

ii) 衝撃入力位置比較 2：内側（付図-3.11）と外側（付図-3.12）の比較

受振波形および周波数分布ともに、ほぼ差がないことがわかった。よって、弾性波計測を行う上では、どちら側から衝撃を与えてもよいといえる。得られるデータに差がないため、研究においては、数多くの計測を行うことを考慮し、簡便に衝撃を与えられる外側を衝撃入力位置とする。

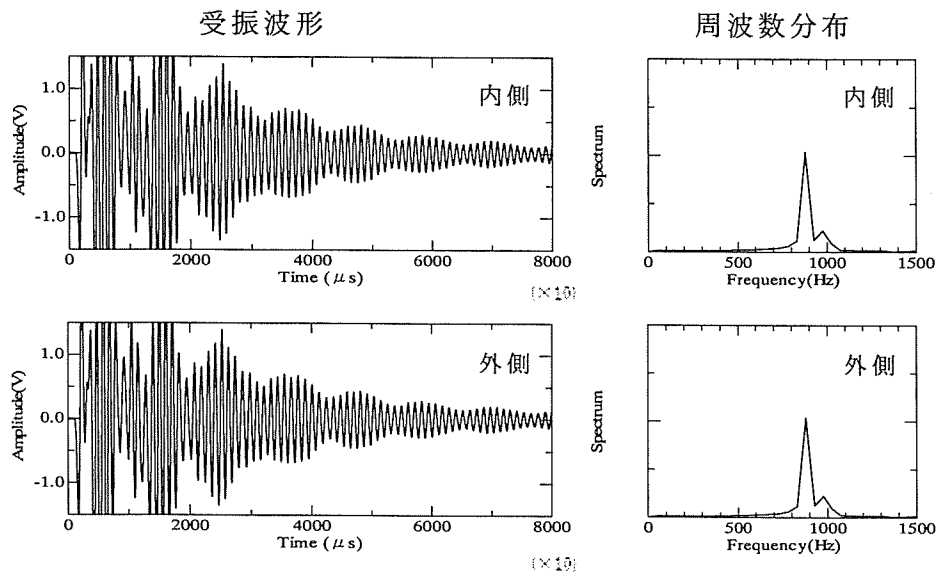


図 3.6.49 衝撃入力位置の比較 2

③ 衝撃入力方法の影響

方法 I（付図-3.13）は、受振波形は規則的であり、周波数分布もばらつきが少なく卓越した周波数をもつ。しかし、他と比べると安定性に優れているとはいえない。これは、ゴムハンマの平面の部分で衝撃を入力するため、接触面積が不安定になるためだと考えられる。そのため、衝撃入力方法として不適である。方法 II（付図-3.14）は、安定性は優れており、受振波形は規則的であるが、周波数分布は卓越した周波数が広範囲におよんでいて管の振動数を把握することができない。よって、衝撃入力方法として不適である。方法 III（付図-3.15）は、受振波形は非常に規則的であり、周波数分布もばらつきが少なく卓越した周波数をもっている。さらに、計測結果が非常に安定しているため、衝撃入力方法として適しているといえる。方法 IV（付図-3.16）は、受振波形は規則的であり、周波数分布もばらつきが少なく非常に卓越した周波数をもっている。さらに、計測結果が非常に安定しているため、衝撃入力方法として適しているといえる。以上の結果より、方法 III および IV が衝撃入力方法として適しているといえる。よって、両者とも計測方法として適用可能であるが、本研究ではより簡便に計測が行える方法 IV を採用した。

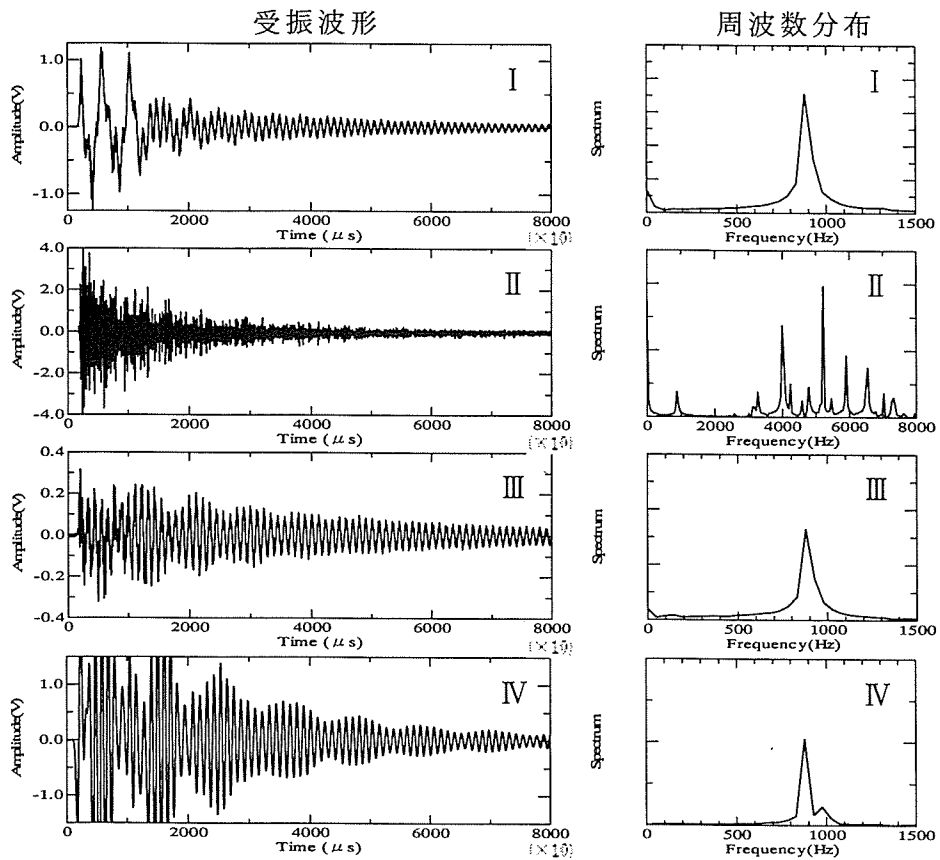


図 3.6.50 衝撃入力方法の比較

④ サンプル設定の影響

様々な測定を行った結果から、一つの設定ですべてのケースにおいて適したデータを得られないことが確認できた。つまり、対象物の状況に応じて設定を変えることが必要である。また、サンプリング範囲の選択によって、周波数分布のばらつきに差が出ることも明らかになった。これは、受振波形の先頭部分には、衝撃を与える物と対象物の接触により不規則な波形が含まれることが原因である。そのため、先頭部分を除いた範囲を選択することで、ばらつきの少ない周波数分布が得られることがわかった。

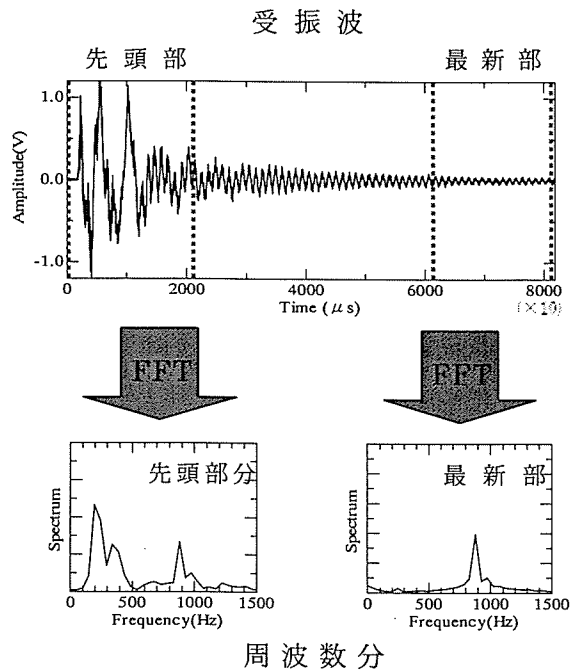


図 3.6.51 サンプル設定の比較

4) 本章の結論

本章(3)によって得られた結果を以下の表 3.6.1 に示す。また、その結果を踏まえて、肉厚を推定するための最適な弾性波計測方法を図 3.6.52 に示す。なお、ばらつきの少ない周波数分布を得るために、サンプリング設定で先頭部分を含まない範囲を高速フーリエ変換する。

表 3.6.1 弾性波計測方法の項目別比較一覧表

		受振波形	周波数分布	安定性	総合評価
センサ貼付 位置 比較 1	端部から 10cm	○	○	○	○
	中央部	○	△	×	×
	衝撃位置付近	○	○	△	△
センサ貼付 位置 比較 2	内側	○	○	○	○
	外側	○	○	△	△
衝撃入力位置 比較 1	端部から 10cm	○	○	○	○
	中央部	○	○	△	△
衝撃入力位置 比較 2	内側	○	○	○	○
	外側	○	○	○	○

		受振波形	周波数分布	安定性	簡便性	総合評価
衝撃 入力方法	I	△	○	△	△	△
	II	○	×	○	○	×
	III	○	○	○	△	○
	IV	○	○	○	○	○

○：適用可，△：場合により適用可，×：適用不可，：計測方法

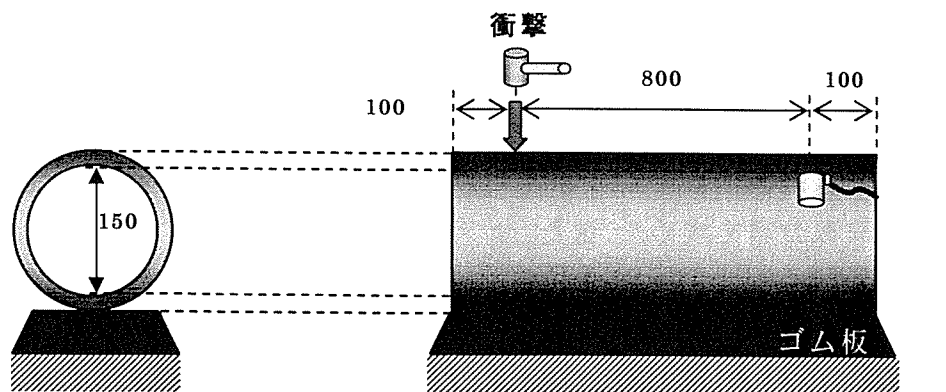


図 3.6.52 最適な弾性波計測方法

単位 [mm]

(4) 肉厚と周波数分布の関係

1) 本章の概要

衝撃弾性波法を用いた計測により得られるデータには、最大振幅値、波形減衰時間、周波数分布等がある。既往の研究により、最大振幅値と波形減衰時間は、管にかかる圧力や衝撃力により大きく変化するため、埋設状況や計測条件の影響を受けやすいことが確認されている。一方、周波数分布はそういった影響を受けにくいことも明らかになっている。そこで、本章では、ダクタイル鋳鉄管が外面腐食により減肉する状況を想定し、健全供試管から外面切削を段階的に施して肉厚を変化させ、肉厚と周波数分布の関係について検討した。ダクタイル鋳鉄管の内面塗装で大部分を占める、エポキシ粉体塗装およびモルタルライニングを施した管を対象として実験を行った。

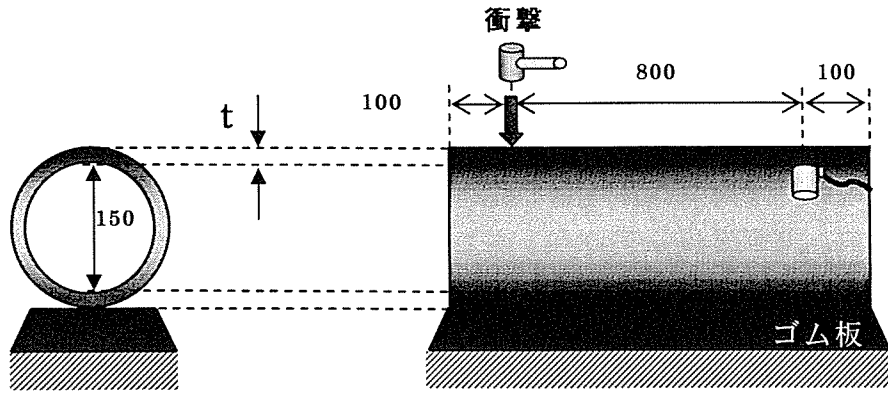
2) 実験概要

① 供試体

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3.6.44に示すように1.0mに切断したものをベースとした。また、内面にエポキシ粉体塗装およびモルタルライニングを施した2種類の管を用意し、管種ごとに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切削管と呼ぶこととする。エポキシ粉体塗装管においては、健全供試管、1.1mm切削管、1.9mm切削管、2.9mm切削管、4.0mm切削管、4.9mm切削管を用いた。モルタルライニング管においては、健全供試管、1.0mm切削管、2.2mm切削管、3.1mm切削管、4.1mm切削管、5.0mm切削管を用意した。

② 弾性波計測方法

供試体の設置状況および打撃と受振の位置関係は、図3.6.53に示すように、厚さ5mmのゴム板上で底面全面支持とし、管端部から100mmの位置を打撃し、もう一方の管端部から100mmの位置で受振した。衝撃入力は、供試管上面をプラスチックハンマで直接打撃する方法で行った。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）は最新部分の16384を対象とした（図3.6.54）。



単位 [mm]

設定肉厚 t : 7.5mm, 6.5mm, 5.5mm, 4.5mm, 3.5mm, 2.5mm

図 3.6.53 供試体の設置状況および弾性波計測方法

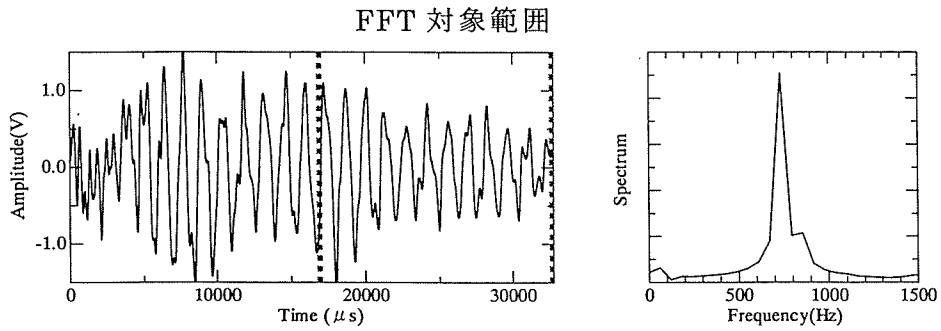


図 3.6.54 FFT 対象範囲および周波数分布の例

3) 実験結果および考察

①エポキシ粉体塗装管

図 3.6.55 に、6 種類の供試管における実験において得られた周波数分布を示す。丸印を付しているところは、各周波数分布の中で卓越した周波数で、ピーク周波数という。図 3.6.55 よると供試体の肉厚が薄くなり管の剛性が落ちるとともに、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 3.6.2 に示すように 1.0mm 程度の肉厚の減少においても明らかにピーク周波数が減少していることは明らかである。つまり、本手法を用いれば 7.5mm 厚の内面エポキシ粉体塗装管において 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。

また、今回の実験で、1.0mm 程度の肉厚の差でもピーク周波数が大きく変化することが確認できたため、今後、さらに精度を高められる可能性が示された。

表 3.6.2 ピーク周波数

供試管	ピーク周波数 (Hz)
健全供試管	732.4
1.1mm 切削管	610.4
1.9mm 切削管	549.3
2.9mm 切削管	488.3
4.0mm 切削管	427.2
4.9mm 切削管	244.1

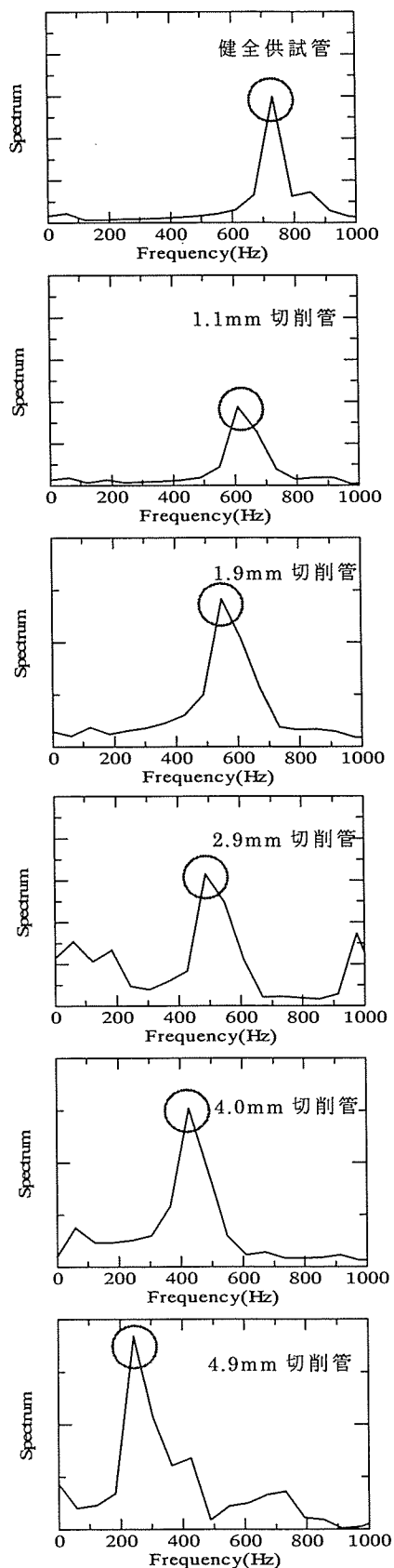


図 3.6.55 周波数分布

②モルタルライニング管

図 3.6.56 に、6 種類の供試管における実験において得られた周波数分布を示す。図 3.6.56 によると供試体の肉厚が減少するとともに、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。

健全供試管～4mm 減供試管と比べ 5mm 減供試管の周波数分布に変化が生じたのは、肉厚が非常に薄くなることによって、モルタルライニングが管の振動に与える影響が大きくなったためだと考えられる。そのため、5mm 減供試管のように分布にばらつきが生じた場合は、肉厚が非常に薄くなっていると推測できる。

表 3.6.3 に示すように、1.0mm 程度の減少にともないピーク周波数が減少していることが明らかである。つまり、本手法を用いれば 7.5mm 厚のモルタルライニング管において 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。

また、今回の実験で、1.0mm 程度の肉厚の差でもピーク周波数が大きく変化することが確認できたため、今後、さらに精度が高められる可能性が示された。

表 3.6.3 ピーク周波数

供試管	ピーク周波数(Hz)
健全供試管	976.6
1.0mm 切削管	854.5
2.2mm 切削管	793.5
3.1mm 切削管	732.4
4.1mm 切削管	671.4
5.0mm 切削管	551.4

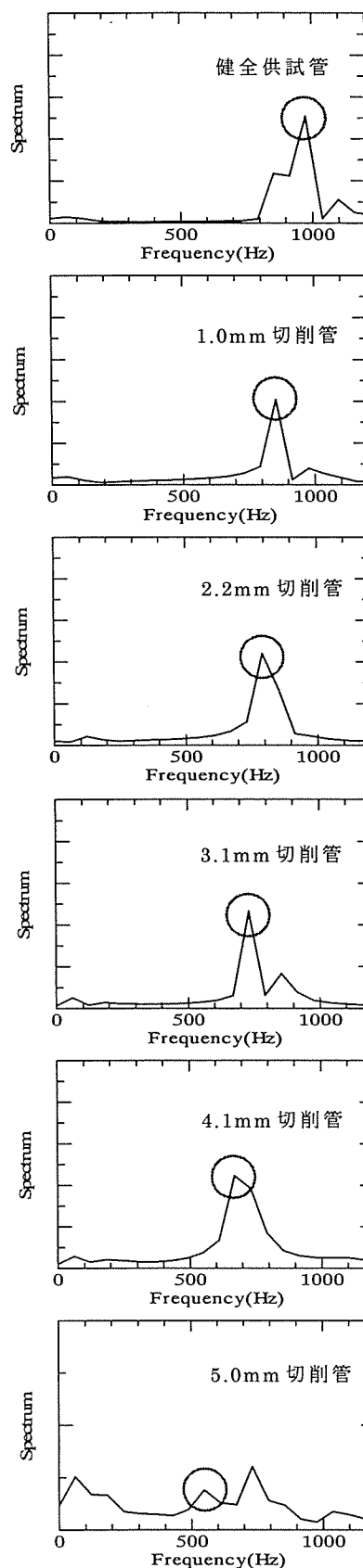


図 3.6.56 周波数分布

③内面塗装の影響

図 3.6.57 に示すように比較すると、明らかにモルタルライニング管のピーク周波数の方が高いことが分かる。このような差が生じたのは、エポキシ粉体塗装は、塗装部分の厚さが管厚に対して非常に薄いものであるのに対して、モルタルライニングでのモルタル厚さが管厚全体に占める割合が大きいことが原因と考えられる。つまり、エポキシ粉体塗装管に比べ、モルタルライニング管は管厚が非常に大きく、その影響で管の剛性が高くなっていると考えられる。

4) 肉厚推定方法

実験結果から、管のピーク周波数と肉厚は、相関関係をもつことが確認できた。その関係をグラフ化した図 3.6.57 をみると、減少傾向にはある程度規則性があることもわかる。よって、肉厚が不明な管であっても、そのピーク周波数が得ることにより、肉厚を推定することかできると考えられる。よって、衝撃弾性波法を用いれば、肉厚の定量的に評価できる可能性が示された。

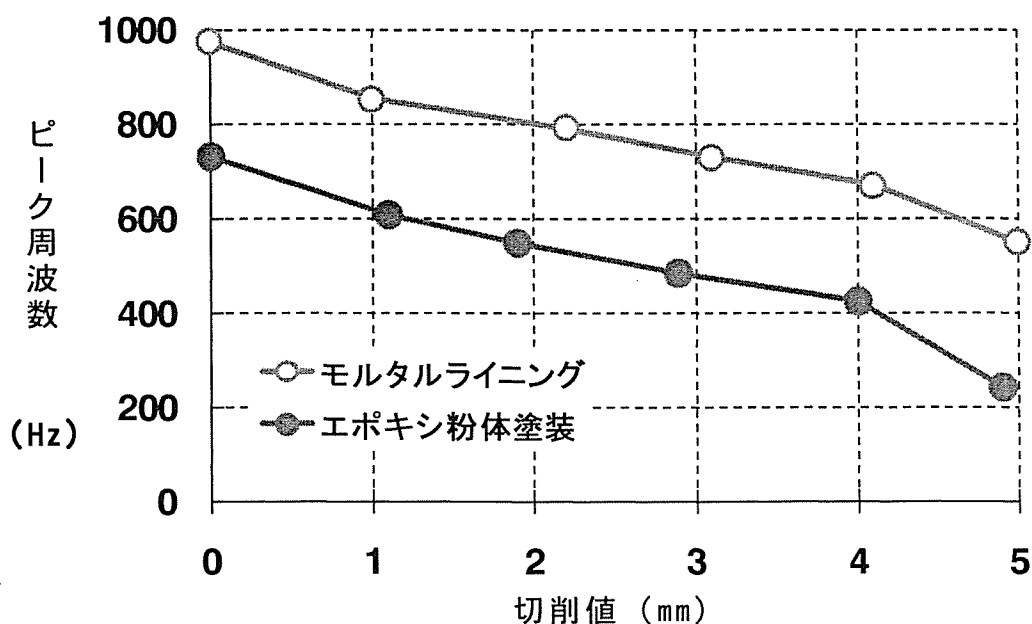


図 3.6.57 ピーク周波数の比較

5) 本章の結論

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、肉厚ごとに弾性波計測を行い、その周波数分布と肉厚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 3.6.57 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。

(5) モード解析によるピーク周波数の検証

1) 本章の概要

前章(4)で管のピーク周波数と肉厚は相関関係をもつことが確認でき、減少傾向にある程度の規則性があることが分かった。そこで、FEMによる振動モード解析を用いて肉厚毎の固有振動数を算出し、実験結果の妥当性の検証および解析によるピーク周波数の推定について検討した。解析モデルには内面塗装が考慮されていないため、内面塗装の影響が少ないエポキシ粉体塗装管の実験結果との比較を行った。

2) 解析概要

①解析モデル

管長および内径は、前章(4)の実験で用いた供試管と同様のものとし、肉厚は7.5mm, 6.5mm, 5.5mm, 4.5mm, 3.5mm, 2.5mmの6種類の解析モデルを作成した。図3.6.59に示す設定切削値とは、各解析モデルの肉厚と健全供試管モデルの肉厚(7.5mm)の差を表している(肉厚3.5mmの場合は設定切削値4mmとなる)。また、ダクタイル鋳鉄管の材料の物性値は、密度7.15g/cm³、ヤング係数150GPa、ポアソン比0.28とした。

②解析条件

図3.6.58に示すのは健全供試管モデルであり、赤線で示している部分が支持箇所である。支持条件は実験に近い条件を再現するため、底面をX軸方向およびY軸方向を固定して行った。

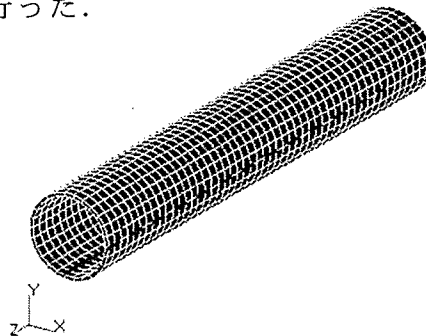


図 3.6.58 解析モデルと解析条件

③結果と考察

図3.6.59に示すように実験結果と解析結果では多少数値に差が生じている。これは実験供試体と解析モデルを比較すると、外面の塗料、肉厚および材料定数、支持条件などが厳密には一致しないことや、内面塗装が原因と考えられる。

一方、両者の減少傾向は近く、ある程度の規則性があることが確認できるため、実験結果は妥当であると言える。また、解析において実験結果の変化傾向を再現できるため、様々な劣化パターンのピーク周波数も解析を用いることで推定できる可能性が示された。

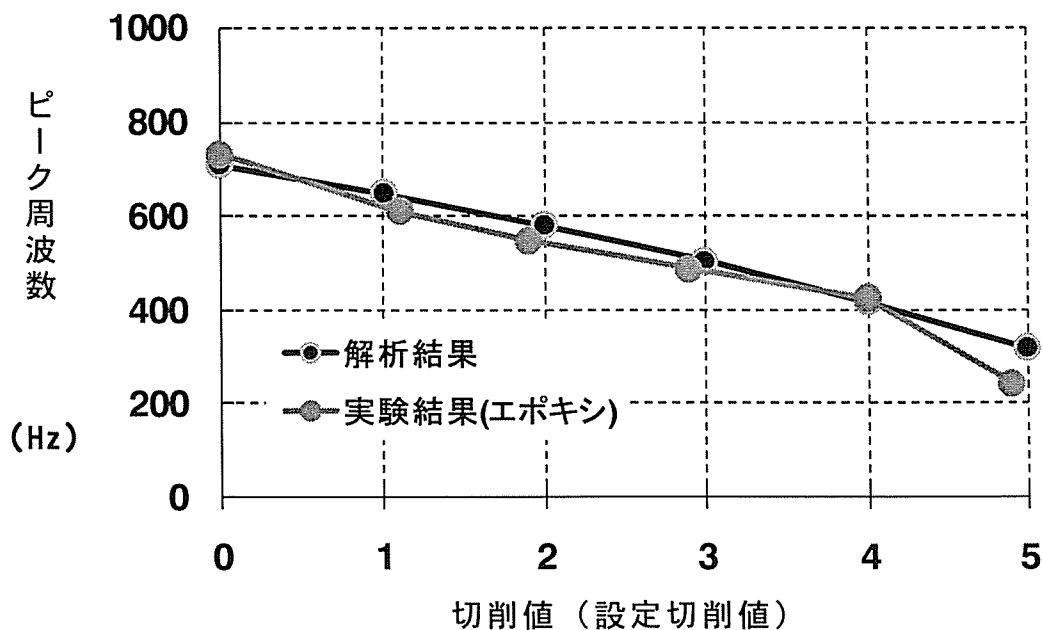


図 3.6.59 実験結果と解析結果の比較

4) 本章の結論

実験結果と解析結果の比較をすると、共にある程度の規則性があり、近い減少傾向を示すため実験結果は妥当であると判断できる。よって、解析をすることで実際の測定で得られるピーク周波数を推定することができるため、実際には測定を行っていない様々な劣化パターンのピーク周波数を推定することができる。これにより、肉厚とピーク周波数の関係を示すデータベースが充実し精度の高い診断が可能になるといえる。

(6) 結論

本研究では、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する基礎的な検討を行った。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。[第3章(3)]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。[第4章(4)]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[第5章(5)]。

以下に、本研究によって得られた結果をまとめる。

1) センサは管の端部から 100mm の位置で内側に貼り付け、衝撃入力はもう一方の端部から 100mm の位置で行うことにより、安定した適確な計測結果が得られることがわかった。また、衝撃入力においては、内側および外側による結果の差がほぼないため、どちらを用いても影響はない。本研究では、円滑の多くの計測を行うために外側打撃を採用した。

2) 衝撃入力は方法Ⅲ（ゴム板上の鋼球をゴムハンマで打撃）および方法Ⅳ（プラスチックハンマによる打撃）が計測に適していることがわかった。両者とも計測方法として適用可能であるが、本研究ではより簡便に計測が行える方法Ⅳを採用した。

3) 受振波形の先頭部分には不規則な波形が含まれるため、先頭部分を除いた範囲を選択し高速フーリエ変換することで、卓越した周波数分布が得られることがわかった。

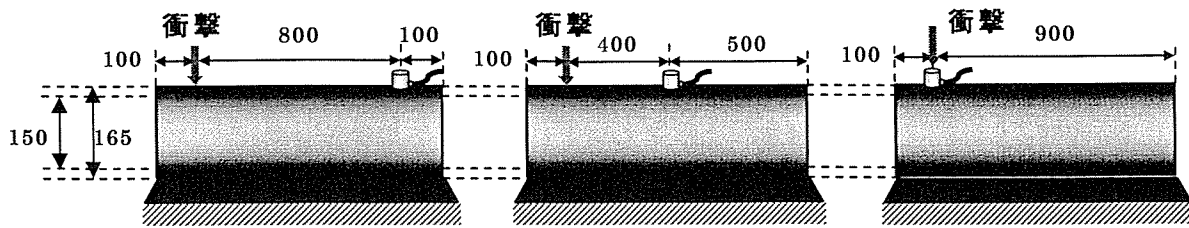
4) 管の肉厚が減少するとともに、管のピーク周波数が低周波側に移動することが確認できた。ただし、内面塗装の違いによりピーク周波数にも差異が現れる。

5) 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。

6) 解析結果を用いて肉厚とピーク周波数の関係を示すデータベースを作成できる可能性が示された。

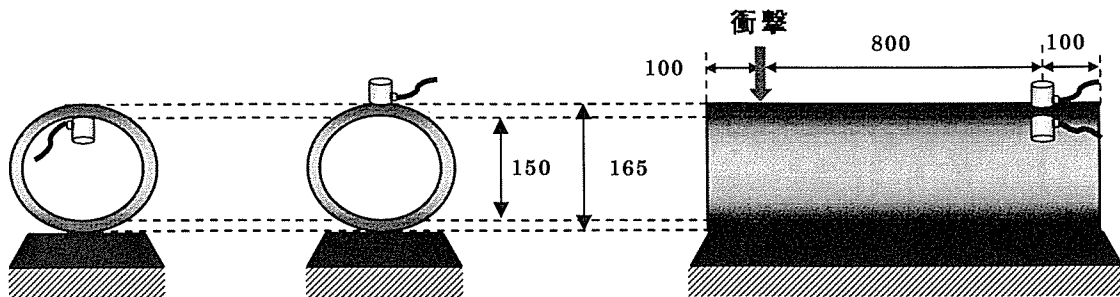
7) 肉厚とピーク周波数の減少傾向にはある程度の規則性があるため、対象とする管のピーク周波数を求めることによりダクタイル鋳鉄管の肉厚を定量的に評価することが可能である。

付図



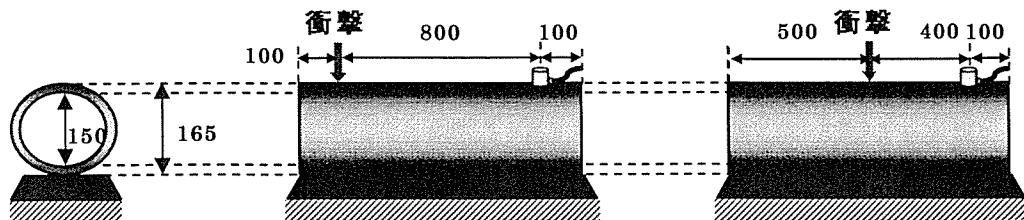
付図-3.1 センサ貼付位置 (端部から100mm, 中央部, 同箇所)

単位 [mm]



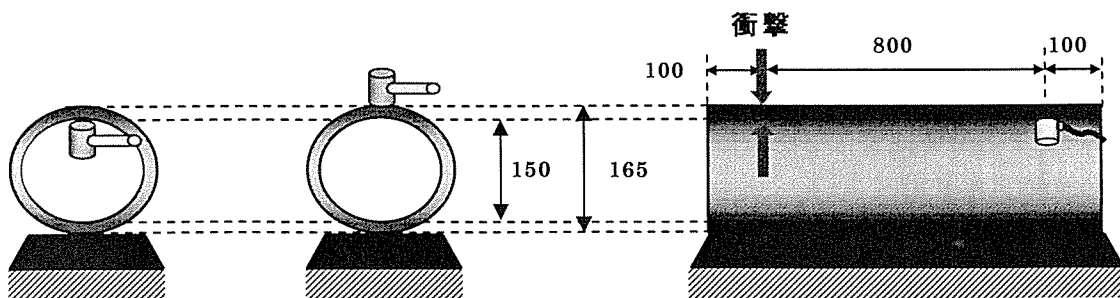
付図-3.2 センサ貼付位置 (内側, 外側)

単位 [mm]



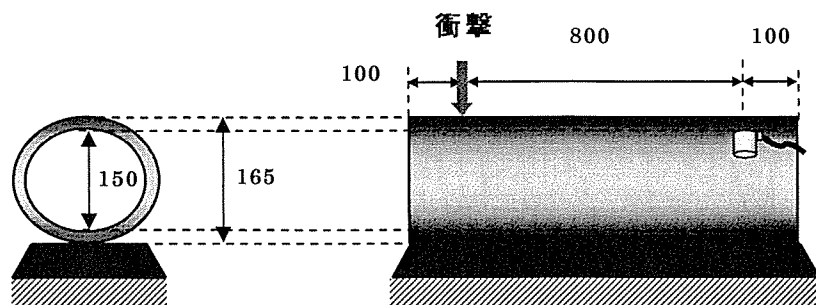
付図-3.3 衝撃入力位置 (端部から100mm, 中央部)

単位 [mm]

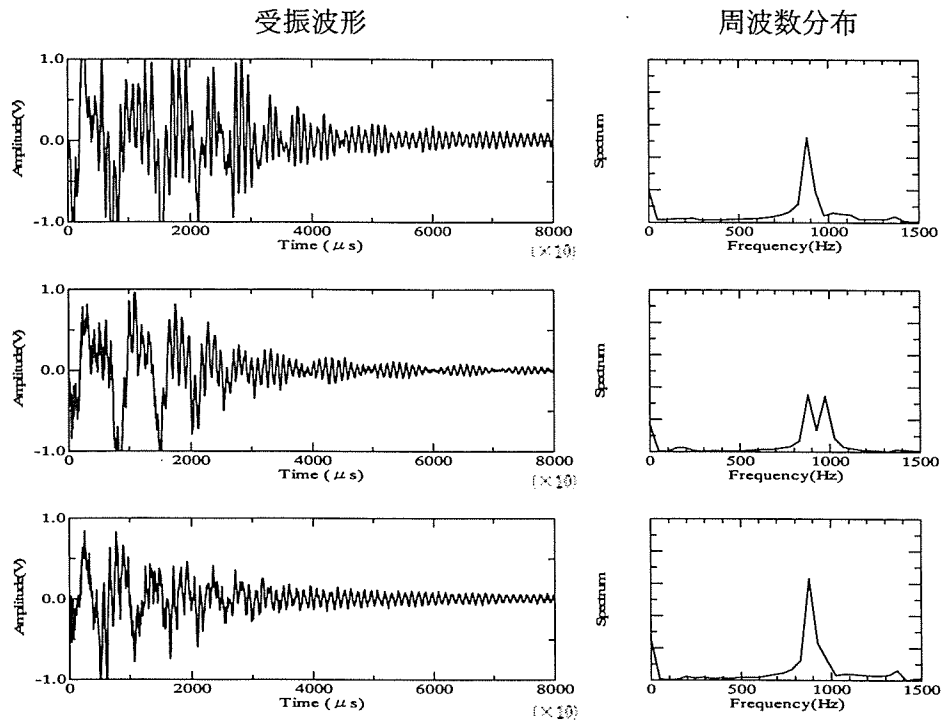


付図-3.4 衝撃入力位置 (内側, 外側)

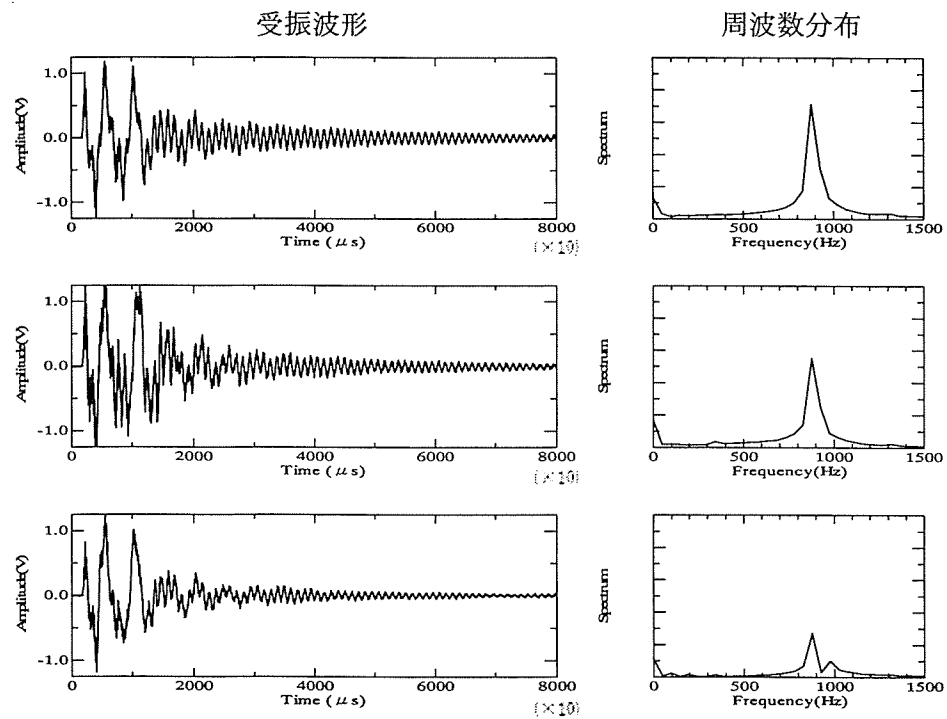
単位 [mm]



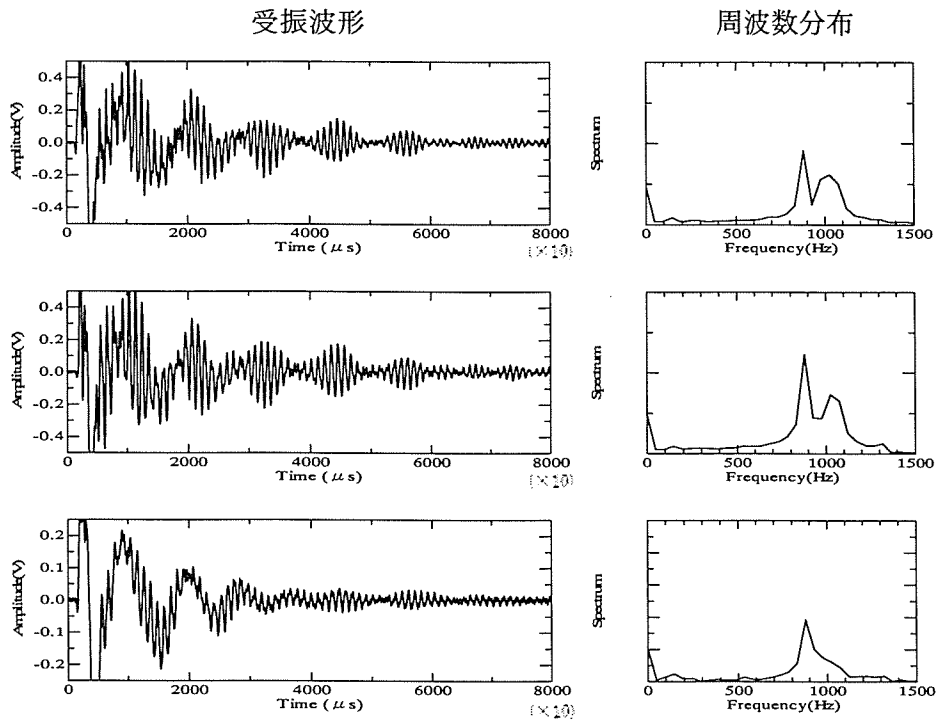
付図-3.5 衝撃入力位置と受振位置 単位 [mm]



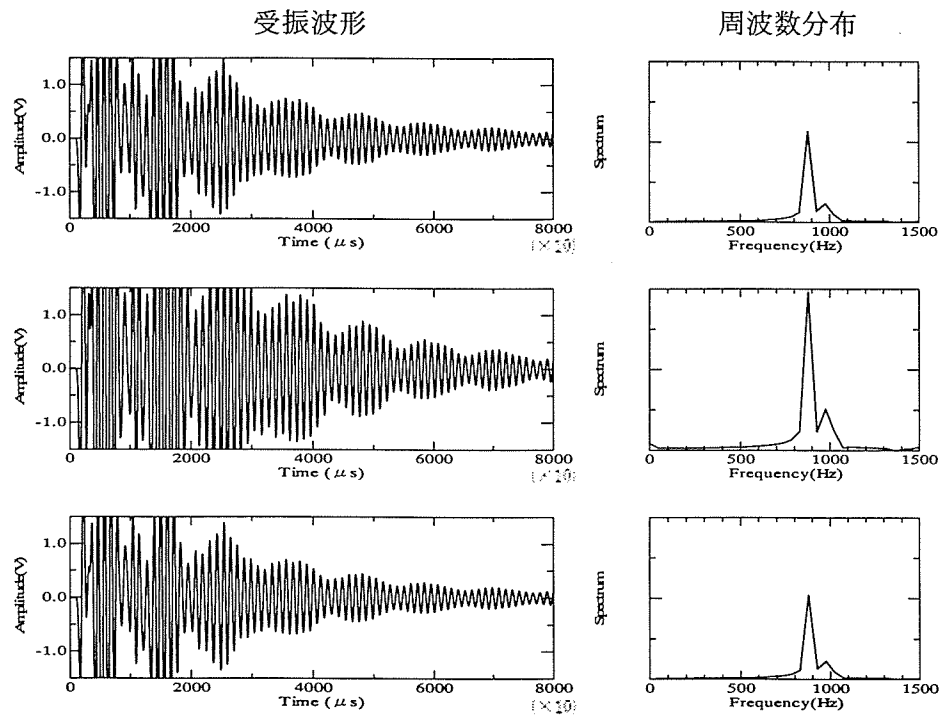
付図-3.8 衝撃入力位置付近にセンサ貼付



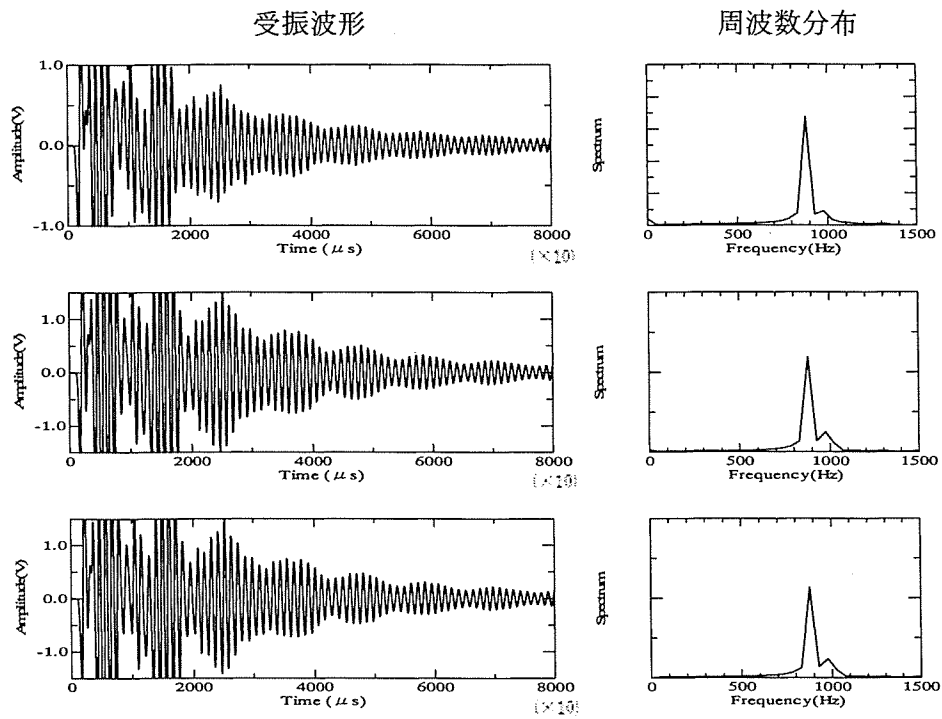
付図-3.9 管の内側にセンサ貼付



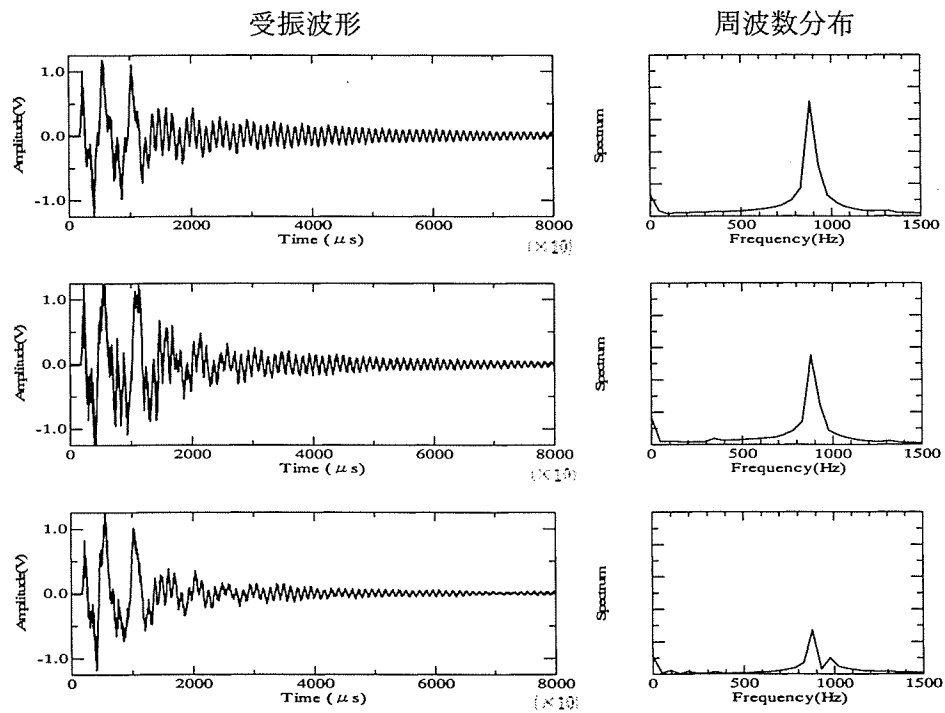
付図-3.10 中央部に衝撃入力



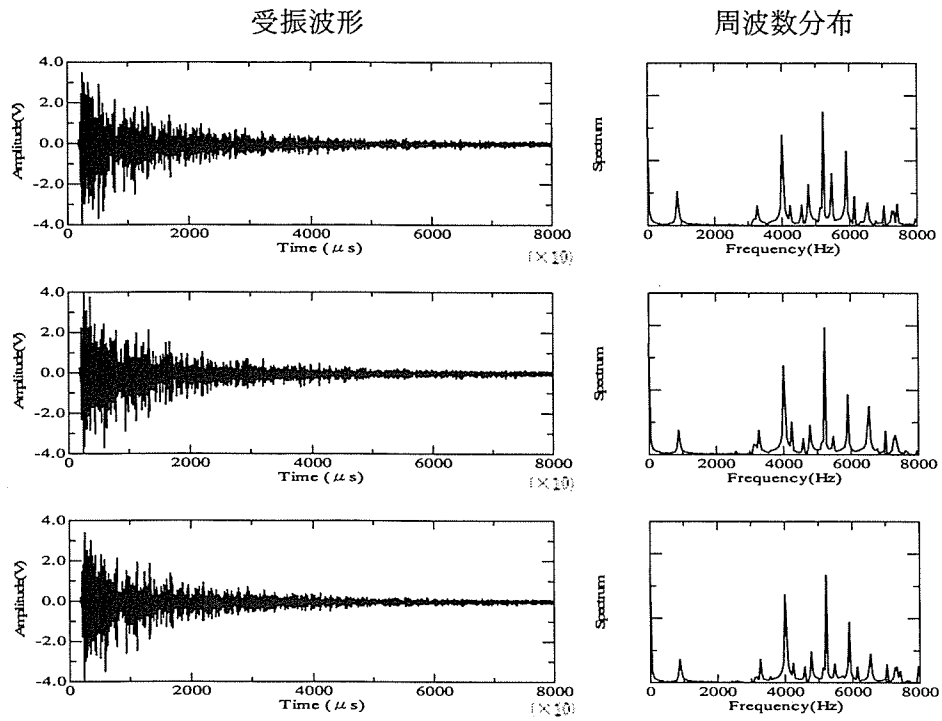
付図-3.11 管の内側に衝撃入力



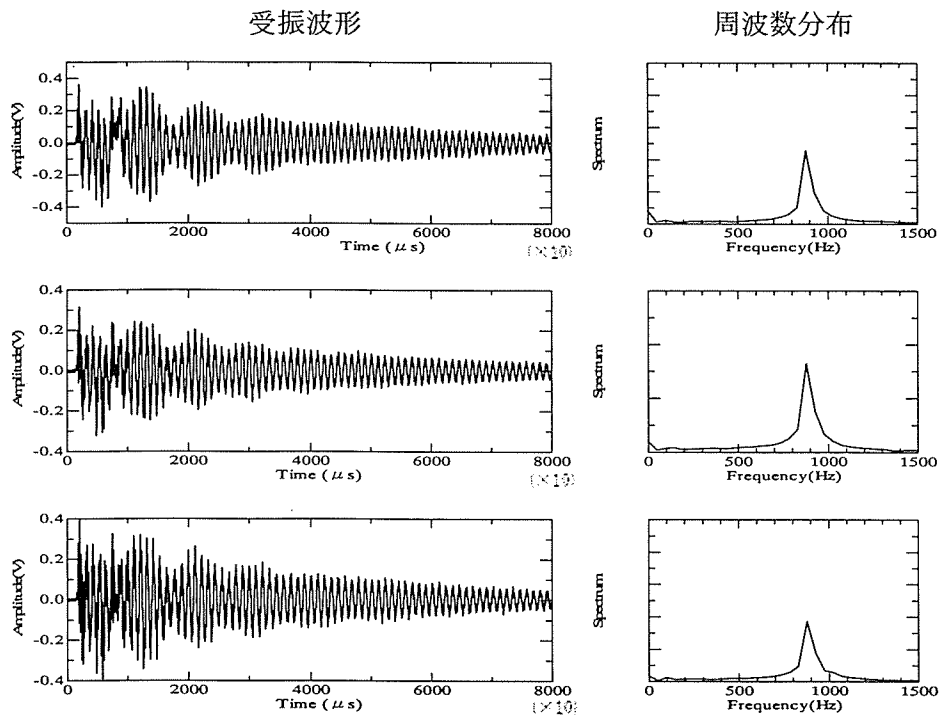
付図-3.12 管の外側に衝撃入力



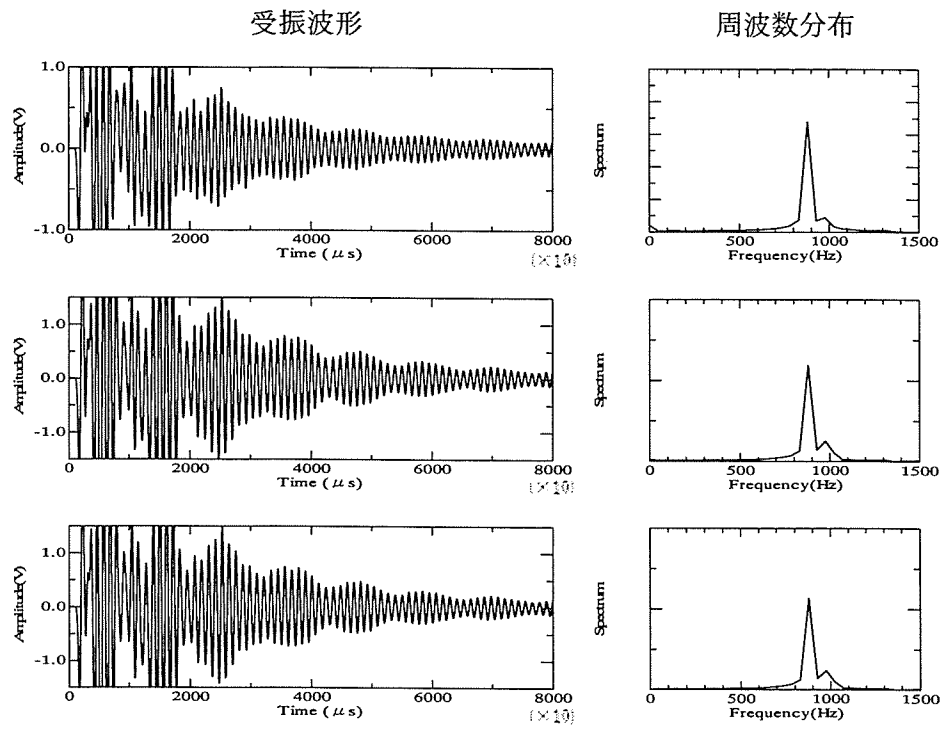
付図-3.13 衝撃入力方法 I



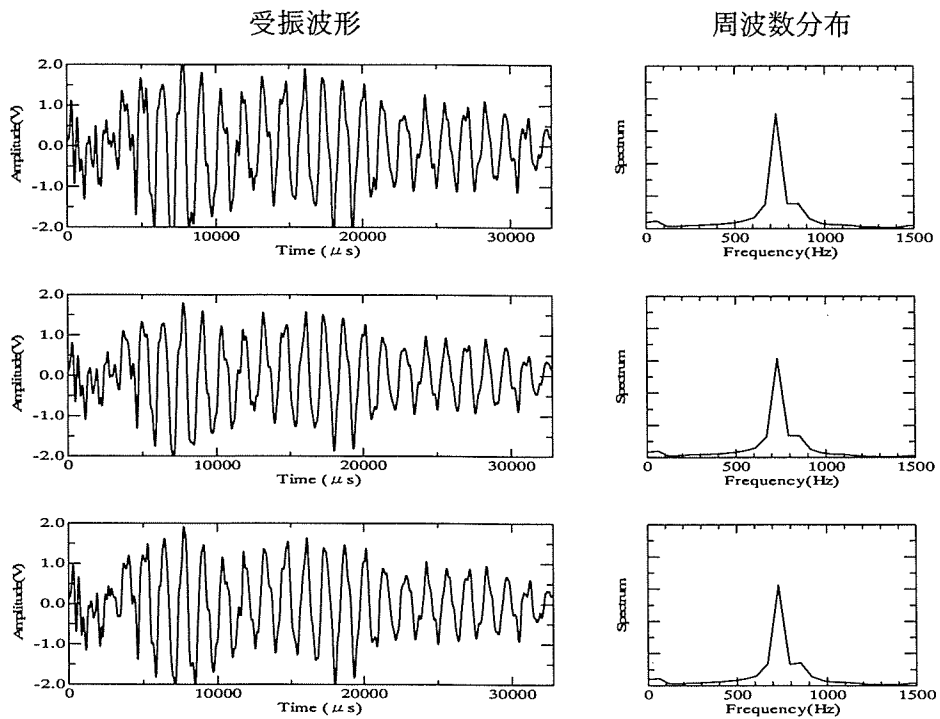
付図-3.14 衝撃入力方法II



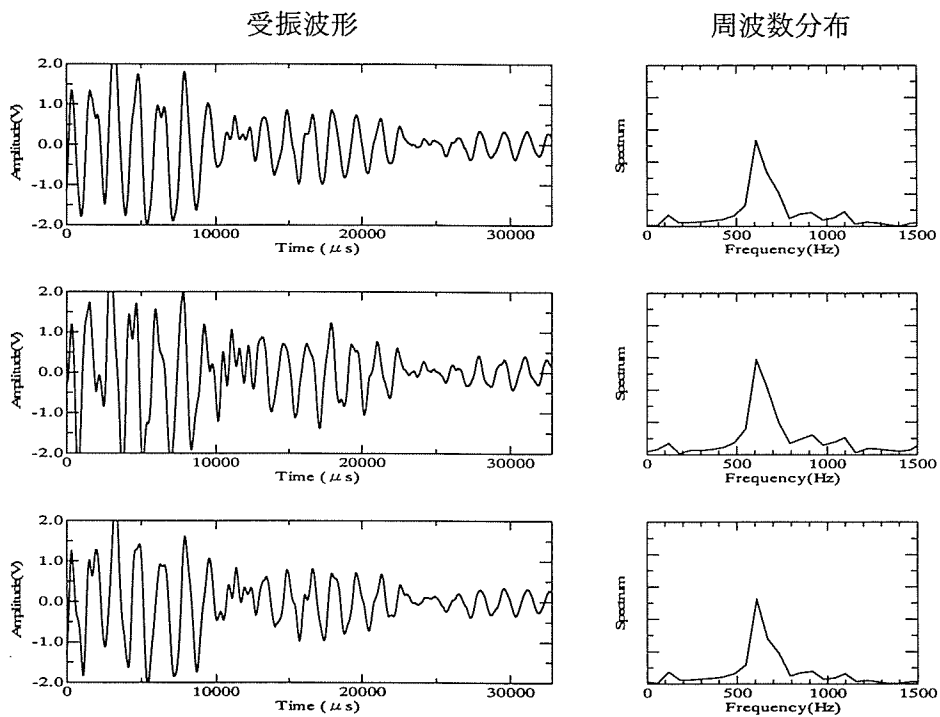
付図-3.15 衝撃入力方法III



付図-3.16 衝撃入力方法IV



付図-4.1 エポキシ粉体塗装, 健全供試管



付図-4.2 エポキシ粉体塗装, 1mm減供試管