

配管の損傷が振動応答に与える影響

皆川 佳祐

埼玉工業大学工学部機械工学科

mina@sit.ac.jp

Influence of Damage of Pipe on Its Vibration Response

Keisuke MINAGAWA

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Saitama Institute of Technology

Abstract

This paper describes influence of damage of a pipe on its vibration response. Inner wall of a pipe in industrial plants or factories is shaved by flowing fluid over the years, and the thickness of the pipe decreases. As a result, it causes bursts of the pipe, so monitoring the damage before bursting is very important for piping systems. Conventional inspection systems using supersonic waves or radioactive rays require large-scale test apparatuses and are expensive. Therefore author focused on influence of damage of pipe on vibration response and have proposed an monitoring system. In the proposed system, acceleration sensors are attached everywhere in piping systems. Then vibration induced by the flow of the fluid is measured and processed, and the damage of pipes is evaluated by changes of the vibration characteristics. This paper reports influence of damage on natural frequency and so on as a fundamental study to develop proposed system.

Key Words: Health Monitoring, Pipe, Vibration, Natural Frequency

1. はじめに

2004年の美浜原発配管破断事故、2012年の笹子トンネル天井崩落事故のように、設備の老朽化が適切に監視されなかったことを起因とする事故が相次いでいる。高度経済成長時代に建設された工場、プラントなどが老朽化していくことから、今後も、工場、プラント内の設備の損傷を適切に監視することが重要である。一方で、少子高齢化による労働者人口の減少も懸念されており、これらの設備の健全性診断を正確

かつ合理的に実施する手法が求められている。

これらの問題のうち、筆者は工場やプラント内の配管の肉厚が経年使用により減少する、いわゆる減肉に注目し、配管の損傷を振動により評価する手法の構築に取り組んできた¹⁾。従来の配管損傷検査法としては、超音波深傷法や放射線透過法などがあるが、これらの手法は検査可能な領域が試料表面から3 mm程度に限定されてしまうことや大掛かりな計測装置が必要であるなどの問題点がある。さらに、工場の稼働

を止める必要もあり，時間的，コスト的な問題もある．そこで，筆者は配管の随所に加速度センサーを取り付け，ハンマーによる打撃や流体が流れる際の振動を計測し，その経年変化により配管の損傷を評価するシステムを提案している．本報では，システム構築のための基礎的検討として，損傷が配管の固有振動数に与える影響などを報告する．

2. 提案するシステム

本論文で提案する配管健全性モニタリングシステムの概略図を Fig. 1 に示す．

本システムでは近年低廉化の進んでいる加速度センサーを配管随所に設置し，振動を常時モニタリングする．配管が損傷し，形状が変われば振動特性，つまり固有振動数や減衰比が変化することから，本システムでは計測した加速度波形を元に周波数分析し，周波数応答の変化から損傷を推定する．振動の発生源として，作業員が循環してハンマーで打撃する方法，内部流体の流れによる振動を利用する方法が考えられる．

また，加速度データを分析，蓄積してビッグデータを構築することで，損傷の検出精度が向上すると期待される．

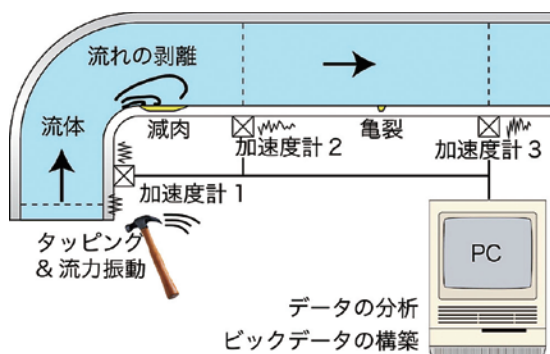


Fig. 1 提案するシステム

3. 直管による実験

3.1 実験目的

本実験では，ハンマーによる打撃振動や流体が流れる際の振動により，配管がどのように振動するかを計測する．また，計測した波形を分

析し，損傷が配管の固有振動数に与える影響を検討する．

3.2 供試体

本実験では，配管用ステンレス鋼管 (JIS-G3459)，呼び径 A65 5S，外径 76.3 mm，厚さ 2.0 mm の配管を用いる．健全な配管のほか，配管外周をフライス盤で切削して欠損を模擬した配管でも試験を実施する．試験で使用する配管の長さ，欠損の幅，深さを Table 1 に，供試体の写真を Fig. 2 に示す．

Table 1 供試体寸法

| No. | 配管の長さ [mm] | 欠損幅 [mm] | 欠損深さ [mm] |
|-----|------------|----------|-----------|
| 1 | 300 | 0 | 0 |
| 2 | | 50 | 0.5 |
| 3 | | | 1.0 |
| 4 | 150 | 0 | 0 |
| 5 | | 10 | 1 |
| 6 | | 50 | |
| 7 | | 100 | |



Fig. 2 供試体 (左から No.1, 2, ...)

3.3 実験方法

ここでは，ハンマーによる打撃振動実験，流体による振動励起実験を実施する．いずれも配管中央部に取り付けた加速度センサーで加速度を計測する．

ハンマーによる打撃振動実験では，Fig. 3 の通り，内部を水で満たした配管を十分に長い紐で吊るし，固定による影響のないようにする．プラスチック製のハンマーで打撃し，その際の

振動を計測する。計測した波形を周波数分析し、固有振動数を算出する。

流体による振動励起実験では、Fig. 4 の通り、ポンプにより配管内部に水を流し、その際の振動を計測する。計測した波形を周波数分析し、固有振動数を算出する。供試体に流れる水の量はドレインバルブで調整できる。

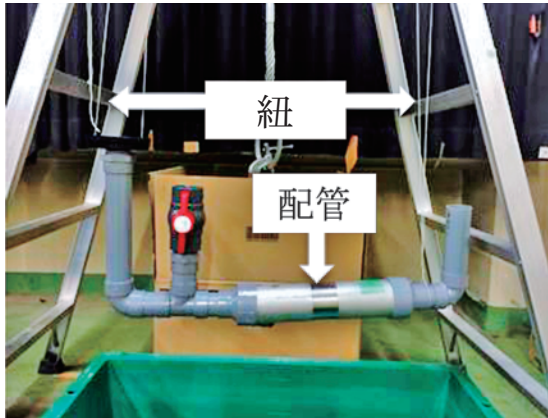


Fig. 3 打撃振動試験の方法

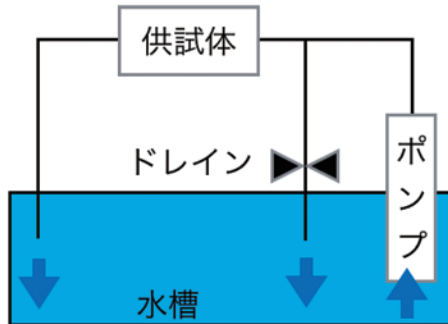


Fig. 4 流体振動励起試験の方法

3.4 実験結果

ハンマーによる打撃振動実験の結果として、Fig. 5 に損傷と固有振動数の関係を示す。Fig.

5 より、欠損の深さが深いほど、また幅が広いほど、固有振動数は減少することがわかる。ここで、欠損がない場合の結果に注目すると、配管長さ 300 mm の方が固有振動数が小さいことがわかる。これは、配管が長いことで内部の流体質量が大きく、結果として振動数も減少したものと考えられる。

次に、流体による振動励起実験の結果として、Fig. 6 に供試体 No.1~3 の、Fig. 7 に供試体 No.4~7 のパワースペクトルを示す。Fig. 6 より、欠損の深さが深いほどスペクトルのピークは低振動数側に移動し、打撃振動試験と同様に固有振動数は減少することがわかる。ここで、打撃振動試験の結果と比較すると、流体励起振動試験の方が固有振動数が小さい。これは、流体が流れていることで内部流体の等価質量が大きい

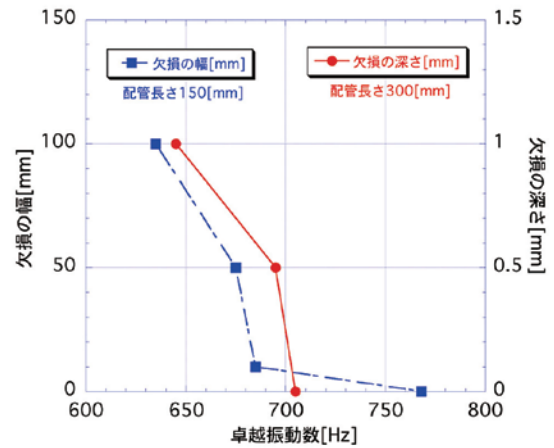


Fig. 5 打撃振動試験の結果

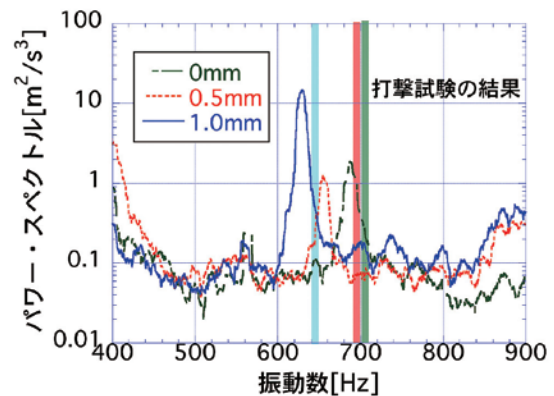


Fig. 6 流体振動励起試験の結果 (パワースペクトル, 供試体 No.1~3, 水量最大)

ためだと考えられる。Fig. 7についても同様の傾向が得られた。

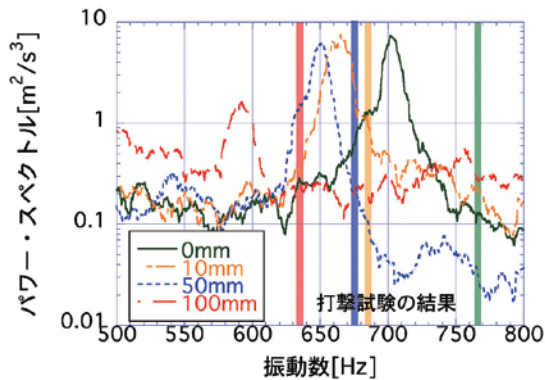


Fig. 7 流体振動励起試験の結果（パワースペクトル，供試体 No.4~7，水量最大）

4. エルボ管による実験

4.1 実験目的

配管の減肉は、エルボ管やT字管のような曲がり部のある部分で発生しやすい。そこで本実験では、エルボ管を供試体として振動特性を調査した。ただし、エルボ管には損傷を模擬して加工することが困難であったため、健全な状態での実験のみを実施した。

4.2 供試体

本実験では、配管用ステンレス鋼管（JIS-G3459），呼び径 A65 10S，外径 76.3 mm，厚さ 3.0 mm の配管を Fig. 8 のように溶接して製作したエルボ管を使用した。

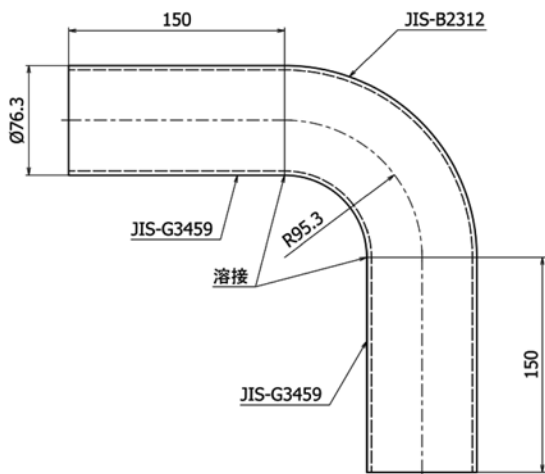


Fig. 8 エルボ管

4.3 実験方法

第3章と同様に、ハンマーによる打撃振動実験，流体による振動励起実験を実施する。いずれも加速度センサーはエルボ管の流入部，中央部，流出部に設置した。また，実際の運用を想定し，打撃試験においても水を流したままの実験を実施し，エルボ配管の中央部付近を上下左右の4方向から打撃した。

なお，溶接による製造誤差などを考慮し，4本の供試体で実験を実施した。

4.4 実験結果

実験結果として，Fig. 9 に流出部における卓越振動数の比較を示す。図中のI型の印は4本の供試体のバラツキの範囲を示す。

Fig. 9 より，試験方法によらず，内部流体の状態により概ね同程度の振動数が卓越していることがわかる。水無しの条件は，水の影響がないため，特にバラツキが小さい。また，水の質量が影響しないことから，固有振動数も他より大きくなる。一方，水流が小さい場合はバラツキが大きかった。

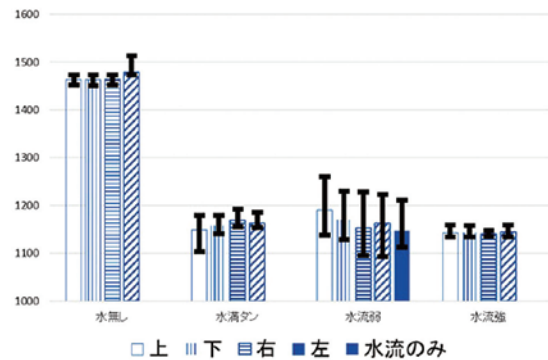


Fig. 9 流出部における卓越振動数の比較

5. 有限要素解析

5.1 解析目的

第4章のエルボ管による実験では，形状が複雑であることから損傷を模擬した加工ができなかった。そこで，本章では今後有限要素解析により破損を模した解析が可能かを検証するため，第4章と同様の健全なエルボ管に対して有限要素解析により固有振動数を求め，実験結果と比較した。

5.2 解析方法

有限要素解析には、Autodesk 社の Inventor を使用した。Fig. 8 に示したエルボ管をメッシュ平均要素サイズ 0.010 mm として解析モデルを作成した。なお、ここでは水は考慮しない。

5.3 解析結果

有限要素解析の結果として、Fig. 10 にエルボ管の変形モードを示す。このときの固有振動数は 1466.80Hz であった。この変形モードはエルボ管両端の直管部がオーバル振動をするモードで、以前実施した直管のみの場合の振動に類似している¹⁾。第 4 章での実験結果において、水無しの場合の卓越振動数は 1460 Hz 程度であり、Fig. 10 の振動モードに対応すると考えられる。これより、有限要素解析を実施することで、エルボ管の固有振動数が求められた。

以上の結果を踏まえれば、欠損のあるエルボ管の固有振動数を有限要素解析により求めることができるといえる。実際のシステムに適用する際には、初期状態での配管の固有振動数を計測するほか、有限要素解析で固有振動数を推定し、これらの値と実測値を比較することで、配管の損傷が推定可能になるといえる。

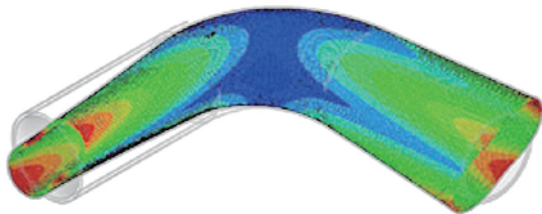


Fig. 10 エルボ管の変形モード (1466.80 Hz)

6. 結論

本報では、配管の健全性を振動応答によりモニタリングするシステムを構築するための基礎的検討として、損傷が配管の固有振動数に与える影響などを検討した。その結果、得られた知見は以下の通りである。

- ・打撃による振動及び流体により励起された振動により、配管の固有振動数を計測することができる。
- ・配管の欠損が大きいほど、固有振動数は低下する。
- ・流体を内部に満たすことで、卓越振動数は低下する。
- ・配管の振動応答は有限要素解析で求められる。

今後はモニタリングシステム構築に向け、欠損のエルボ管についても実験を実施する。

謝辞

本研究実施にあたり、埼玉工業大学工学部機械工学科元学生の内田博之君、宮澤大樹君、高野大輔君、片山駿樹君、村山聡一郎君には多大なる協力を頂いた。ここに感謝の意を評する。

参考文献

- 1) 皆川佳祐：配管減肉による振動特性の変化に関する基礎研究，埼玉工業大学先端科学研究アニュアルレポート，2014