

衝撃弾性波法に基づくダクトイル鋳鉄管の老朽度評価手法に関する基礎研究

大阪大学大学院 鎌田 敏郎

第1章 序論

1.1 背景および目的

近年、我国では、ストックマネジメントの観点から、膨大な量の既存の管路施設を合理的に維持管理し施設全体の延命化をはかるためのシステムを構築することが急務となっている。管路の維持管理では、劣化状況の適確な診断と適切なタイミングでの施設更新が重要と考えられるが、管路の状態を現場で定量的に評価する方法は未だ確立されていないのが現状である。

このような背景から、本研究では、特に、ダクトイル鋳鉄管における外面からの腐食による劣化を対象とし、可能な限り非開削・非破壊で効率良く定量的に管の老朽度を適確に把握することができる劣化診断手法を検討することとした。ここでは、下水道管路の劣化診断で実績のある衝撃弾性波法¹⁾に着目し、以下に示す構成に従って基礎的な研究を行った。

1.2 本報告書の構成

第1章では、本研究の背景および目的について述べた。

第2章では、衝撃弾性波法によるダクトイル鋳鉄管の老朽度評価の適用性についての検討ならびに評価パラメータの確認を行うため、衝撃応答解析を用いた検証を行った。

第3章では、解析によって得られた結果に基づき、供試管を対象に衝撃弾性波法による測定を行い、手法の妥当性についての検討を行った。

第4章では、堀上管の老朽度評価への衝撃弾性波法の適用性について述べるとともに、老朽度評価手法の提言を行った。

第5章では、本研究で得られた結論を示した。

第2章 解析によるダクタイル鋳鉄管の老朽度評価の適用性・評価パラメータの検討

2.1 はじめに

管厚, 管径および管長の異なる供試管を作製し実験を行うことは非常に多くのパターンの供試管を必要とし効率的ではない。そこで本章では, 有限要素法解析に基づき, 衝撃弾性波法によるダクタイル鋳鉄管の老朽度評価の適用性について検討するとともに, 評価パラメータの検証を行った。具体的には, 管厚, 管径および管長と衝撃弾性波法(手法の原理については, 第3章 3.2 で詳述する。)により求められるピーク周波数との関係を解析により確認することを目的とした。

2.2 管厚, 管径および管長とピーク周波数の関係

本節では, 管厚の異なる供試管を模擬したモデルにおける解析を行い, 管径および管長とピーク周波数との関係と, 管径および管長の異なる管における管厚とピーク周波数との関係を把握することとした。

2.2.1 管厚の違いがピーク周波数に与える影響

解析は衝撃応答解析を用いた。ここでは, 管厚とピーク周波数の関係について検討することを目的とした。

(1) 解析モデルおよび条件

ダクタイル鋳鉄管を模擬して作成した解析モデルの詳細を表-2.1 に示す。続いて解析モデルの画像の一例を図-2.1, 図-2.2 に示す。材料係数は弾性係数 150GPa, 密度 7.15g/cm³, ポアソン比 0.28 である。支持条件は図-2.1 において矢印の指している管下の一線で XYZ 方向の変位を固定している。荷重は, 後述する実験における打撃位置と同様の条件である管の端部から 100mm の図-2.2 において矢印で指している点に与えている。荷重は 0.001 秒間で図-2.3 に示す荷重条件により入力している。

表-2.1 解析モデル詳細

	管厚 (mm)	管長 (mm)	管径 (mm)
健全管	7.5	1000	150
1mm 切削管	6.5	1000	150
2mm 切削管	5.5	1000	150
3mm 切削管	4.5	1000	150
4mm 切削管	3.5	1000	150
5mm 切削管	2.5	1000	150

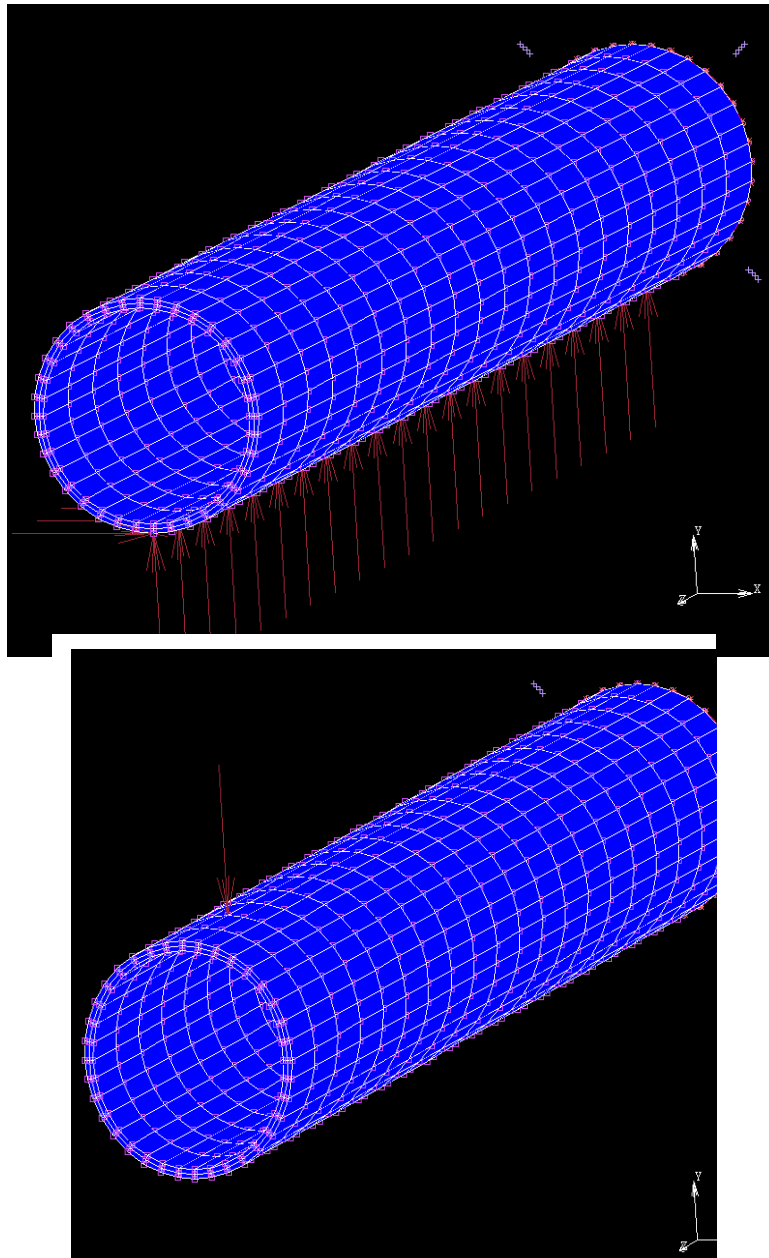


図-2.2 解析モデル(荷重位置)

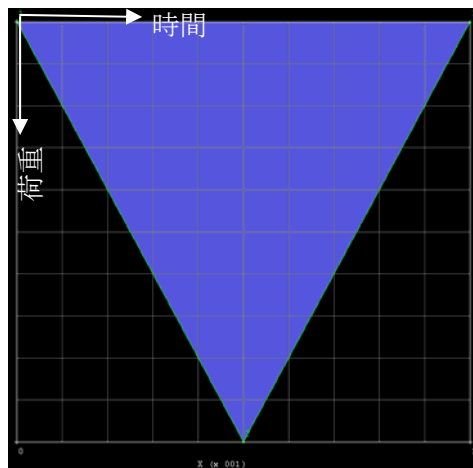


図-2.3 荷重詳細

(2) 解析結果

解析結果を表-2.2 および図-2.4 に示す。

表-2.2 実験および解析結果

管厚(mm)	7.5	6.5	5.5	4.5	3.5	2.5
解析値(Hz)	693	556	527	507	478	468

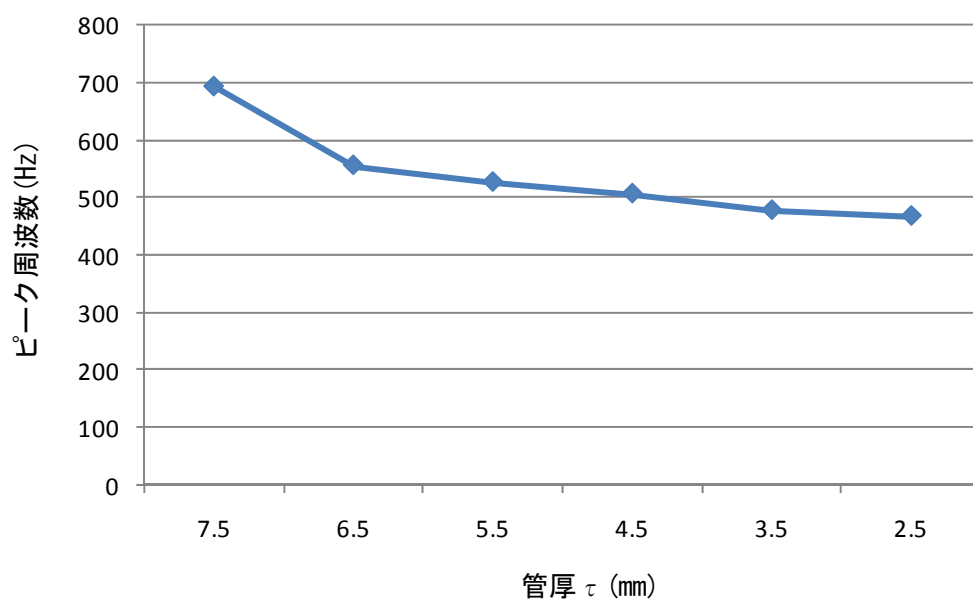


図-2.4 管厚 τ とピーク周波数の関係

(3) 考察

管厚が小さくなるとピーク周波数も小さくなることが明らかとなった。したがって、管厚評価におけるパラメータとしては、ピーク周波数が妥当であると考えられる。

2.2.2 管径および管長の違いがピーク周波数に与える影響

管径および管長とピーク周波数との関係についての検討を行った。解析は 2.2.1 と同様、衝撃応答解析を用いることとした。

(1) 解析モデルおよび条件

ここでは、管径および管長にバリエーションを設けた解析モデルを用いた。まず、管径を 150mm に固定し、管長を 150mm, 2000mm, 3000mm, 4000mm, 5000mm と変化させたモデルを作成した。さらに、管長を 1000mm に固定し、管径を 300mm, 600mm と変化させたモデルも併せて作成した。表-2.3 に解析実施モデルをまとめて示す。なお、解析条件は 2.2.1(1) と同様の条件で行った。

表-2.3 解析実施モデル

		管長 (mm)						
		150	1000	2000	3000	4000	5000	6000
管径 (mm)	150	○	○	○	○	○	○	
	300	—	○	—	—	—	—	○
	600	—	○	—	—	—	—	○

※○：解析を行ったモデル —：解析を行わなかったモデル

(2) 解析結果

解析により求められたピーク周波数を表-2.4 にまとめた。また管長および管径がピーク周波数に与える影響を確認するため、管長および管径とピーク周波数との関係をそれぞれ図-2.5, 図-2.6 に示す。

表-2.4 解析結果

		管長 (mm)						
		150	1000	2000	3000	4000	5000	6000
管径 (mm)	150	595Hz	693Hz	625Hz	595Hz	605Hz	615Hz	
	300	—	546Hz	—	—	—	—	527Hz
	600	—	468Hz	—	—	—	—	429Hz

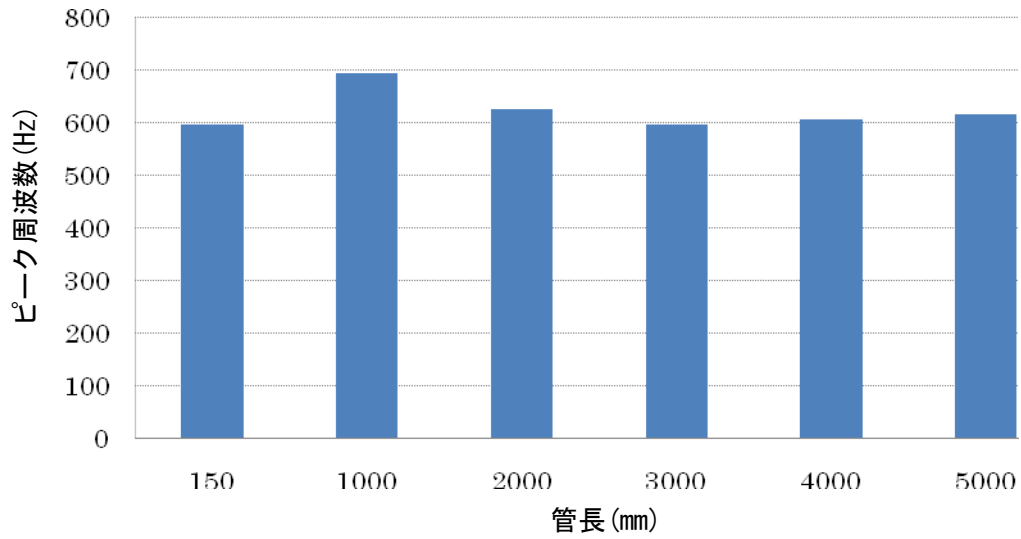


図-2.5 管長とピーク周波数の関係

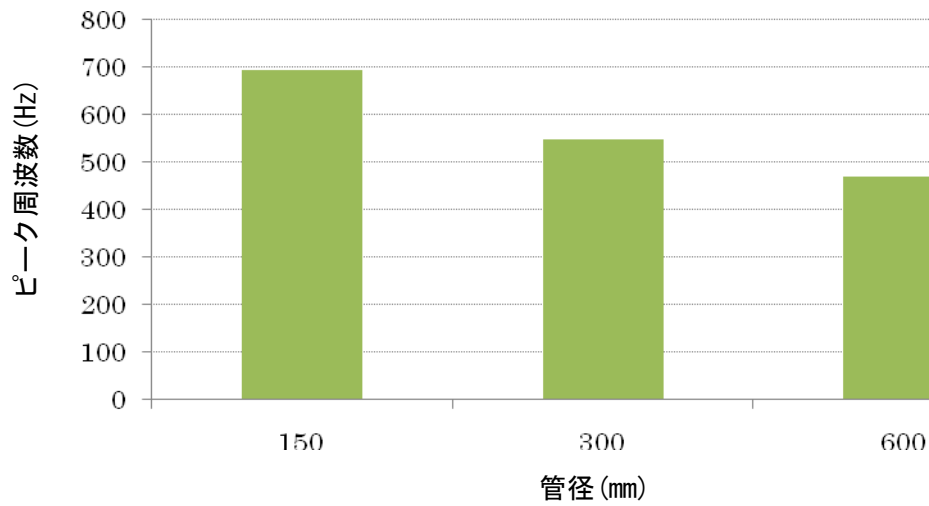


図-2.6 管径とピーク周波数の関係

(3) 考察

図-2.5 に示す通り、管長が変化してもピーク周波数は大きく変わらないことがわかった。したがって、評価パラメータであるピーク周波数は、管の長手方向に起因する振動よりも、むしろ円周方向の振動の影響を強く受けると考えられる。また、管長を著しく短くすることで円周方向の振動のみの特性をとらえようとしたモデル（管長 150mm）において、管長の長いモデル（管長 1000, 2000, 3000, 4000 および 5000mm）と比較して、ピーク周波数がほとんど変化していないことも、以上のように考えられる要因である。また、図-2.6 より、管径が大きくなるとピーク周波数は小さくなる傾向があることが明らかとなった。

2.2.3 管径および管長の異なる管における管厚の変化がピーク周波数に与える影響

ここでは、管径および管長が異なる管における管厚とピーク周波数の関係について検討するため、衝撃応答解析を行った。

(1) 解析モデルおよび条件

管径および管長とピーク周波数の関係の確認で用いたモデルの一部を 1mm, 2mm, 3mm および 4mm 減肉したモデルにおいて、それぞれ解析を行った。詳細を表-2.5 に示す。解析条件は、2.2.1(1) と同じである。

表-2.5 解析実施モデル

		管長 (mm)						
		150	1000	2000	3000	4000	5000	6000
管径 (mm)	150	—	○	—	—	—	○	
	300	—	○	—	—	—	—	—
	600	—	○	—	—	—	—	—

※○：解析を行ったモデル —：解析を行わなかったモデル

(2) 解析結果

解析結果を表-2.6 に示す。また、管径、管長および管厚の影響を確認しやすくするため、それぞれの関係を図-2.7 に併せて示す。

表 2.6 解析結果

	管厚 (mm)				
	7.5mm	6.5mm	5.5mm	4.5mm	3.5mm
管径 150mm, 管長 1000mm	693Hz	556Hz	527Hz	507Hz	478Hz
管径 150mm, 管長 5000mm	620Hz	595Hz	566Hz	546Hz	498Hz
管径 300mm, 管長 1000mm	546Hz	517Hz	488Hz	468Hz	449Hz
管径 600mm, 管長 1000mm	468Hz	458Hz	449Hz	439Hz	439Hz

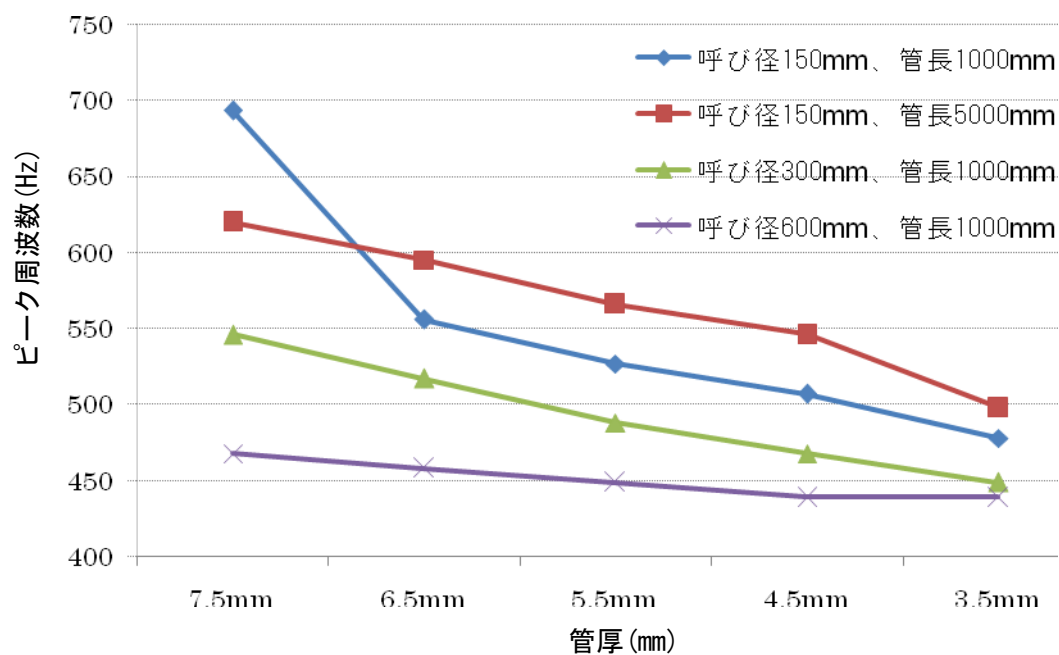


図-2.7 管径および管長の異なる管ごとの管厚とピーク周波数の関係

(3) 考察

いずれのモデルにおいても、管厚が減少するとピーク周波数が低下するという傾向が現れた。また、管径が大きくなった場合および管長が長くなった場合には、管厚の減少によるピーク周波数の低下は小さくなることが確認できた。

2.3 外面腐食による部分的な減肉がピーク周波数に与える影響

実際に外面腐食を生じた管において、管厚が全面的に均一に減少しているとは考えにくい。そのため、部分的な減肉がピーク周波数に与える影響を確認することで、外面腐食を生じた管における本手法の適用性を検討する。ここでは、外面腐食を再現するため、解析モデルにおける管の長手方向の管厚にバリエーションを設けることとした。すなわち、(Ⅰ)部分的に管厚を薄くしていく場合、(Ⅱ)部分的に減肉させた管の管厚を全面的に薄くしていく場合、(Ⅲ)減肉部分の位置を変化させた場合、(Ⅳ)減肉部分の長手方向長さを変化させた場合について、解析モデルの設定を行った。

2.3.1 部分的に管厚を薄くしていく解析におけるピーク周波数の変化

ここでは、外面腐食による部分的な減肉がピーク周波数に与える影響について検討するため、管厚を減肉するパターンの一つとして、部分的に管厚を薄くしていくモデルを対象に解析を実施した。

(1) 解析モデルおよび条件

詳細を図-2.8 および表-2.7 に示す。

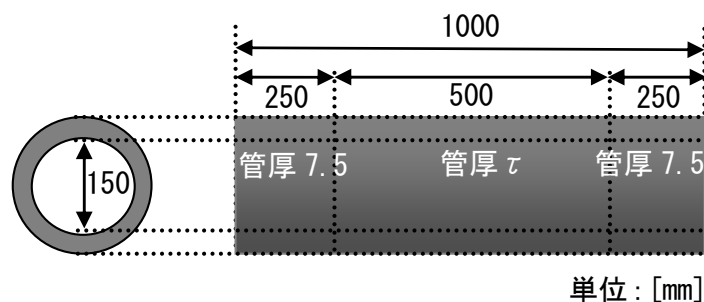


図-2.8 解析モデル詳細

表-2.7 管厚 τ

	τ (mm)
モデル 1-A	7.5
モデル 1-B	6.5
モデル 1-C	5.5
モデル 1-D	4.5
モデル 1-E	3.5

(2) 解析結果

解析結果を図-2.9 に示す。

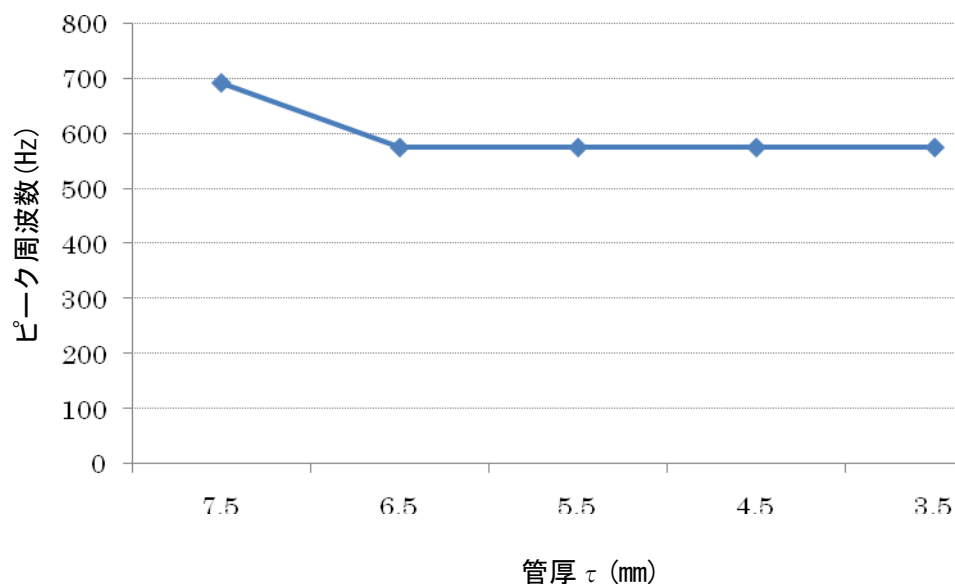


図-2.9 管厚 τ とピーク周波数の関係

(3) 考察

図-2.9 によれば、減肉させた部分の管厚 τ が 7.5mm から 6.5mm に減少するとピーク周波数が低下している。このことから、管全長の半分の長さにおいて管厚が 1mm 減少すればピーク周波数が低下し、部分的な減肉が管全長の半分程度の腐食管の健全性が判別できると考えられる。しかしながら、管厚が 2mm 以上減少してもピーク周波数に変化が現れていないことから、部分的な管厚の減少程度までを推定することは容易ではなかった。

2.3.2 部分的に減肉させた管の管厚を全面的に薄くしていく解析におけるピーク周波数の変化

(1) 解析モデルおよび条件

詳細を図-2.10 および表-2.8 に示す。

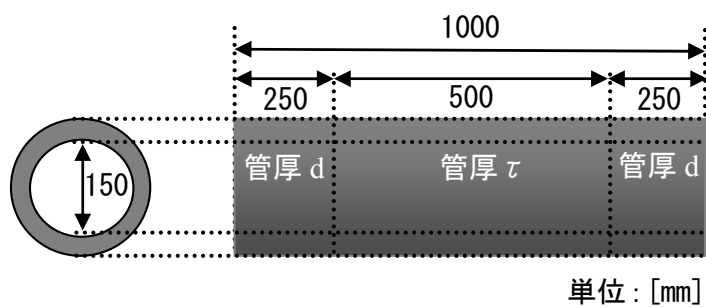


図-2.10 解析モデル詳細

表-2.8 管厚 τ および管厚 d

	τ (mm)	d (mm)
モデル 2-A	5.5	7.5
モデル 2-B	4.5	6.5
モデル 2-C	3.5	5.5
モデル 2-D	2.5	4.5

(2) 解析結果

解析結果を図-2.11 に示す。

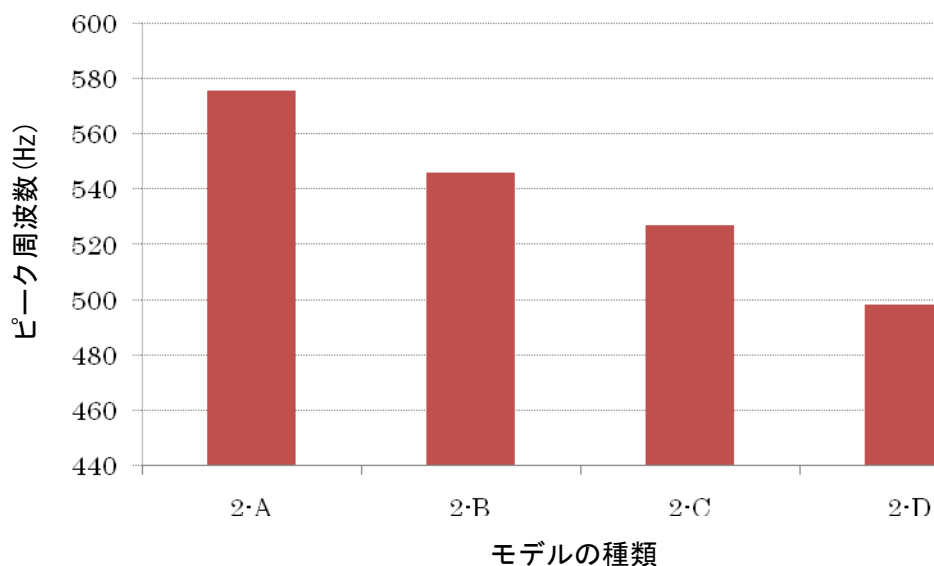


図-2.11 各モデルにおけるピーク周波数

(3) 考察

管厚 τ および管厚 d を 1mm ずつ減少させたモデル 2-A, 2-B, 2-C, 2-D においては管厚が薄くなる 2-A \rightarrow 2-B \rightarrow 2-C \rightarrow 2-D の順にピーク周波数が減少することが確認された。そのため、部分的に減肉した管の管厚が全面的に薄くなるような減肉パターンであれば、管厚の減少程度を衝撃弾性波法により推定できる可能性があることがわかった。

2.3.3 減肉部分の位置を変化させる解析におけるピーク周波数の変化

(1) 解析モデルおよび条件

詳細を図-2.12 および表-2.9 に示す。打撃は図-2.12 のモデルの右端から 100mm の位置で行い，センサは左端から 100mm に設置した。

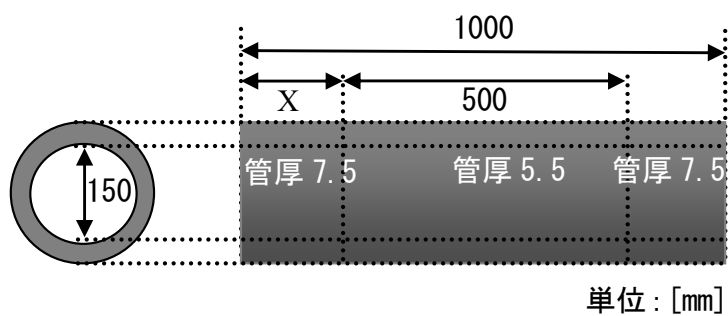


図-2.12 解析モデル詳細

表-2.9 部分的な減肉までの長さ X

	X(mm)
モデル 3-A	0
モデル 3-B	150
モデル 3-C	250
モデル 3-D	350
モデル 3-E	500

(2) 解析結果

解析結果を図-2.13 に示す。

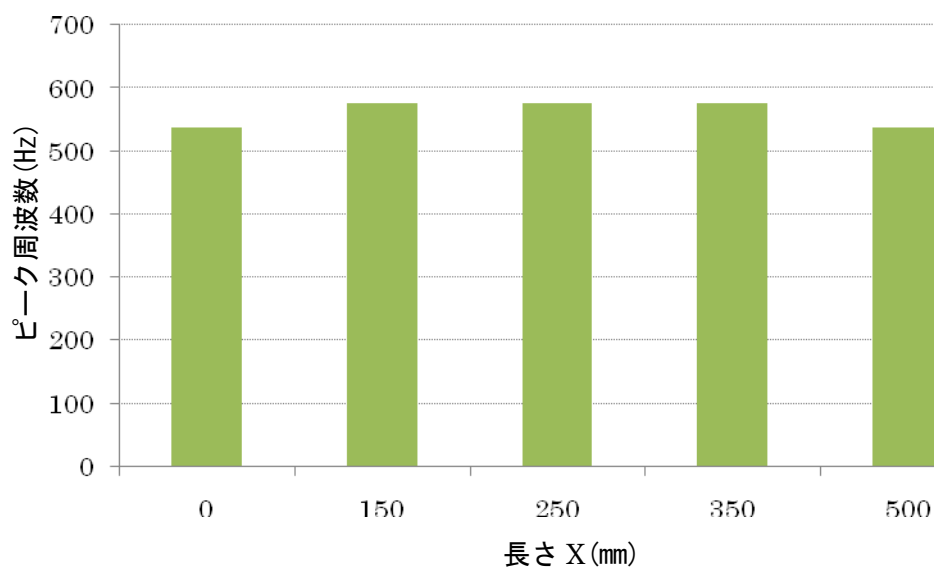


図-2.13 部分的な減肉の位置とピーク周波数の関係

(3) 考察

図-2.13 に示す通り，部分的な減肉が管の端部に生じたモデル（部分的な減肉までの長さ X が 0mm および 500mm）を除けば，ピーク周波数は全く変化しなかった。また長さ X が 0mm および 500mm のモデルにおいてもピーク周波数は大きく変化せず，部分的な減肉の位置がピーク周波数に与える影響は小さいことが確認された。

2.3.4 減肉部分の長手方向長さを変化させる解析におけるピーク周波数の変化

(1) 解析モデルおよび条件

管厚の薄い部分はいずれのモデルにおいても管中央に配置し、その管厚の薄い部分の長さを短くしたモデルを用いて解析を行った。詳細を図-2.14 および表-2.10 に示す。

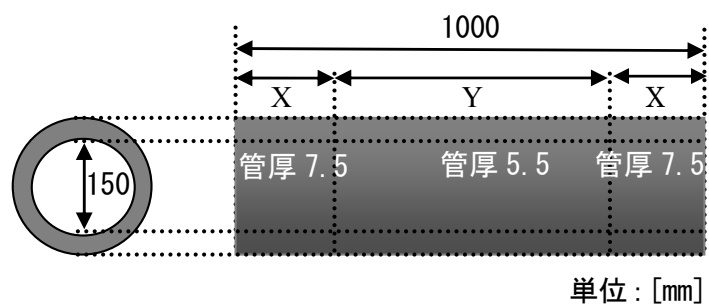


図-2.14 解析モデル詳細

表-2.10 長さ X および長さ Y

	X(mm)	Y(mm)
モデル 4-A	0	1000
モデル 4-B	250	500
モデル 4-C	300	400
モデル 4-D	350	300
モデル 4-E	400	200

(2) 解析結果

解析結果を図-2.15 に示す。

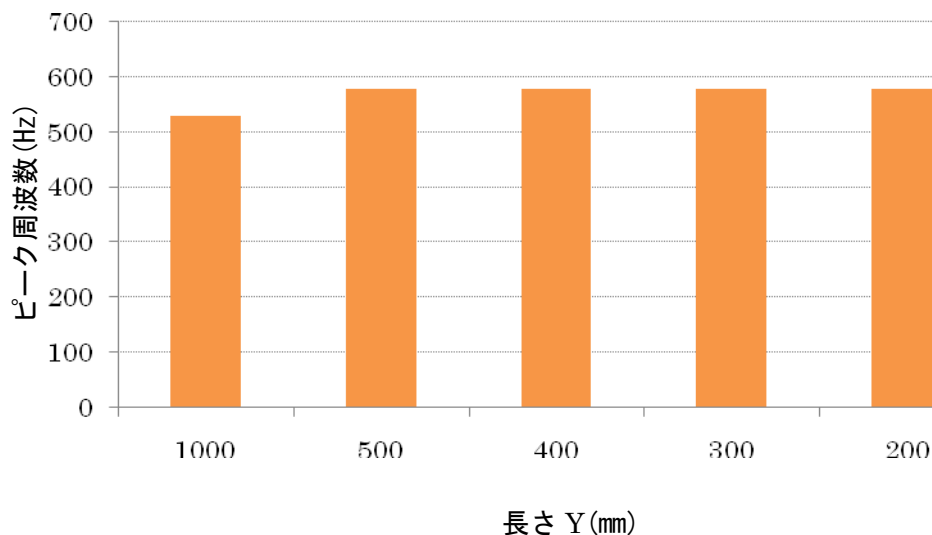


図-2.15 部分的な減肉の長さとのピーク周波数の関係

(3) 考察

管の全長に対して 20%~50%程度の部分的な減肉であれば、長さを変化してもピーク周波数は変化しないことが確認できた。そのためピーク周波数から減肉の長さを推定することは難しいが、全面的に減肉させた管と比較するとピーク周波数が高いことから、減肉部が大きくなるとピーク周波数が低下すると考えられる。また管の全長の 20%の部分的な減肉においても健全管と比較した場合ピーク周波数の低下がみられることから、本手法によれば管全長の 20%程度の部分的な減肉も検出できる可能性がある。

2.4 まとめ

本章では、解析によりダクタイル鋳鉄管の老朽度評価原理について検討した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 管径が一定の場合は、管長の違いがピーク周波数に与える影響は小さいことがわかった。管径が大きくなる場合は、ピーク周波数が低くなる傾向が現れた。また管長および管径が大きくなるほど、管厚の減少によるピーク周波数の低下の程度が小さくなることが明らかになった。
- 2) 部分的な減肉区間が管の全長の 20%程度であっても、ピーク周波数は低下することが確認できた。
- 3) 部分的な減肉の位置がピーク周波数に与える影響は小さく、本手法によれば減肉の位置に関わらず、管全体の減肉の程度を評価できる可能性があることがわかった。

第3章 供試管における衝撃弾性波法の適用性に関する検討

3.1 はじめに

本章では、第2章で得られた解析結果に基づき、供試管を対象に衝撃弾性波法による測定を行い、手法の妥当性についての検証を行った。実験では、外面切削により管厚にバリエーションを設けたダクタイル鋳鉄管（供試管）、内面条件の異なる2種類の供試管（モルタルライニング管およびエポキシ粉体塗装管）を対象に行った。

3.2 衝撃弾性波法の原理

衝撃弾性波法は、対象物表面にハンマや鋼球などを用いて機械的に衝撃を与えることにより弾性波を入力し、同じく対象物表面において加速度計などのセンサにより弾性波を受振する方法であり、得られた受振波形における最大振幅値、波形減衰時間、周波数分布などを指標とし、対象物の物性や劣化状態などを非破壊で評価する方法である。

本研究における衝撃弾性波法によるダクタイル鋳鉄管の老朽度評価は、外面腐食などに起因した肉厚減少により管の剛性が低下すると、それに伴い管の振動数が低下するという性質に着目したものである。ここでは、弾性波計測を行ったのち、得られた受振波形を高速フーリエ変換（FFT）することで、管特有の周波数分布を算出し、老朽度を評価しようとするものである。

一般的に、衝撃により入力された弾性波は、超音波のように電氣的な作用を利用して発振させた弾性波と比較して伝播する弾性波の持つエネルギーが大きく、波長の大きな成分を多く含むことから固体中において減衰や散乱の影響を受けにくい。そのため、弾性波を伝播させる距離を長くすることができ、大型構造物を対象とした計測も可能である。つまり、本手法では広範囲における診断が可能であり、対象物の全体的な老朽度評価を行うことができる。

現在のところ衝撃弾性波法は、下水用途の鉄筋コンクリート管（ヒューム管）の劣化評価、トンネルの覆工厚さ評価、杭の根入れ深さや損傷程度の評価、PCグラウトの充填度評価、道路橋床版の損傷評価などに用いられている。鉄筋コンクリート下水管路の劣化診断における適用例では、コンクリート管のひび割れ評価に関する検討を行った結果、最大振幅値、波形エネルギー、周波数分布のデータを参考にひび割れの有無を評価できることを明らかになっている。最大振幅値、波形エネルギーは、埋設状況によって異なる土圧の影響で大きく変化することがわかり、周波数分布はその影響を受けにくいことも確認されている。

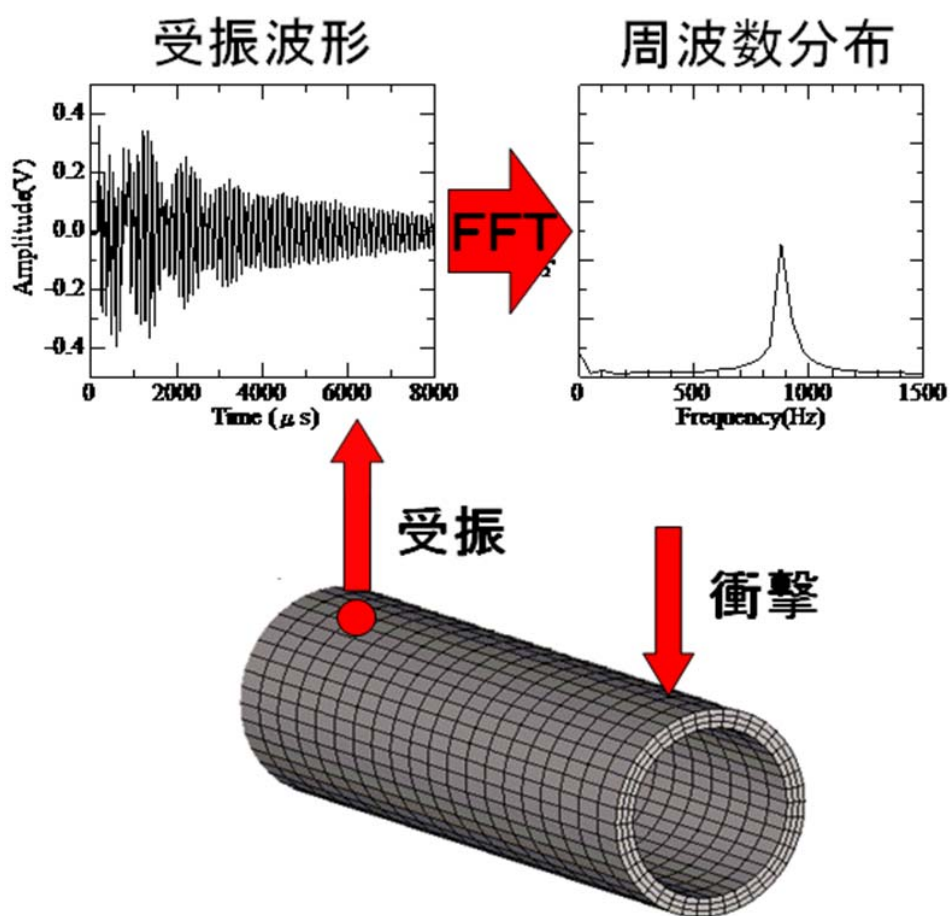


図-3.1 衝撃弾性波法の原理のイメージ

3.3 実験概要

3.3.1 供試管 I (モルタルライニング管)

実験状況を図-3.2 に示す。

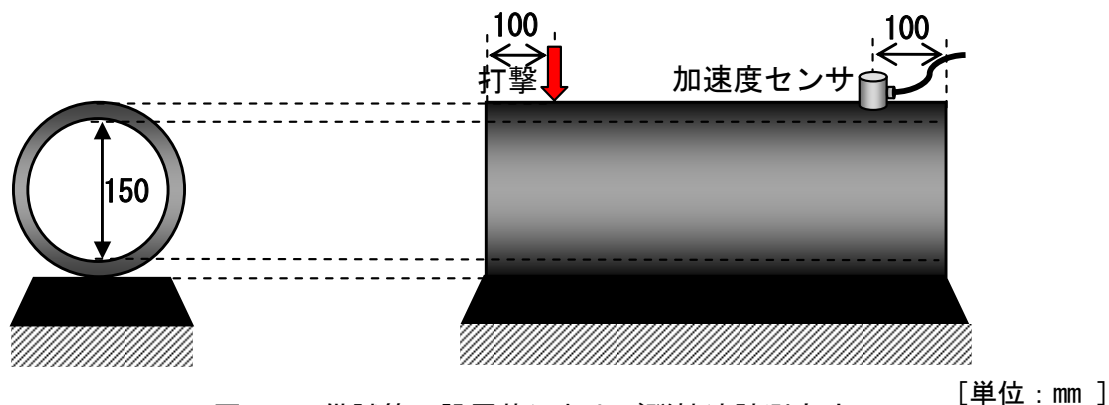


図-3.2 供試管の設置状況および弾性波計測方法

(1) 供試管概要

本実験では、JIS の規格により製造されたダクタイル鋳鉄管(K 形 1 種, 呼び径 150mm, 肉厚 7.5mm) を, 図-3.2 に示すように 1.0m に切断したものをベースとした。また, 内面にはモルタルライニングを施し, 6 種類の肉厚パターンの供試管を作製した。外面腐食による肉厚減少を模擬するため, 外面側から平均的に切削を行った。健全供試管と比較して肉厚が 1mm 切削されているものを 1mm 切削モルタルライニング管と呼ぶこととする。実験のバリエーションとして, 健全モルタルライニング管, 1.0mm 切削モルタルライニング管, 2.2mm 切削モルタルライニング管, 3.1mm 切削モルタルライニング管, 4.1mm 切削モルタルライニング管, 5.0mm 切削モルタルライニング管を用意した。供試管の仕様を表-3.1 に示す。

表-3.1 供試管詳細

	管厚 (mm)	管長 (mm)	管径 (mm)
健全モルタルライニング管	7.5	1000	150
1.0mm 切削モルタルライニング管	6.5	1000	150
2.2mm 切削モルタルライニング管	5.3	1000	150
3.1mm 切削モルタルライニング管	4.4	1000	150
4.1mm 切削モルタルライニング管	3.4	1000	150
5.0mm 切削モルタルライニング管	2.5	1000	150

(2) 弾性波計測方法

供試管の設置状況，打撃位置および加速度センサ設置位置については先に図-3.2 に示した通り，打撃は管の端部から 100mm の位置で行い，もう一方の端部から 100mm の位置に加速度センサを設置した。弾性波の受振には，0.003~10kHz に応答感度を有する加速度センサを用いた。受振した波形は，アンプを介し，高速波形収集システムによりパソコンに記録した。以上の方法で得られた受振波形から，最大振幅値および波形減衰時間を求め，高速フーリエ変換（FFT）により周波数分布を求めた。また，サンプリング周期 1 μ 秒，サンプリング数 32768，トリガーレベル 0.500V に設定し計測を行った。高速フーリエ変換（FFT）は図-3.3 に示すように最新部分の 16384 を対象とした。

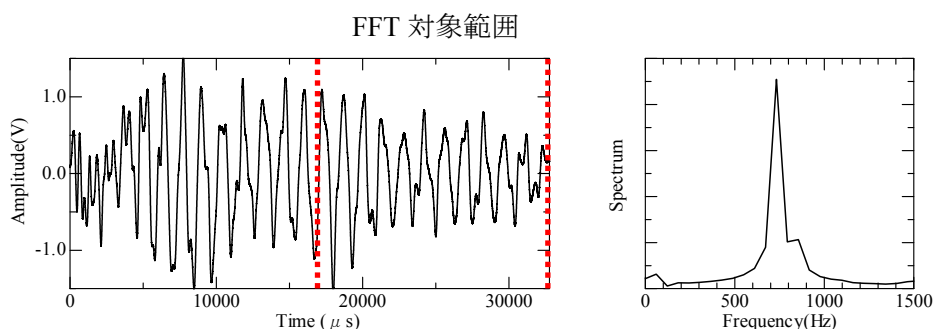


図-3.3 FFT 対象範囲および周波数分布の例

3.3.2 供試管Ⅱ（エポキシ粉体塗装管）

(1) 供試管概要

実験に用いた供試管は，3.3.1 と同様，JIS の規格により製造されたダクタイル鋳鉄管（K 形 1 種，呼び径 150mm，肉厚 7.5mm）を，図-3.2 に示すように 1.0m に切断したものをベースとした。また，内面にはエポキシ粉体塗装を施し，3 種類の肉厚パターンの供試管を作製した。外面腐食による肉厚減少を模擬するため，外面側から平均的に切削を行った。切削のなされていない健全供試管と比較して肉厚が 2mm 切削されているものを 2mm 切削エポキシ粉体塗装管と呼ぶこととする。同様に，4mm 切削エポキシ粉体塗装管も用意した。詳細は表-3.2 に示す。

表-3.2 供試管詳細

	管厚 (mm)	管長 (mm)	管径 (mm)
健全エポキシ粉体塗装管	7.5	1000	150
2mm 切削エポキシ粉体塗装管	5.5	1000	150
4mm 切削エポキシ粉体塗装管	3.5	1000	150

(2) 弾性波計測方法

ここでは、3.3.1(2)と同じ方法を用いた。

3.4 実験結果および考察

3.4.1 モルタルライニング管

図-3.4 に、内面にモルタルライニングを施した 6 種類の供試管において得られた周波数分布をそれぞれ示す。図によれば、供試管の肉厚が現象するとともに、ピーク周波数が低周波側にシフトしていることがわかる。表-3.3 および図-3.5 に、管厚とピーク周波数との関係をそれぞれ示す。表および図より、1.0mm 程度の管厚の減少に伴ってピーク周波数が減少していることがわかる。これより、本手法によれば、7.5mm の管厚のモルタルライニング管において、1.0mm 程度の管厚の違いを識別できる可能性があることを明らかにした。また、肉厚が不明な管であっても、衝撃弾性波法によりピーク周波数を得ることができれば、肉厚を定量的に評価できる可能性があることも明らかとなった。

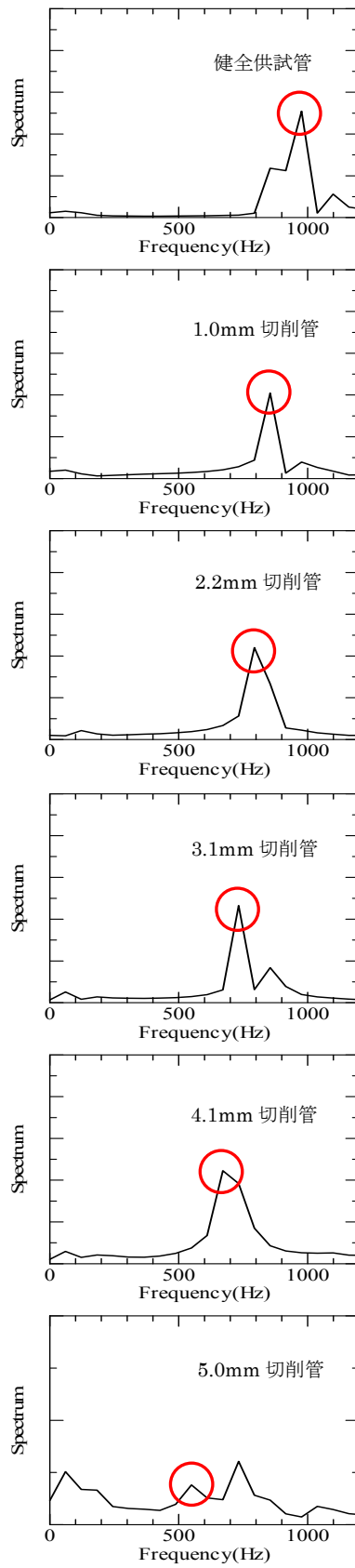


图-3.4 周波数分布

表-3.3 管厚とピーク周波数との関係

管厚(mm)	7.5	6.4	5.6	4.6	3.5	2.6
実験値(Hz)	732	610	549	488	427	244

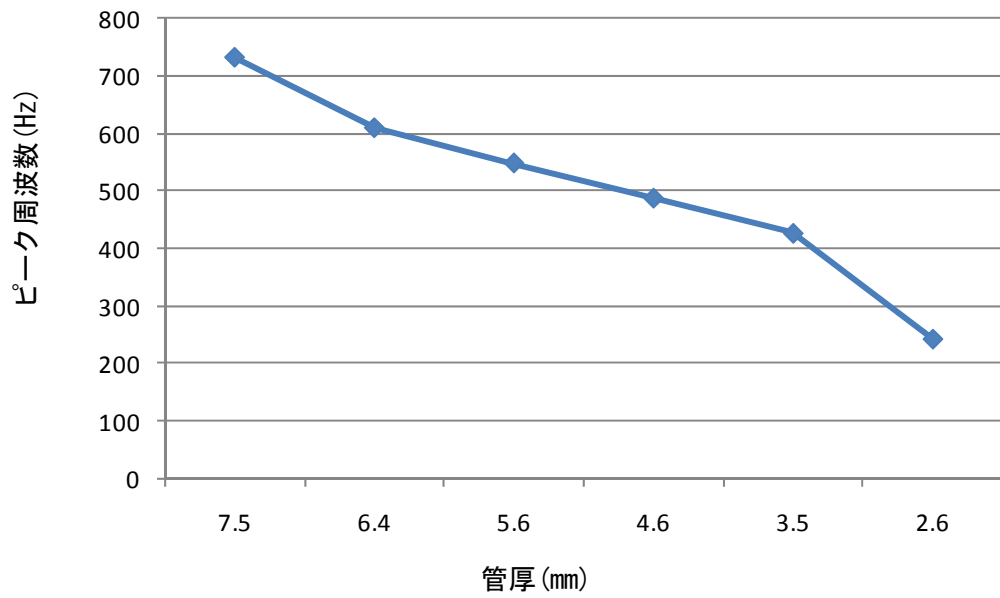


図-3.5 管厚とピーク周波数との関係

3.4.2 エポキシ粉体塗装管

図-3.6 に、内面にエポキシ粉体塗装を施した 6 種類の供試管において得られた周波数分布をそれぞれ示す。図によれば、管厚が小さくなり管の剛性が低下し、これによりピーク周波数が小さくなることがわかる。また、図-3.7 および表-3.4 に管厚とピーク周波数との管径を、解析の結果 (2.2.1 参照) と併せて示す。実験および解析の結果ともに、管厚の低下とともに、ピーク周波数が小さくなることが確認できる。さらに、1mm 程度の管厚の違いにより、ピーク周波数が変動していることも同時に確認できる。これより、本手法によれば、7.5mm の管厚のモルタルライニング管において、1.0mm 程度の管厚の違いを識別できる可能性があることを明らかにした。また、肉厚が不明な管であっても、衝撃弾性波法によりピーク周波数を得ることができれば、肉厚を定量的に評価できる可能性があることも明らかとなった。

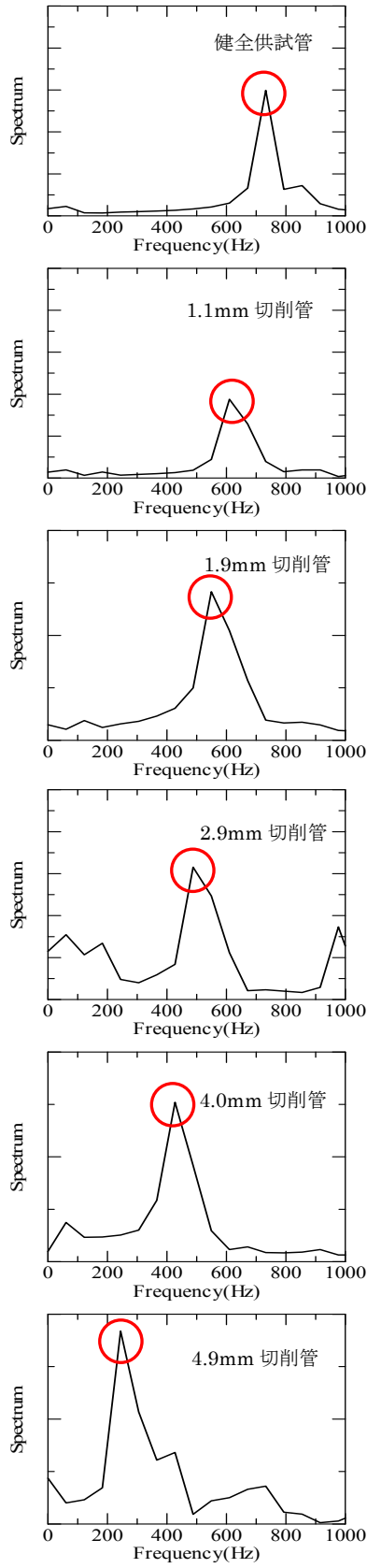


图-3.6 周波数分布

表-3.4 実験および解析結果

管厚(mm)	7.5	6.5	5.5	4.5	3.5	2.5
実験値(Hz)	732	—	573	—	512	—
解析値(Hz)	693	556	527	507	478	468

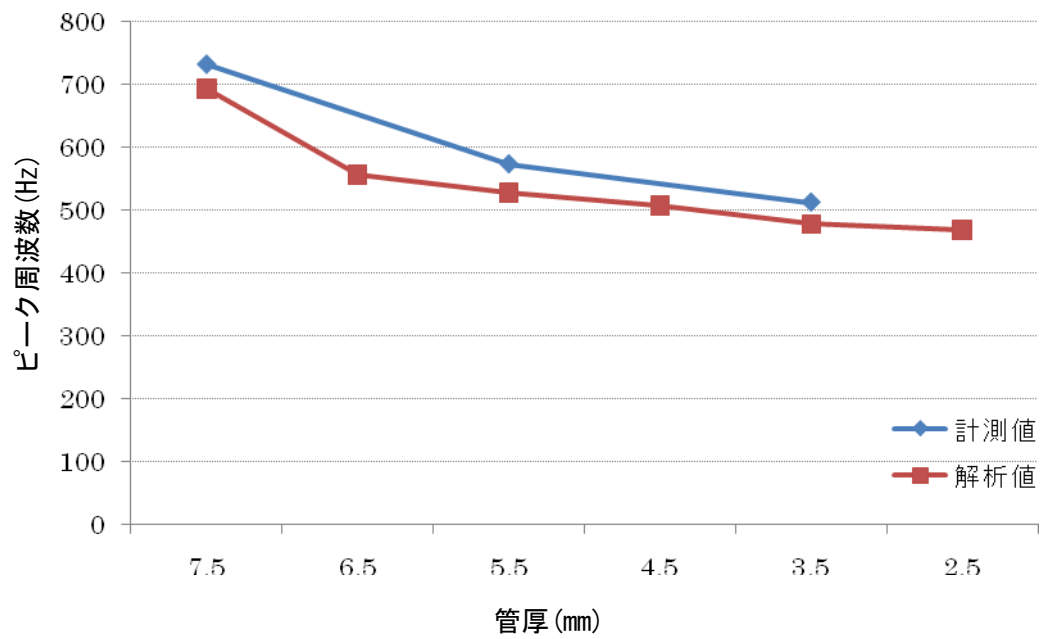


図-3.7 実験および解析結果の比較

3.5 まとめ

本章では、外面腐食により管の肉厚が減少していく状況を再現するため、健全供試管をベースに外面から段階的に切削を施し、管厚ごとに衝撃弾性波法による計測を行い、得られた周波数分布におけるピーク周波数と管厚との関係について検討を行った。以下に結果をまとめる。

- 1) 管の肉厚が減少するとともに、管のピーク周波数が低周波側に移動することが確認できた。
- 2) 本手法は、7.5mm 厚の供試管で 1.0mm の減肉に対して検知感度を有しており、1.0mm 程度の肉厚の違いを識別できる可能性があることがわかった。
- 3) エポキシ粉体塗装管とモルタルライニング管の周波数分布を比較すると、塗装の違いにより大きな差が生じることがわかった。後者の方が高いピーク周波数をとる。
- 4) 図-3.5 および図-3.7 に示すように、ピーク周波数の減少傾向には、ある程度の規則性があることが確認できた。
- 5) 衝撃弾性波法を用いてピーク周波数を求めることにより、管の肉厚を定量的に評価することが可能である。

第4章 掘上管の老朽度評価への衝撃弾性波法の適用

4.1 はじめに

本章では、管厚が不均一となる掘上管に対する本手法の適用性についての検討を行った。また、除錆前後におけるピーク周波数の変化を確認するため、管体調査を併せて実施し、両者の結果を比較・検証した。さらに、得られた結果に基づき、ダクタイル鋳鉄管における老朽度評価手法の提言を行った。

4.2 実験概要

本手法において求められるピーク周波数と管体調査における管厚調査で得られた結果との比較を行った。なお、管体調査における管厚の計測はケレン作業により管外面に付着した腐食生成物を除去した後に行った。

4.2.1 衝撃弾性波法

ここでは、第3章で示した手法と同じ手法を用いることとした。

4.2.2 掘上管

本実験では実際に供用されていた布設時期の異なる管長 1000mm、管径 150mm のモルタルライニングの掘上管を用いた。モルタルライニングの厚みはいずれも 4mm 程度であったためにライニング厚の違いによる影響はないものと考えた。掘上管の詳細を表-4.1に示す。







表-4.1 掘上管詳細

管の種類	掘上管①	掘上管②	掘上管③
採取地	X市水道局	X市水道局	Y県水道局
布設時期 (供用年数)	1980年 (27年)	1972年 (35年)	1973年 (34年)
布設土壌	赤土	赤土	赤土/水なし
管長(mm)	1000	1000	1000
管径(mm)	150	150	150

4.2.3 管体調査

管体調査における管厚調査結果を以下に示す。計測は管端部から長さ方向 250mm 間隔 (5 カ所) の各位置において管円周方向に 4 点の計 20 点で行った。このようにして得られた 20 点の計測値の平均値をもって管厚とした。管厚およびケレン作業前後の各掘上管の外面の状況を表-4.2 に示す。

表-4.2 掘上管の管厚および外面状況

管の種類	掘上管①	掘上管②	掘上管③
管厚 (mm)	9.8	9.1	8.6
管体調査実施前 (除錆前)			
管体調査実施後 (除錆後)			

4.3 実験結果および考察

除錆の前後におけるピーク周波数および周波数スペクトルの変化を図-4.1 に示す。また管厚とピーク周波数の関係を図-4.2 に示す。まず除錆の前後におけるピーク周波数および周波数スペクトルの比較から、除錆の前後におけるピーク周波数の変化は小さく、周波数スペクトルにおいてもその形状は大きく変化していない。管厚とピーク周波数の関係については、実際に外面腐食を生じた管においても管厚が薄くなるとピーク周波数は小さくなるという結果を得ることができた。

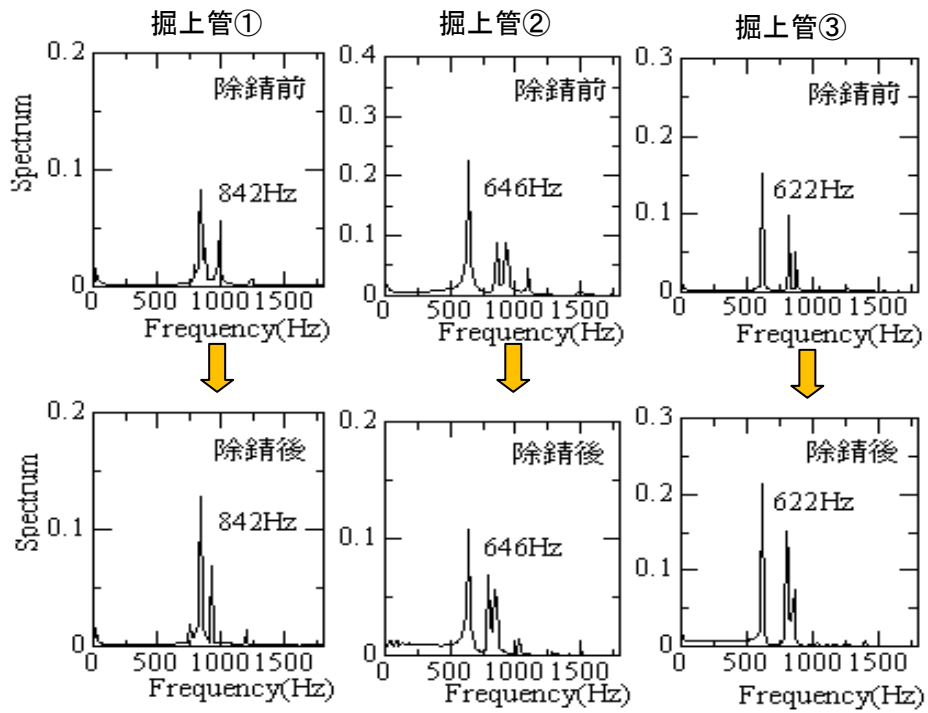


図-4.1 除錆前後の周波数スペクトルの比較

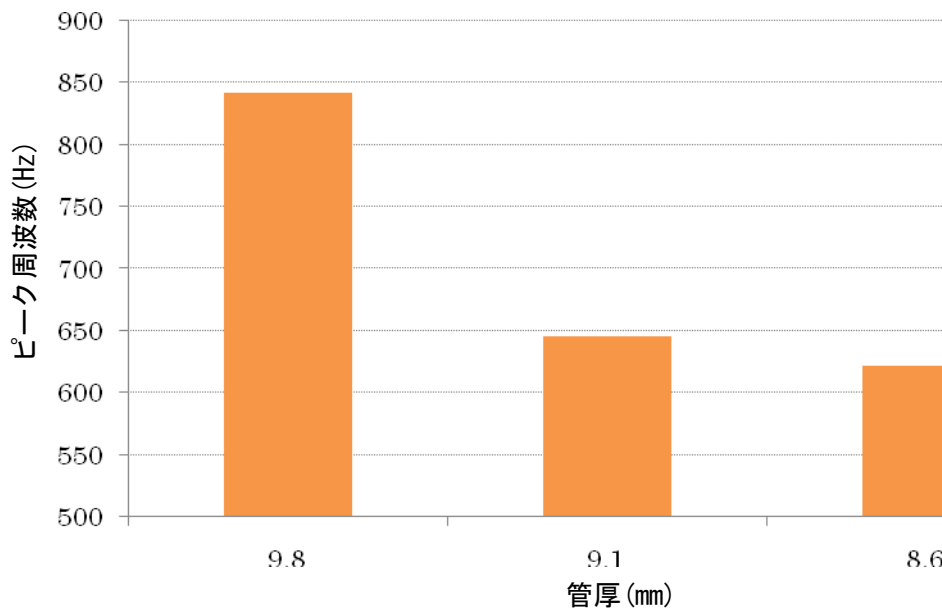


図-4.2 管厚とピーク周波数の関係

4.4 ダクタイル鋳鉄管の老朽度評価への適用性

ここで一例として、管径 150mm 管長 1000mm の管の健全度ランクと衝撃弾性波法により得られるピーク周波数との関係を、日本水道協会の水道施設更新指針²⁾を参考に基つき整理したものを表-4.3 に示す。この表に示すように、種々のモデルのピーク周波数と健全度とに対応関係がみられることから、部分的に減肉した管においても健全度ランクを判別できる可能性が示唆されたものと考えられる。

表-4.3 健全度定義詳細およびモデルの関係（管径 150mm 管長 1000mm での一例）

	健全度 A	健全度 B	健全度 C
管厚 (mm)	7.5~5.6	5.5~3.6	3.5~
モデル名および 〔最小管厚 (mm) — ピーク周波数 (Hz)〕	健全管 [7.5—693] 1mm 切削管 [6.5—556]	2-A [5.5—576] 2mm 切削管 [5.5—527] 2-B [4.5—546] 3mm 切削管 [4.5—507]	2-C [3.5—527] 4mm 切削管 [3.5—478] 2-D [2.5—498] 5mm 切削管 [2.5—468]
ピーク周波数 (Hz)	~550	549~500	499~

4.5 まとめ

本章では、実際に共用されていたダクタイル鋳鉄管を地中から掘り上げ、その管に対し衝撃弾性波法を適用することにより、その老朽度評価を試みた。以下にその検討結果をまとめる。

- 1) 実験において外面腐食を生じた管においても、管厚が減少するとピーク周波数が低下することが明らかとなった。また、管外面に付着した腐食生成物が本手法に与える影響は小さいことも確認できた。
- 2) 実際に外面腐食を生じたダクタイル鋳鉄管においても管厚が減少するとピーク周波数が下がるという結果が得られた。この結果は、解析および供試管実験で得られた結果と同様であった。
- 3) 外面腐食により部分的に減肉した管であっても、ピーク周波数を用いて、たとえば健全度ランク A, B, C 程度の識別ができる可能性があることが確認された。

第5章 結論

本研究では、衝撃弾性波法に基づくダクタイル鋳鉄管の老朽度評価手法に関する基礎的な検討を行った。具体的には、まず、衝撃弾性波法による鋳鉄管の老朽度評価の適用性について検討ならびに評価パラメータの確認を行うため、衝撃応答解析を行った（第2章）。この結果に基づき、外面を1mmずつ切削し、肉厚の異なる各供試管を対象に衝撃弾性波法による測定を行い、手法の妥当性についての検討を行った（第3章）。さらに、外面腐食などによって減肉レベルが不均一となるケースとして堀上管を取り上げ、本手法の適用性についての検討を行った。ここでは、除錆前後におけるピーク周波数の変化を確認するため、管体調査を併せて実施し、両者の結果を比較・検証した（第4章）。

以下に本研究で得られた結論を示す。

- 1) 衝撃応答解析の結果、管厚が小さくなると、ピーク周波数も小さくなることが明らかとなった。
- 2) 管径が一定の場合では、管長の違いがピーク周波数に与える影響は小さく、また、管径が大きくなるとピーク周波数が低くなる傾向が解析により把握できた。さらに、管長が長くなるほど、および管径が大きくなるほど、管厚の減少によるピーク周波数の低下の程度が小さくなることも併せて明らかにした。
- 3) 1) および2) より、ダクタイル鋳鉄管の老朽度評価においては、衝撃弾性波法により得られる周波数分布におけるピーク周波数に着目することが、その評価においては有効であることがわかった。
- 4) 衝撃弾性波法を用いてピーク周波数を測定することにより、鋳鉄管内面のエポキシ粉体塗装やモルタルライニングの違いによらず、管厚を定量的に評価できる可能性があることを明らかにした。
- 5) 堀上管に対して衝撃弾性波法を適用した結果、除錆前後においてピーク周波数が変化しないことを確認した。したがって、外面腐食による錆がピーク周波数に与える影響は小さい。また、管厚とピーク周波数との間に相関があることから、管厚が不均一となる堀上管においても、衝撃弾性波法を適用できると考えられる。
- 6) 以上より、衝撃弾性波法によって測定されたピーク周波数から管厚を評価することにより、ダクタイル鋳鉄管の老朽度を判別する方法としては、衝撃弾性波法によって測定されたピーク周波数を活用することが有効であると考えられる。

謝辞

本研究は、(財)水道技術研究センターの NewEpoch プロジェクトにおける基礎研究の一環として行ったものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 皆木卓士, 浅野雅則, 鎌田敏郎, 舟橋孝仁: 弾性波を用いた下水道管路の劣化診断手法に関する研究, 下水道協会誌, Vol.41, No.505, pp.119-129, 2004.11
- 2) 社団法人 日本水道協会: 水道施設更新指針, p.70, 2005.5