

また、2m の金属管を 2 本接続し、50MHz の正弦波を加え、金属管への供給点を 0m 基準として 2m、4m 点での相対遅延時間により実験系金属管での伝播時間を求めた。試験測定図を図 4.6.54 に示す。

③ 試験結果

まず、金属管内での電磁波の伝播速度を求める。実験の結果は図 4.6.55 に示すように、0m～2m : 6.2ns、2m～4m : 6.4ns で約 3.2ms/s の伝搬速度であった。実験系では金属管とアース導体の間は比誘電率 1 の空気であり、図 4.6.35 で示した光速とほぼ同じ値が得られた。従って、管内においても光速と同等の速度でパルスが進行しているといえる。

次に、劣化の大きさとエコー強度の関係を示す。1000mm×φ32mm（外周100mm）金属管の劣化なし状態から、500mm 位置にφ3mm のドリル孔を10mm ごとに 1～10 箇所劣化として与え、劣化数に対するパルス反射波の変化を測定した。この測定状況を図 4.6.56 に示す。

印加パルス幅が 71ns であり、これは前記伝搬速度から 22m の分解能となるため、金属管の入力端での反射波、劣化部分での反射波、金属管終端での反射波が図 4.6.57 に示すように、それぞれ重なり合った波形で観測される。

特徴点を拡大し、図 4.6.58 のように示すと、劣化を大きくしていくにつれ、1m 金属管の中間点からの反射波が終端からの反射波より強調されるので、立ち上がりが早くなる傾向で管の損傷度合いが観測できている。

次に、管路長とエコー強度について示す。パルス波入力端から 500mm の位置に劣化を加えた金属管で、終端までの長さを 1m、1m、4m に変化させた時の反射波を測定した。

原理的には入力端、劣化点、終端からの反射波の重なりが長さに比例して、1m と 2m では差分 1m に対する伝搬遅延の 3.3ns、2m と 4m では差分 2m に対する伝搬遅延の 6.6ns 変化するものと推測できる。

実験の結果、図 4.6.59 に示すように、ほぼ理論値どおりの反射波遅延が観測できた。なお、金属管の縦続接続は、実際の水道管の従属接続がボルト接続であ

るが、本試験では図 4.6.60 のようにインピーダンス整合が完全ではないバインド線による接続とした。

次に、同一管路長において劣化位置を変えた場合、パルス反射波が変化するかを測定した。原理的には入力端、劣化点、終端からの反射波の重なりが劣化位置に比例して、劣化位置が遠いほど伝搬遅延により反射波の立ち上がりが鈍くなることが推測できる。

2m 管の場合、以下の条件で測定を行った。試験装置概観図を図 4.6.61 に示す。試験結果を図 4.6.62 に示す。図より原理的どおりに劣化位置が遠いほど伝搬遅延により反射波の立ち上がりが鈍くなることが観測できた。また、劣化位置が遠いとその伝搬経路損失により反射波が減衰し、反射波のエネルギーが低くなっていることが観測できた。

4m 管での試験は以下の条件で測定を行った。試験装置概観図を図 4.6.63 に示す。試験結果を図 4.6.64 に示す。図より原理的どおりに劣化位置が遠いほど伝搬遅延により反射波の立ち上がりが鈍くなることが観測できた。また、劣化位置が遠いとその伝搬経路損失により反射波が減衰し、反射波のエネルギーが低くなっていることが観測できた。

さらに、管路中に複数個劣化がある場合について検討を行った。

管路長 4m において劣化位置の異なる単独劣化と、それぞれを組み合わせた複合劣化で、パルス反射波に変化が現れるか検討した。

試験結果を図 4.6.65 に示す。図より、

⑧入力端＋遠距離劣化＋終端からの反射波
に比べ、

⑨入力端＋近距離劣化＋遠距離劣化＋終端からの複合反射波
のほうが反射波エネルギーが強く、反射点が分散しているためにピーク値の保持時間が長くなる減少を確認できた。

(4) 鋼管接合部からのパルス反射基礎実験

①試験目的

(3) において管劣化部においてエコーが検出されることが確認された。しかし、実際に埋設されている管路は様々な鋼管が接続されており、この部分からの反射波が検出されると予想される。そこで、金属水道管の接続部において、パルス波が固定的に反射することを実験により確認する。

②試験方法

試験は 4m 直管と 2m 管を 2 接続した管を用い、それぞれの鋼管にパルス波を加え、反射波を測定した。2m 管の接続は、バインド線接合と銅板接合の 2 種類を使用し、反射波到達時刻を測定した。接続部の無い 4m 直管の測定値を基準に、2m 管 2 本からの反射波との電圧差分を取り、接続部からの反射を確認した。

- ①4m 直管 :
- ⑧2m 管 2 本 :

③試験結果

図 4.6.66 のように、2m 管を 2 本接続した場合の反射波は、4m 直管での反射波と比較して、管路の 2m 位置にある接続部（オシロの測定値で 199ns 相当位置）で誤差がピークとなり、この位置でインピーダンス変化によるパルス波の反射が発生していることを示している。

まず、水道管接続部での反射波の発生に関して検討する。図 4.6.66 では、2 本の管路の接続抵抗が大きいバインド接続を用いた場合管路外周に銅板を巻きつけて接続抵抗を少なくした場合より反射波電圧が大きいことを示している。

水道管路の接続部は、腐食防止塗装が施された部位をボルト止めするため、接続抵抗は管路の抵抗に比べ大きくなることが推定されるため、水道管路においても接続部から反射波が戻ることが推定できる。

さらに、反射位置特定方法に関して検討を行う。測定波形から反射位置（時間）を演算により特定する一つの方法として、測定区間の測定電圧の累積値（エネルギー）から、その 50%に達した時間を反射位置とすることが考えられる。

2 本の管路をバインド接続、銅板接続した場合のそれぞれの反射波電圧累積値を 1 に正規化したときのグラフを図 4.6.67 に示す。図 4.6.67 より、測定電圧の 50% に達する時間は、バインド接続：198.84ns、銅板接続：199.00ns で、管路 2m 位置と一致する。ここで、接続方法により 0.16ns (=48mm 相当) の誤差があるが、これは測定波形の雑音によるものである。

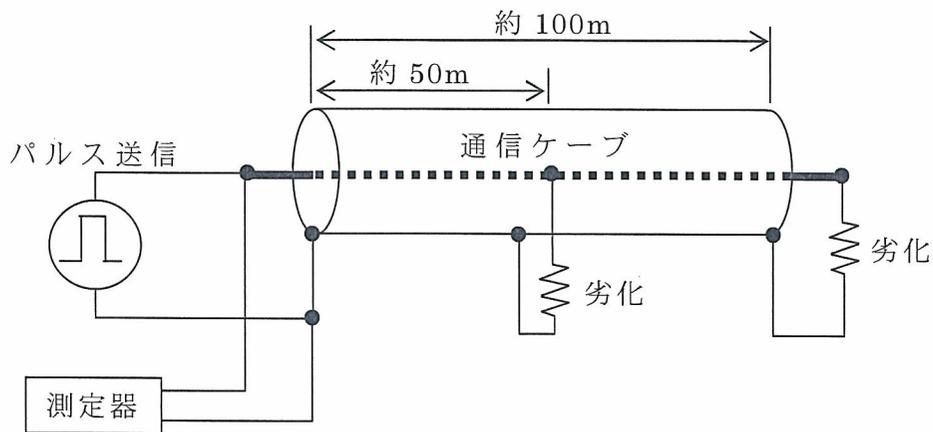


図 4.6.42 実験装置図

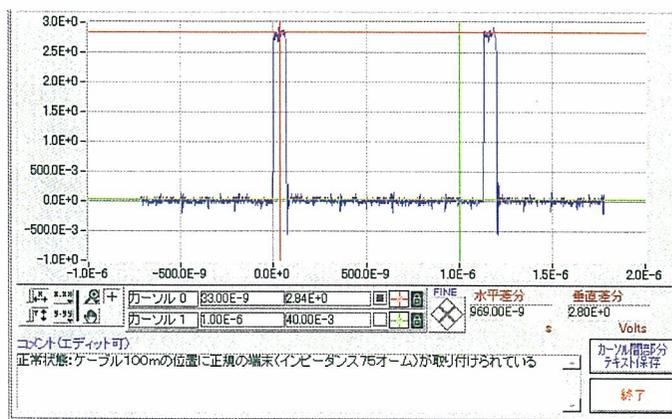


図 4.6.43 正常状態のピーク曲線

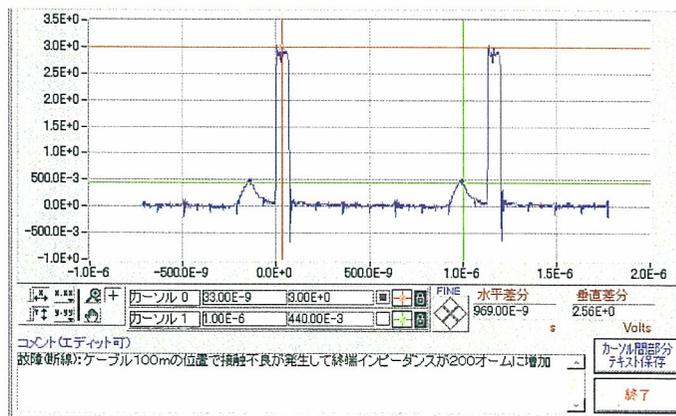


図 4.6.44 100m の位置で接触不良が生じた場合のピーク曲線

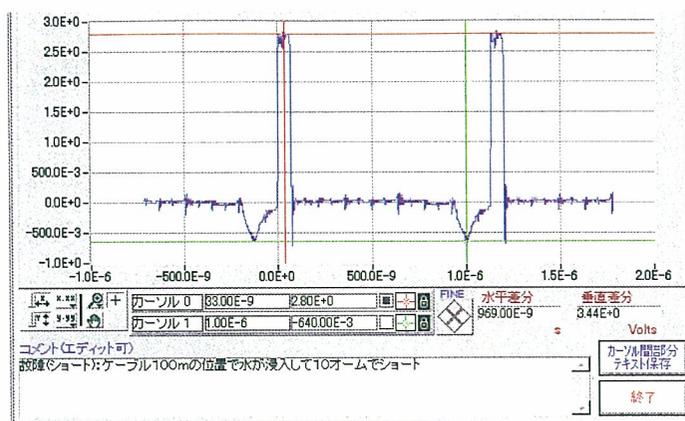


図 4.6.45 100m の位置でショートが生じた場合のピーク曲線

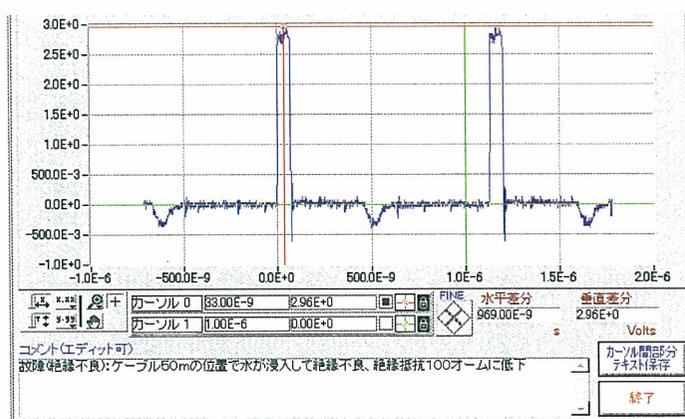


図 4.6.46 50m の位置でショートが生じた場合のピーク曲線

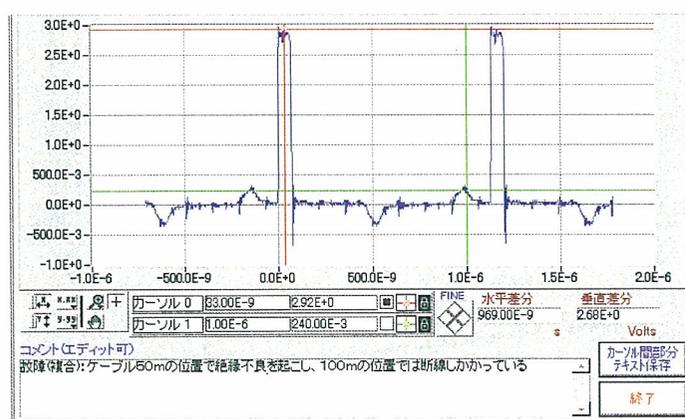


図 4.6.47 50m 及び 100m の位置で断線が生じた場合のピーク曲線

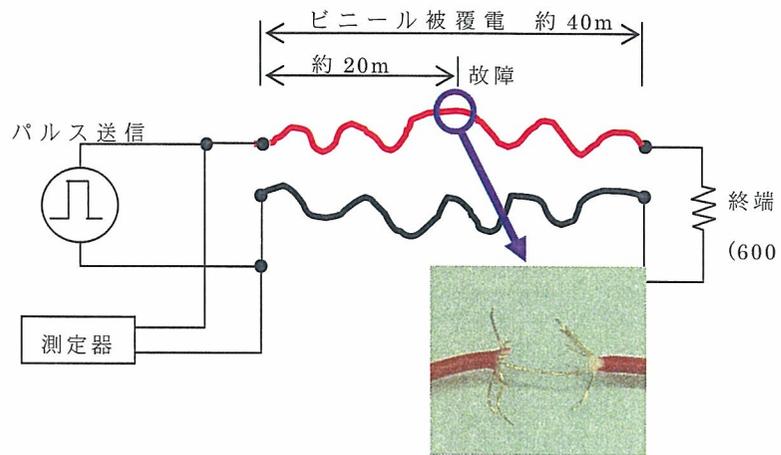


図 4. 6. 48 実験装置図



図 4. 6. 49 測定系外観

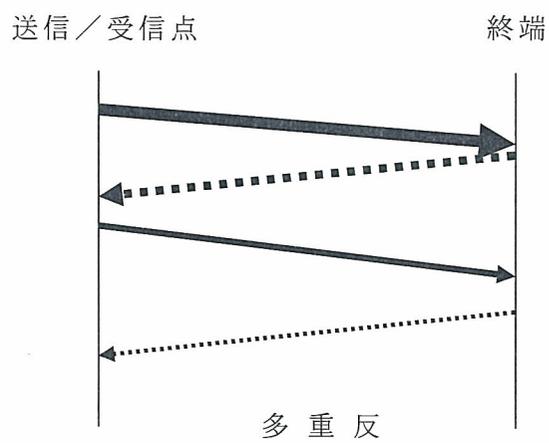


図 4. 6. 50 試験概念図

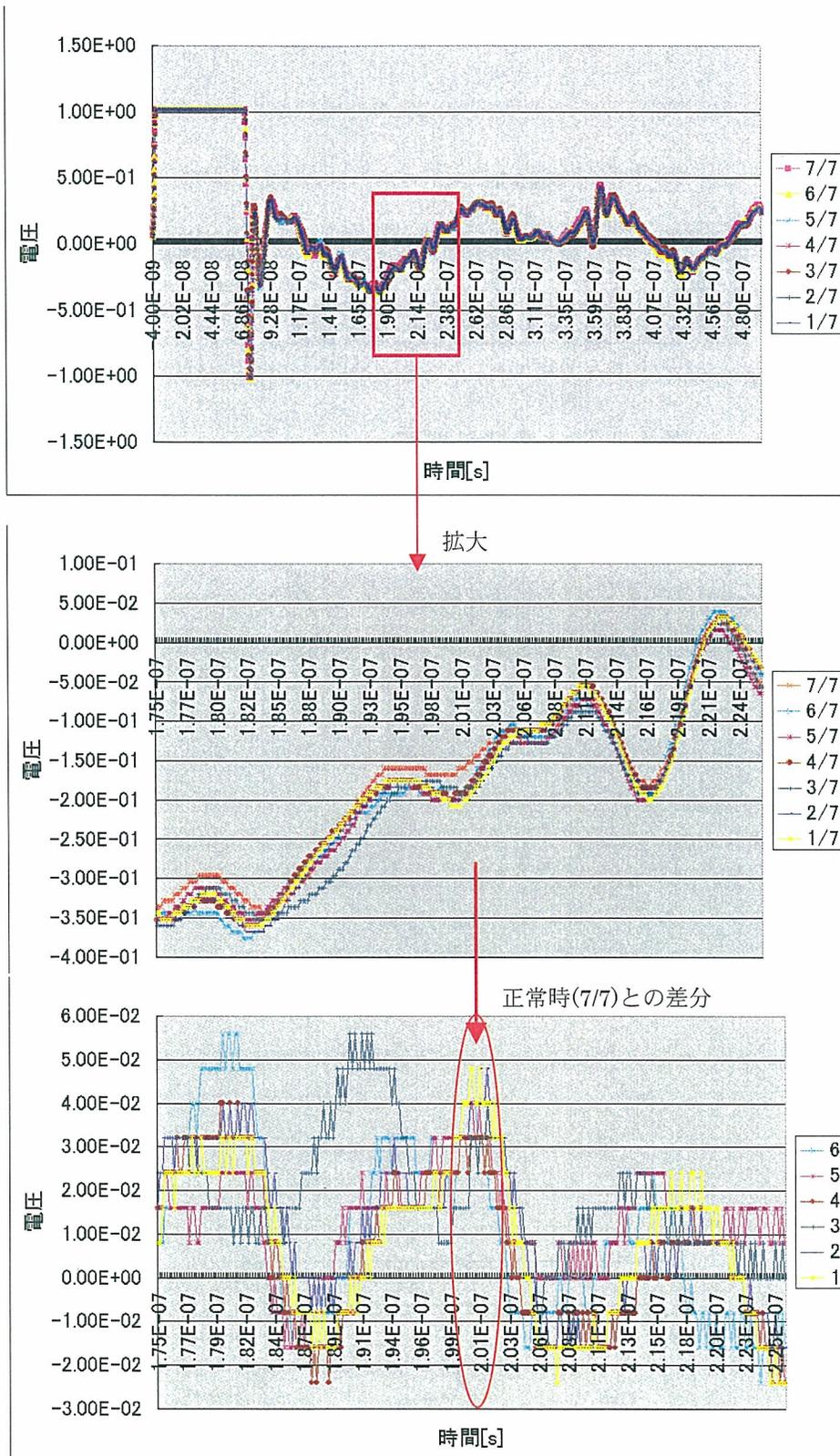


図 4. 6. 51 ケーブル切断によるエコーの発生

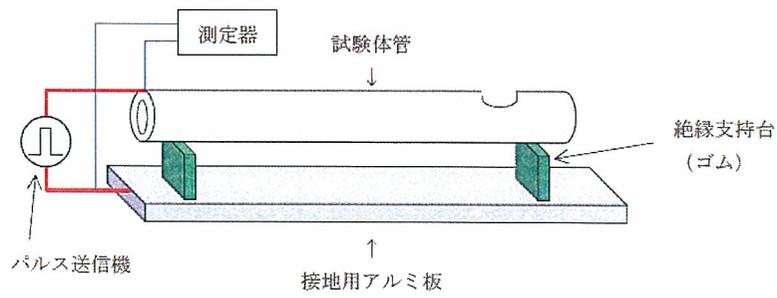


図 4.6.52 実験装置図



図 4.6.53 パルス発生装置

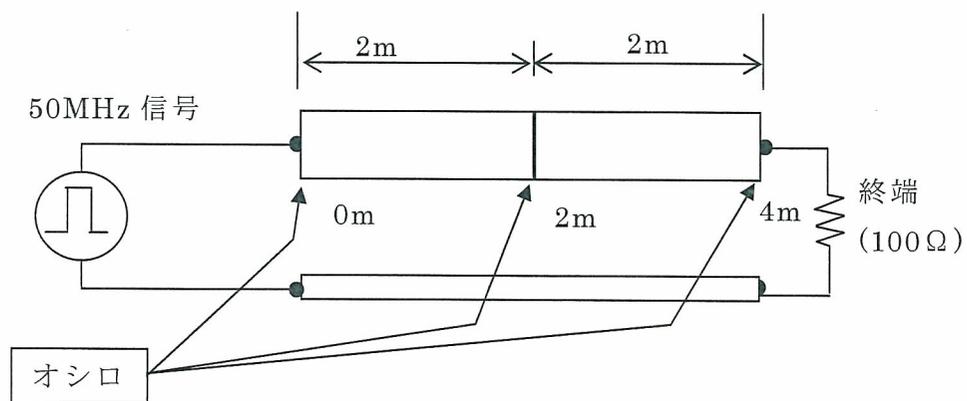


図 4.6.54 測定系統図

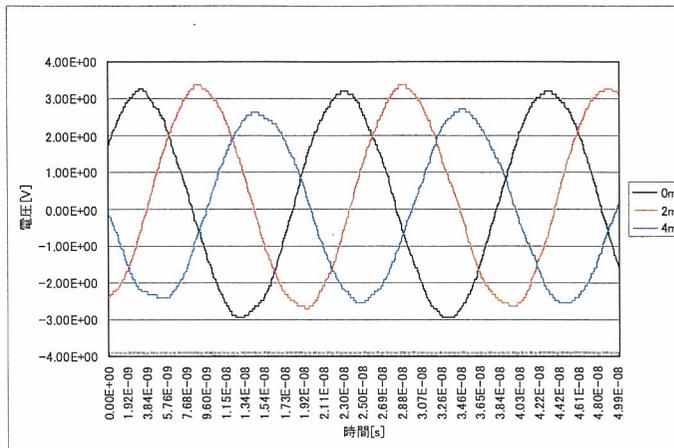


图 4.6.55 鋼管伝搬速度

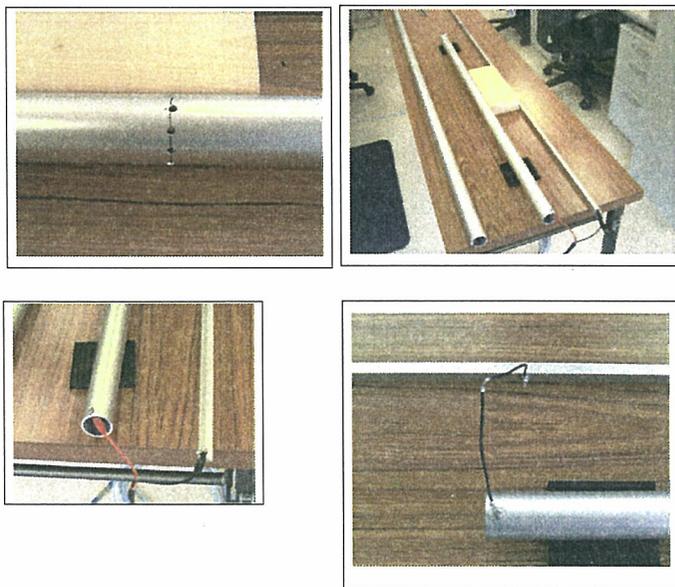


图 4.6.56 試験装置図

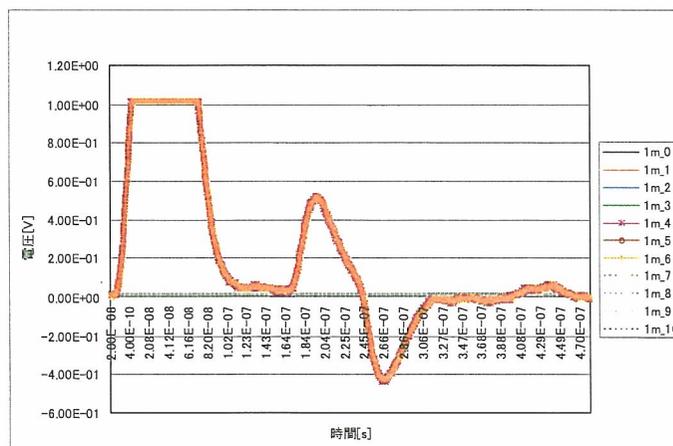


图 4.6.57 劣化規模とパルスエコー波形

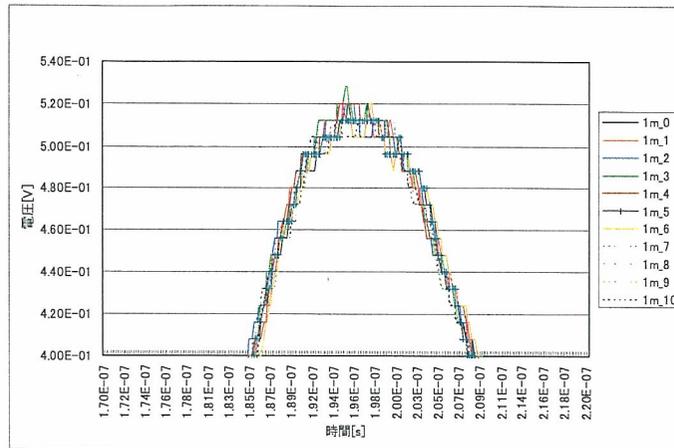


図 4.6.58 劣化規模とパルスエコー波形（拡大図）

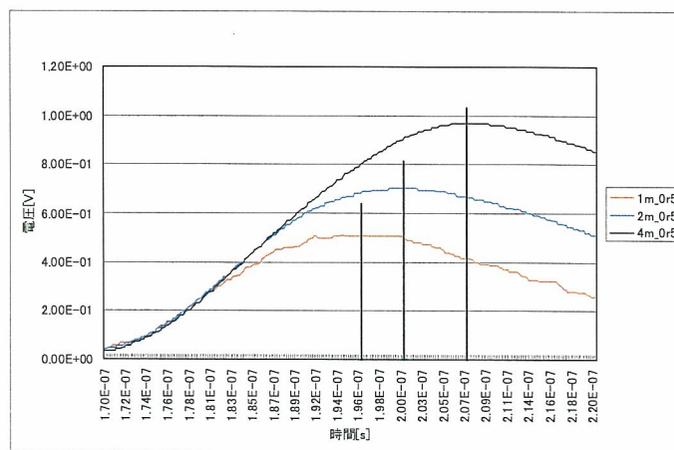


図 4.6.59 管路長とパルスエコー波形（拡大図）

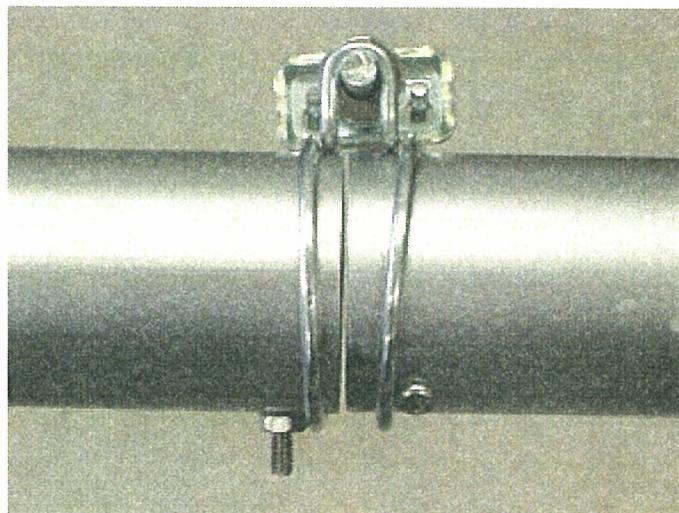


図 4.6.60 金属管接合部

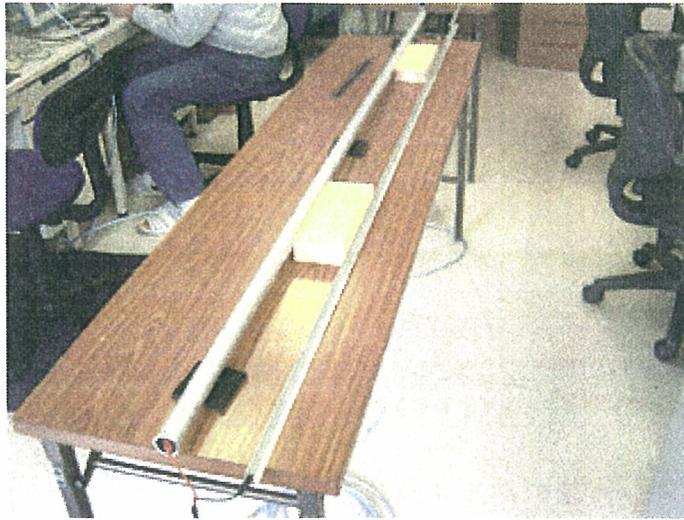


図 4. 6. 61 2m 管試験概観図

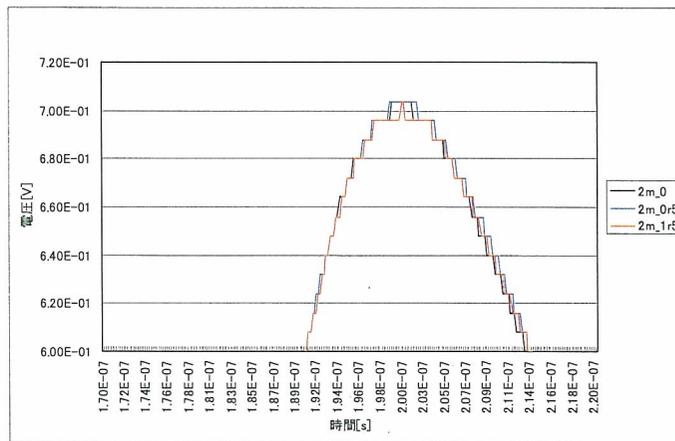


図 4. 6. 62 2m 管のパルスエコー波形 (拡大図)



図 4. 6. 63 2m 管×2 本による 4m 試験概観図

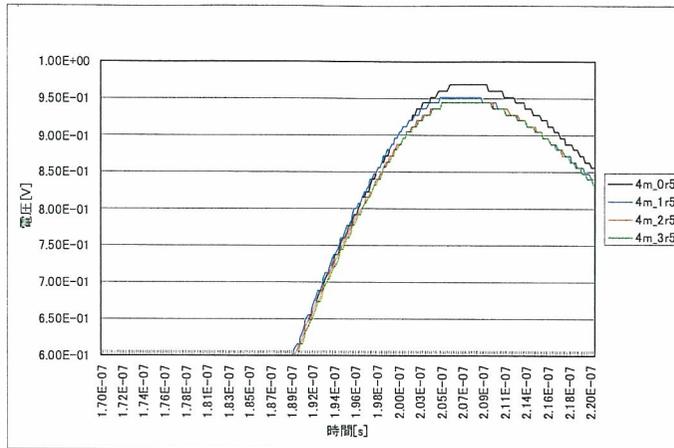


図 4. 6. 64 4m 管のパルスエコー波形 (拡大図)

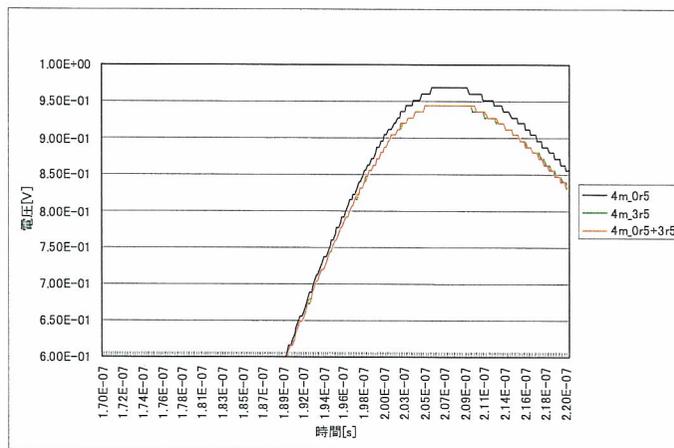


図 4. 6. 65 複数の損傷がある場合のパルスエコー波形 (拡大図)

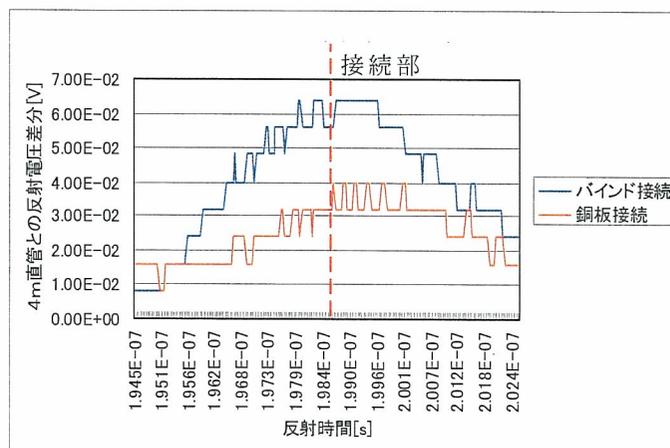


図 4. 6. 66 2m 管 2 本の接続部からの反射

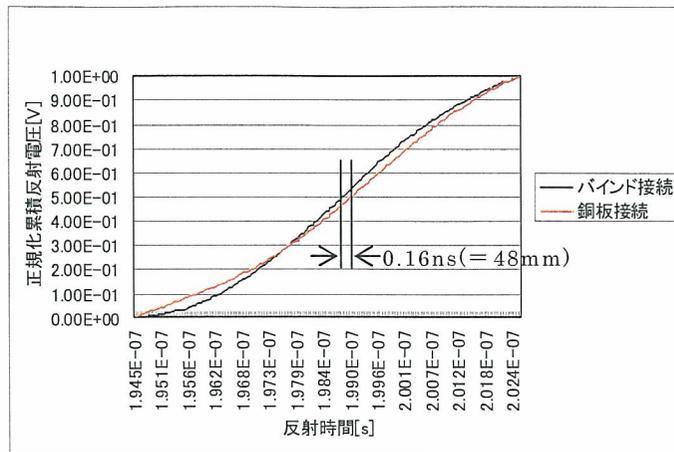


図 4.6.67 2m 管 2 本の接続部からの反射

4) 結言

本研究では、金属鋼管中に存在する欠損部分で電磁波の反射が起こり、エコーパルスが発生する。このエコーパルスを測定することで鋼管中の劣化を検出できるか検討を行った。

本研究ではまず金属ケーブル及び金属線で試験を行い、金属中に異常が検出された際、エコーによって検出されることが原理的に確認することができた。これは基礎実験により、伝送線路にパルス信号を印加したとき、インピーダンス変化点でパルス波が反射され、それを計測できることが明確になった。また、パルス波の反射が金属管を伝送路とした場合でも起こり、それを計測できることが実証された。金属管を用いた実験では

- ①劣化の大きさにより反射波の電圧値が変化する。
- ②劣化位置の違いにより反射波の到達時間が変化する。
- ③金属管の接続部においてパルス波の反射が発生することが明らかになり、この固定距離からの反射波を測定距離マーカとして利用することができる。

する現象を観測できた。

本研究の実験は、これら物理的な現象を確認する目的であり、現状では

- ①印加パルス幅が 71ns、距離分解能は 22m
- ②金属管へのパルス信号供給はクリップ止め
- ③金属管相互の接続部はバインド留め

であるが、今後これらを改善することで更に測定精度を向上できる。

管路の腐食による肉厚減少の検出精度は、

肉厚減少 = 管路断面積の減少 = 管路インピーダンス（抵抗）増加と捉えれば、図 4.6.68 に示す反射係数に比例したパルス反射波の変化が起こる。したがって、測定機の AD 変換部の分解能を改善することで対処できる。

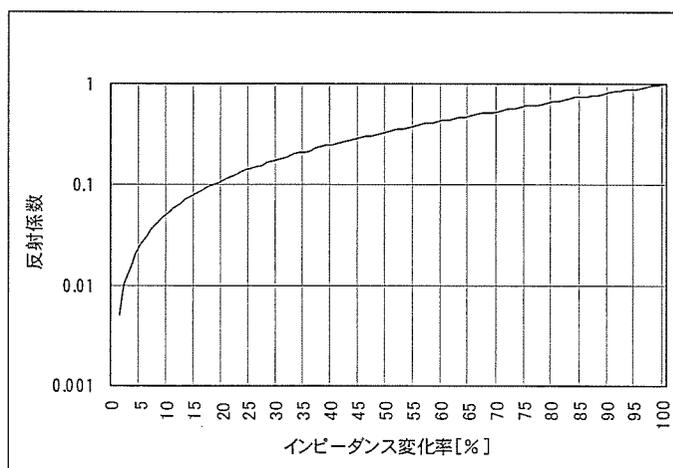


図 4.6.68 インピーダンス変化率と反射係数

5) 今後の研究課題

(1) 埋設管路のパルス伝送特性

本試験では大気中に静置した鋼管を用いて試験を行ったが、実用化に向けては埋設状態での応答を調査する必要がある。そのため、埋設状態の管路において、土壌を測定パルス信号の帰路とした場合の基礎定数を明らかにする必要がある。

第一に埋設管路でのパルス伝搬速度を明らかにし、管路の劣化位置を推定するための演算式を導く。

第二に減衰特性（距離依存性）を検討し、管路の劣化位置までの距離に依存するパルス反射波の減衰を考慮した、劣化規模を推定するための演算式を導く。

第三に周波数特性（距離依存性）を検討し、パルス伝搬経路の周波数特性によるパルス反射波の時間的広がりを考慮し、劣化の位置と規模を推定する演算式の補正式を導く。

また、これらの基礎定数は土質、水分含有量により変化するものと推定されるため、このパラメータによる変化も明らかにする必要がある。

(2) 測定プローブ

埋設管路は防食のための塗装がなされ、また、埋設状態においては管路表面が腐食している場合もある。測定用のパルス信号を測定機から電氣的に接続するために、測定プローブ接続位置を研磨することは、管路の防食上好ましくない。

測定用のパルス信号を電磁的な方法（マグネットプローブと呼ぶことにする）で接続することで、管路に傷を付けず、且つ簡易に取り付けられるプローブ構造を設計する。このためマグネットプローブの試作を行い、管路とパルス伝達の整合性を明らかにし、設計パラメータを導く。

(3) 測定機

ハードウェアに関しては、前項の基礎定数を基に測定時間分解能、測定電圧分解能、測定周期など、測定機の所要性能を確定し、ハードウェア設計を行う。

ソフトウェアに関しては、測定ハードウェアでサンプリングされた測定値から、管路劣化の位置と規模を推定・表示するための演算を行うプログラムを設計する。

(4) おわりに

本方法は検査対象となる水道管にパルスジェネレータを接続し、急峻な電磁パルスを入力し、その反射を同じ場所に接続したオシロスコープで検出するだけで遠隔地の欠損が検出できる大変魅力的な方法である。本年度はその原理をいくつかの模擬的に欠損を作った水道管によって確認した。しかし、この方法は、検出対象全体が電気伝導体でなければならないという制限がある。多くの水道管路は比較的短い鑄鉄管をゴムなどのパッキングを介して接続したものであり、必ずしも全体が電氣的に連なっているとは限らない。当初はある程度の電氣的接続が鑄鉄管の間にあるという前提で実験を開始したが、3) (4) で示したように接続部分の電気抵抗が大きい場合にはそこでの電磁波の反射が支配的になり、その接続部分より先の欠損は見だしにくいことが分かった。従って、今後の研究は接続部分のない鋼鉄管を対象に進めることにしたい。一方、接続部分のある鑄鉄管の欠損を見いだすために、電磁パルスの注入・検出する小さなプローブを管内面に設置して地中に埋設されている鋼管を非掘削で欠損を検出する新しい着想についても来年度以降検討したい。

4.6.3 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／岐阜大学 鎌田敏郎

1) はじめに

現在、地中に埋設された水道管路施設に対して、その老朽度を非開削で効率良く適確に診断する手法は未だ確立されていない。今後、老朽管路の増加が見込まれるわが国では、管路の状態を、できるかぎり定量的に非開削・非破壊で評価できる方法の開発が急務となっている。

そこで本研究では、下水道等の鉄筋コンクリート管の劣化度評価手法として実績のある衝撃弾性波法¹⁾に着目し、この手法のダクタイル鋳鉄管での老朽度評価への適用性について供試管を用いた実験および有限要素法を用いた解析により検討した。

2) 実験概要

(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（エポキシ粉体塗層およびモルタルライニング：呼び径150mm、肉厚7.5mm）を、図4.6.69に示すように1mに切断したものをベースとし、以下に示す①～④の4種類の供試管を作製した。すなわち、外面からの腐食により肉厚が減少した状況を模擬するため①外面側を平均2mmの厚さで切削したもの（図4.6.70(b)：以降、「2mm切削管」と呼ぶ）、および②外面側を平均4mmの厚さで切削したもの（図4.6.70(c)および図4.6.71(b)：以降、「4mm切削管」）を作製した。また、孔食を想定して③外面からの切削は行わずに直径50mmの貫通孔を空けたもの（図4.6.70(d)：以降、「削孔供試管」と呼ぶ）も作製した。さらに、上記の劣化供試管との比較のために④無垢の供試管（図4.6.70(a)および図4.6.71(a)：以降、「健全供試管」と呼ぶ）を用意した。また、管長の違いが計測結果に与える影響を検討するために、図4.6.72に示すような5m管（エポキシ粉体塗層：呼び径150mm、肉厚7.5mm、全長5m）を用いた。

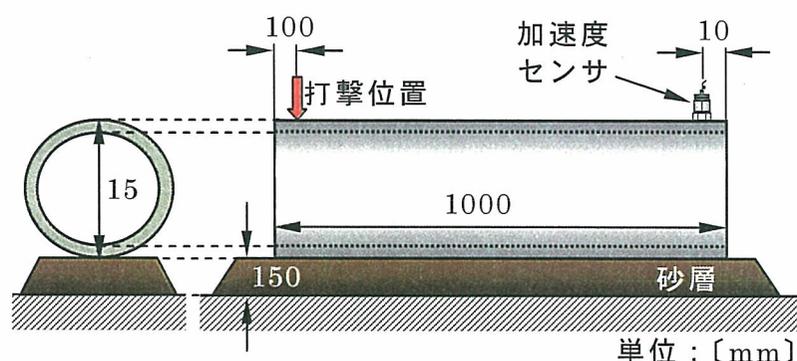


図 4.6.69 供試管 (1m 管) 設置および打撃と受振の位置関係

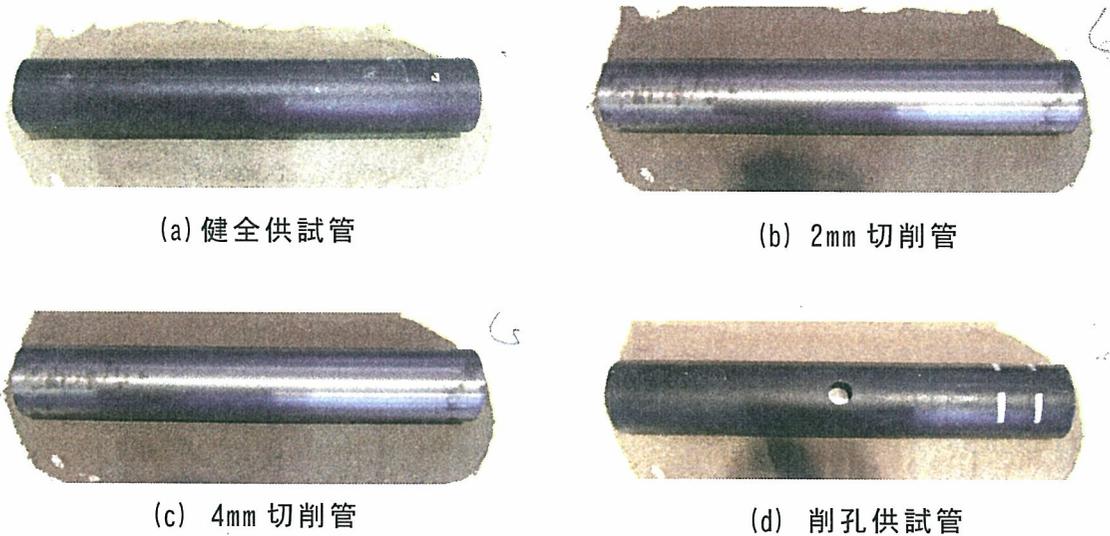


図 4. 6. 70 供試管概況

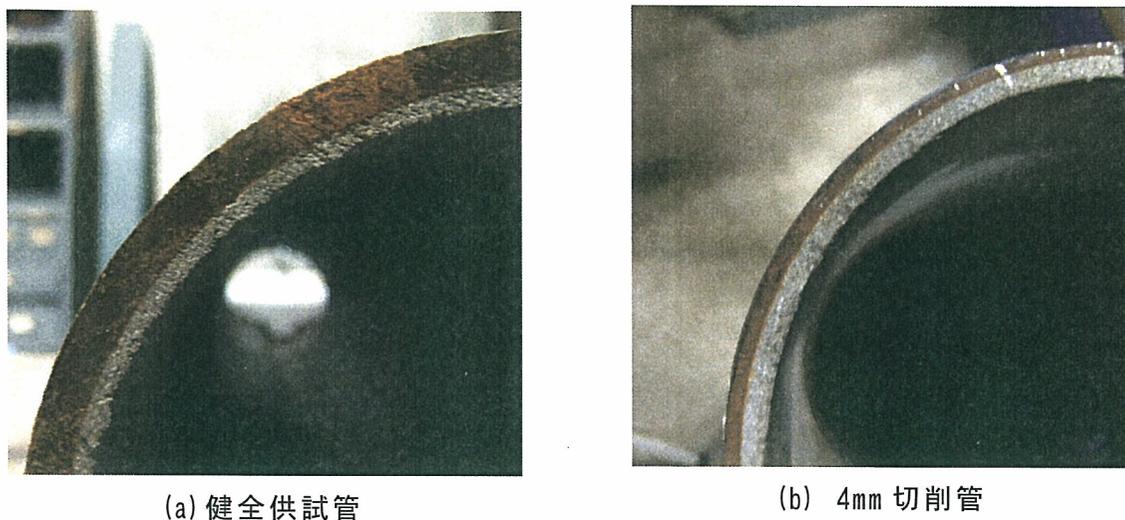


図 4. 6. 71 供試管断面

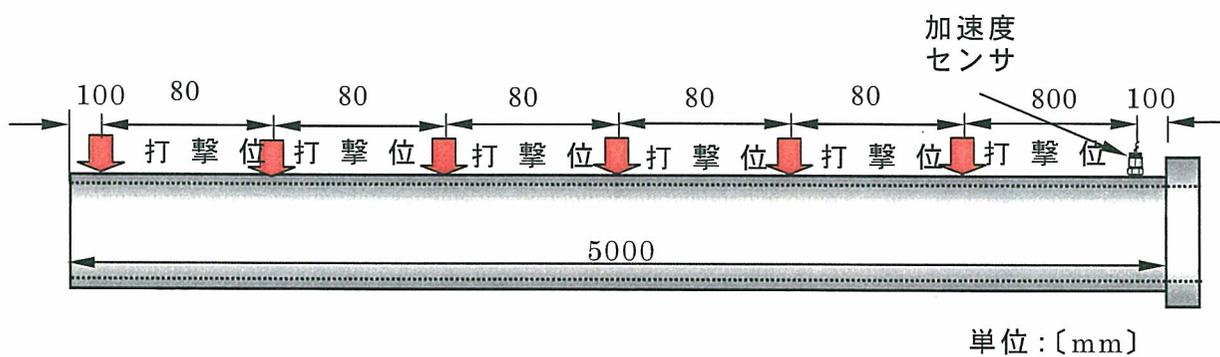


図 4. 6. 72 5m 管における打撃と受振の位置関係

(2) 弾性波計測方法

① 1m 管における打撃および受振の方法

衝撃入力方法は、直径 9.5mm の鋼球落下（落下高さ 100mm）、およびプラスチックハンマーによる直接打撃、供試体表面にあらかじめ設置したゴム版を介してのプラスチックハンマーによる打撃の 3 種類とした（打撃位置とセンサの位置は図 4. 6. 69 参照）。鋼球落下によれば、ハンマー打撃と比べて、より広い周波数範囲での管の応答が評価できるものと考えられる。一方、管の共振周波数そのものを捉えるためには、ハンマー打撃が適している。供試体の設置状況および打撃と受振の位置関係は、図 4. 6. 69 示すように、厚さ 150mm の砂層上に底面全面支持とし、管端部から 100mm の位置を打撃し、もう一方の管端部から 100mm の位置で受振を行った。計測の状況を図 4. 6. 73 に示す。弾性波の受振には、加速度センサ（TEAC 製：応答周波数範囲 0.003～30kHz）を用いた。受振された波形は、アンプ（TEAC 製：SA-630）を介し、高速波形収集システム（TEAC 製：NR-500）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、高速フーリエ変換（FFT）により周波数分布を求めた。

② 5m 管における打撃および受振の方法

打撃方法は、ゴム版を介したプラスチックハンマー打撃のみで行い、図 4. 6. 72 に示すようにセンサから 800mm 間隔で 4800mm まで離れた位置でそれぞれ打撃した。得られた受振波形から高速フーリエ変換（FFT）により周波数分布を求めた。なお、用いたセンサおよび計測装置は、①と同じである。

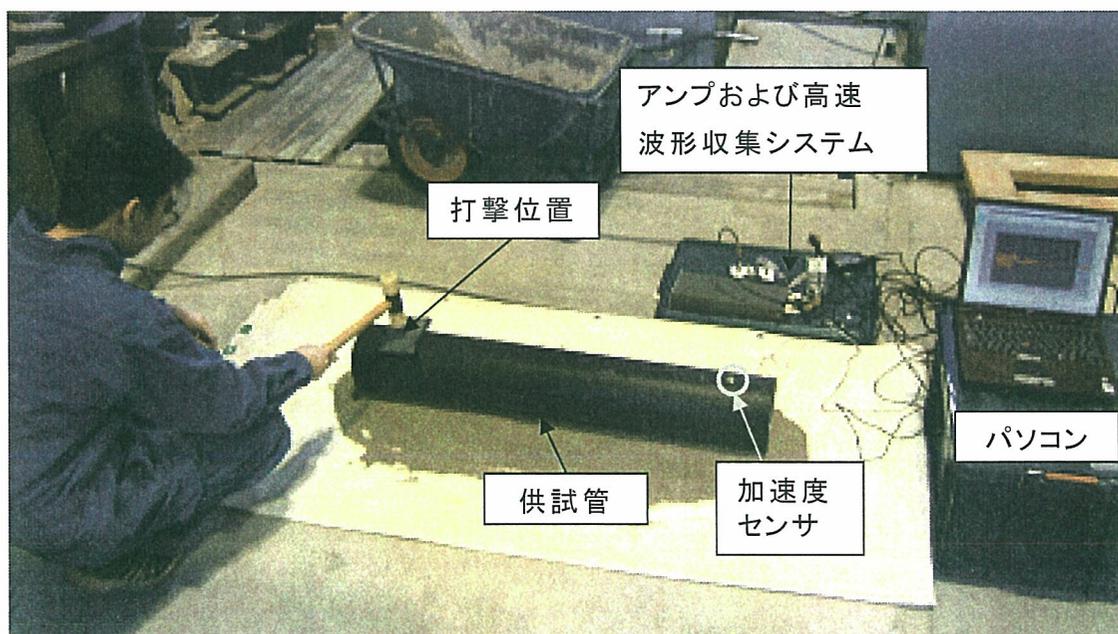


図 4. 6. 73 計測状況

3) 解析概要

(1) 解析方法

解析モデルは弾性体モデルとし、3次元有限要素法解析（LS-DYNA 使用）を行った。入力点から軸方向に 800mm の距離にある管頂部での加速度波形より周波数分布を求めた。

(2) 解析モデル

解析には、図 4.6.74 に示すような、内径 150mm、全長 1m、密度 7.15g/cm^3 、弾性係数 150kN/mm^2 、ポアソン比 0.28 のモデルを用いた。管の厚さは 7.5mm（健全体相当モデル）、5.5mm（2mm 切削管相当モデル）および 3.5mm（4mm 切削管相当モデル）の 3 種類を用意した。管の両端から管中央に向かってそれぞれ 100mm の位置に衝撃荷重作用点（図中の a）と波形抽出点（図中の b）を設けた。また、衝撃の入力波形は図 4.6.75 に示す。

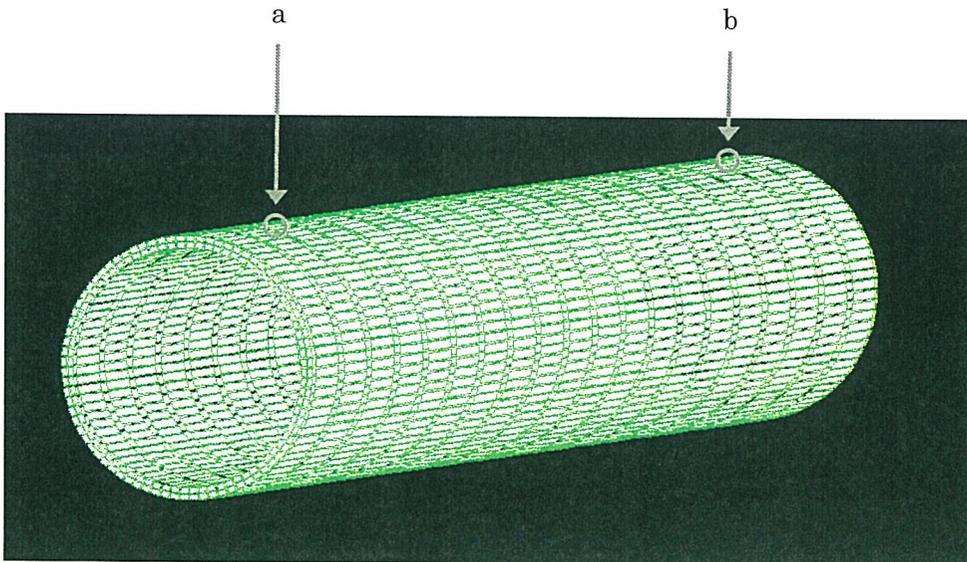


図 4.6.74 解析モデル