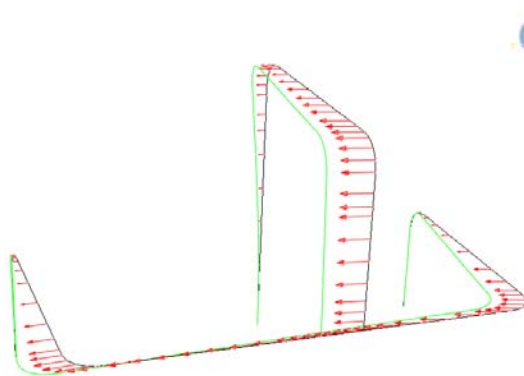


図8 減肉配管系の1次モード (4.02Hz)

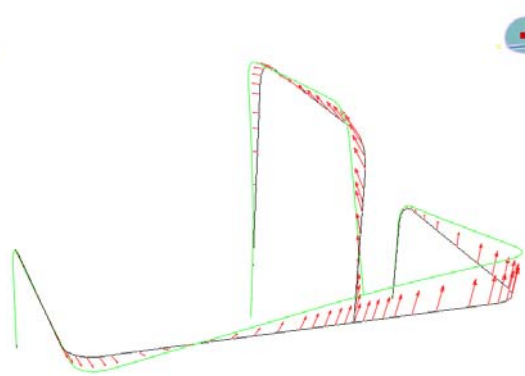


図9 減肉配管系の2次モード (6.70Hz)

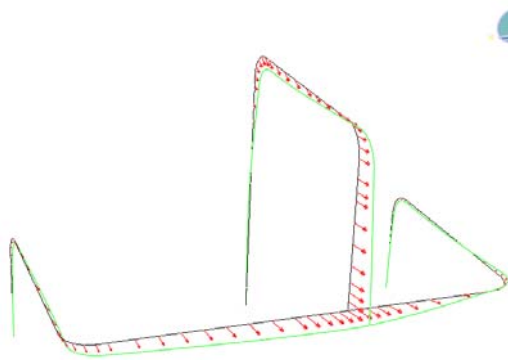


図10 減肉配管系の3次モード (11.71Hz)

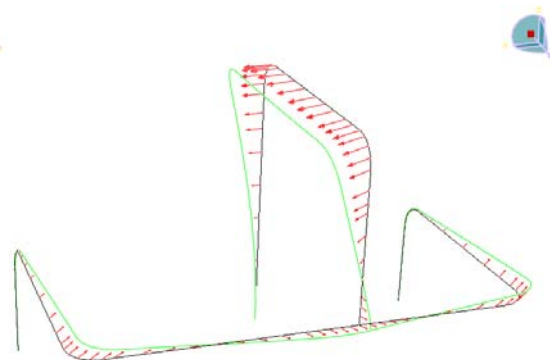


図11 減肉配管系の4次モード (18.85Hz)

また、表1に固有振動数の実験値と解析値を示す。特に振動応答に影響を与えると考えられる1次モードと2次モードの解析結果が実験値に近い値を示している。また、どのモードにおいても、固有振動数が健全配管系よりも減肉配管系の方が低くなっている。

表1 固有振動数

	実験値		解析値	
	健全	減肉	健全	減肉
1次モード	5.30	4.20	4.85	4.02
2次モード	7.88	6.38	7.89	6.70
3次モード	11.58	9.73	12.79	11.37
4次モード	17.66	12.84	21.04	18.85

単位[Hz]

#### 4.2 開閉変形量

次に、実験においてエルボ3に取り付けられた変位センサで計測された時刻歴開閉変形量と、解析で得られた時刻歴開閉変形量を図12に示す。健全配管系においては2.5倍、7.5倍加振時の応答波形、最大応答値ともによく一致しており、高い解析精度を示している。一方、減肉配管系では応答波形は一致しているが、最大応答値が若干小さくなる傾向が表れている。また、加振後の残留変形が再現できておらず、健全配管系の解析精度と比較するとやや劣っている傾向が見られる。

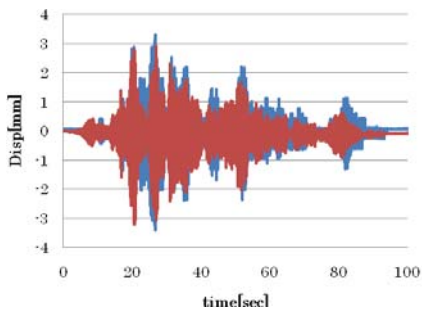


図12 健全配管系 (エルボ3、2.5倍)

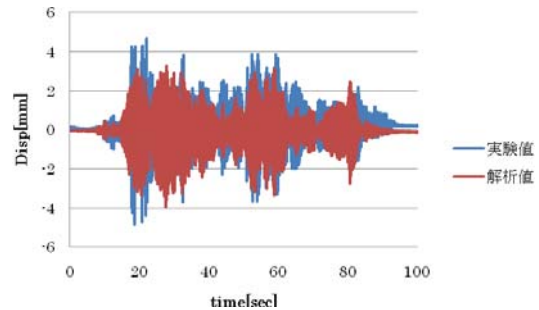


図13 減肉配管系 (エルボ3、2.5倍)

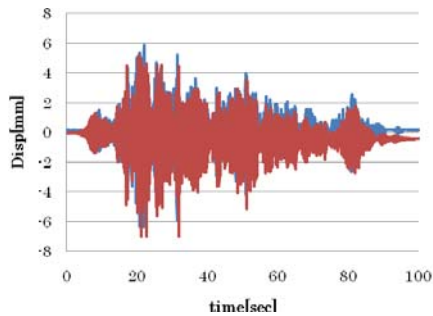


図14 健全配管系 (エルボ3、7.5倍)

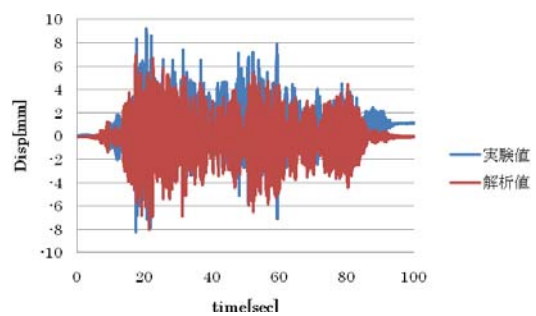


図15 減肉配管系 (エルボ3、7.5倍)

## 5. パラメトリック解析

### 5.1 パラメトリック解析概要

実験ではコストの面などから実施困難な減肉条件をパラメータにとったパラメトリック解析について述べる。ただし、パラメトリック解析を行うに当たり、パラメータを無限に取り扱うことはできないので、ここでは減肉率にパラメータを絞って解析を実施している。減肉率は0% (健全配管)、10%、20%、と10%ずつ90%まで減肉し、各減肉条件が配管系にどのような影響を与えるかを調査した。入力波は、図16に示す狭帯域ランダム波を使用した。この狭帯域ランダム波は2.5Hz～8Hzで加速度応答スペクトルがフラットとなる波で、これは後述の各減肉率における1次～2次モードの固有振動数を全て含むものである。継続時間は65秒で、うち定常部分の継続時間は40秒である。入力条件は、狭帯域ランダム波の加速度の最大値が前章で使用した2.5倍及び7.5倍時の寿都地震波の加速度の最大値と同等となるように2.02倍、及び6.07倍に加振して解析を行った。

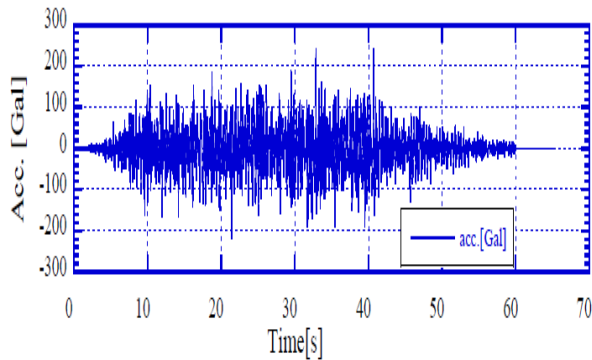


図16 狭帯域ランダム波

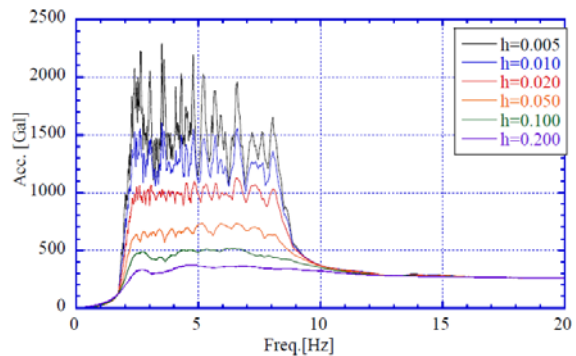


図17 加速度応答スペクトル

### 5.2 固有振動数

各減肉率における配管系全体の固有振動数に与える影響を調べ、表2にまとめた。減肉率を大きくしていくにつれて固有振動数は低下している。また、減肉率が大きくなるほど、固有振動数の下がり幅も大きくなっている。

表 2 固有振動数

	健全	10%減肉	20%減肉	30%減肉	40%減肉	50%減肉	60%減肉	70%減肉	80%減肉	90%減肉
mode1	4.85	4.71	4.56	4.39	4.21	4.02	3.79	3.55	3.25	2.79
mode2	7.89	7.71	7.51	7.27	7.00	6.70	6.35	5.95	5.47	4.77
mode3	12.79	12.56	12.30	12.02	11.71	11.37	10.97	10.50	9.87	8.86
mode4	21.04	20.76	20.42	20.01	19.50	18.85	17.98	16.81	15.14	12.50

単位[Hz]

### 5.3 最大開閉量

図 18 から図 27 に、1 次モードの影響を大きく受けるエルボ 3 の時刻歴開閉変形量を示す。さらに、表 3 と表 4 に開閉量をまとめた。狭帯域ランダム波 2.02 倍時の開方向において、開方向では減肉率 60% で最大値を示した後、減肉率を大きくするごとに最大開閉量が小さくなっている。ここで図 20 を見ると、減肉率 70% では残留変形が発生している。一方閉方向では、減肉率を大きくするごとに最大開閉量が大きくなっていくが、減肉率 90% において急激に三次元最大開閉量が大きくなった。これは図 22 に示すように、減肉率 90% において閉方向に大きく残留変形が発生しており、この残留変形によって閉方向の最大開閉量が大きくなったことが分かる。狭帯域ランダム波 6.07 倍時の開方向において、減肉率 80% において最大値を示した後、減肉率を大きくするごとに最大開閉量が小さくなっている。一方閉方向では、減肉率が大きくなるごとに開閉量が大きくなっていくが、減肉率 90% において急激に最大開閉量が大きくなった。図 27 を見ると、残留変形量が閉方向に急増していることが分かる。また、図 26 と図 27 を比較すると、残留変形が発生する方向が変わっていることが分かる。

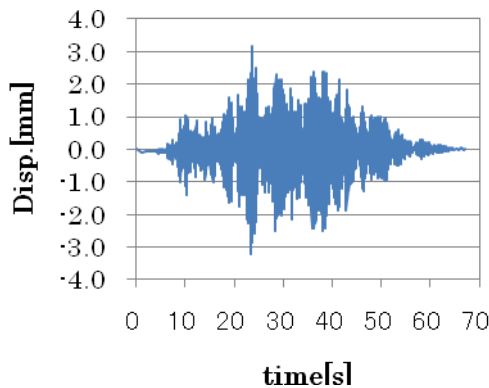


図 18 エルボ 3 の開閉量 (2.02 倍・減肉率 50%)

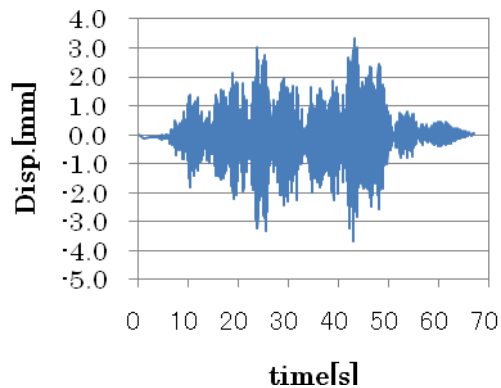


図 19 エルボ 3 の開閉量 (2.02 倍・減肉率 60%)

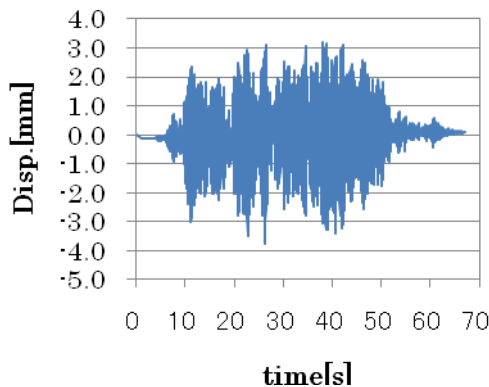


図 20 エルボ 3 の開閉量 (2.02 倍・減肉率 70%)

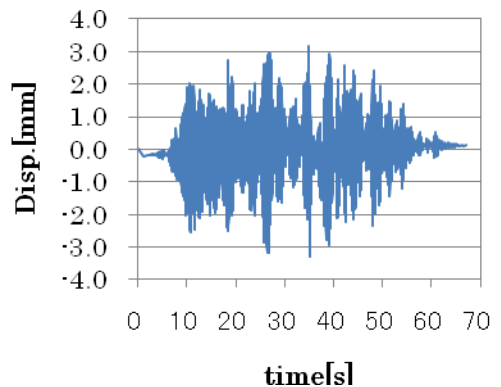


図 21 エルボ 3 の開閉量 (2.02 倍・減肉率 80%)

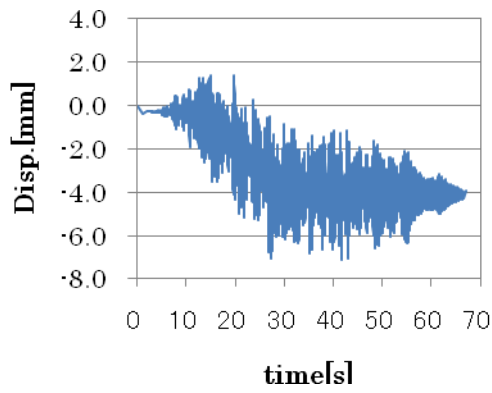


図 22 エルボ 3 の開閉量 (2.02 倍・減肉率 90%)

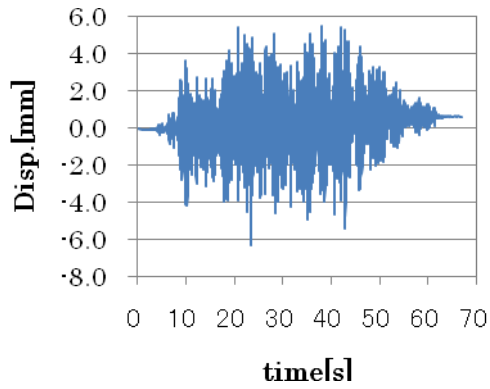


図 23 エルボ 3 の開閉量 (6.07 倍・減肉率 50%)

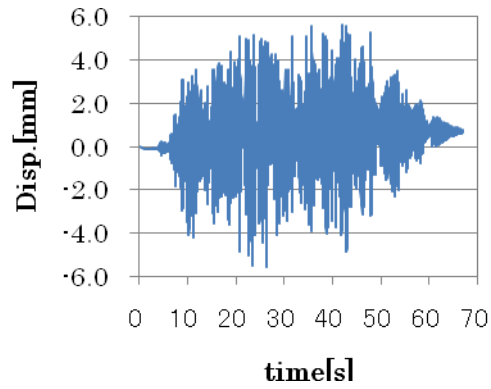


図 24 エルボ 3 の開閉量 (6.07 倍・減肉率 60%)

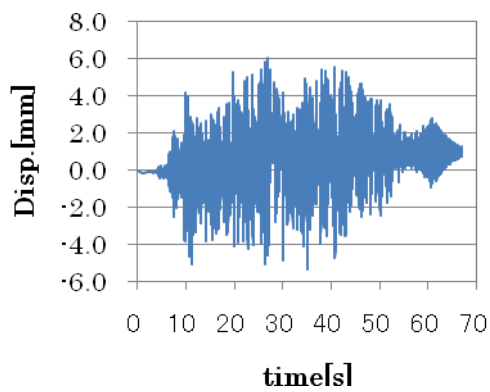


図 25 エルボ 3 の開閉量(6.07 倍・減肉率 70%)

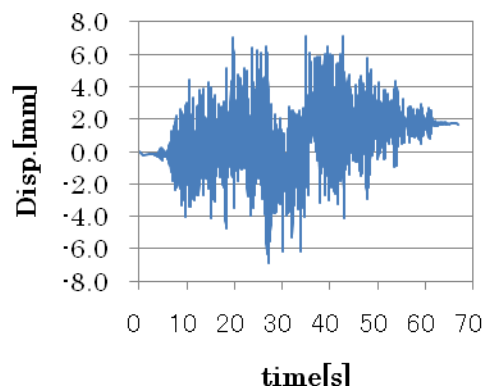


図 26 エルボ 3 の開閉量(6.07 倍・減肉率 80%)

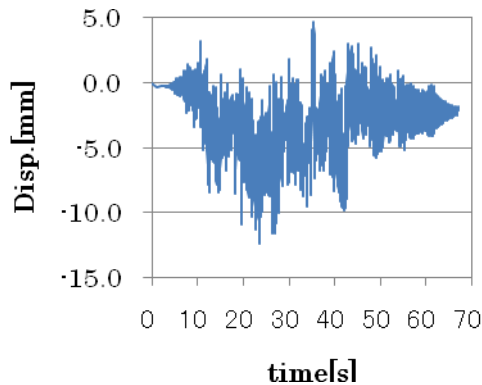


図 27 エルボ 3 の開閉量(6.07 倍・減肉率 80%)

表 3 エルボ 3 の最大開閉量（開方向）

	健全	10%減肉	20%減肉	30%減肉	40%減肉	50%減肉	60%減肉	70%減肉	80%減肉	90%減肉
2.02倍加振	2.195	2.061	2.285	2.827	2.886	3.166	3.319	3.207	3.157	1.407
6.07倍加振	4.790	4.721	5.260	5.325	5.964	5.511	5.619	6.075	7.161	4.704

単位[Hz]

表 4 エルボ 3 の最大開閉量（閉方向）

	健全	10%減肉	20%減肉	30%減肉	40%減肉	50%減肉	60%減肉	70%減肉	80%減肉	90%減肉
2.02倍加振	-2.159	-2.162	-2.635	-2.950	-3.095	-3.197	-3.689	-3.756	-3.274	-7.144
6.07倍加振	-5.151	-5.190	-4.827	-5.741	-5.234	-6.305	-5.588	-5.382	-6.871	-12.442

単位[Hz]

## 6. 結論

本研究では、エルボ要素を用いて試験体配管系をモデル化して解析を行った。解析モデルによる解析結果を実験結果の応答波形と比較した結果、健全配管系モデルでは波形形状及び最大値共によく一致する解析結果となった。一方減肉配管系モデルは最大応答値が少し小さくなる傾向がでたが、波形形状及び最大値共に概ね一致する解析結果となった。しかし、7.5倍加振時の加振終了後の残留変形は再現できなかった。本解析モデルでは実際の応答を概ね予測できるものであり、かつ一つの解析に要する時間も2時間程度と短く、様々な条件の解析が簡易にできることから、減肉率を種々変化させた解析モデルを用いたパラメータスタディも実施した。しかし、減肉を有する配管系の動的挙動を完全に把握するには至っていない。したがって、今後は多種多様な減肉配管系に対する実験や解析を数多く実施し、これらの結果を通じて減肉配管の耐震安全性の評価を行い、減肉配管に対する欠陥評価手法を提案していく必要がある。そのためには、減肉を有する配管系の破損形態を把握できるような解析モデルの構築が必要である。本解析ではエルボ要素を用いた簡易モデルによる動解析のみを行った為、配管系の破損形態を把握することはできなかったが、この動解析によって得られた時刻歴三次元開閉量を有限要素法による静解析のメッシュモデルに入力することで、破損形態の予測や疲労寿命予測が可能となる。ただし、疲労寿命評価手法は種々存在しているため、どの評価手法が最良であるかの検討を行う必要がある。

## 謝 辞

本研究は、文部科学省原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブにより実施された「高経年配管系に対する耐震裕度の定量評価に関する研究」の平成21年度の成果に基づく。関係者各位に対し、ここに感謝の意を表します。