

発生装置によって入力した数値を読取装置に置いて出力値を測定することで鋼管の欠損率、つまり鋼管の減肉量を求められる可能性が確認された。

(3) 水で満たされた模擬水道管への適用実験

1) 試験目的

前項の実験では鋼管に直接電磁波を加え、その応答から欠損部分と欠損率を検出できることを確認した。本項の実験では水中に電磁波を発射し、それに対する応答を実験管路の端で検出することにより、予想される結果が得られるか否かを検証することを目的とした。なお、本項の実験は水中でこの方法が原理的に動作することを確認する実験であるので、実験が容易な系を用いることにした。具体的には鋼材としてステンレス鋼を、水系として、食塩水を用いた。この実験条件は送信器と受信器の性能を上げることにより、鋳鉄と水道水の系に置き換えることは原理的に確実である。

2) 試験方法

試験には長さ 910mm、φ25mm、厚さ 1mm 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 3.6.37 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 1、及び 30cm を一つの区間とし、中間部に 5cm の幅で欠損部を作成した試験体 2 の 2 つの試験体を作成した。欠損部の作成は、欠損区間内に直径 4mm の穴を開け、管路の欠損部を模擬した。

送信アンテナは写真 3.6.11 に示す、長さ 300mm、φ20mm の円柱状送信アンテナを使用した。

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入力信号発生装置を入れ、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

管路に欠陥がある場合及び欠陥がない場合において、それぞれ入力信号を加えた時の応答を図 3.6.38 に示す。また、測定区間毎の出力値を図 3.6.39 に、下記の式によって算定した欠損率と出力値の関係を図 3.6.40 及び図 3.6.41 に示す。

$$\begin{aligned} \text{欠損率}[\%] &= \frac{\text{欠損部分の表面積}}{\text{端子間の表面積}} \times 100 \\ &= \frac{\pi \times 0.2^2 \times n}{2 \times \pi \times 1.25 \times 30} \times 100 \end{aligned}$$

ここで、n は開けた穴の個数である。

①入力した電磁波信号に対する出力値の応答

図 3.6.38 に管路に欠損がある場合とない場合における出力信号を示したが、欠損の有無によって明確な出力信号の差が見られた。このことから、管路中にピグを流下し、電磁波信号を発生させた場合、管路の状況に対応した応答が得られる可能性が示された。

②管路の状態による出力値の変化

図 3.6.39 に試験体 1 を用いて管路中に電磁波を発生させながら入力装置を移動させた場合の応答を示す。図より管路の欠損区間になるにつれ、出力値の増大し、最も欠陥が大きい部分において出力値が最大となった。従って、管内の状態により、応答が大きく変化することから、管内の欠損状態を求められる可能性が示された。

③欠損率の変化による出力値の変化

図 3.6.40 及び図 3.6.41 に各試験体の欠損率と出力値を示した。なお、出力値は隠し検体における最大出力値を用いている。図 3.6.40 より、試験体 1 では欠損率の増加と共に出力値が増加し、欠損率と出力値が比例関係にあることが示された。従って、出力値を読取る事によって、測定区間内での欠損率が求められる可能性が示された。

一方、図 3.6.41 より試験体 2 では出力値がある段階になると一定の値を示した。これは入力された電磁波が水中を流れる際の電磁波分布が他の欠損区間によって影響を及ぼしている為と考えられる。このことから、欠損部に対する解像度と送信ピグの大きさには今後の研究が必要である。

(4) 結果の要約と今後の研究課題

1) 結果の要約

本研究結果を要約すると以下ようになる。

- ①電磁波送信器とアンテナを備えたピグを水中に流下させて、管壁の肉厚を測定する方法の原理と特徴について述べた。
- ②水の入っていない模擬水道管路に欠損をつけて、本方法を適用し、その有効性を確認した。
- ③水の入っている同様の模擬水道管に本方法を適用し、次の結果を得た。
 - (i)1m 長の管の中央につけた 30cm の欠損を 15cm 程度の分解能で分離できた。
 - (ii)検出出力はピグが欠損部の真上に来た時に最大値を示し、高い感度で欠損を検出することができた。
 - (iii)欠損率とピーク出力値は線型の関係にあり、1%程度の欠損も容易に検出することができた。
 - (iv)狭い範囲に複数の欠損がある場合には、欠損率と出力の関係は単純ではなくなる。

なお、本方法の原理の有効性を確認する為に行う実験であったので、模擬水道管としてはステンレス鋼管を、溶液には 5%食塩水を用いて実験を行った。この条件は本方法の有効性に影響を与えない。淡水と鋼管の組合せにおいても、流下ピグの性能向上と検出器の感度を上げることにより、同様の結果が得られることは理論的に確実である。

2) 今後の研究課題

今後の研究課題を以下に記載する。

- ①ピグ送信器の出力の増強と検出器の感度を上げることにより、淡水と鋼管の組合せ

で本方法が適用できるように開発を進める。

- ②ピグの大きさ及び形状を工夫して、分解能を上げる研究を行う。
- ③複数の欠損部が近接してある場合に得られる出力を解明し、その実用的意味づけを行う。
- ④実際の堀上管について有効性を確認する。
- ⑤継手部分がある水道管についての適用実験を行う。

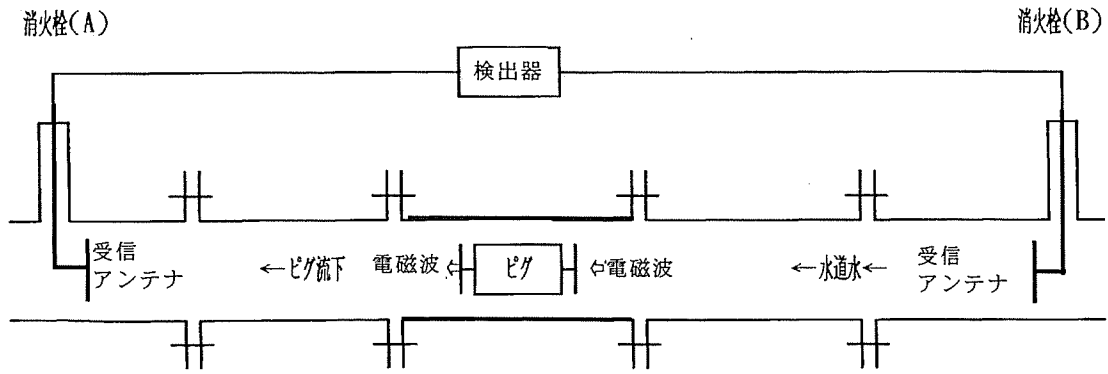


図 3.6.32 信号発生ピグによる管壁肉厚測定の実理

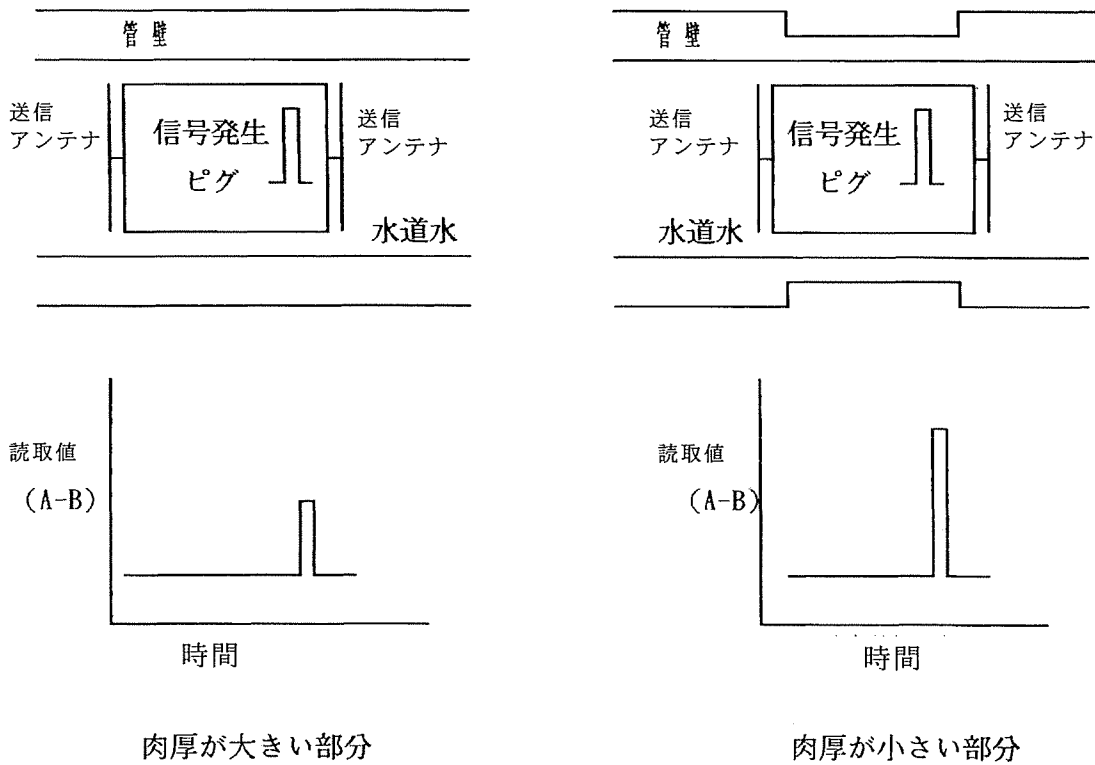
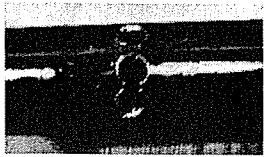
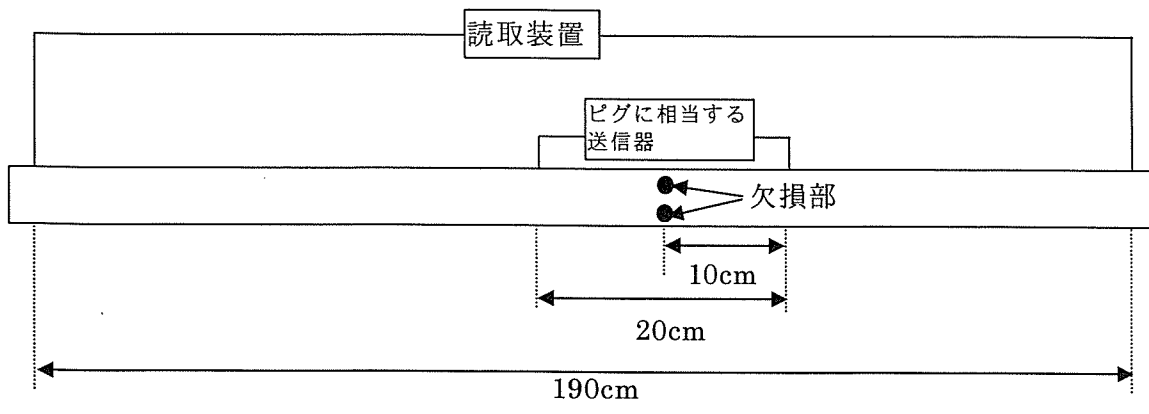


図 3.6.33 アンテナ A-B の間に観察される信号(A-B)



欠損部写真

図 3.6.34 実験装置概略図

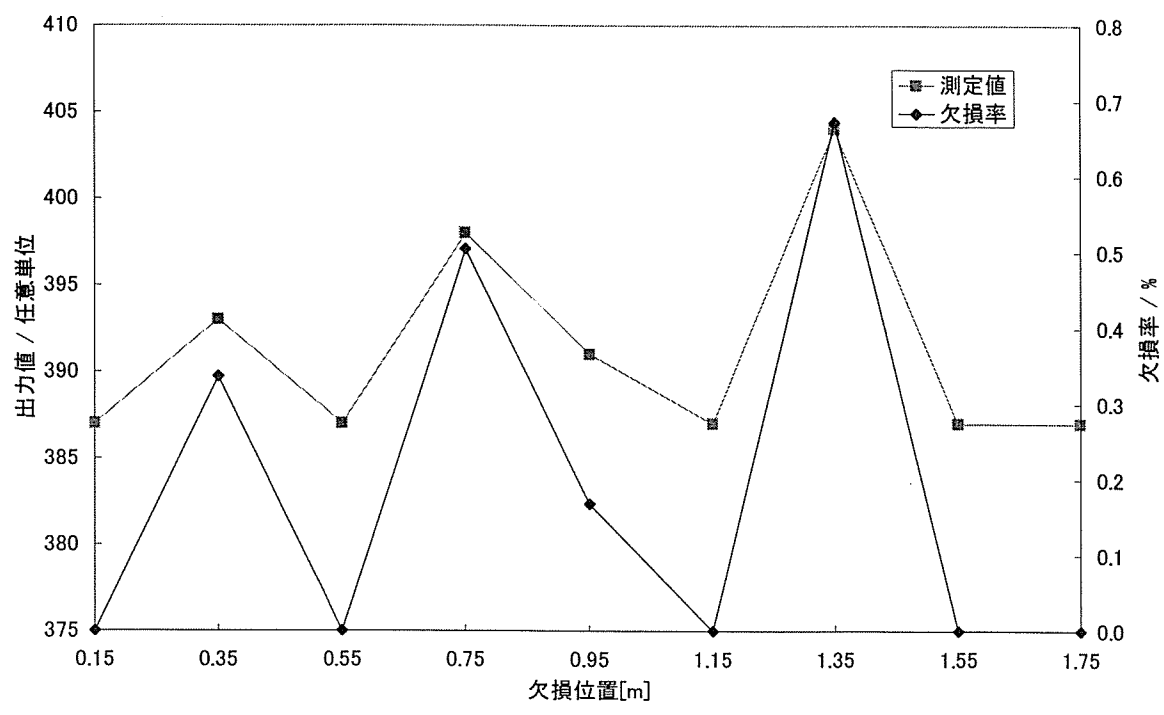


図 3.6.35 各欠損位置における測定値と欠損率の関係
 ※ 欠損率は以下の式で算出した。

$$\text{欠損率}[\%] = \frac{\text{欠損部分の表面積}}{\text{端子間の表面積}} \times 100$$

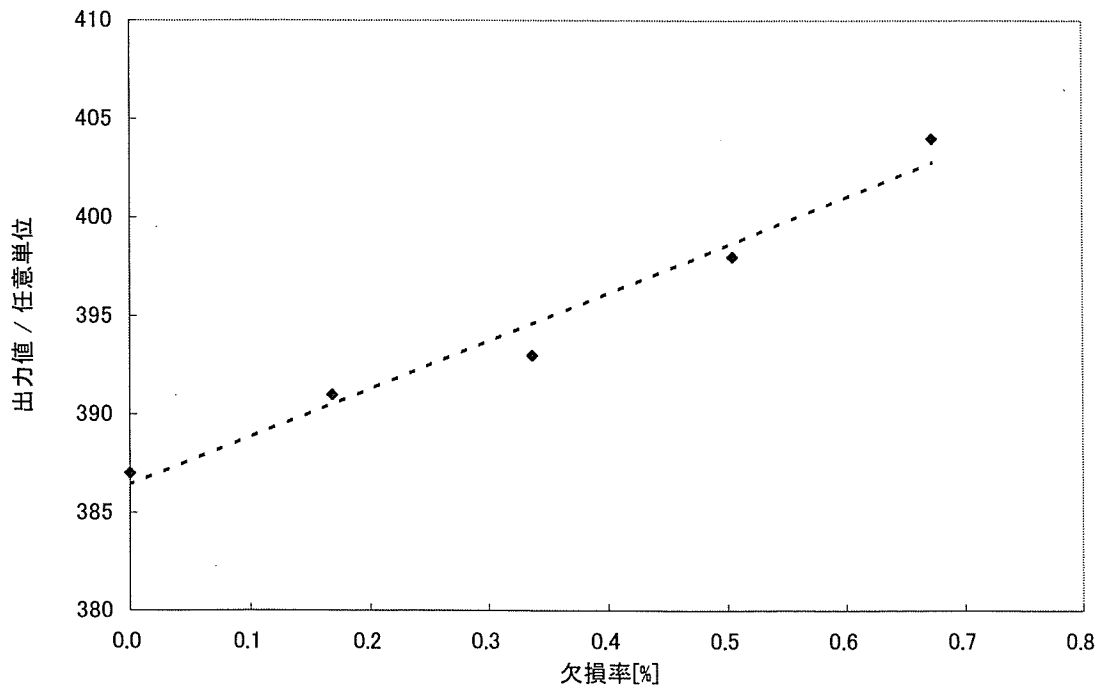


図 3.6.36 欠損率と出力の関係

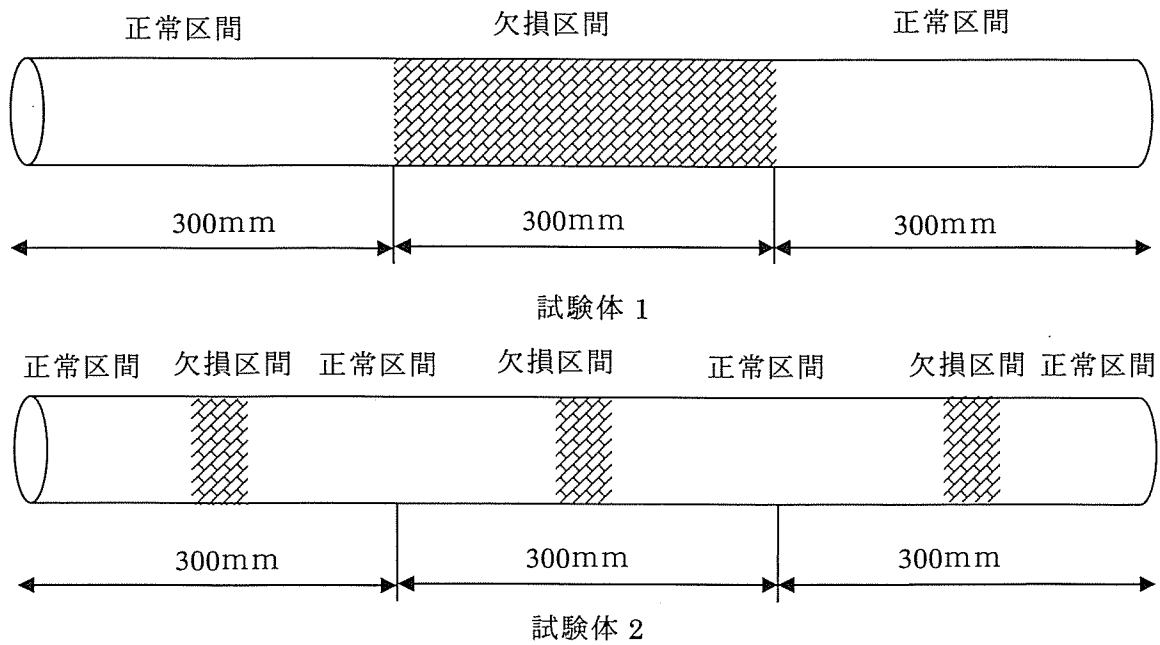


図 3.6.37 模擬試験管概略図

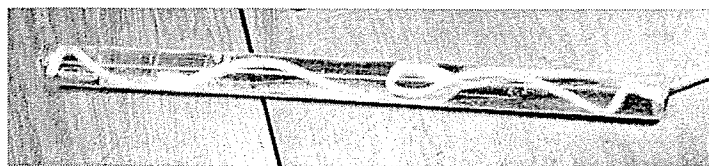


写真 3.6.11 電磁信号送信アンテナ

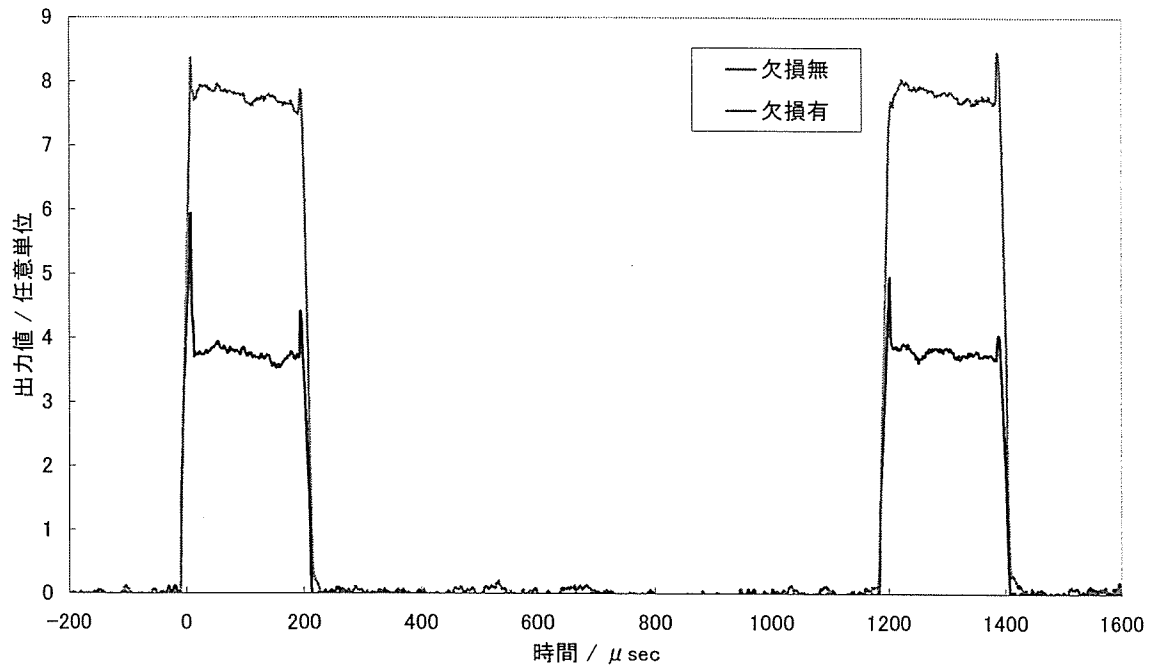


図 3.6.38 水中で送信したパルス入力に対する応答

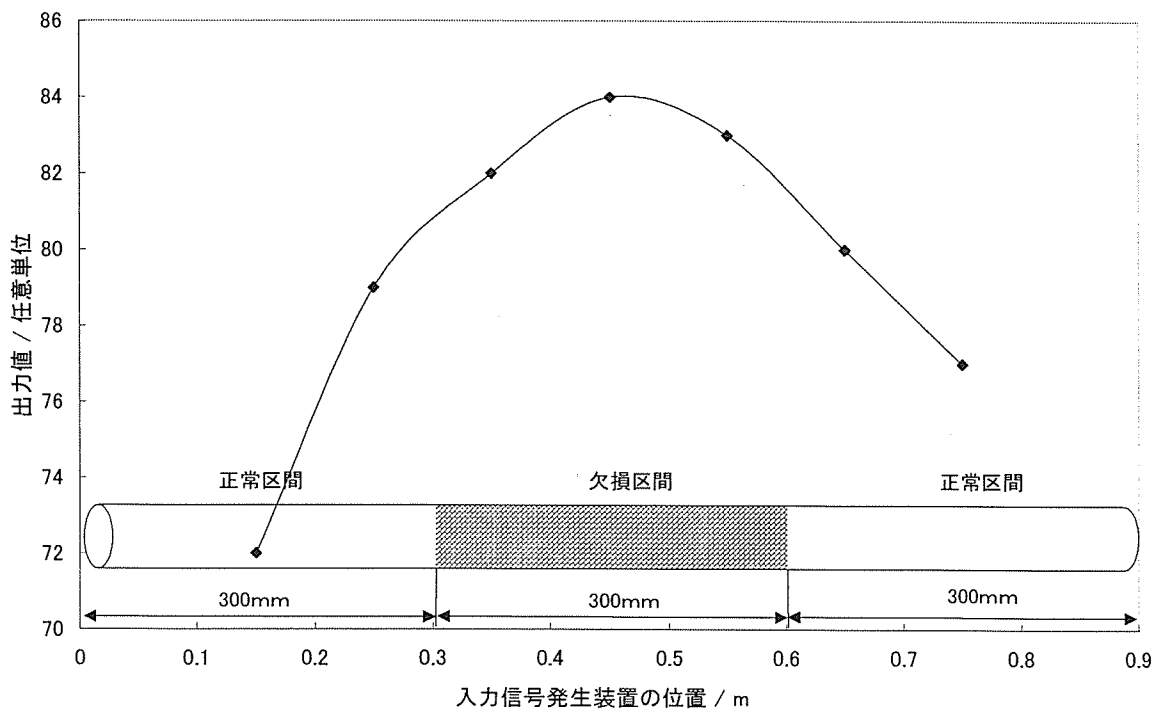


図 3.6.39 測定区間による出力値の変化
 ※ 横軸 0 は管底面、0.9 は管上端を表す。
 ※ 欠損率 1.6% の試験体 1 を用いて実験

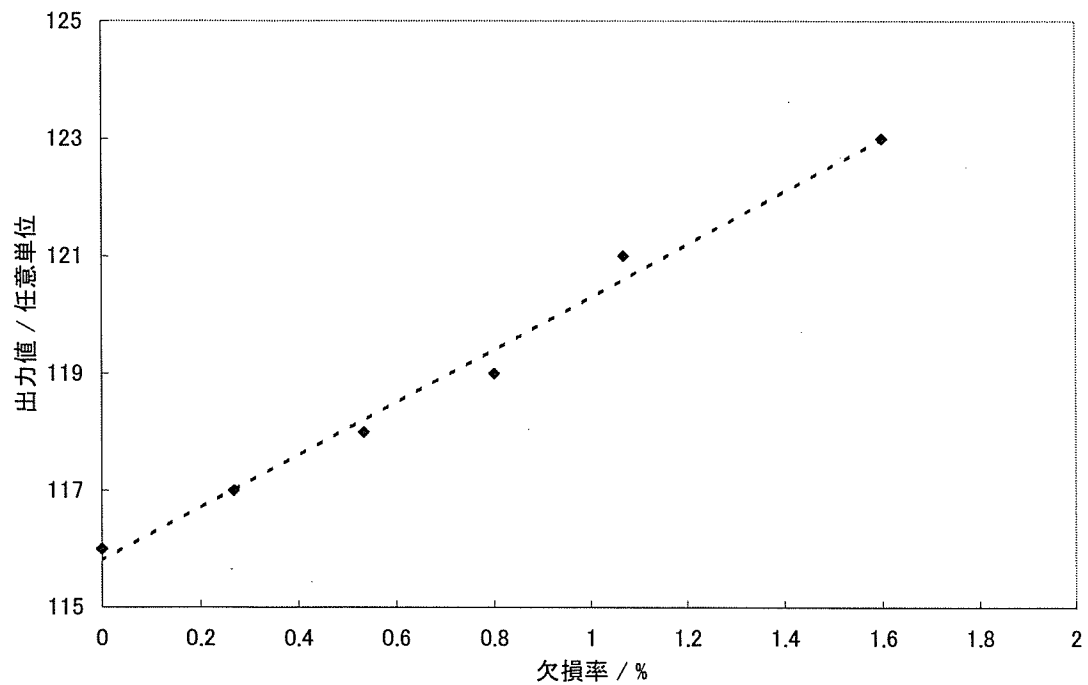
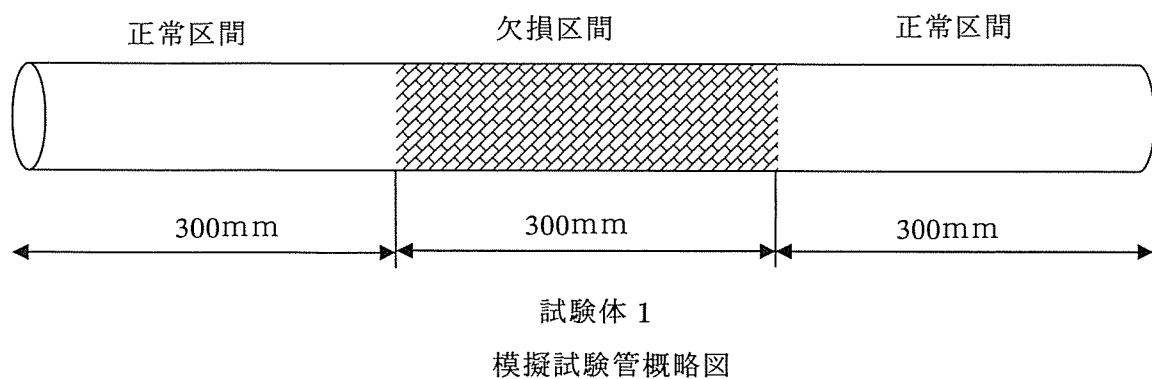


図 3.6.40 試験体 1 での欠損率と出力値の関係

※ 欠損率は以下の式で算出した。

$$\text{欠損率}[\%] = \frac{\text{欠損部分の表面積}}{\text{端子間の表面積}} \times 100$$



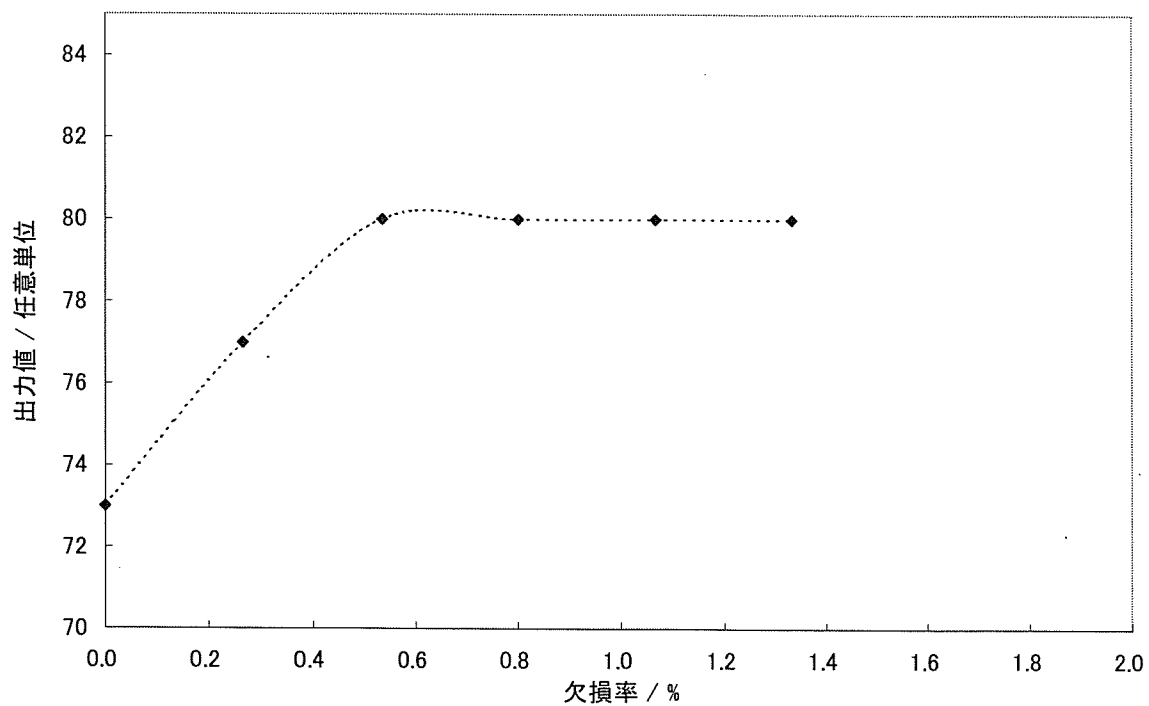
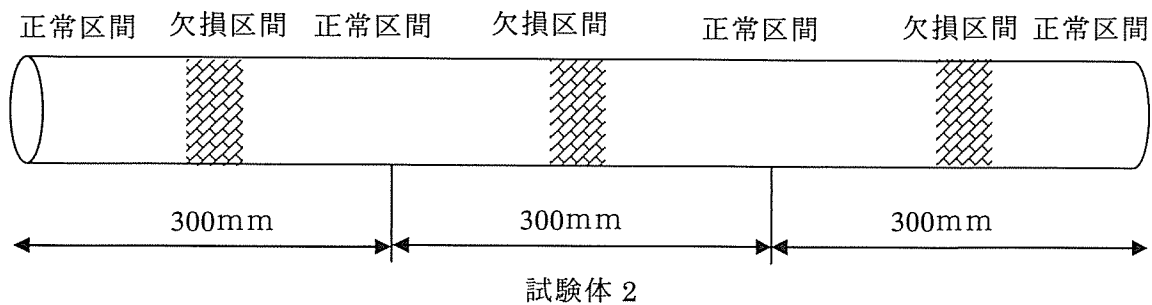


図 3.6.41 試験体 2 での欠損率と出力値の関係

※ 欠損率は以下の式で算出した。

$$\text{欠損率}[\%] = \frac{\text{欠損部分の表面積}}{\text{端子間の表面積}} \times 100$$



3.6.3 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

研究担当委員／大阪大学大学院 鎌田 敏郎

(1) 研究の背景と目的

近年、我国では老朽化が懸念される社会基盤施設が増加している。老朽化した施設は適宜更新する必要がある。そのためには老朽度を適確に把握しなければならない。現在、様々な分野で老朽度評価の研究が進められており、それに伴う維持管理システムの発展が期待されている。しかし、上水管路施設における老朽度評価方法は未だ明らかにされておらず、その確立が急務となっている。

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状態を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に着目し、基礎的な研究を行った。

昨年度の研究から、衝撃弾性波法による劣化評価指標として、周波数分布、振幅値、波形減衰時間などの弾性波特性値により、ダクトイル鋳鉄管の劣化状況がある程度評価できる可能性が明らかになっている。しかし、今のところ劣化度を定量的にグレーディングできるところまでには至っていない。そこで、主な劣化原因とされる管の外面腐食に起因する肉厚減少を対象として研究を行った。肉厚減少の把握を可能にするためには、計測において適確なデータを得ることが必要となる。そのためには適切な弾性波の入力方法や受信方法、計測範囲など、具体的な計測方法の検討も必要となる。さらに、計測により得られたデータから肉厚を推定する方法を検討する必要がある。

よって今年度の研究では、衝撃弾性波法の計測方法の検討および管の肉厚推定方法に関して詳細に検討を行うこととした。前者の検討においては、主に健全供試体を対象として、異なる弾性波の入力方法や受信方法を用いた計測を行い、計測方法の違いが弾性波特性値に与える影響について検討した。また、後者の検討においては、異なる肉厚の供試体を対象として、前者の検討による計測方法を用いて計測を行い、それぞれの得られた弾性波特性値と肉厚の関係を比較することにより検討を行った。また、それらの結果の妥当性を示すため、有限要素法による解析を行い、実験との比較を行った。

(2) 既往の研究

本章では、衝撃弾性波法の原理について述べるとともに、これまでに行われてきたダクタイル鋳鉄管の老朽度診断に関する研究について述べる。また、管の老朽度診断に適用可能性のある、他の非破壊試験法についても述べる。

1) 衝撃弾性波法に関する既往の研究

① 衝撃弾性波法

衝撃弾性波法とは、固体表面にハンマー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肉厚推定法の原理は、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、管の肉厚を推定しようとしたものである。

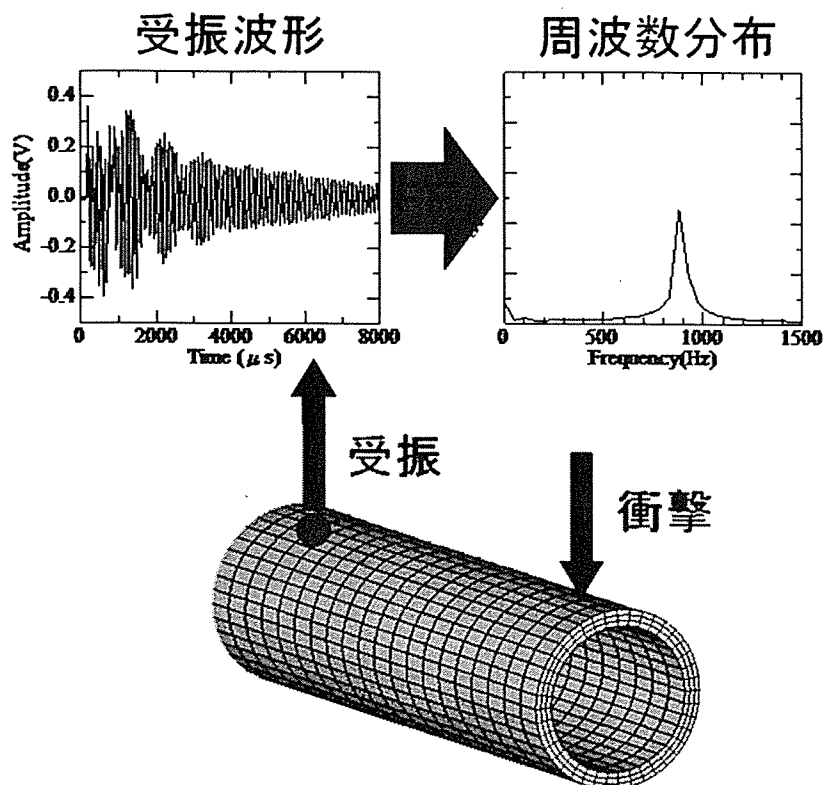


図 3.6.42 衝撃弾性波法の原理のイメージ図

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、対象物の全体的な劣化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。ここで、コンクリート下水管路の劣化診断における適用例を示す。舟橋らは、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している。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、本研究においては貼り付けに両面テープを用いることとする。

②ダクタイル鋳鉄管の老朽度評価に関する既往の研究

鎌田らは、衝撃弾性波法のダクタイル鋳鉄管の老朽度評価への適用可能性について検討を行っている。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、外面腐食による肉厚減少を模擬するため外面側を平均2.0mmの厚さで切削した管(2mm減供試管)および4mm減供試管、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ている。ここでは、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減供試管および4mm減供試管では、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る傾向を明らかにしている。これは管の肉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察している。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結論付けている。

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減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を明らかにしている。また、2mm減供試管では程度が小さい

ものの、同様の傾向が得られると述べている。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 減供試管→4mm 減供試管と低周波側へシフトする傾向を示すことを実験で確認しており、供試管における模擬劣化の程度と周波数分布での低周波側へのシフト現象とは良好な相関があると述べている。

しかしながら、現段階では劣化度の違いにより弾性波特性値が変化することこそ明らかになってはいるが、弾性波特性値から劣化度を定量的に判断することができない。それを可能にするには劣化度と弾性波特性値の関係を明確にする必要がある。また、そのためには弾性波計測方法にさらなる改善を加え、精度を高めることが課題となる。

2) 管の劣化診断に関する既往の研究

①超音波診断法

この方法では、図 3.6.43 に示すように探触子により超音波を管の内側表面から外側表面へ向けて入射する。この場合、媒質中を伝播した超音波は管の外側表面で反射し、再び内側表面へ戻ってくる。この反射波を受振して、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。

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

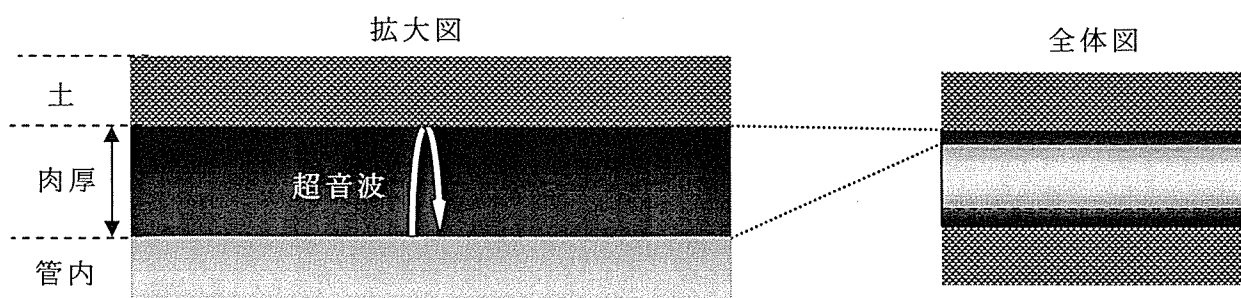


図 3.6.43 超音波の反射

②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ターゲットとした二次的な試験法としては有効であるといえる。

(3) 衝撃弾性波法の計測方法の検討

1) 本章の概要

衝撃弾性波法は、弾性波計測方法および衝撃入力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。本研究の目的である、ダクタイル鋳鉄管の肉厚と弾性波特性値の関係を効率よく定量的に把握するためには、安定性に優れ適確なデータが必要となるため、その計測方法について検討を行う必要がある。今回はデータの中で、受振波形および周波数分布に着目した。受信波形は、管の異常にともない変化が現れると考えられるため、規則的な波形になる方法が、周波数分布は前章(2)で示したように肉厚を推定するのに重要な判断要素となるため、ばらつきが少なく卓越する方法が必要となる。そこで本章では、加速度センサの貼付位置、衝撃入力位置、衝撃入力方法、データのサンプリング設定の違いが受振波形および周波数分布に与える影響について検討を行った。

2) 実験概要

① 供試体

本実験では、供試体として JIS の規格により製造されたダクタイル鋳鉄管（K形 1 種管，内面モルタルライニング，呼び径 150mm，肉厚 7.5mm）を図 3.6.44 に示すように 1.0m に切断したものを使用した。供試体は損傷のない管（以降，健全供試管）のみを用いた。そして，その健全供試管を図 3.6.45 に示すようにゴム板の上に設置し実験を行った。

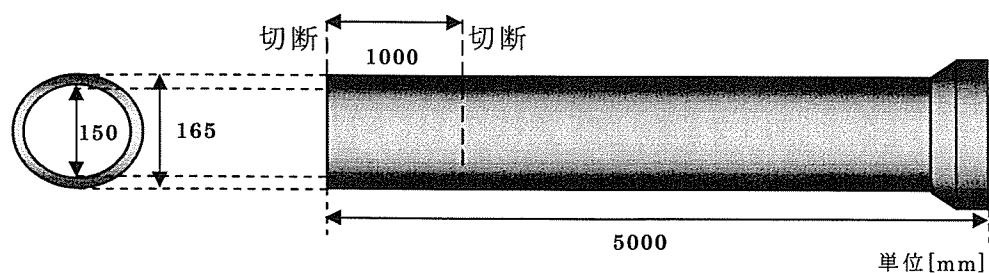


図 3.6.44 供試体概要

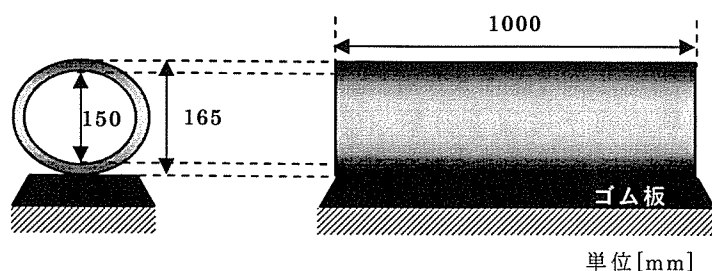


図 3.6.45 健全供試管設置状況

②弾性波計測方法

弾性波計測方法について以下の検討を行う。

センサ貼付位置

i)センサ貼付位置比較 1：端部から 100mm，中央部，衝撃位置付近の比較

付図-3.1 に示すようにセンサを管の端部から 100mm の位置に貼り付けたものおよび中央部，衝撃位置付近に貼り付けたものを比較した。衝撃入力方法は，健全供試管の上にゴム板を敷き，その上をゴムハンマで叩く方法を用いた。打撃位置は端部から 100mm の位置とし，センサは管の外側に貼り付けるものとした。

ii)センサ貼付位置比較 2：内側と外側の比較

付図-3.2 に示すようにセンサは端部から 100mm の位置とし，管の内側および外側に貼り付けたものを比較した。衝撃入力方法は，1)と同様のものを用いた。

衝撃入力位置

i)衝撃入力位置比較 1：端部から 100mm と中央部の比較

付図-3.3 に示すように，加速度センサを端部から 100mm の位置に内側貼付した管を用い，もう一方の端部から 100mm の位置を打撃，管の中央部を打撃，と 2つの位置から衝撃入力をして比較を行った。衝撃入力方法は，1)と同様のものを用いた

ii)衝撃入力位置比較 2：内側と外側の比較

付図-3.4 に示すように，加速度センサを端部から 100mm の位置に内側貼付した管を用いた。衝撃入力位置は，管のもう一方の端部から 100mm 位置の内側と外側であり，その比較を行った。衝撃入力方法は，内側と外側から同様の打撃が行えるようにプラスチックハンマを用いた。

③衝撃入力方法

弾性波は，衝撃入力の際の接触面積や硬度によって違ってくるため，以下の I)～IV) の衝撃入力方法で計測を行い，結果を比較した。センサは管の端部から 100mm の位置に内側貼付し，衝撃入力はもう一方の端部から 100mm 位置とした(付図-3.5)。

方法 I) ゴム板上をゴムハンマで打撃 (写真 3.6.12)

方法 II) 鋼球の落下による打撃 (写真 3.6.13)

方法 III) ゴム板上の鋼球をゴムハンマで打撃 (写真 3.6.14)

方法 IV) プラスティックハンマによる打撃 (写真 3.6.15)

また，(3) 1) で述べたように安定した正確なデータが必要となるため，(3) 2) ②および (3) 2) ③では，各項目で 10 回ずつ計測を行い評価した。なお，サンプリング周期 10 μ s，サンプリング数 8192，トリガーレベル 0.300V の設定で計測を行った。

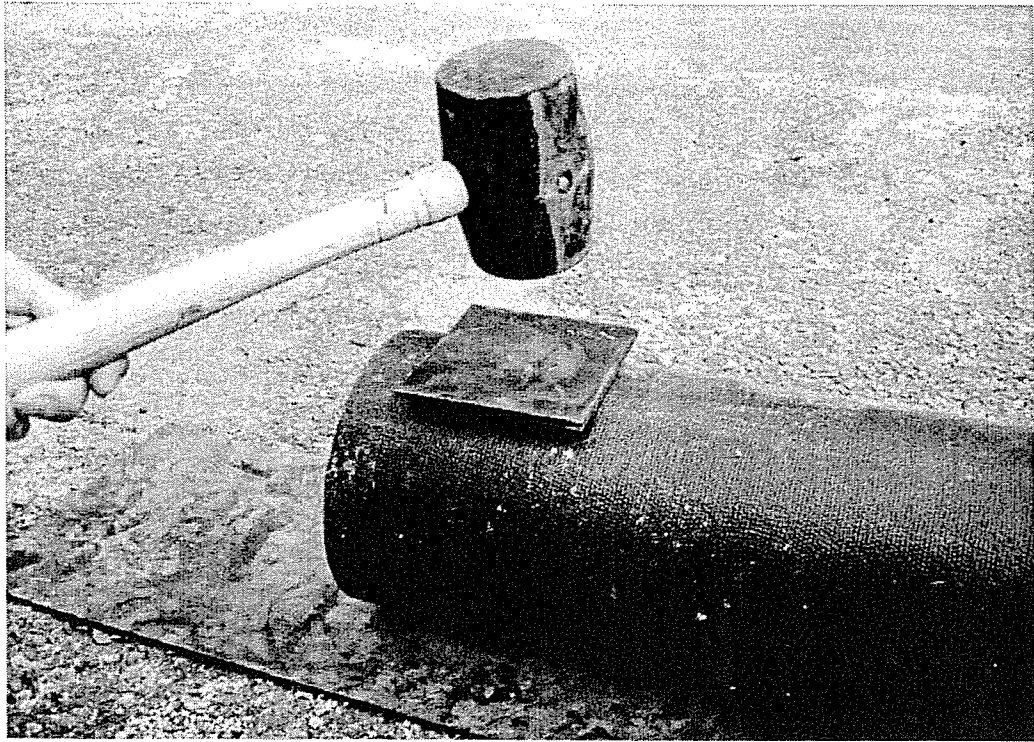


写真 3.6.12 衝撃入力方法Ⅰ

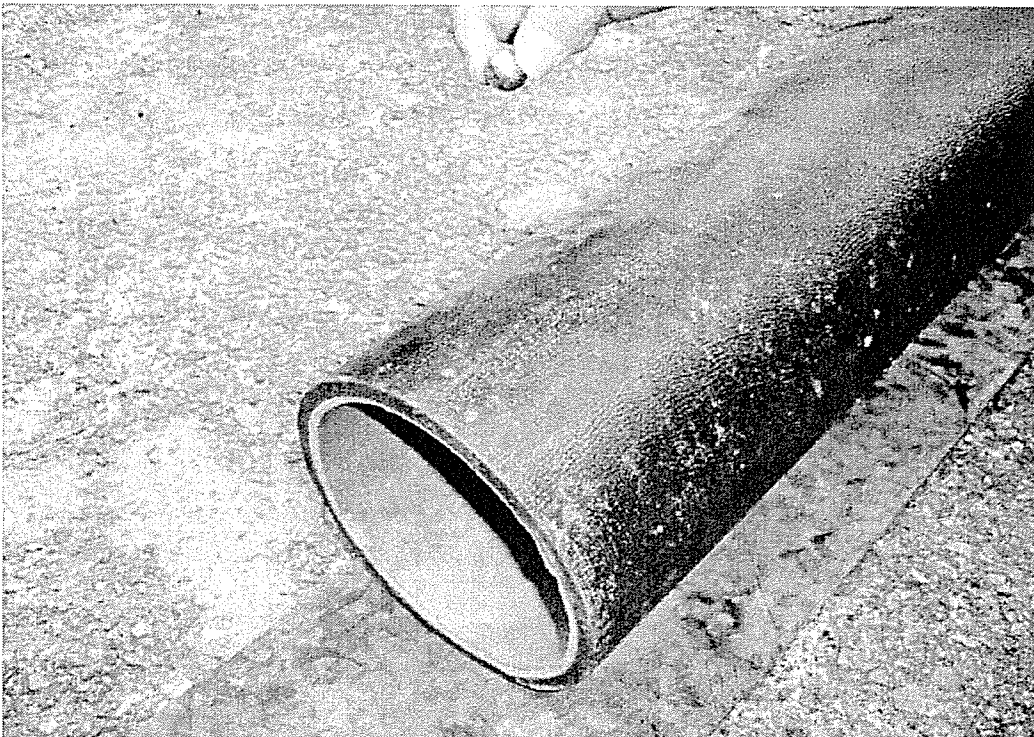


写真 3.6.13 衝撃入力方法Ⅱ



写真 3.6.14 衝撃入力方法Ⅲ

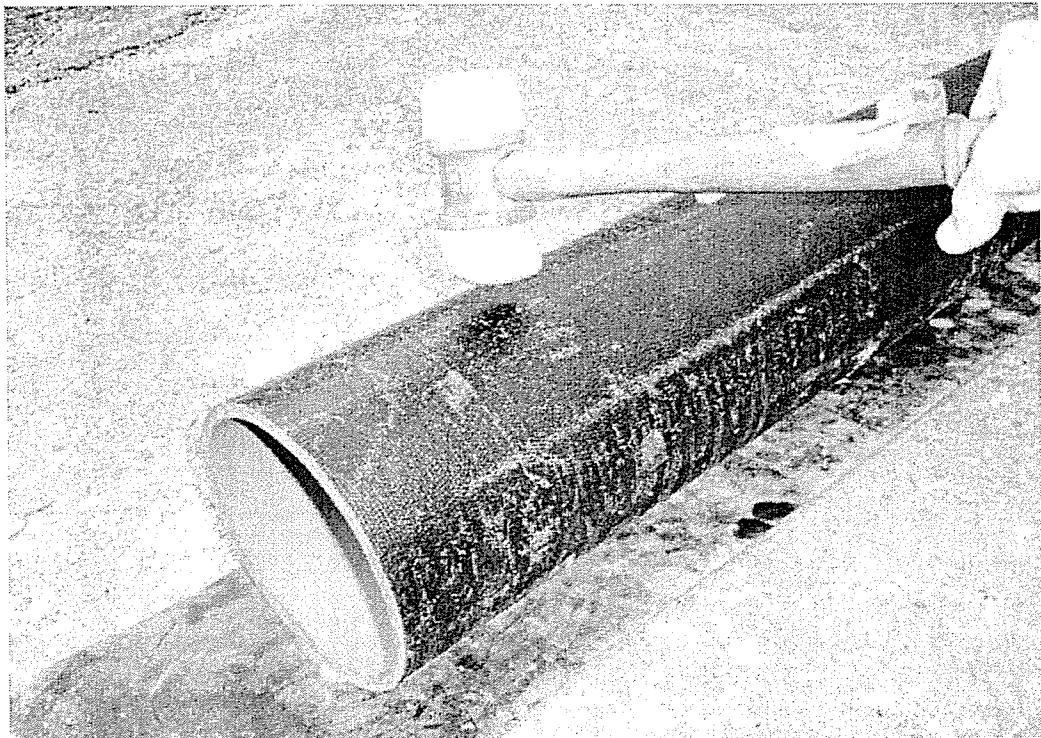


写真 3.6.15 衝撃入力方法Ⅳ

④ サンプリング設定

サンプリング設定の項目には、サンプリング周期、サンプリング数、トリガーレベル、FFTを行うためのサンプリング範囲の選択などがある。それらによって得られるデータが変わるため、その設定方法の検討が必要である。そのため、様々な設定を行い最適な計測結果が得られるような方法を検討した。

3) 実験結果および考察

ここでは各パターンの特徴を表した代表的な結果をそれぞれ図に示す。また、安定性を示すため、パターン毎に計測結果からランダムに3つ選んだものを付図に示す。よって、受振波形および周波数分布は図を参考にし、安定性は付図を参考にし、弾性波計測方法の検討を行う。

① 加速度センサの貼付位置の影響

i) センサ貼付位置比較 1: 端部から 100mm (付図-3.6), 中央部 (付図-3.7), 衝撃位置付近 (付図-3.8) の比較

受振波形は、波形も安定性にも大きな差はない。周波数分布は、他と比べ管の端部から 100mm の場合、ばらつきが少なく卓越した周波数をもっているうえに、安定性においても優れていると言える。よって、センサは端部から 100mm の位置に貼り付けるものとする。

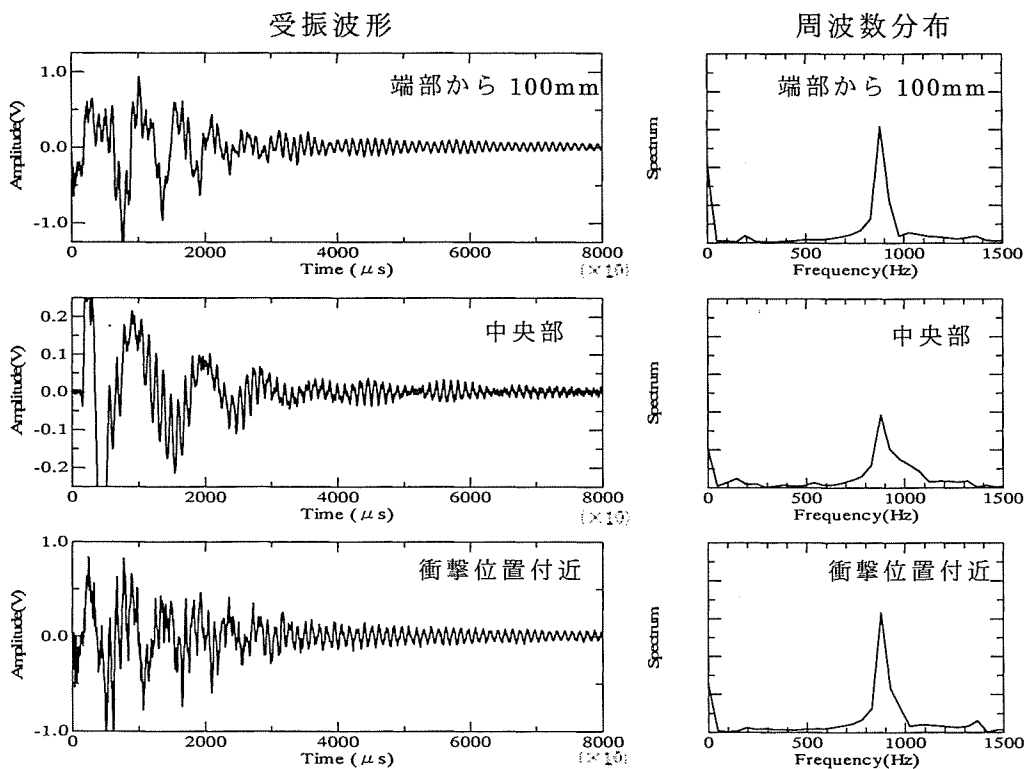


図 3.6.46 センサ貼付位置の比較 1

ii) センサ貼付位置比較 2：内側（付図-3.9）と外側（付図-3.6）の比較

受信波形は、波形および安定性の両方において内側の方が適していると言える。周波数分布も、内側の方がばらつきが少なく安定している。これは、内側の表面が滑らかなのに対して、外側の表面は塗装による表面の凹凸が影響したものと考えられる。よって、センサは管の内側に貼り付けるものとする。しかし、評価指標としてはほぼ差異がないため、内側貼付が困難な場合は外側貼付も可とする。

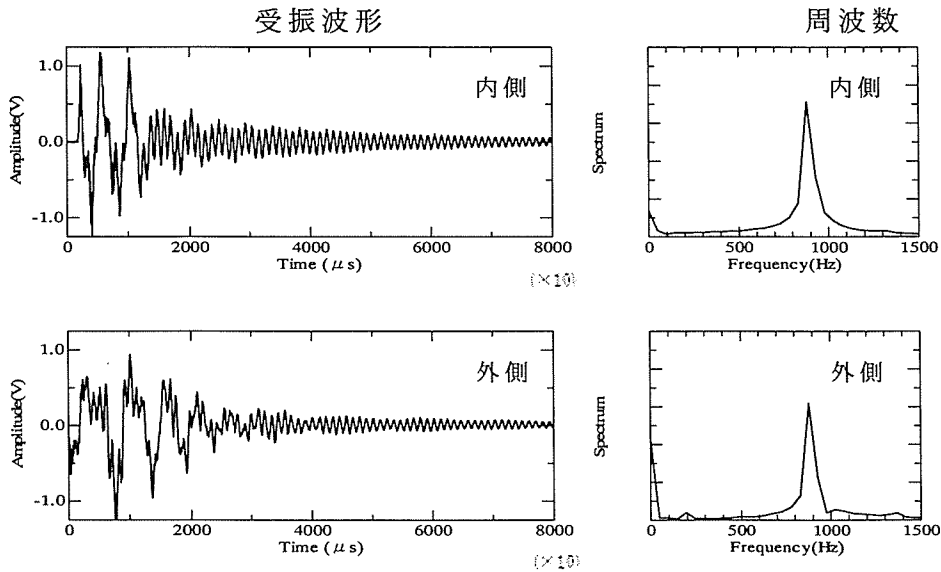


図 3.6.47 センサ貼付位置の比較 2

② 衝撃入力位置の影響

i) 衝撃入力位置比較 1：端部から 100mm（付図-3.6）と中央部（付図-3.10）の比較

両者とも、受振波形および周波数分布ともに、適したデータが得られることがわかった。しかし、中央部は安定性に欠けることがわかる。よって、衝撃入力位置は端部から 100mm の位置とする。

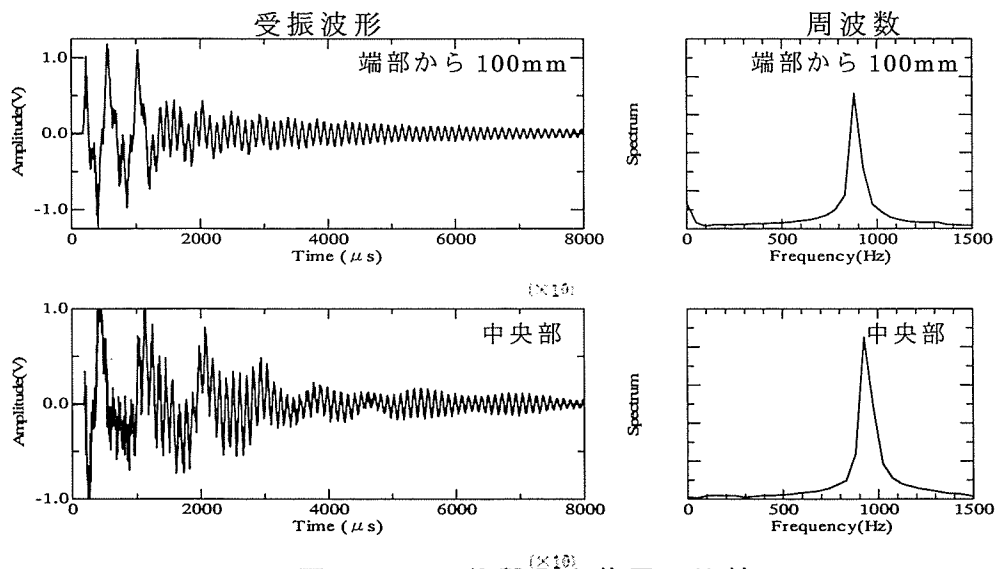


図 3.6.48 衝撃入力位置の比較 1