

図 5.3.30 埋設 VP 管で得られた出力エコー
(埋設約 25 年、 $\phi 75\text{mm}$ 、長さ 20m)

(4) 要約と結論

1) 音響エコー法で得られた測定結果と実際の腐食状況との対応

配管の内部を確認すると、内部に大きな錆こぶがあることが確認され、これらの錆こぶがピーク強度として検出されたと考えられる。測定箇所によって、錆こぶが存在するにもかかわらず、応答波形は得られていない。これは付着物の存在する位置より前方に存在する様々な堆積物の影響により、エコーに減衰が生じ、存在する錆こぶが検出されなかったと考えられる。従って、音響エコーにより管内面に存在する堆積物を測定することは可能であるが、管内面に付着している錆こぶを堆積物と分離して検出することは現時点で困難であると考えられる。また、試験体内面に存在する堆積物の高さで応答エコーに関して相関は特に見られない。このことから、現状では堆積物の高さの特定に関しても難しいと考えられる。

2) 実機装置試作機の製作とそれを用いた模擬埋設管路の適用試験

本研究では実管路に使用する試作機を製作し、実際の模擬埋設配管にて試験を実施した。その結果、堆積物が存在すると考えられる箇所より出力エコーが得られ、本方法が適用できることが示された。

5.4 電磁波の伝播と反射を用いた金属製水道管路の欠損の検出 (電磁波信号発生ピグ流下法)

研究担当委員／横浜国立大学 朝倉 祝治

(1) 電磁波信号発生ピグ流下法の原理と特徴

1) 電磁波信号発生ピグ流下法の原理

水流がある配水管に電磁信号を発生し続けるピグを挿入する。ピグの前後には水に電磁波を発生させる装置を取り付ける。電磁波は铸铁管に流れ反射と吸収をおこなう。その応答を消火栓などの立ち上げ部に設置したアンテナで検出する。ピグは水流によって流下し図 5.4.1 及び図 5.4.2 のように各々の場所の肉厚に相当した信号を検出用アンテナが受信する。

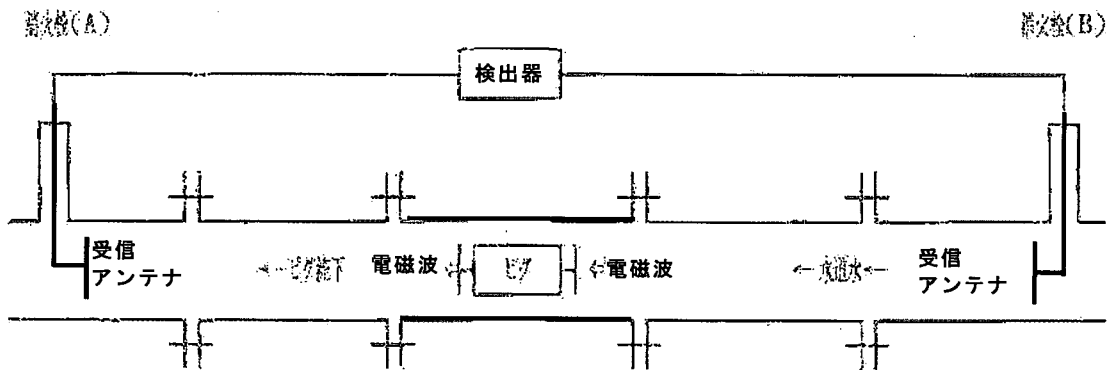


図 5.4.1 信号発生ピグによる管壁肉厚測定の実理

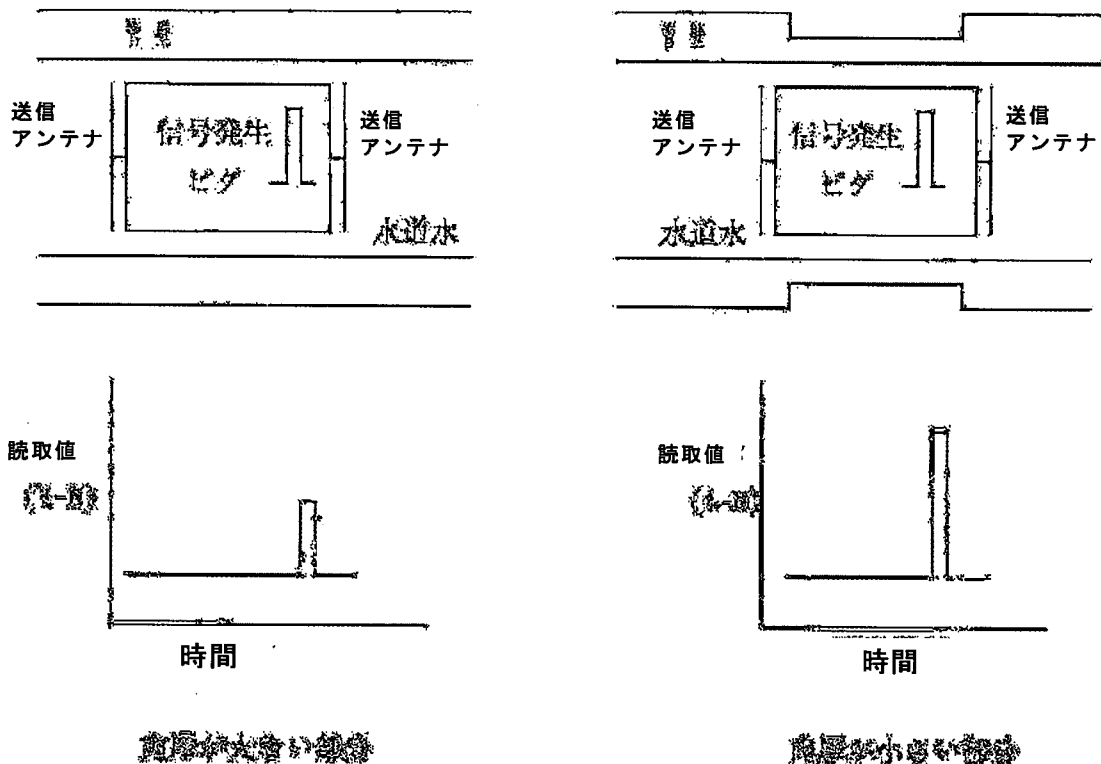


図 5.4.2 アンテナ A-B の間に観察される信号(A-B)

2) 電磁波信号発生ピグ流下法の特徴

- ① 電源を内蔵し、独立して動くピグを水流にのせて流すだけで内外面からの腐食による減肉を測定できる。
- ② ピグには簡単な信号発生器を内蔵させるだけでよく、小さなピグが作成できるため、小口径管にも対応できる。
- ③ 比較的安価な測定器で対応できる。
- ④ 動作原理から信頼性の高いデータが得られる。
- ⑤ 流水中で測定できる。

(2) 異なる長さの入力信号発生装置を用いた模擬水道管への適用実験

1) 試験方法

試験は長さ 1000mm、 ϕ 50.8mm、厚さ 3mm のステンレス鋼管を使用した。鋼管両端から 1cm の位置に読取装置を接続した。また、試験体は図 5.4.3 に示すように 30cm ごとに正常区間、欠損区間、正常区間とした試験体を作製した。欠損部の割合は 5%、10%、20%、40%とした。

電磁波信号の発生は図 5.2.2.4 に示す信号発生ピグを使用した。信号発生ピグは長さ 10cm、20cm、30cm のものを使用した。

ステンレス鋼管の片側は栓をし、内部に 5%食塩水を加えた。ステンレス鋼管内部に信号発生ピグを入れ、信号を入力し、ステンレス鋼管に接続された出力端子から、出力値を読取った。

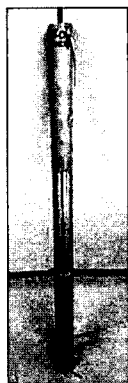


図 5.4.3 試験に使用したステンレス鋼管

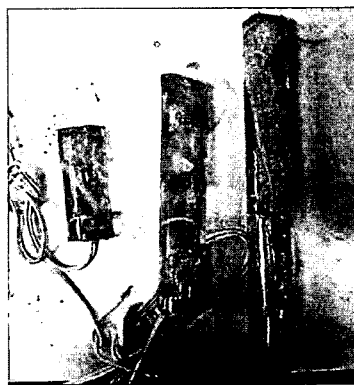


図 5.4.4 試験に使用した信号発生ピグ

2) 試験結果と考察

各信号発生ピグでの測定結果を図 5.4.5～図 5.4.7 に示す。欠損率と最大出力値の関係を図 5.4.8 に示す。図より、出力値は欠損率と比例関係にあることが確認された。また、得られた近似曲線の傾き及び切片と入力信号発生装置長さの関係を図 5.4.9 に示す。

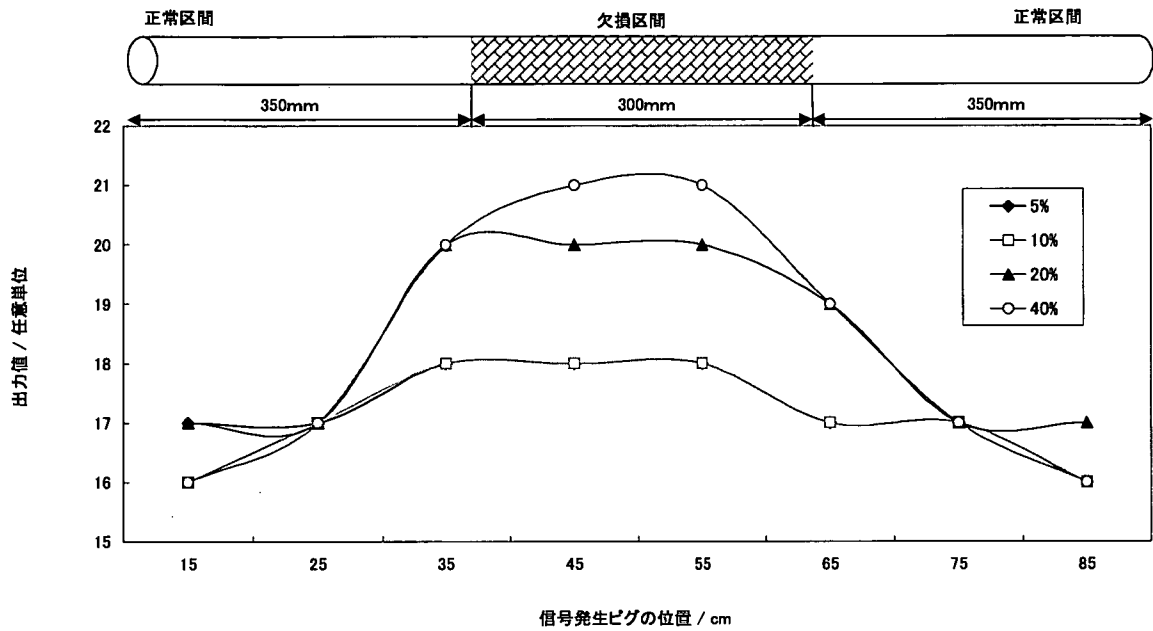


図 5.4.5 信号発生ピグ 10cm での出力値

※信号発生ピグの位置は管底面から信号発生ピグ中央部までの位置を表す。

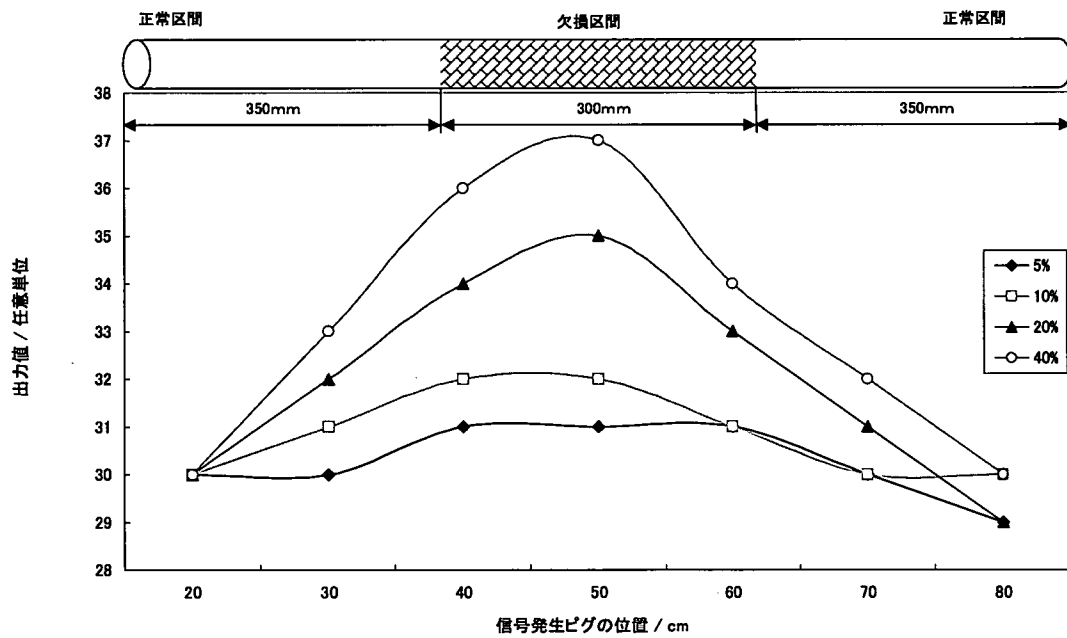


図 5.4.6 信号発生ピグ 20cm での出力値

※信号発生ピグの位置は管底面から信号発生ピグ中央部までの位置を表す。

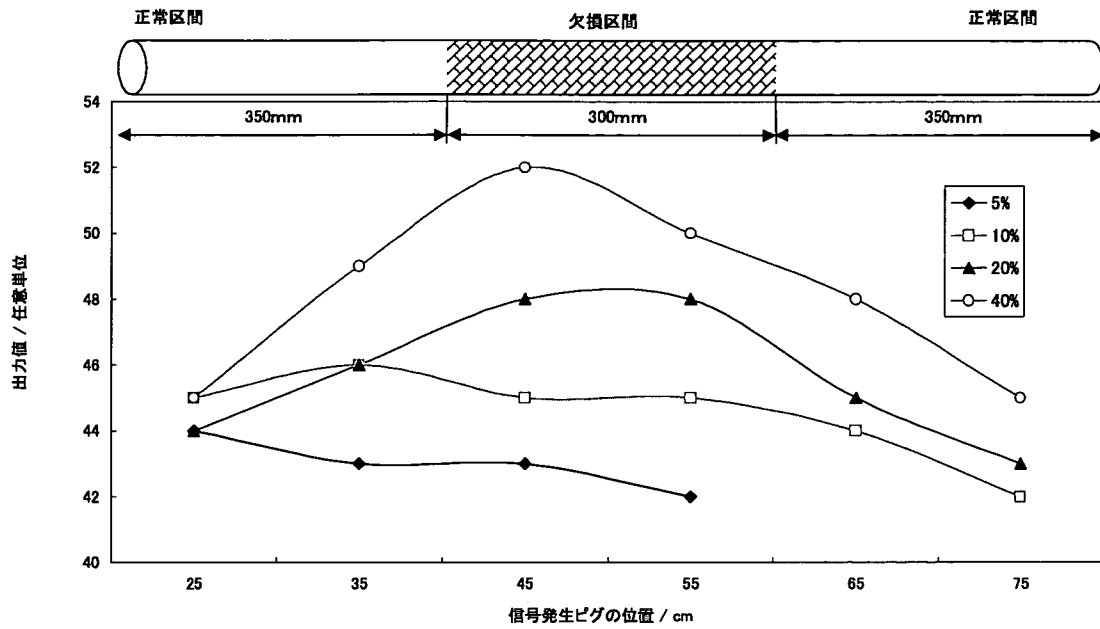


図 5.4.7 信号発生ピグ 30cm での出力値
 ※信号発生ピグの位置は管底面から信号発生ピグ中央部までの位置を表す。

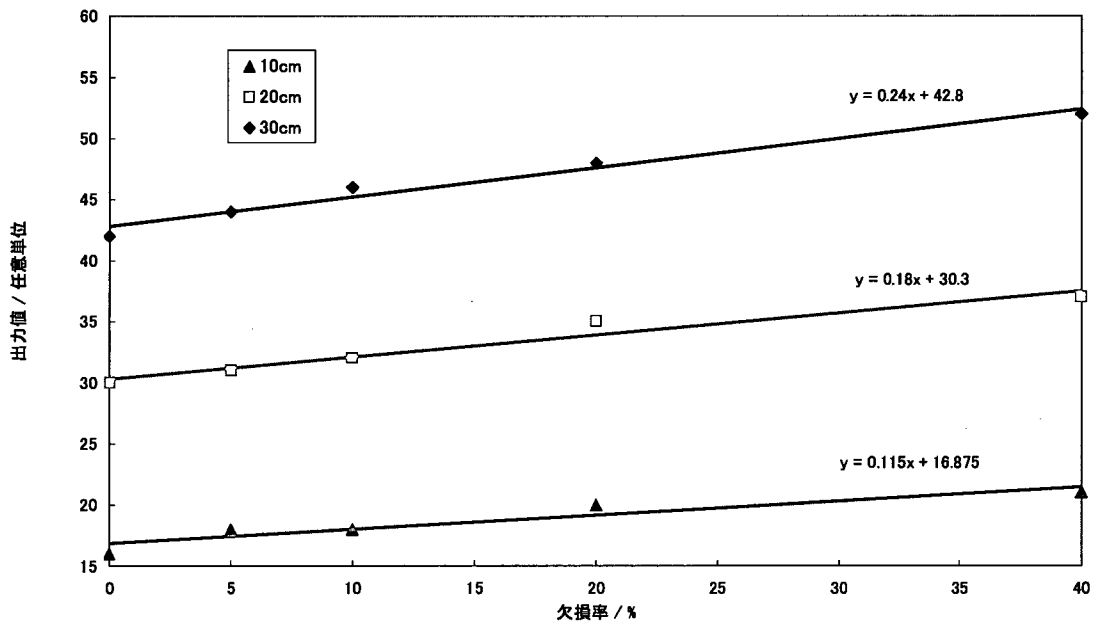


図 5.4.8 各試験条件での最大出力値と欠損率の関係

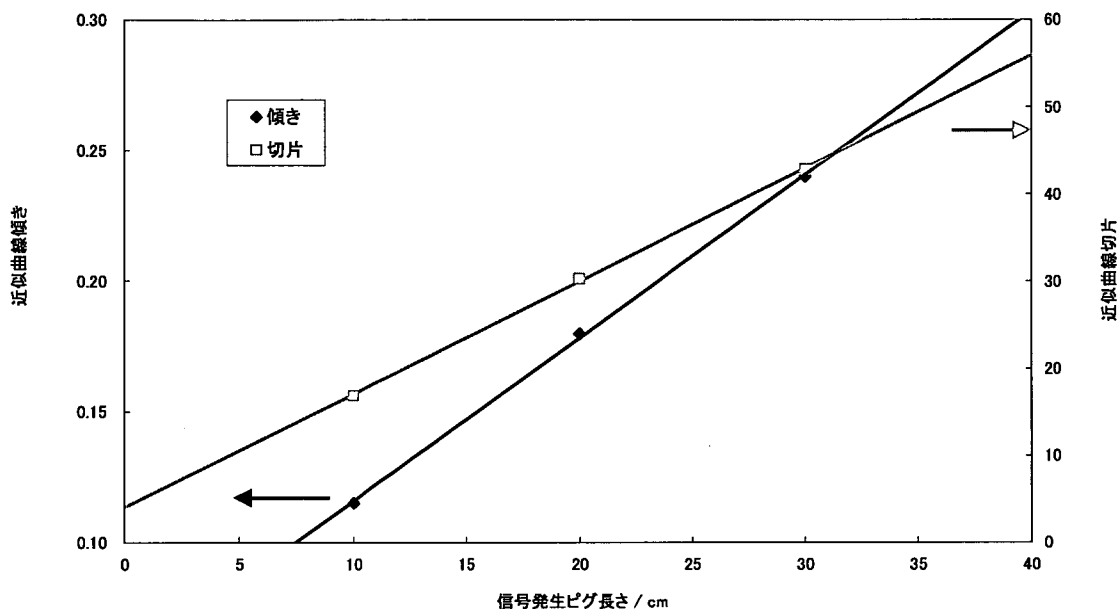


図 5.4.9 得られた近似曲線の傾き、切片と信号発生ピグ長さの関係

(3) 濃度の異なる食塩水で満たされた模擬水道管への適用実験

1) 試験目的

前項の実験では、模擬水道管としてステンレス鋼管、溶液として 3%食塩水を使用した。しかし、実管路においては、铸铁管、水道水環境である。従って、現試験よりもより厳しい環境での測定となり、そのような環境においても測定できる機器を作製しなければならない。そこで、本試験では、食塩水の濃度を変えて試験を実施した。

2) 試験方法

試験は長さ 1000mm、 ϕ 50.8mm、厚さ 3mm のステンレス鋼管を使用した。鋼管両端から 1cm の位置に読取装置を接続した。また、試験体は図 5.4.3 に示すように 30cm ごとに正常区間、欠損区間、正常区間とした試験体を作製した。欠損部の割合は 0%、5%、10%、20%、40%とした。

電磁波信号の発生は図 5.4.4 に示す信号発生ピグを使用した。信号発生ピグは長さ 10cm のものを使用した。

ステンレス鋼管の片側は栓をし、内部に 3%食塩水、2%食塩水、1%食塩水、水道水を加えた。ステンレス鋼管内部に信号発生ピグを入れ、信号を入力し、ステンレス鋼管に接続された出力端子から、出力値を読取った。

3) 試験結果と考察

①入力した電磁波信号に対する出力値の応答

入力した電磁波信号に対する出力値の応答曲線を図 5.4.10 に示す。図より、欠損区間においては出力波形が増大し、欠損を検知していることが確認された。

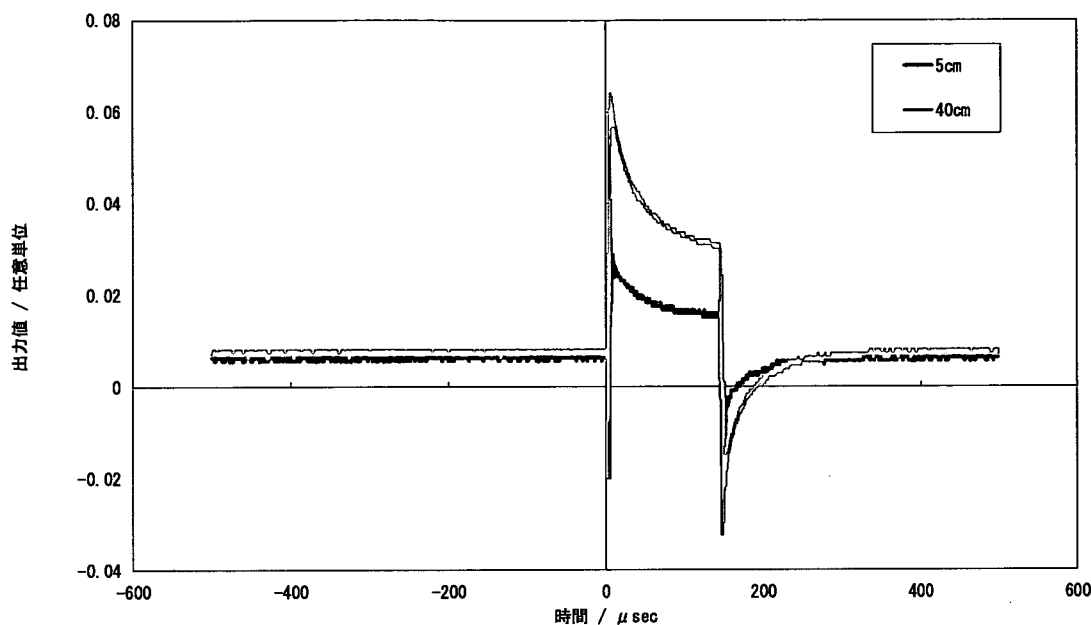


図 5.4.10 得られる出力波形
 ※3%食塩水で信号発生ピグ位置 5cm と 40cm での波形

②信号発生ピグの位置による出力値の変化

信号発生ピグの位置による出力値の変化を図 5.4.11～図 5.4.14 に示す。図より、欠損区間において出力値が増大し、位置による欠損を検出していることが確認された。

③欠損率の変化による出力値の変化

欠損率の変化による出力値の変化を図 5.4.11～図 5.4.14 に示す。図より、欠損率の増加に伴い、欠損区間での出力値が増大していることが確認された。各条件での欠損区間の最大値と欠損率の関係を図 5.4.15 に示す。図より、欠損率の増加に伴う出力値の変化には線型関係が得られると考えられる。

④溶液の濃度変化による出力値の変化

溶液の濃度変化による出力値の変化を図 5.4.11～図 5.4.14 に示す。図より、溶液濃度の低下により、欠損が大きくなった場合においても、その検出が困難であると考えられる。また、水道水に関しては検出不能であった。これは溶液の伝導率が濃度の低下と共に減少するため、検出が困難なことが示される。しかし、これは本実験で使った信号発生ピグの出力が低い為生じた結果であり、より高出力の信号発生ピグを使用することによって、出力信号を増大し、検出が可能であると考えられる。

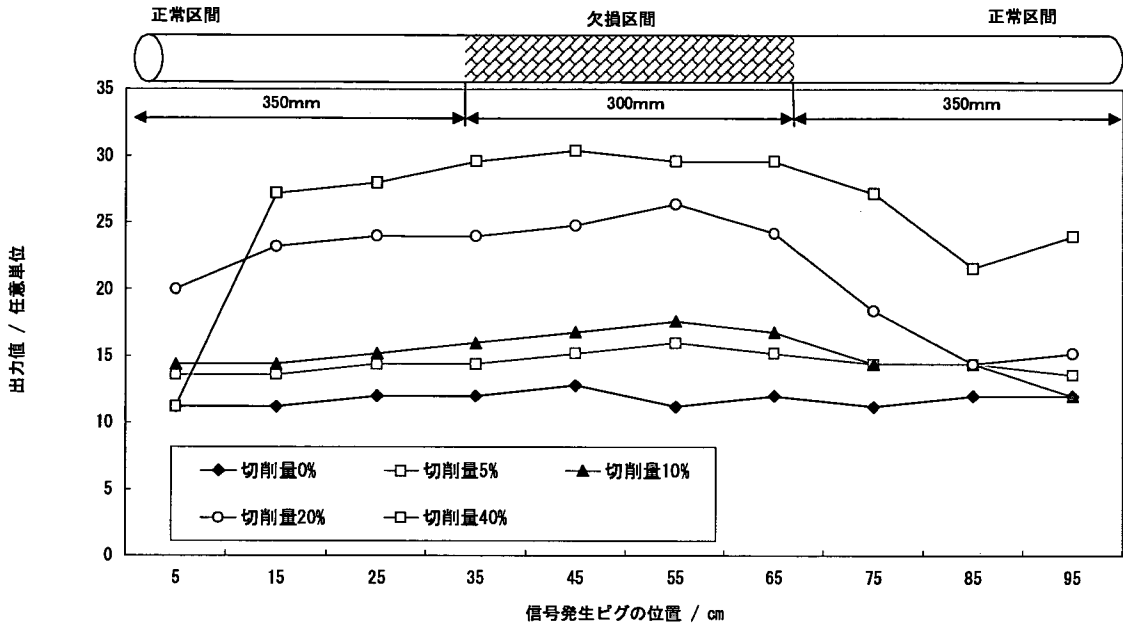


図 5.4.11 3%食塩水での出力値

※信号発生ピグの位置は管底面から信号発生ピグ中央部までの位置を表す。

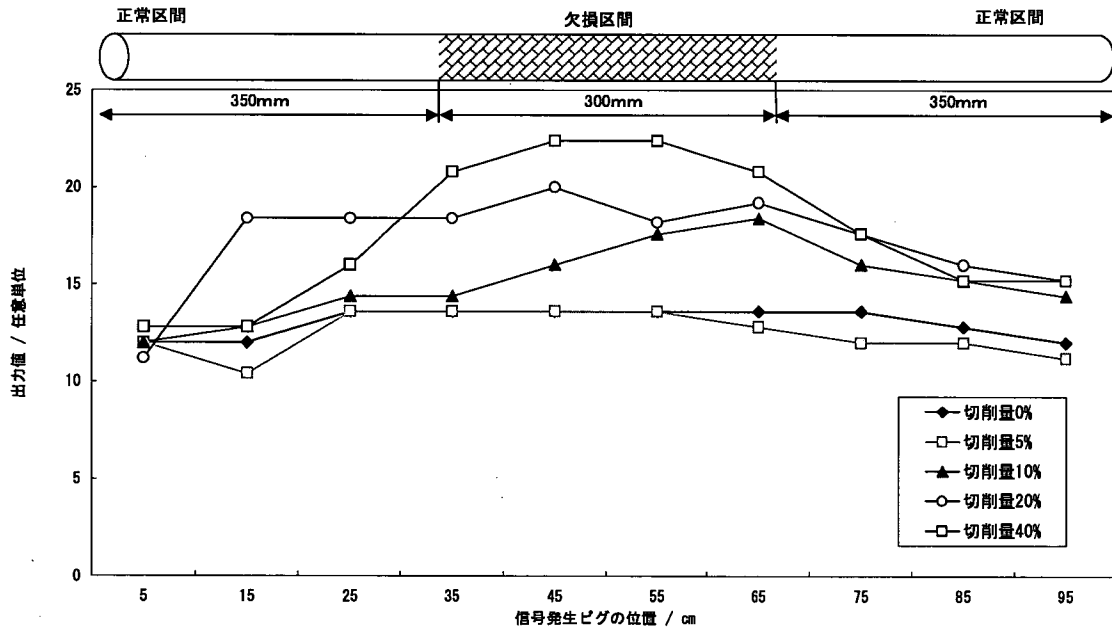


図 5.4.12 2%食塩水での出力値

※信号発生ピグの位置は管底面から信号発生ピグ中央部までの位置を表す。

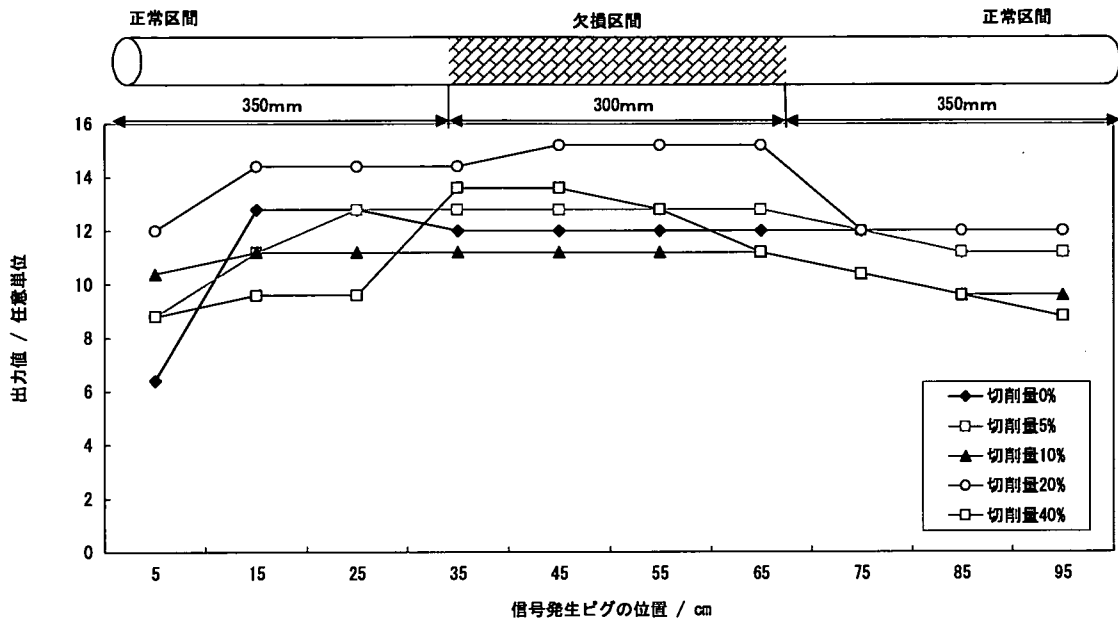


図 5.4.13 1%食塩水での出力値

※信号発生ピグの位置は管底面から信号発生ピグ中央部までの位置を表す。

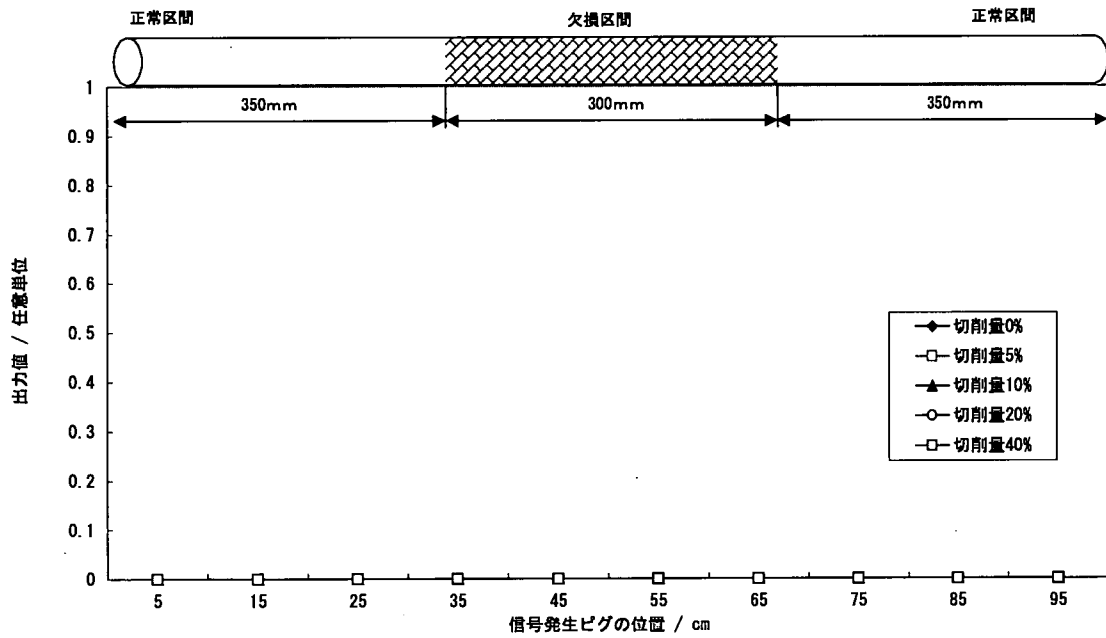


図 5.4.14 水道水での出力値

※信号発生ピグの位置は管底面から信号発生ピグ中央部までの位置を表す。

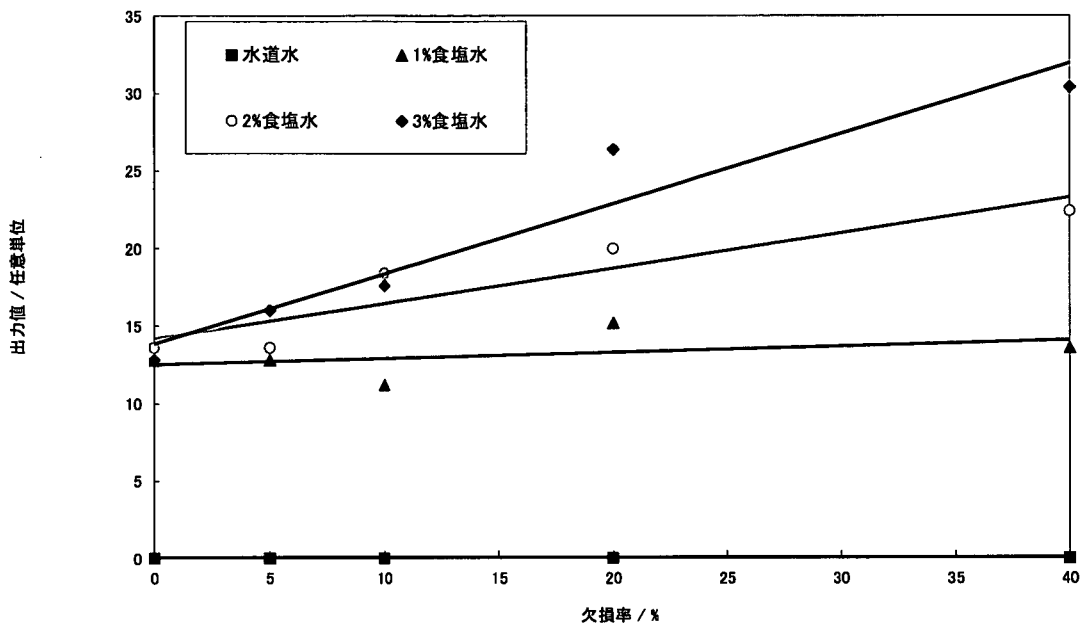


図 5.4.15 溶液濃度と欠損区間における最大出力値の関係

(4) 結果の要約

本研究結果を要約すると以下のようなになる。

- ① 信号発生ピグを管路に挿入することにより、管路の欠陥が検出される可能性が示された。
- ② 管路の欠損率によって出力値も変化し、欠陥の増大と共に出力値の増加が確認された。
- ③ 電気伝導度の低下と共に出力値の低下が確認された。これはより高出力の信号発生ピグの作製によって対応が可能であると考えられる。
- ④ 今の段階では水道水での応答は得にくかったが、食塩水を充填すれば非開削で管路の肉厚を測定できる。

5.5 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研究

研究担当委員／大阪大学大学院 鎌田 敏郎

第1章 序論

1.1 本年度の研究の目的

既往の研究により、衝撃弾性波法による劣化評価指標として、周波数分布を用いることで外面腐食を模擬して管を外面から全面的に切削した管長1m管径150mmのダクタイル鋳鉄管モデル供試体においては老朽度を定量的に評価することができることが明らかになっている。しかし、実際に外面腐食を生じた場合は減肉が部分的に進展することが一般的であると考えられ、そのようなケースに対しての本手法の適用性の検討は行われていない。

よって本年度は、外面腐食を生じて減肉が部分的に進展したダクタイル鋳鉄管を対象とした老朽度評価への衝撃弾性波法の適用性の検討を目的とした。検討として(I)実際に供用されていた掘上管においての本手法による計測とケレン作業後に行った管厚計測との比較、(II)部分的に減肉したモデルにおける衝撃応答解析によって部分的な減肉が本手法に与える影響の確認を行った。

1.2 本報告書の構成

第1章では、本年度の研究の目的について述べた。

第2章では、衝撃弾性波法の原理、老朽度評価手法に関する既往の研究について述べた。

第3章では、支持条件および打撃方法の違いがピーク周波数に与える影響の確認に関する実験概要、またその実験結果について述べた。

第4章では、管厚、管径および管長とピーク周波数の関係の確認に関する実験および解析概要、またその結果について述べた。

第5章では、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の確認に関する実験および解析概要、またその結果について述べた。

第6章では、本年度の研究で得られた結論を述べた。

第2章 既往の研究

2.1 衝撃弾性波法

2.1.1 衝撃弾性波法の原理

衝撃弾性波法とは、固体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、固体表面において、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る。以上の方法により得られた受振波形から、最大振幅値、波形減衰時間、周波数分布などのデータが得られ、それらをもとに老朽度を評価する手法である。

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。そこで、弾性波計測を行い、得られた受振波形を高速フーリエ変換 (FFT) することで、その管の振動数を算出し、老朽度を評価しようとしたものである。

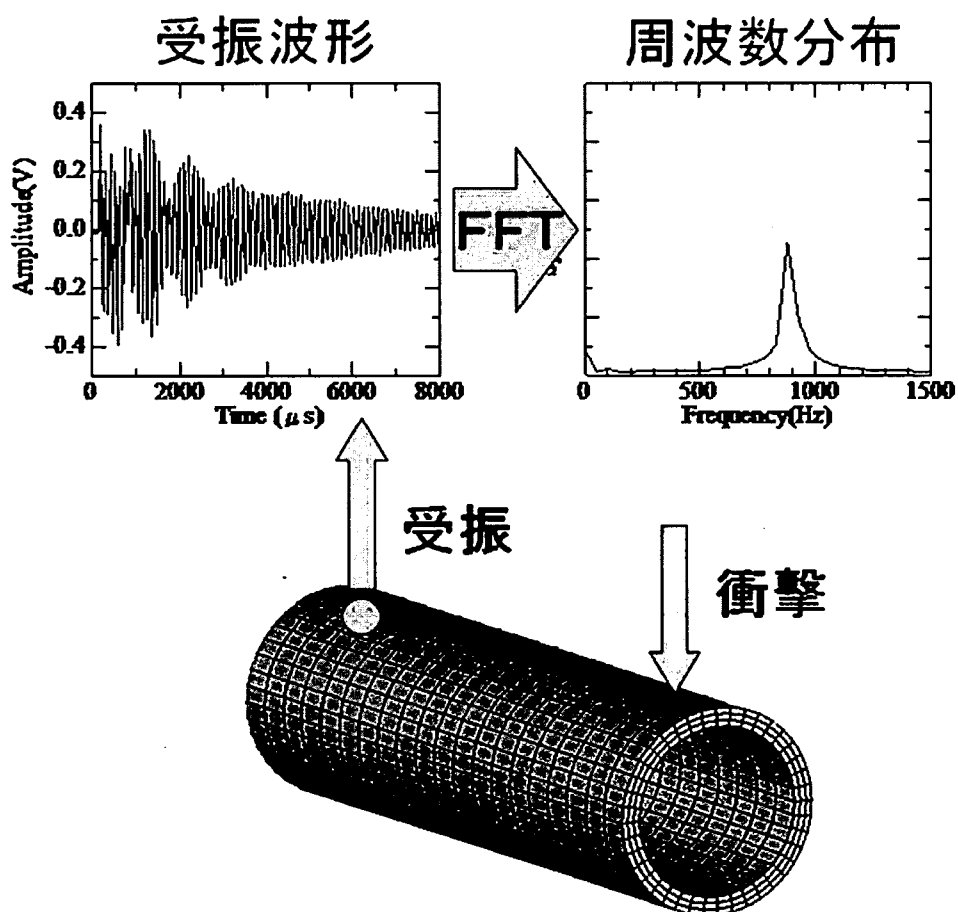


図 5.5.1 衝撃弾性波法の原理のイメージ

また、衝撃により入力された弾性波は、電気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弾性波計測も可能である。つまり、本手法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。その反面、部分的な減肉箇所を特定することができないという欠点がある。しかし、広範囲を効率よく評価できるという点で、本研究におけるダクタイル鋳鉄管の診断方法として適していると言える。

現在のところ衝撃弾性波法は、PC グラウトの充填評価、路床版の調査、トンネルの覆工厚さ、杭の根入れ深さ損傷程度、下水ヒューム管およびコンクリート下水管路の劣化評価などに用いられている。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。また、センサの貼り付け方法の違いが受振波形および周波数分布に与える影響は小さいことが確認されているため、本研究においてはセンサの貼り付けに両面テープを用いることとする。

2. 1. 2 ダクタイル鋳鉄管の老朽度評価

既往の研究で、ダクタイル鋳鉄管の老朽度評価への衝撃弾性波法の適用可能性について検討が行われている。供試体として内面エポキシ粉体塗装を施されたダクタイル鋳鉄管をベースに、外面腐食による老朽化を模擬して管を外面から 2mm 切削した管 (2mm 切削供試管) および 4mm 切削した管 (4mm 切削供試管)、孔食を想定した管 (削孔供試管) を作製し、それらと無垢の供試管 (健全供試管) について弾性波計測を行い、それぞれの受振波形と周波数分布を比較した。衝撃入力方法として、鋼球落下およびプラスチックハンマによる打撃が用いられている。

鋼球落下による受振波形において、2mm 切削供試管および 4mm 切削供試管では、健全供試管と比べて、波形の最大振幅値および波形継続時間が共に大きくなっている。これは管厚の減少に伴い管剛性も低下したことにより、外力に対する変形抵抗性が低下し、最大振幅値あるいは波形継続時間の増大につながったためであると考えられる。一方、削孔供試管においては健全供試管と比べて差が非常に小さく、孔食に関しては検知感度が十分とはいえないと考えられた。

鋼球落下による周波数分布において、削孔供試管ではピーク周波数が健全供試管よりも低い位置にシフトしており、4mm 切削供試管において全体的に低周波側の成分が卓越する現象が確認できた。また、2mm 切削供試管では程度が小さいものの、同様の傾向が確かめられた。プラスチックハンマ打撃の場合は、ピーク周波数が、健全供試管→削孔供試管→2mm 切削供試管→4mm 切削供試管と低周波側へシフトする傾向が見られ、

老朽度評価パラメータとしてピーク周波数に着目するところで、供試管における老朽度を図 5.5.2 に示すように定量的に評価することが可能であることがわかった。

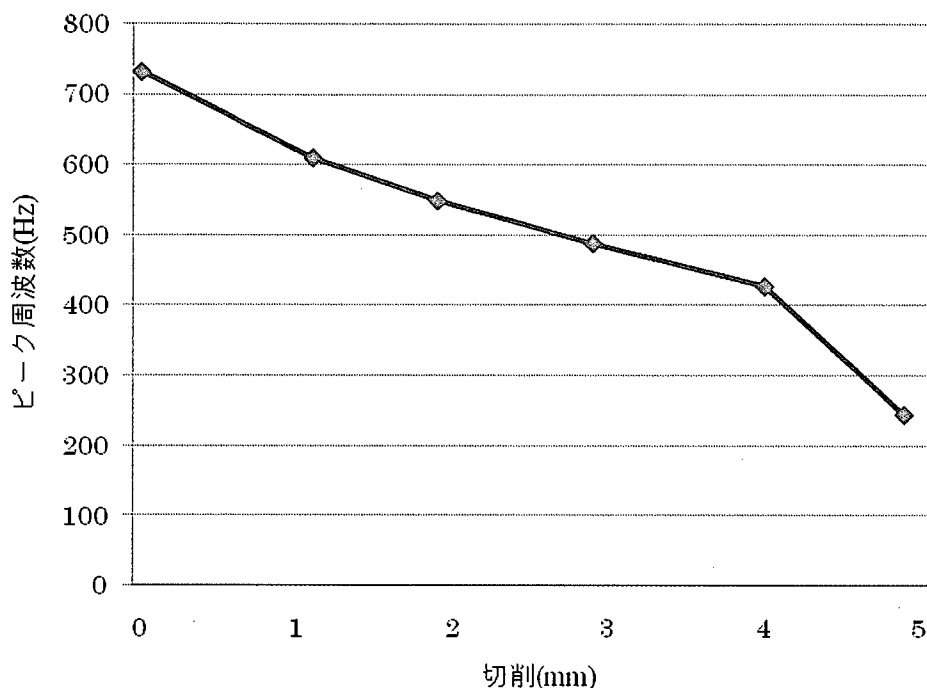


図 5.5.2 ピーク周波数と切削値の関係

2. 2 管の老朽度評価方法

2. 2. 1 管体調査

管体調査とは、管を開削し管外面の腐食量調査および管厚調査などを行うことによって老朽度を評価する手法である。

腐食量調査については、まずワイヤブラシ、テストハンマ等を用いて管外面の付着物や錆等を除去する。その後、腐食が認められたか所においてはデプスゲージ(孔食計)を用いて腐食深さを測定することにより腐食量を推定する。調査は管軸方向に 1~2m 程度の範囲で実施し、腐食の大きさや発生数の位置関係が明確になるようにエリア分けをして行う。

管厚調査においては、グラインダ等により管健全部を露出させた後、超音波厚さ計を用いて管厚測定を行う。測定は管円周方向に 4 点または 8 点(管の管径、現地の状況により判断)で行い、管厚が十分であるか否かについて調査する。

この手法を用いれば、孔食の進展状況や管厚の減少を詳細にとらえることができるが、診断には開削およびケレン作業を必要とするため広範囲にわたるダクタイル鋳鉄管の診断には適しているとは言えない。

2. 1. 2 超音波診断法

超音波とは、人間の耳には聞こえないほどの高い周波数の音波のことであり、金属などの物体中を伝播しやすく、音波を一定方向だけに伝播する性質がある。また、物体中で伝播している超音波が、物体の端に当たったり、違う材質との境界に当たったりした時に反射するという性質をもっている。これらの性質を利用して部材の肉厚を調べる方法を超音波診断法という。土中にある管の場合、まず、探触子により超音波を管へ入射する。すると、図 5.5.3 に示すように管の中を伝達中の超音波が、境界で反射し返ってくる。この反射波を受信して、超音波の伝播速度と伝播時間から肉厚を算出する。この管の伝播速度を V (m/s) とし、伝播時間を T (s) とすると、肉厚 D (m) は式-2.1によって導かれる。

この手法を用いれば肉厚を推定することが可能だが、狭い範囲しか診断ができず、広範囲の診断には時間がかかるという欠点がある。そのため、検査対象として膨大な量があるダクタイル鋳鉄管の診断としては適しているとは言えない。

$$D = \frac{VT}{2} \quad \text{式-2.1}$$

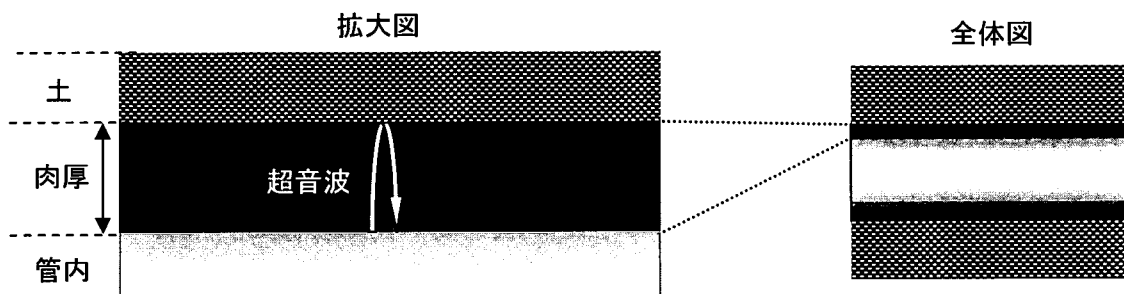


図 5.5.3 超音波の反射

2. 2. 3 渦流探傷法

金属材料の表面に交流磁場を発生させるコイルを置いた場合、金属材料の表面には渦電流が流れる。この渦電流は材料の透磁率、抵抗率などの電磁気的な性質や傷の有無など表面の状況によって変化する。渦流探傷法は、コイルのインピーダンスを測定することによって渦電流の変化状況を調べ、傷の有無や材質などを判定しようとする方法である。ガス管などで実績がある。

この手法を用いれば、どこがどれくらい減肉しているかが分かるうえ、検査自体に時間がかからないという利点があるのだが、部分的な減肉しか把握することができないという欠点もある。そのため、超音波診断法と同様に、膨大な量を検査する手法としては適しているとは言えない。しかし、衝撃弾性波法により異常が確認された箇所を対象とした二次的な試験法としては有効であるといえる。

第3章 支持条件および打撃方法の違いがピーク周波数に与える影響

3.1 はじめに

衝撃弾性波法は、打撃方法に応じて得られるデータが変化することが分かっている。本研究では、目的である外面腐食を生じて減肉が部分的に進展したダクタイル鋳鉄管を対象とした老朽度評価への衝撃弾性波法の適用性を検討するために、実際に供用されていた掘上管においての本手法による計測を行う。掘上管は外面腐食を生じたことによって表面に凹凸が発生しているために、切削供試管と比較すると、安定した打撃および支持が困難である。

そこで本章では、支持条件および打撃方法の違いがピーク周波数に与える影響を把握するとともに、より安定性に優れた計測を可能とする支持条件および打撃方法についての検討を行った。

3.2 実験概要

実験状況を図 5.5.4 に示す。

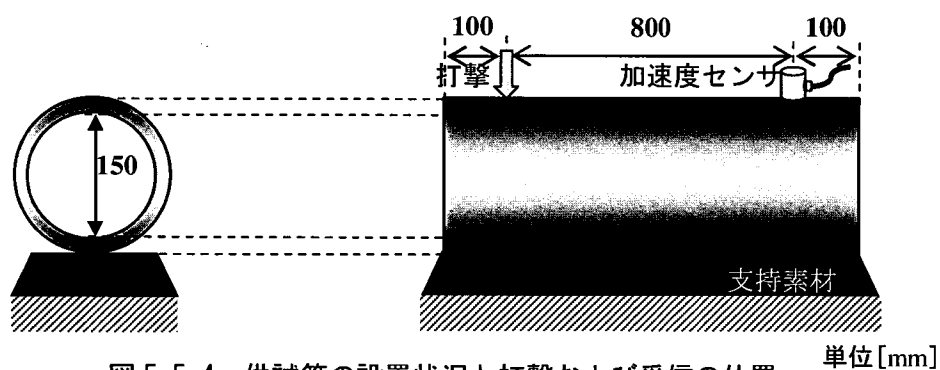


図 5.5.4 供試管の設置状況と打撃および受信の位置

3.2.1 供試管

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 1.0m に切断したものをベースにして作成したエポキシ粉体塗装管 3 種類, モルタルライニング管 1 種類, および供用年数 27 年 (1980 年布設) の管長 1.0m, 呼び径

表 5.5.1 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
健全モルタルライニング管	7.5	1000	150
掘上管	—	1000	150

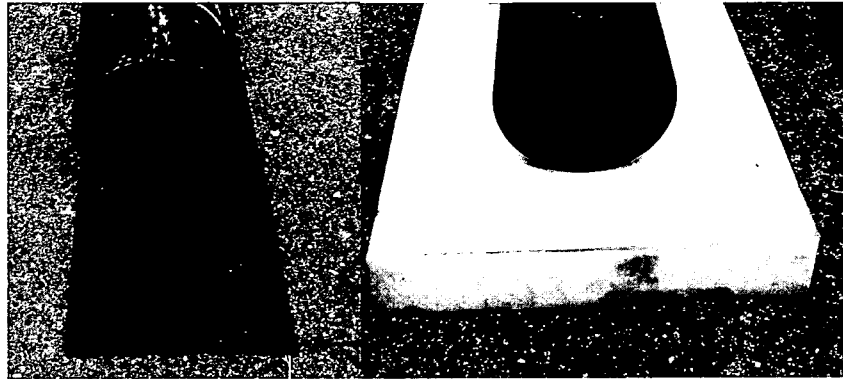


写真 5.5.1 支持状況

150mm の掘上管 1 種類の合計 5 種類の供試管を用意した。エポキシ粉体塗装管は、外面腐食による減肉を模擬して外面から全面的に切削した 4mm 切削供試管, 2mm 切削供試管, 健全供試管を用いた。モルタルライニング管は健全供試管を用いて実験を行った。

3. 2. 2 支持条件

支持条件の違いがピーク周波数に与える影響を確認するためにゴム板(厚さ 0.8mm)による支持およびウレタンフォーム(厚さ 7.5mm)による支持においてそれぞれ計測を行い、結果を比較した。ウレタンフォームは密度(JIS K7222)54.0±4.3kg/m³ 硬さ(JIS K6400-2)500±60N のものを使用した。それぞれの支持素材による支持状況を写真 5.5.1 に示す。

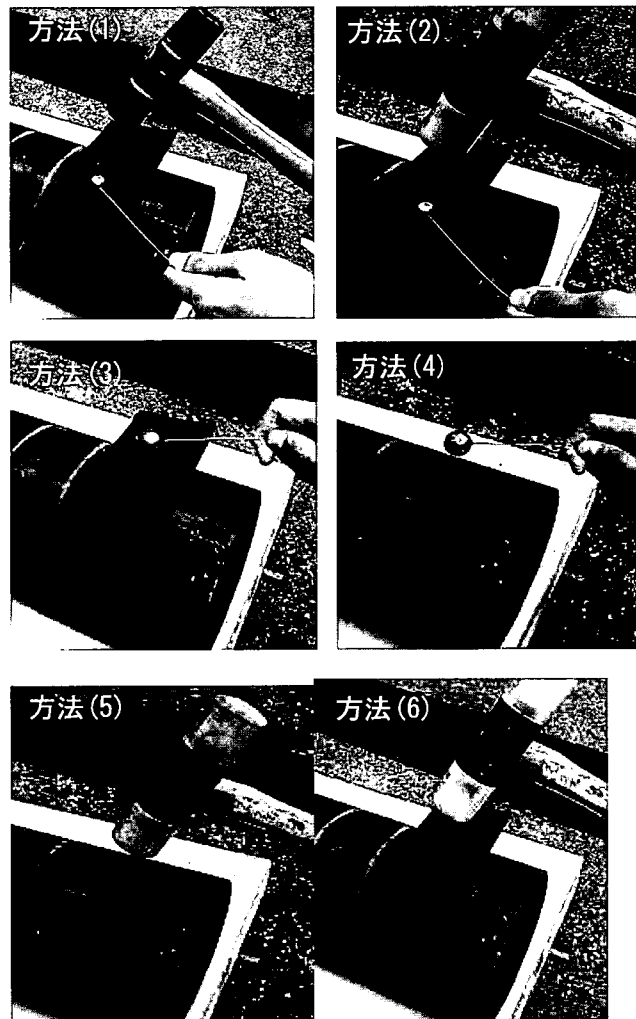


写真 5.5.2 打撃状況

3. 2. 3 打撃方法

支持条件とあわせて打撃方法の違いがピーク周波数に与える影響を確認するために上記の 2 種類の支持条件において以下の(1)～(6)の打撃方法でそれぞれ計測を行い、結果を比較した。それぞれの打撃状況を写真 5. 5. 2 に示す。

- (1) ゴム板上の鋼球をゴムハンマで打撃
- (2) ゴム板上の鋼球をプラスチックハンマで打撃
- (3) ゴム板上に鋼球で打撃
- (4) 鋼球で打撃
- (5) プラスティックハンマによる打撃
- (6) ゴム板上をプラスチックハンマで打撃

3. 3 結果および考察

3. 3. 1 結果

それぞれの支持条件および打撃方法において 4 回計測を行い計測値の安定性を比較した。その結果を表 5. 5. 2 に示す。また特に安定性の高い計測が困難であった掘上管における周波数スペクトルの一例を図 5. 5. 5 に示す。

表 5. 5. 2 支持条件および打撃方法ごとの計測の安定性

	健全 エポキシ管		2mm 切削 エポキシ管		4mm 切削 エポキシ管		健全 モルタル管		掘上管	
	ゴム板	ウレ タン	ゴム板	ウレ タン	ゴム板	ウレ タン	ゴム板	ウレ タン	ゴム板	ウレ タン
打撃方法(1)	—	—	◎	—	○	—	—	—	—	—
打撃方法(2)	○	◎	◎	◎	—	○	—	○	—	○
打撃方法(3)	◎	◎	○	○	—	—	◎	○	○	—
打撃方法(4)	—	○	—	—	—	◎	○	○	—	—
打撃方法(5)	—	◎	◎	◎	—	—	◎	○	○	—
打撃方法(6)	○	◎	◎	◎	○	◎	○	◎	—	◎

◎：非常に安定性が高い ○：安定性が高い

3. 3. 2 考察

- ・ほとんどの管においてウレタンフォームによる支持のほうがゴム板による支持と比較して安定性に優れた計測が行えた
- ・打撃方法(5)および(6)が他の打撃方法と比較して安定している
- ・特に安定した計測が困難である掘上管において、非常に安定性に優れていたのはウレタンフォームによる支持、打撃方法(6)における計測方法のみであった

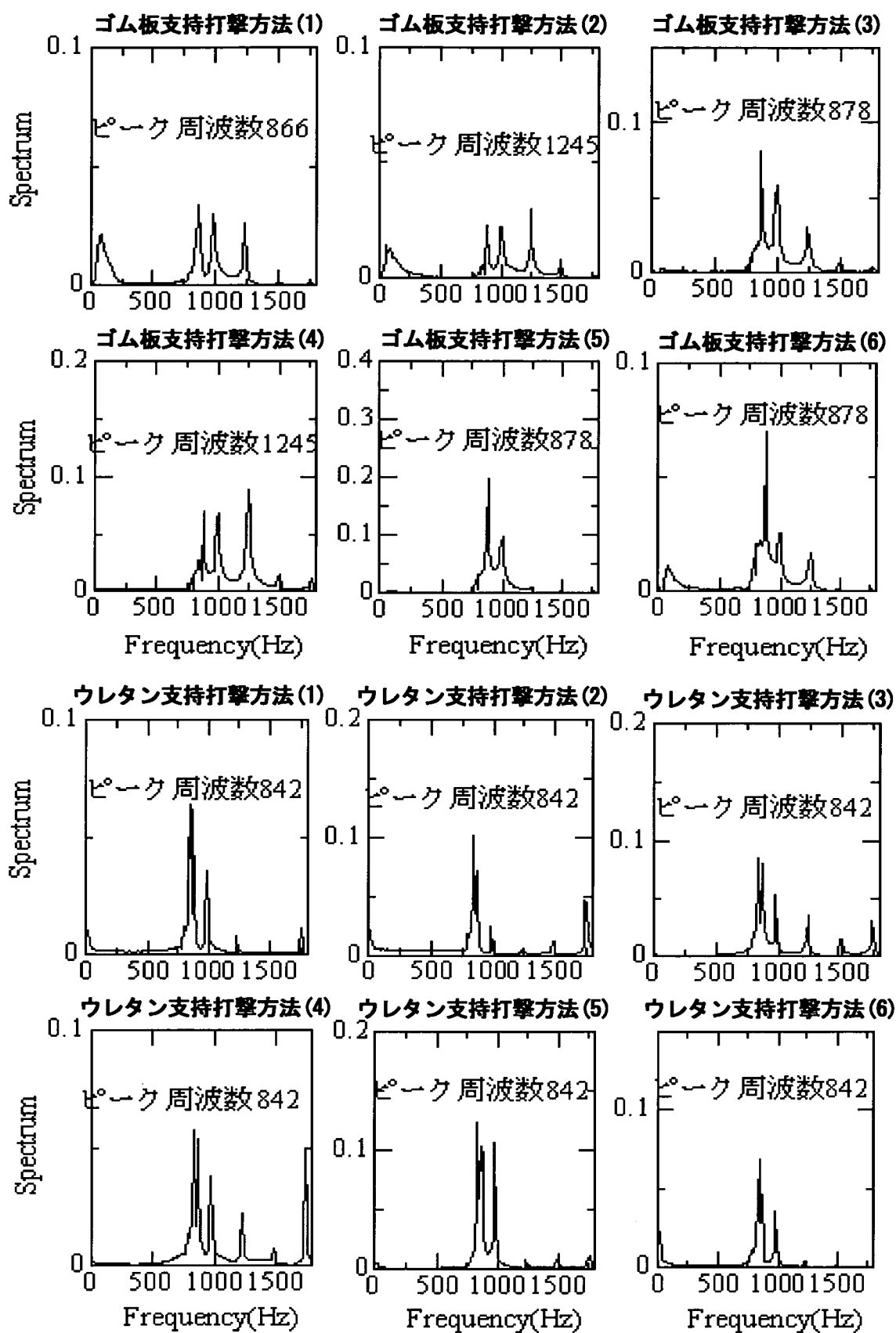


図 5.5.5 掘上管の周波数スペクトル

3. 4 まとめ

掘上管は、はじめに述べたように外面腐食を生じたことによって表面に凹凸が発生している。そのため、打撃のたびに管とハンマや鋼球との接触時間が異なることに起因して計測値にばらつきが出ていたと考えられる。管を直接打撃する方法よりもゴム板を挟んで行う打撃方法のほうが安定性に優れていたこともそのためであると予想できる。また伸縮性の高いウレタンフォームによる支持のほうがゴム板による支持と比較して安定性に優れていたことも、管表面の凹凸に起因したものであると思われる。

本章によって得られた結果から本手法に最適な支持条件および打撃方法はウレタンフォームによる支持においてゴム板上をプラスチックハンマで打撃する方法である。またその結果を踏まえて、本論文における以下のすべての実験は上記の最適な支持条件および打撃方法で行った。