

衝撃弾性波法によるコンクリート構造体中の
傷位置推定に関する研究
— 表面波の高精度推定による精度の向上 —

2007 年 3 月

岩手大学大学院工学研究科
電子情報工学専攻

村上 武

目次

第1章 序言.....	1
1.1 背景.....	1
1.2 本論文の目的.....	4
1.3 本論文の構成.....	5
第2章 従来の非破壊検査手法.....	6
2.1 前書.....	6
2.2 非破壊検査法.....	8
2.3 衝撃弾性波法.....	11
2.4 従来の欠陥位置推定法.....	16
2.4.1 リソナント周波数を用いた伝統的な手法.....	16
2.4.2 安倍らが提案した手法.....	17
2.5 結論.....	20
第3章 新しい手法.....	21
3.1 前書.....	21
3.2 表面波の測定実験.....	22
3.3 表面波の推定.....	25
3.4 コンクリート供試体における表面波の推定.....	31
3.5 欠陥位置推定処理.....	37
3.6 実験結果.....	39
3.6.1 欠陥が無いコンクリート供試体の場合.....	40

3.6.2 平行な欠陥があるコンクリート供試体の場合.....	44
3.6.3 斜めの欠陥があるコンクリート供試体の場合.....	50
3.7 結論.....	54
第4章 結言.....	55
4.1 まとめ.....	55
4.2 今後の課題.....	57
謝辞.....	60
参考文献.....	61

第1章 序言

1.1 背景

近年における科学技術の発展，特に計算機技術の発展はめざましく，ここ数年で飛躍的に処理速度が向上し，それまで計算することができなかったような複雑な計算やデータ処理を行うことが可能となってきた．その結果，音響の分野においても，コンピュータやDSP ボードなどを用い，より高速で複雑なデータ処理が可能になった．このような状況を背景として，現在「デジタル信号処理」の技術が急速に発展しつつある．

デジタル信号処理とは，下記に示すような処理を数値計算によって行うことである．

- ・ 信号波形を分析しその特徴を抽出
- ・ 雑音を消去
- ・ フィルタリング
- ・ 分析結果からもとの波形を合成

これらを行うには，波形の瞬時値の系列に対する膨大な計算が必要となるため，デジタル信号処理が通信・計測などの諸分野で広く実用されるようになったのは，電子計算機に関係する技術が進歩した1960年代以降のことである．

デジタル技術を信号処理に応用するようになったことにより，アナログ技

術しか使えなかった時代には考えられなかったような種々の信号処理が可能となり、デジタル信号処理技術の対象は電気通信ではなくなった。すなわち、デジタル信号処理は、波形のような1次元の信号のみならず、図形、画像等の2次元の信号処理にも用いられ、地震波、音声波、脳波、あるいはレーダーやソナーなどの測定データの処理、ロボットやリモートセンシングなどのための画像処理、その他に広く応用されるようになった。その応用例の一部として

- ・騒音の能動制御
- ・非破壊検査による構造体の欠陥検出
- ・多数センサによる音源位置及び波形の高精度推定
- ・脳血管異常の非侵襲的検査

などがあり、すでに実用化されているものもある。しかし、精度向上など、改善すべき点も多数残されている。

本論文では、このデジタル信号処理技術の応用としてコンクリート構造体の非破壊検査法について述べる。本論文で扱う検査の対象として二種類のコンクリート構造物を考える。

一つは、橋などの柱や防波堤のケーソンのように大部分が地中や水中に埋設された大規模コンクリート構造物である。特に構造物が表面を残して大部分が地下や水中に埋設されているような場合には、地表に現れている部分から得られる情報のみで、コンクリート構造物の状態を非破壊的に検査することが望まれている。

もう一つの対象は、高速道路等を構成するコンクリート製の橋である。コンクリートの引張強度は圧縮強度に比べて小さいため、あらかじめコンクリートに圧縮力を与え、荷重によって作用する引張力を相殺するように設計される場合がある。圧縮力は、コンクリート中の空洞に配置した鋼製の緊張材を引張って導入される。圧縮力の導入後は、空洞にモルタル（セメント＋水＋砂）を注入し、緊張材の防錆が図られる。このときモルタルが十分に充填されず空隙ができる場合があるため、空隙の有無を非破壊的に確認することで、充填の施工品質をより確かなものにできる。

1.2 本論文の目的

検査対象となるコンクリート構造物が非常に大きい場合を考慮して、エネルギーを大きくしやすい打撃等の衝撃による、減衰の少ない低周波の振動を利用して欠陥位置を推定する衝撃弾性波法を用いた。複数のセンサをコンクリート構造物表面に取り付け、ハンマ等の打撃により振動パルスを生成する。構造物内部に欠陥がある場合には、欠陥位置から反射波が生じるので、この反射波を解析することで欠陥位置を推定する。

ここで、コンクリートは弾性体であるため、一度打撃すれば同時に3種類の弾性波すなわちP波、S波及び表面波が構造物を伝播する。弾性波の中でP波とS波は実体波であり、P波が最もスピードが速いため、構造物内部の欠陥からP波の反射波が最も早く表面のセンサで捉えられる。よってP波を欠陥位置推定に用いる。それに対して、表面波は文字通り表面のみ伝播し、振幅は3種類の弾性波のうち最も大きい。このため、表面波が欠陥からのP波の反射波に干渉した場合、欠陥位置推定の深刻な問題となる。この問題に対して表面波推定のための方法が考案されたが、欠陥位置推定の精度はまだ不十分である。

そこで本論文では表面波について詳しく調査を行い、表面波を高精度に推定する方法を提案する。表面波を推定し、センサ波形から推定した表面波を除去することにより、従来の手法よりも欠陥位置推定の精度が向上したことを示す。

1.3 本論文の構成

本論文は4章構成で、第1章は序言であり、研究の背景、本論文の目的について述べる。第2章では従来の非破壊検査手法について説明し、本研究の必要性について言及する。第3章では新しい手法について説明し、そこで得られた実験結果を示し、新しい手法の優位性を示す。第4章は結言であり、本論文の結論を述べ、今後の課題について言及する。

第2章 従来の非破壊検査手法

2.1 前書

1995年の阪神大震災以来、巨大ビル、トンネル、ダム等のコンクリート構造物の診断技術の重要性が高まっており、その確立が急務となっている。診断技術で必要となるのは、欠陥の有無、欠陥の位置、大きさを非破壊的に診断・予測することである。近年、研究されている技術としては、X線、赤外線サーモグラフィ及び弾性波を用いた方法等がある。本論文では構造物の表面から比較的深い位置にある欠陥を探查する必要性があることから弾性波による手法を研究している。

弾性波による非破壊検査法としては、超音波法、打音法及び衝撃弾性波法などが挙げられるが、深い位置にある欠陥を探查する目的としては、衝撃弾性波法がよく用いられる。

衝撃弾性波法では構造物を打撃等の衝撃により振動させ、目的物（欠陥、空隙、鉄筋等）からの反射波を解析する。ここで、コンクリートは弾性体であるため、一度打撃すれば、同時に3種類の弾性波すなわちP波、S波及び表面波が構造物を伝播する。欠陥位置推定にはP波のみを用いる。それに対して、表面波のエネルギーは3種類の弾性波のうち最も大きいため、表面波が欠陥からのP波の反射波に干渉することが、欠陥位置推定の深刻な問題となる。また、横壁からの反射波も同様にP波の反射波に影響を与えることが問題となっていた。この問題に対して、安倍らは表面波や横壁からの反射波の影響を除去する方法

を考案[8]し、欠陥位置推定において一定の成果をあげたが、精度的には不十分であった。

本章では、まずコンクリート構造物に適用できる幾つかの主要な非破壊検査手法について説明する。次に弾性波法について説明し、本研究で採用している衝撃弾性波法について詳しく述べる。次に衝撃弾性波法による従来の手法を説明し、それらの問題点を明らかにする。

2.2 非破壊検査法

コンクリートを探査するための主な非破壊検査法として以下の手法が挙げられる。

- ・ X線を用いた方法[1]
- ・ IRサーモグラフィ法[2]
- ・ 弾性波を用いた方法[3,4,5,6,8]

X線を用いた方法は、探査対象物に対してX線を照射し、透過したX線量を評価することにより構造物の評価を行う。構造体内部の状態を透過映像のように詳しく観察することができるが、装置が大規模、高価になりがちで、大規模な構造物に対する探査には不向きである。

IRサーモグラフィ法は、赤外線センサを用い物体表面の温度分布の変化を調べ構造物の評価を行う。比較的大規模な探査に向くが、物体表面が直接見えている必要があり、また深い位置の情報が表面まで伝わりにくいため、深い位置にある欠陥の探査に対しては向かない。

弾性波を用いた方法は、弾性構造物の表面から振動を与え、センサ等で観測された弾性波を解析することで内部構造の評価を行う。この方法は与える振動の周波数により探査目的が異なる。たとえば、超音波を用いると、比較的浅い範囲（数10センチ）の範囲を詳細に調べることができる。また低周波の強い振動を地面に与えることによって地層の探査も可能であるなど、応用範囲が広い。

本研究において探査対象となるコンクリート構造物のサイズは数mから数10mであり、地中や水中に埋設されていることも考慮すると、弾性波法がもっとも適していると考えられる。

弾性波法には主に以下の3つの方法がある。

- ・超音波法
- ・打音法
- ・衝撃弾性波法

超音波法

圧電効果を利用した振動子により超音波をコンクリート構造体内部へ発信し、構造体表面に設置したセンサにより構造体内部を伝搬した弾性波形を受信して、構造体の物性や欠陥の状態を評価する。一般に超音波とは周波数が20kHz以上のものを指すが、非破壊検査における超音波法は、電氣的に振動を発生させ、電氣的な信号として受信する方法のことを指し、周波数の高低に関わらず超音波法と定義する。圧電素子による発信のエネルギーは比較的小さいため探査深度は数m程度に限られる。

打音法

ハンマ等によりコンクリート等の表面を打撃して生じた音波をマイクロフォン等の音響機器で非接触的に受信する。そして受信した波形の特性を利用して構造物の状況を評価する。これも比較的大きな深度の探査には向かない。

衝撃弾性波法

衝撃弾性波とは、構造物表面にハンマや鋼球などを衝突させたときに生じる弾性波のことである。構造物を伝搬した衝撃弾性波を、表面における加速度センサ等によって受信し、受信波の特性から構造物内部の状況を評価する手法である。弾性波の入力方法は打音法のそれと同様であるが、受信方法が接触式か

非接触式かで異なる。また，超音波法による弾性波の入力方法が電氣的な作用によるものであるのと比較して，ハンマ等による打撃はより大きなエネルギーを得やすいことが挙げられる。

本研究で対象とするコンクリート構造物は大型のもので，表面から深い位置にある欠陥を見つけることを目的としている。よって，入力エネルギーを大きくしやすく，深い位置にある欠陥の検出実績の多い衝撃弾性波法を採用した。

2.3 衝撃弾性波法

図 1 に衝撃弾性波法の模式図を示す。また、衝撃弾性波法に用いた実験機材の模式図を図 2 に示す。衝撃弾性波法の手順は以下の通りである。

1, 探査物体表面にセンサを取り付ける

本研究ではセンサに加速度センサを用いた。センサを表面に取り付ける方法は、周波数特性が変化しないように密着させるため、硬く硬化する 2 液性の瞬間接着剤を用いた。

2, 表面を打撃する

金属製の先端をもつ小型のインパルスハンマを用いて打撃する。ハンマの打撃力は直接 A/D 変換を通してコンピュータに入力され、図 3 に示すような波形になる。打撃時は、ハンマが地面に接触する時間をできるだけ瞬間的にするように心がける。このとき打撃波形の周波数は図 3 のパワースペクトルで示されるように最大約 10kHz 程度である。

3, センサで内部を伝播した弾性波を受信する

打撃位置から直接センサに到達する弾性波や、構造体内部の欠陥や壁等により反射した弾性波がセンサに入力され、アンプにより増幅後、AD 変換を通してコンピュータに入力される。センサ出力例を図 4 に示す。

4, センサ出力を解析して欠陥位置を推定する

欠陥位置推定方法について次節で説明する。

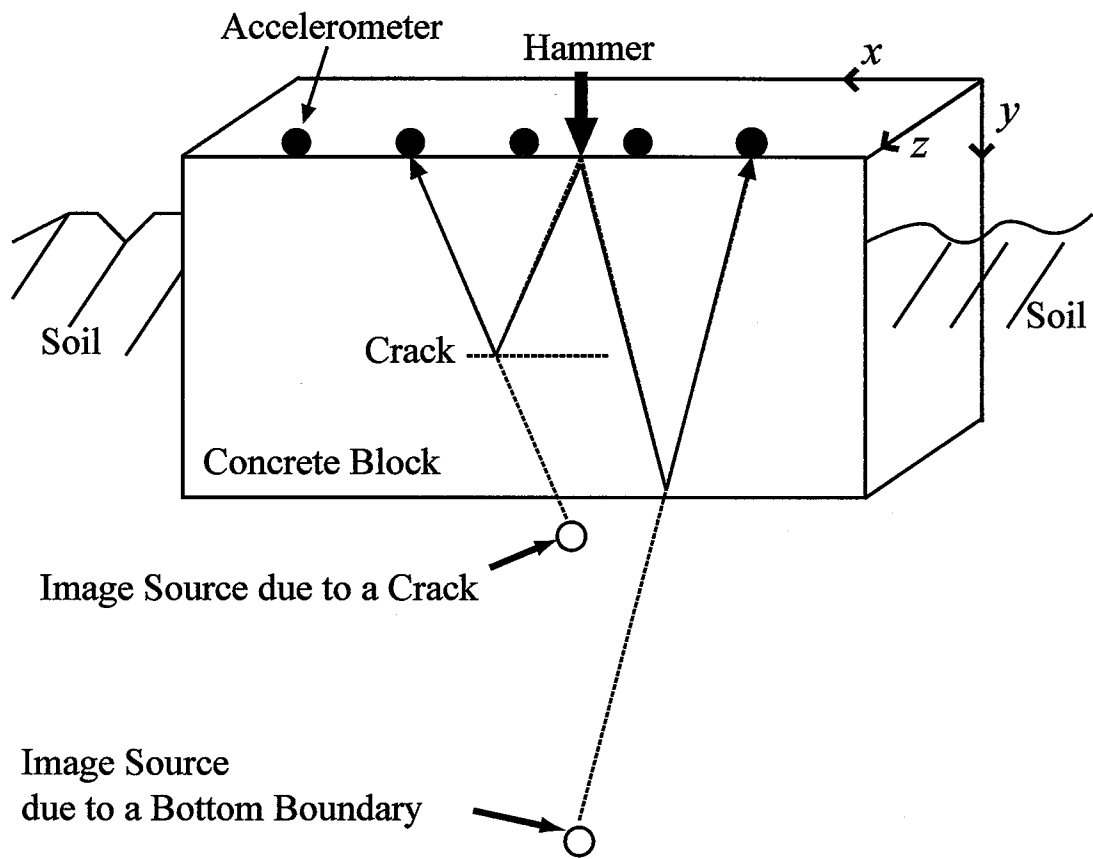


図 1 衝撃弾性波法の模式図

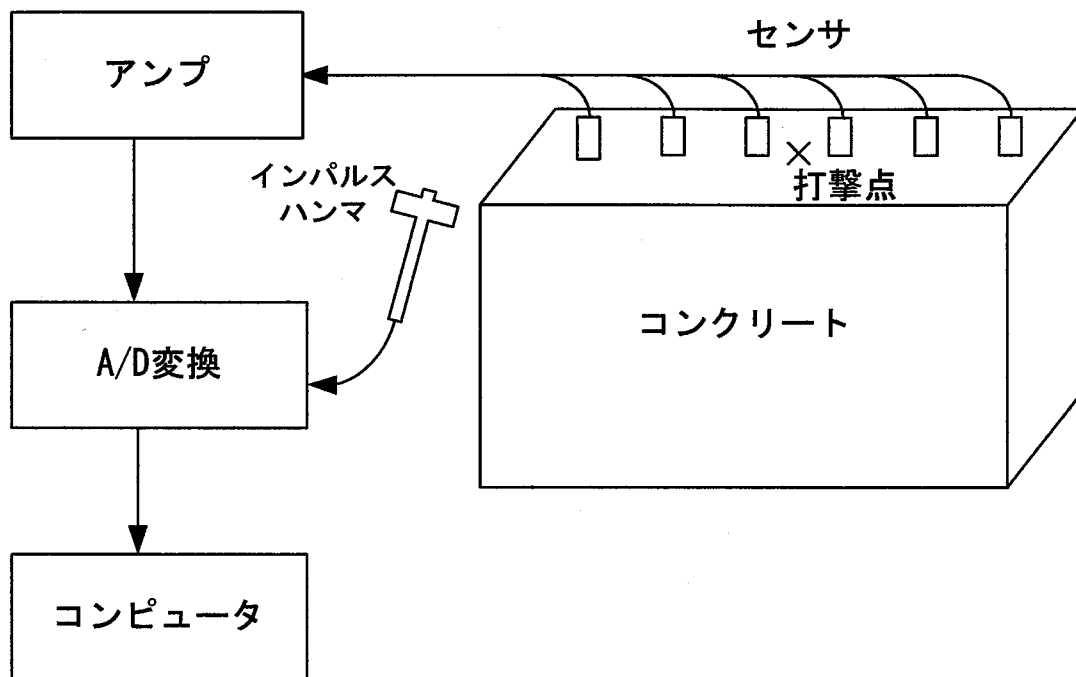


図 2 実験機材の模式図

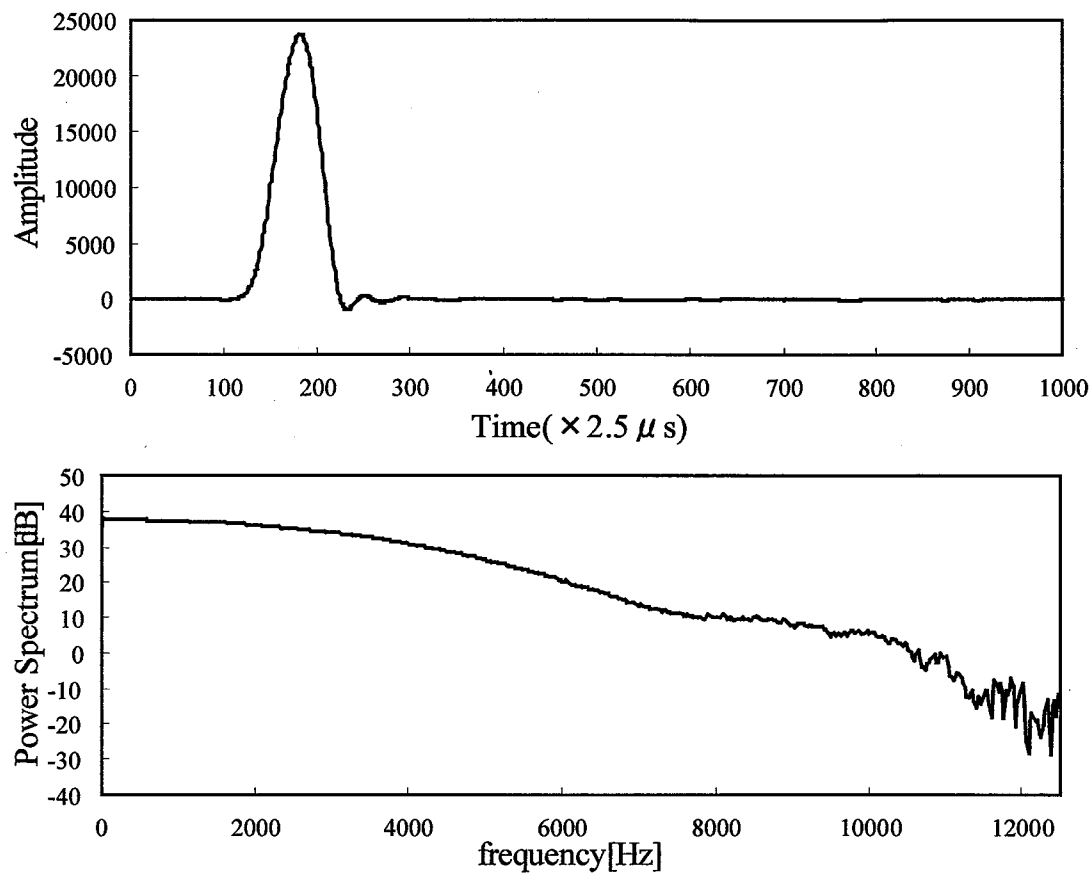


図 3 インパルスハンマによる打撃力(上)とパワースペクトル(下)

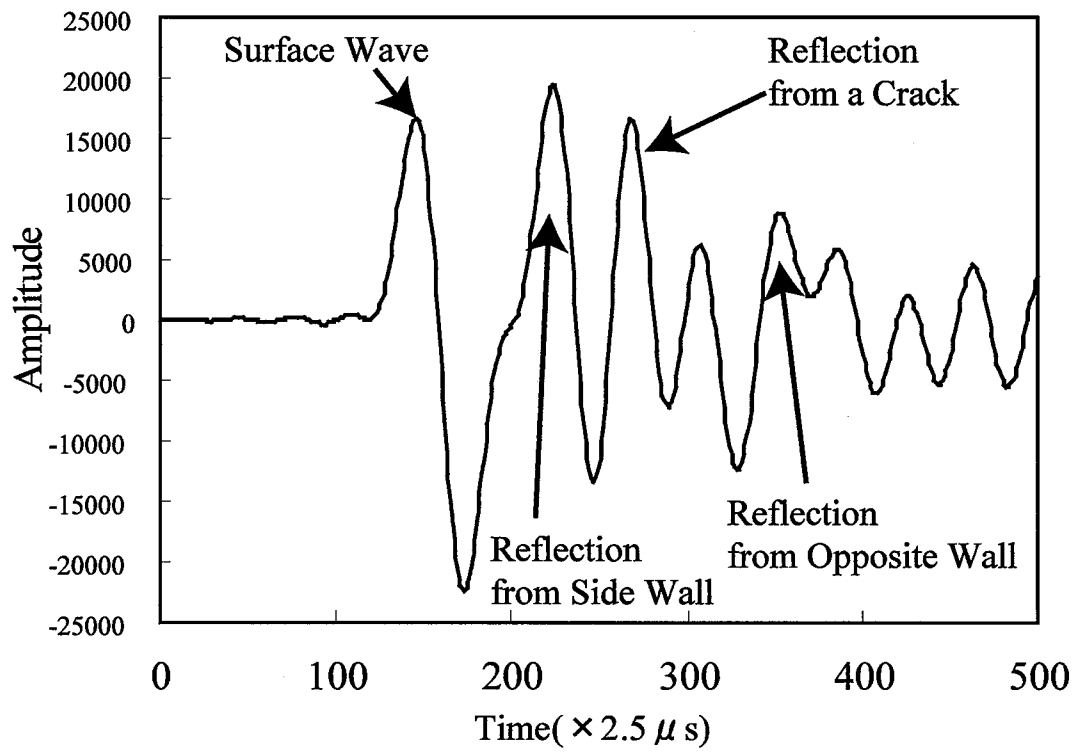


図 4 センサ出力の例

2.4 従来の欠陥位置推定法

衝撃弾性波法を用いた従来の欠陥位置推定法について説明する。

2.4.1 リソナント周波数を用いた伝統的な手法[3]

打撃面と欠陥の間で発生した定在波の周波数 f_{crack} を調べ、弾性波の速度 c が分かれば、 $d_{\text{crack}} = \frac{c}{2f_{\text{crack}}}$ より、打撃面と欠陥の間の距離 d_{crack} を求めることができる。ただし、定在波が発生するためには、欠陥は打撃面に対して平行な平面である必要がある。また定在波が発生するための十分な時間のサンプリングが必要であり、その間に減衰しないように、比較的大きな打撃力を要する。

2.4.2 安倍らが提案した手法

リソナント周波数による手法が定在波を利用したのに対して、安倍らが提案した方法[5][6][7][8]では、欠陥からの最初の反射波のみを利用する。すなわち、打撃時間と欠陥からの第1反射波の到着時間の差及び弾性波の速度が分かれば、打撃位置と欠陥との距離を推定できる。ここで、弾性波は単一成分のみの波形ではなく、また欠陥以外の壁等からの反射波も考えられるため、欠陥位置推定のためには、まず欠陥からの反射波を強調するための前処理が必要である。そこで、まず弾性波について詳しく述べ、その後欠陥位置推定処理について説明する。

2.4.2.1 弾性波の特徴

弾性波は、地震波等でよく知られているように、P波 (Primary wave)、S波 (Secondary wave) 及び表面波 (Surface wave) で構成される。P波は縦波、S波は横波であり、これらは物体の内部を伝播する物体波である。表面波は縦波と横波の複合波でレイリー波とも呼ばれ、文字通り表面のみを伝播する。これらの特徴を以下に示す。

・速度

P波が最も速い。S波が次に速く、表面波が最も遅い。コンクリートでは、一般にP波は約4000m/s、S波は約2700m/s、表面波は約1600m/s程であり、コンクリートの骨材の割合や、鉄筋の有無、経過時間等により異なる。

・振幅

表面波が最も振幅が大きく、S波が次に大きく。P波は振幅が最も小さい。

打撃により物体に衝撃を与え構造物内部の状態を調べるために、物体内部を伝わる物体波のうち最も速いP波を利用する。

2.4.2.2 欠陥位置推定処理

地中に打ち込まれたコンクリート杭のような細長い構造物の場合、その長さ、欠陥位置、形状を比較的簡単に推定可能である[5]。波の伝播方向が杭の長手方向のみなので、1次元の解析のみで形状を推定できる。すなわち、地表にでてい
る杭の上端部を打撃すると、杭の下端部または欠陥部から反射してくるP波の伝播時間を調べれば、杭の長さや欠陥の位置を推定できる。しかしながら、一般的なコンクリート構造物に対しては、この手法は利用できない。なぜならば、杭の場合、伝播方向は杭の長手方向のみ考えればいいのに対して、一般的なコンクリート構造物の場合は、打撃点から半円球状に伝播する弾性波について考慮する必要があり、3次元的な解析が求められるためである。

一般的なコンクリート構造物において、まず問題となるのは表面波や横の壁からの反射波である。特にエネルギーの大きい表面波が打撃位置からセンサまで直接伝わる距離は、P波が打撃位置から欠陥位置で反射して同じセンサまで伝わる距離より短い
が、表面波の速度はP波の速度の半分以下であるため、表面波とP波の反射波が同時にセンサに入力することがあり、その2つの波が干渉することによって、欠陥からのP波の反射波が見えにくくなる
ことが問題となっていた。リソナント周波数による手法では定在波を用いるため、P波の反射波が打撃面と欠陥面の間を何度か往復する比較的長いサンプリング時間が必要であり、この間に表面波が減衰するため表面波の影響を無視できる。しかしながら、本手法では、P波の第1反射波のみを用いるため、表面波の影響は非常に深刻な問題である。

従来の手法[8]では、前処理として雑音成分である表面波と横壁からの反射波の影響を同時に除去する方法を提案した。この手法は、打撃位置とセンサの距離がコンクリート構造物の厚さよりも十分大きく、横壁からの反射波による各センサのインパルスレスポンスがほぼ一致する場合うまく機能する。しかしながらコンクリート構造物が小さく、横壁からの反射波が表面波に重なるような場合、この手法はうまく機能しない。それゆえ、エネルギーの大きな表面波をより正確に推定して除く方法が期待されている。

複数のセンサの波形について、表面波や横壁からの反射波等、雑音成分の除去処理を行い、その結果、欠陥からのP波の反射波を強調できれば、近接音場の指向性合成処理を利用して欠陥位置を推定できる。これについては次章で紹介する。

従来の手法[8]で欠陥位置推定を行った結果、リソナント周波数を用いた従来法では難しい表面に対して平行な2つの平面状の欠陥や斜めの欠陥を推定できることを確認し、成果をあげている。しかし推定精度については問題が残った。雑音成分の除去が不十分なため、欠陥が無いはずのところを欠陥ありと推定することが多かった。

2.5 結論

本章では、従来の非破壊検査手法として X 線、赤外線サーモグラフィ及び弾性波を用いた方法を説明した。そのなかで、弾性波を用いた方法とりわけ衝撃弾性波法が本研究の目的に適していることを示した。

次に、衝撃弾性波法による従来の手法について述べた。コンクリートの表面に衝撃を与えた際に、表面と欠陥との間に生じる定在波の周波数から欠陥位置を推定する手法では、欠陥が平面状で、表面に対して平行である必要がある。

このように適用対象が限られる手法に対し、安倍らは表面に衝撃を加えたとき欠陥から最初に反射した P 波を利用する方法を提案し、コンクリート製の杭など波の伝わり方が一次元的なものに関しては成果を上げている。しかし、通常のコンクリート構造体の場合、エネルギーが大きい表面波や横壁からの反射波が欠陥からの P 波の反射波と干渉することがある。このとき、これら雑音成分の除去が不十分だと、欠陥位置推定が阻害されることが問題となる。次章では、エネルギーの大きな表面波の除去に重点を置いて、その問題点の改善を行う。

第3章 新しい手法

3.1 前書

本章では、安倍らが提案した方法[8]の改善を目的としている。すなわち、欠陥位置推定のために欠陥からのP波の最初の反射波を用いるが、その比較的小さいP波の反射波の妨げとなるエネルギーの大きな表面波をより正確に取り除くことが重要である。そこで本研究では表面波について詳しく調査を行い、表面波推定の精度改善を行った。

次に、欠陥位置の図示化手法として、近接音場の指向性合成処理について説明する。コンクリート構造物のある一面に複数のセンサを貼り付け、それらの波形データを利用することにより、2次元的に欠陥の位置、大きさの推定を行う。

最後に、コンクリートの供試体を用いて、紹介した幾つかの手法で欠陥位置推定を行った結果を示す。

3.2 表面波の測定実験

表面波の性質を詳しく調べるために、盛岡市四十四田ダムの上で打撃実験を行った。その結果、図 5 のような波形が得られた。ここで、センサは打撃地点から 7.5cm はなれた所に置いている。また、サンプリング周波数は打撃で与えられる最大周波数 10kHz を考慮して、その倍以上の 25kHz とした。さらに、欠陥位置を正確に予想するためには、波形のピーク位置を正確に求めることが必要であるので、横軸を 16 倍に FFT 補間しているため、図 5 は実質的に 25kHz \times 16 = 400kHz 相当のサンプリング周波数になっている。

図 5 のグラフにおいて、およそ 230 ポイント目から振動を始め、370 ポイント付近で最大ピークとなり、それから 520 ポイント付近まで減衰しそれ以降は比較的不規則に振動していることが分かる。

ここで、打撃開始点を 230 ポイント目と仮定して、1000 ポイント目までの伝播距離を次に示す。

$$\text{P 波} \quad 3800[\text{m/s}] \times (770 \times 2.5[\mu\text{s}]) = 7.32 [\text{m}]$$

$$\text{S 波} \quad 2700[\text{m/s}] \times (770 \times 2.5[\mu\text{s}]) = 5.20 [\text{m}]$$

$$\text{表面波} \quad 1600[\text{m/s}] \times (770 \times 2.5[\mu\text{s}]) = 3.08 [\text{m}]$$

P 波に関しては、7.32m 伝播することから、欠陥の深さ 3.66m まで検出可能である。また P 波が横方向に伝播する場合は横方向に振動するため、センサに捉えられないので無視できる。

同様に S 波，表面波に関しては，それぞれ 5.2m, 3.08m 伝播することから，打撃位置の横方向にそれぞれ 2.6m, 1.54m のところに壁，段差，材質の変化等があれば反射波がありうるが，実験場所のダム上では，その範囲内で反射波を生じるようなものは無い。つまり，図 5 における波形は，種々の反射波を含まない，表面波と横方向に進む S 波のみから成り，エネルギーの大きな表面波が主な成分と考えられる。

図 5 の波形において，230 ポイントから 520 ポイントまではエネルギーの大きな振動が見られ，これが表面波による影響と思われる。この範囲の波形は振動する減衰波形と仮定できるので，次項ではその波形の推定法を提案する。

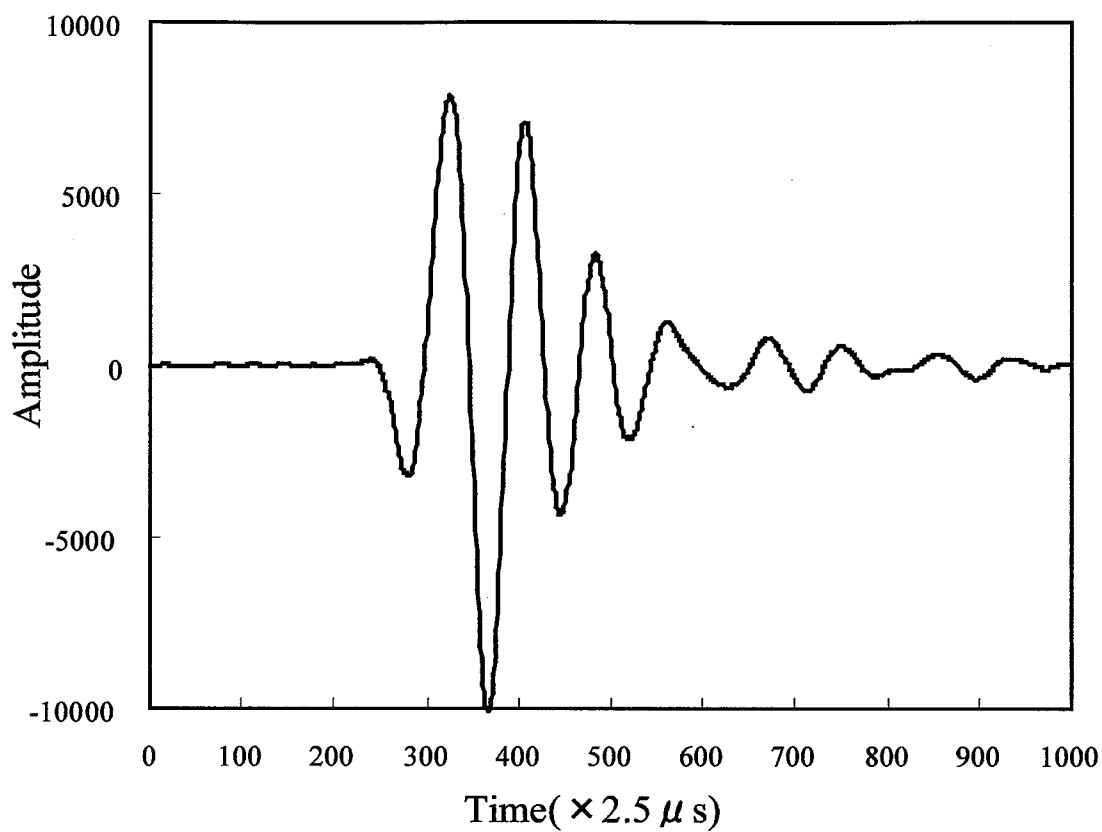


図 5 ダムでの打撃実験におけるセンサ出力 $u_m(n)$

3.3 表面波の推定

前節で説明したとおり，ダムで得られたオリジナルの波形 $u_m(n)$ について，図 5 の 370 ポイント付近から 520 ポイント付近まで減衰する正弦波と仮定できることがわかる．そこで減衰する正弦波としてインパルスレスポンス $h_m(n)$ を以下のように定義する．

$$h_m(n) \approx \alpha_m \exp(-\beta_m n) \cos(2\pi\gamma_m n + \theta_m) \quad (1)$$

ここで， n は時間であり， m はセンサ番号である． α_m β_m γ_m θ_m は波形の性質を決定するパラメータである．このインパルスレスポンス $h_m(n)$ とハンマの打撃力 $f(n)$ との以下に示す畳込操作により求めた波形を表面波の推定波形 $u'_m(n)$ とする．

$$u'_m(n) = \sum_{p=0}^{N-1} f(n-p)h_m(p) \quad (2)$$

ここで， N はインパルスレスポンス $h_m(p)$ の長さであり，ここでは 1024 ポイント (2.56ms) としている．

この実験で用いたセンサの出力を増幅するためのアンプは一種のハイパスフィルタである．一方，図 2 に示すように，ハンマの出力はアンプを通さず直接 A/D 変換されており，ハンマ出力を用いて表面波のセンサ波形を推定するためには，ハンマ出力に対してハイパスフィルタによる補正が必要である．そこで，ハンマの打撃力 $f(n)$ の差分 $f'(n) = f(n) - f(n-1)$ を用いて簡易的なハイパスフィルタとする．図 6 に $f'(n)$ によって実現されるハイパスフィルタの伝達関数を示す． $f(n)$ の代わりに $f'(n)$ を用いた表面波

の推定波形 $u''_m(n)$ を以下に表す.

$$u''_m(n) = \sum_{p=0}^{N-1} f'(n-p)h_m(p) \quad (3)$$

そして、以下に示す最小二乗誤差が最小になるように $\alpha_m, \beta_m, \gamma_m, \theta_m$ を決定する.

$$E = \begin{cases} \sum_n |u'_m(n) - u_m(n)|^2 & \text{for } f(n) \\ \sum_n |u''_m(n) - u_m(n)|^2 & \text{for } f'(n) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 Σ の加算範囲は表面波が主に現れているような範囲とする. この範囲の決定方法については以降の 3.4 節で詳しく述べる.

図 7 に、図 5 に示したセンサ波形 $u_m(n)$ 、ハンマの打撃力 $f(n)$ を用いて推定し、誤差 E が最小になったときの波形 $u'_m(n)$ 、及びそれらの残差波形 $\langle u_m(n) - u'_m(n) \rangle$ を示す. 図 8 は、センサ波形 $u_m(n)$ 、ハンマの打撃力の差分 $f'(n)$ を用いて推定し、誤差 E が最小になったときの波形 $u''_m(n)$ 、及びそれらの残差波形 $\langle u_m(n) - u''_m(n) \rangle$ を示す. 図 7 と図 8 を比較すると、打撃力の差分 $f'(n)$ を用いた推定波形 $u''_m(n)$ が、打撃力 $f(n)$ をそのまま用いた推定波形 $u'_m(n)$ よりも、よりよい表面波の推定モデルであることは明らかである. (打撃力 $f(n)$ をそのまま用いたときの最小誤差値 E は、打撃力の差分 $f'(n)$ を用いたときの最小誤差値の 3.1 倍となった.) 差分 $f'(n)$ は最良のハイパスフィルタではないかもしれないが、打撃力 $f(n)$ をそのまま表面波推定に使用するよりは良いと考えられる.

図 7 と図 8 における残差波形は、S 波及び表面波の推定誤差と考えられる。図 8 において、残差波形の最大振幅は、オリジナル波形のそれより約 12dB 小さい。一方、以降の 3.5 節で詳しく述べるが、欠陥や打撃面の反対面からの反射波により生じるピーク（欠陥位置判定に期待されるピーク）と横壁等からの反射波に起因するピーク（妨害波もしくは雑音波）との差は約 5dB である。即ち、信号対雑音比(Signal to Noise Ratio : SNR) は 5dB であり、これと比較して表面波の推定精度(12dB)は十分である。

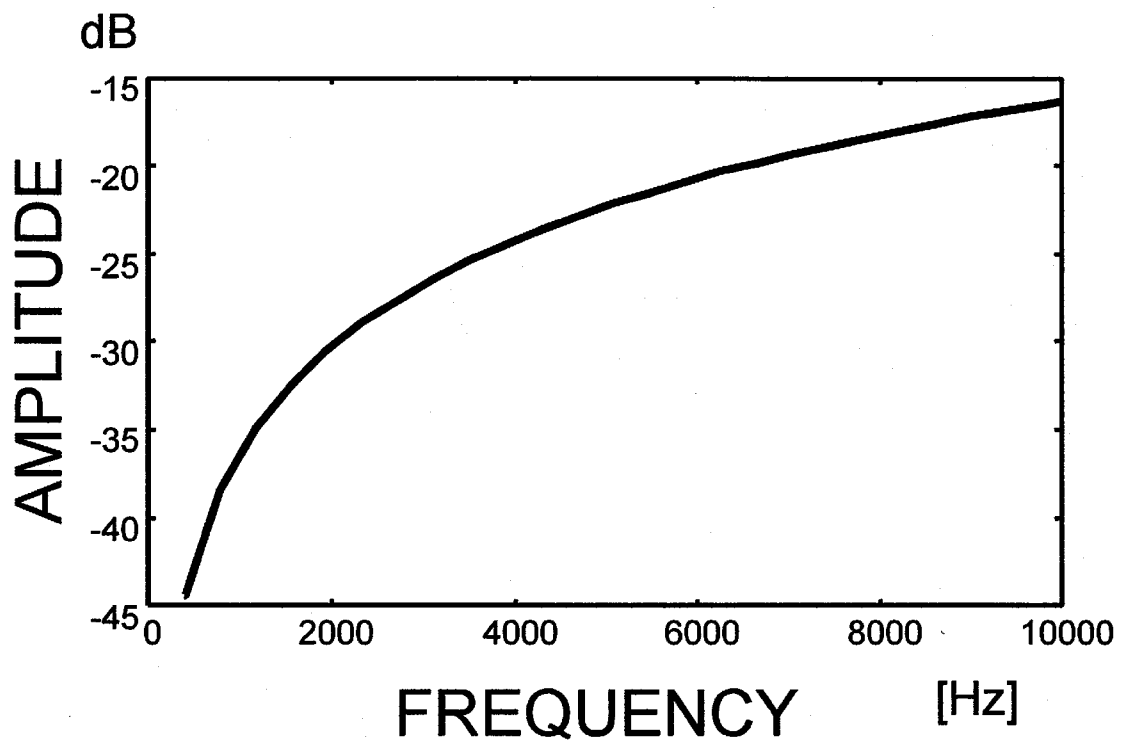


図 6 打撃力の差分 $f'(n)$ によるハイパスフィルタの伝達関数

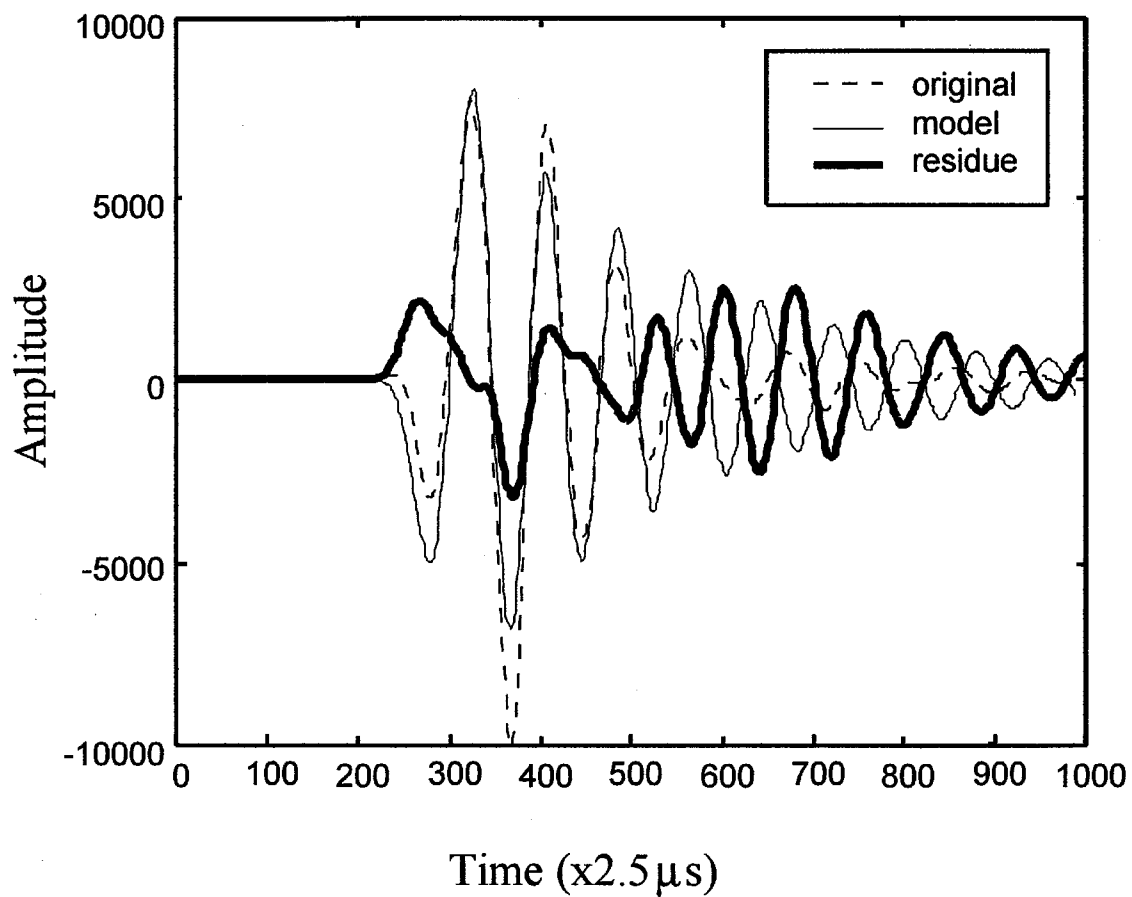


図 7 図 5 に示した元の波形(original) $u_m(n)$,
 打撃力 $f(n)$ を用いて推定した波形(model) $u'_m(n)$,
 及びそれらの残差波形(residue)

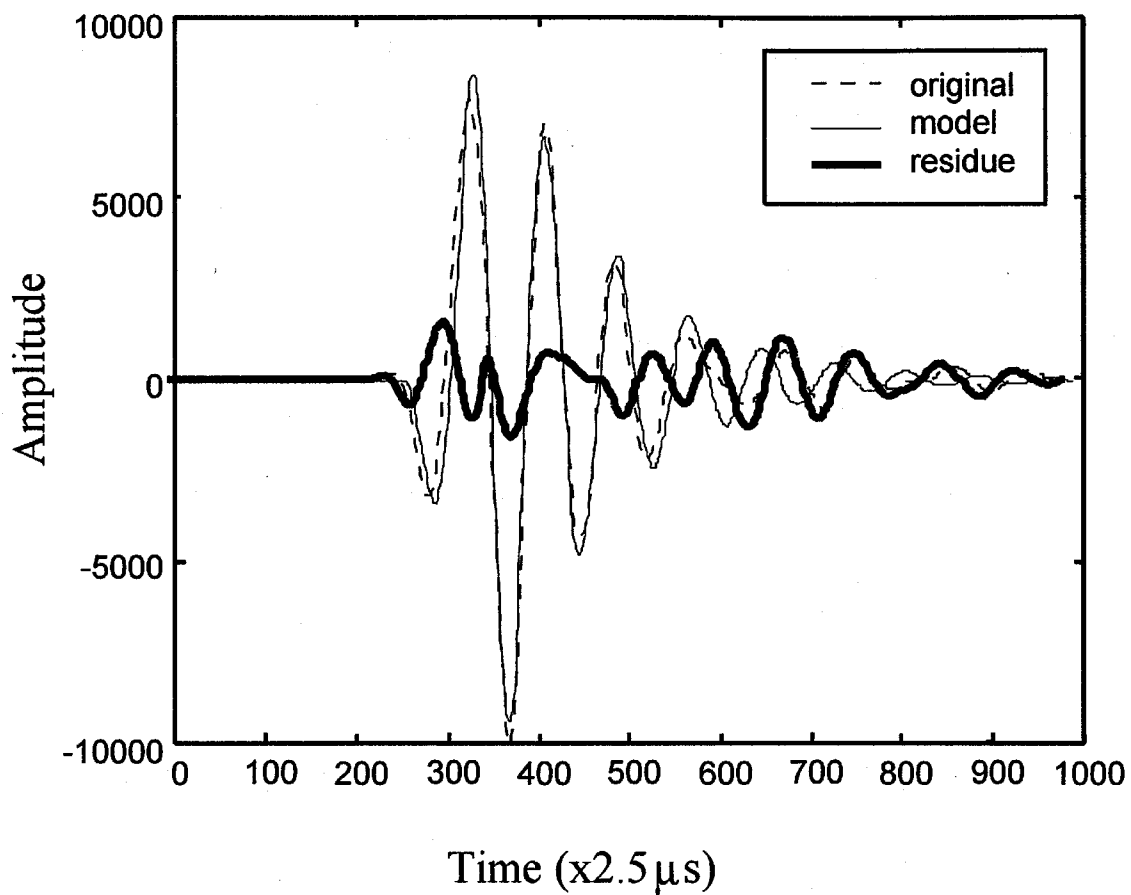


図 8 図 5 に示した元の波形(original) $u_m(n)$,
 打撃力の差分 $f'(n)$ を用いて推定した波形(model) $u'_m(n)$,
 及びそれらの残差波形(residue)

3.4 コンクリート供試体における表面波の推定

前節で示した表面波の推定法を欠陥のあるコンクリート供試体に適用する。実験に用いた供試体を図 9 に示す。ある一面に 6 個のセンサを直線状に貼り付け、そのセンサ列の中央を打撃する。欠陥位置には厚さ 1 cm のベニヤ板を埋め込んで欠陥を模擬している。図 9(iii)の供試体を用いて打撃実験を行った結果、3 番目のセンサにおいて、図 10 に示すようなセンサ波形が得られた。ここで、欠陥からの反射波のピーク位置の特定を行う。コンクリートのインピーダンスと欠陥を模したベニヤ板のインピーダンスでは前者のほうが大きいので、打撃パルスの正のピークに対して、模擬欠陥からの反射波は同じ正のピークとなることがわかっている。打撃時間は 100 ポイント目で、P 波の音速は 3800m/s とする。P 波の音速はセンサ出力のピークの立ち上がり位置を用いて推定した値である。この時、図 10 の④のピークの伝播距離は

$$\begin{aligned} & \text{音速[m/s]} \text{ / 周波数[Hz]} \times (\text{打撃から反射波が立ち上がるまで時間[point]}) \\ & = 3800[\text{m/s}] \text{ / } 400[\text{kHz}] \text{ / } 165[\text{point}] \\ & = 1.57 [\text{m}] \end{aligned}$$

となり、打撃位置から約 0.785m 離れた位置からの反射波のピークであることを示している。これは、図 9(iii)の欠陥位置とほぼ一致するため、④のピークは欠陥からの反射波と予想される。しかしながら、図 10 のセンサ波形ではピーク④以前に比較的大きなピーク①、②及び③が見られる。ピーク①は表面波に起因するピークで、ピーク②及び③は横の壁からの反射波と考えられる。この場合、このまま欠陥位置推定を行うと、ピーク①②③が大きな雑音となり、欠陥位置

推定することが難しい。そこで、これら雑音成分の除去を考える。

2.4.2 節で示した従来の方法と、前節で説明した新しい手法で雑音除去を行った結果をそれぞれ図 11 及び図 12 に示す。ここで、式(4)における誤差 E の計算範囲は次のように決定する。

- ・ 誤差の計算範囲の開始点は、最初のピークの立ち上がり点とする。
- ・ 式(1)で表されるインパルスレスポンスにより、ピークの絶対値は最大値をとって以降、時間とともに減少する。もし、その i 番目のピークの絶対値が $i-1$ 番目のピークよりも大きいとすれば、 $i-1$ 番目のピークと i 番目のピークの間には反射波が存在する。そのときの $i-1$ 番目のピーク後に値が 0 となる位置を誤差計算範囲の終了点とする。

図 12 と図 11 のセンサ波形(original)と推定波形(model)を比較すると、図 12 の最初のピーク①についてほぼ推定できており、表面波推定が適切に働いていることを示している。

図 12 と図 11 の残差波形(residue)を比較すると、表面波によるピークである①が図 12 では大きく抑制されている。また、横壁からの反射波のピーク②③に関しては図 12 の方が大きい。これは、従来の方法は表面波と横壁からの反射波を同時に取り除くことを目的としているのに対し、新しい手法では表面波のみを高精度に推定して取り除くことを目的としており、横壁からの反射波に関しては十分に取り除いていないためである。しかしながら、横壁からの反射波は比較的能量が小さいためピークは低く、結果的に、図 12 では欠陥や反対面の壁からの反射に起因するピークが明瞭に現れている。

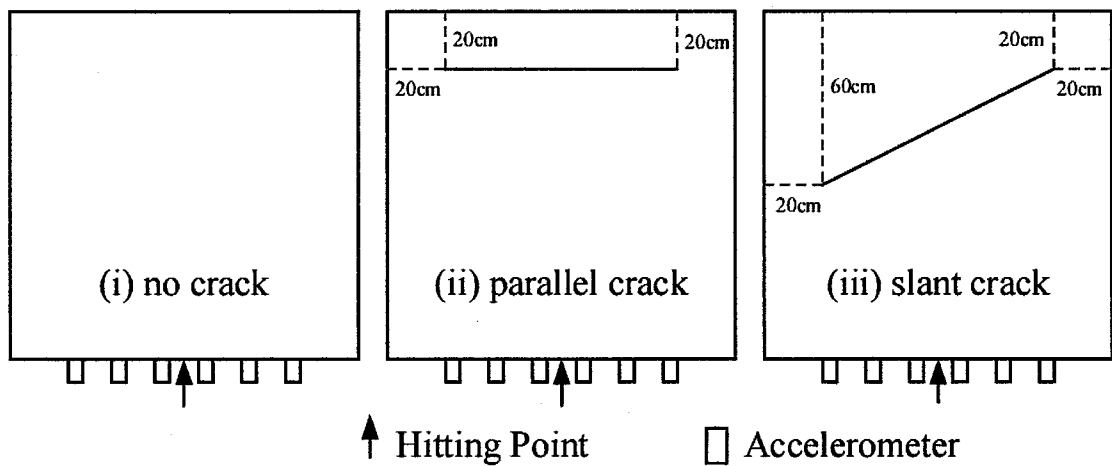
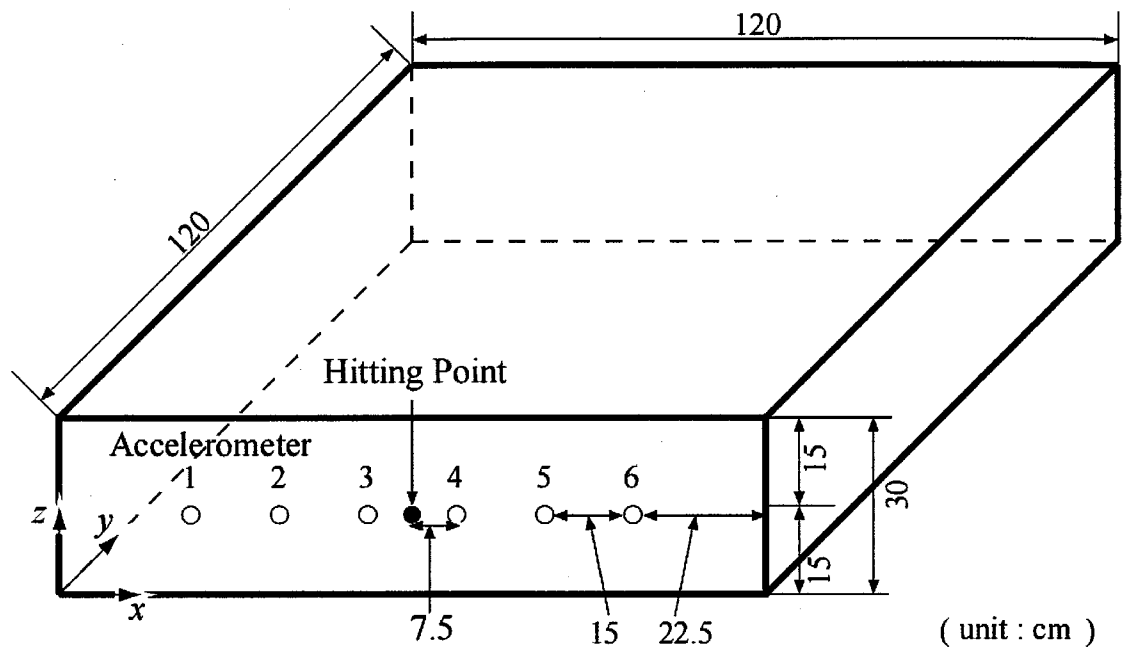


図 9 実験で用いたコンクリート供試体.

- (i) 欠陥の無い供試体,
- (ii) 平行な平面状の欠陥のある供試体,
- (iii) 斜めの平面状の欠陥がある供試体

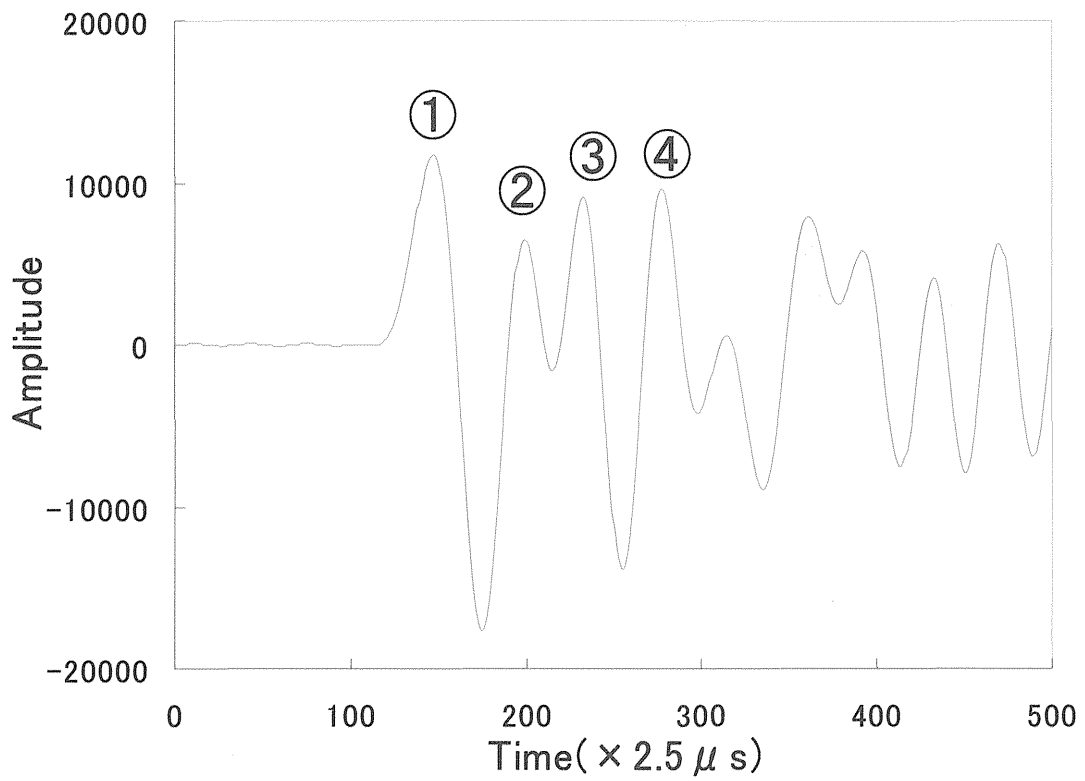


図 10 欠陥のある供試体(iii)でのセンサのオリジナル波形

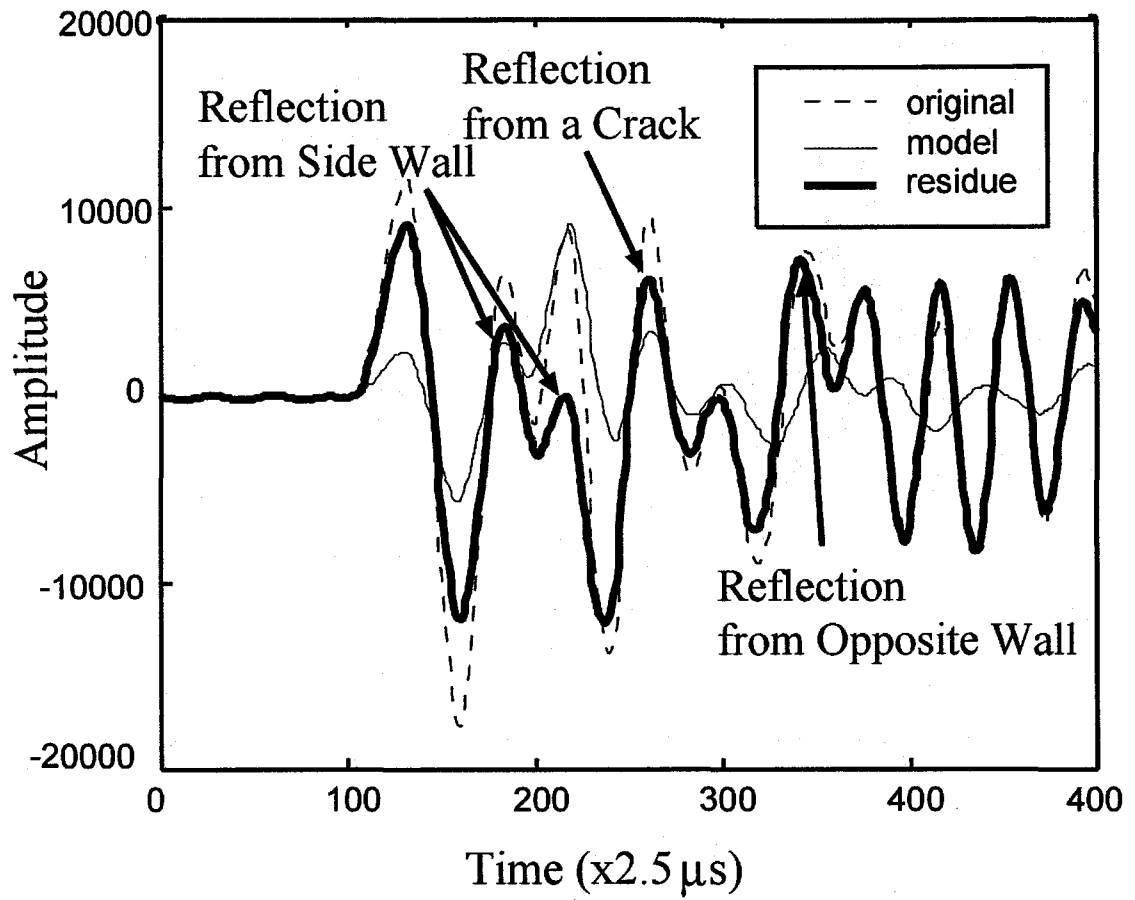


図 11 従来の手法を用いた表面波の推定結果

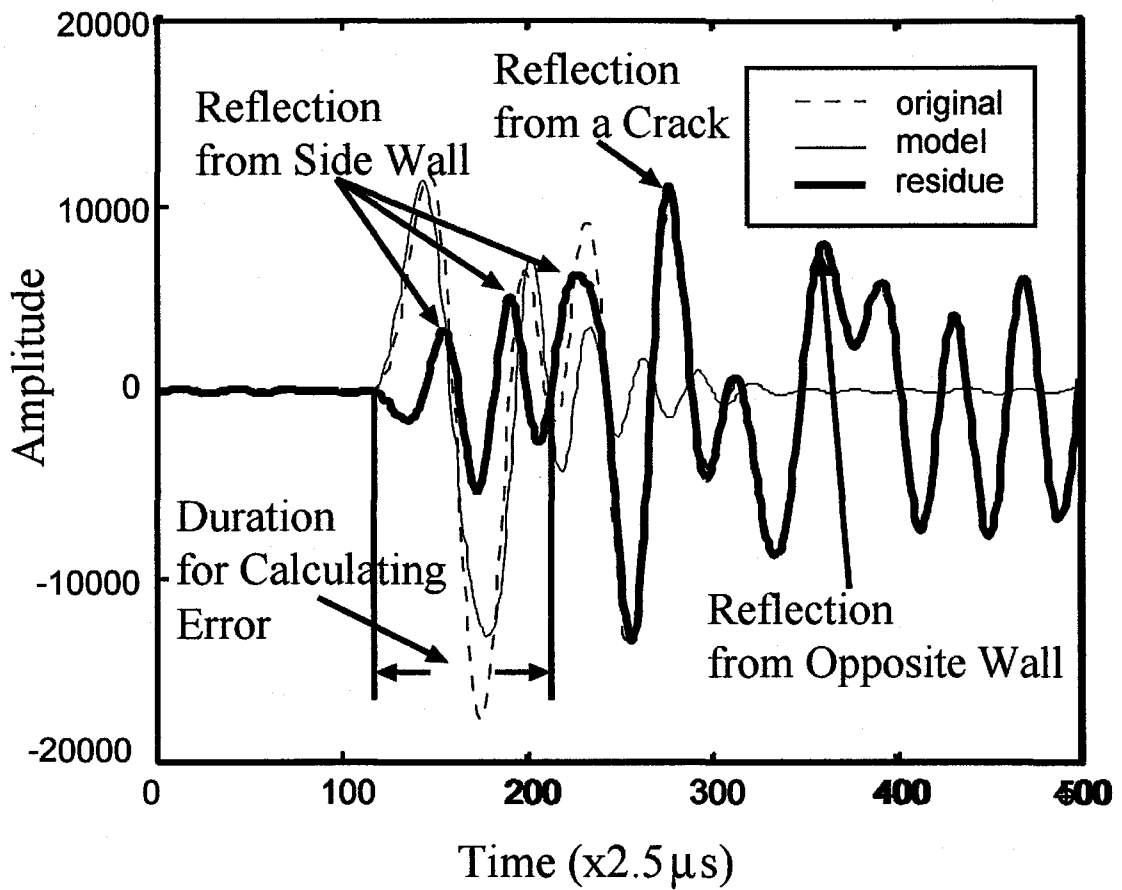


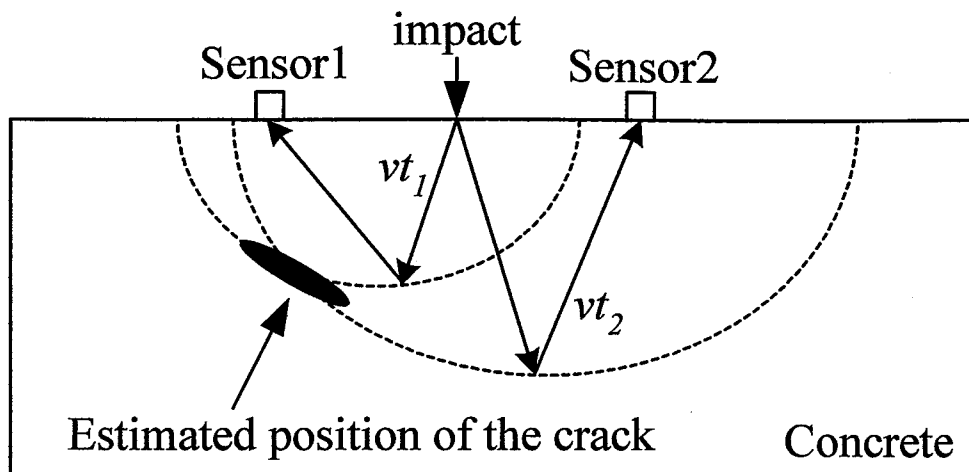
図 12 今回提案した手法を用いた表面波の推定結果

3.5 欠陥位置推定処理

前節における，欠陥からの反射波のピークが強調されたセンサ波形を用いて，近接音場の指向性合成処理[6][7][8]により，欠陥位置を2次元的に推定する方法を以下に説明する．

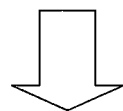
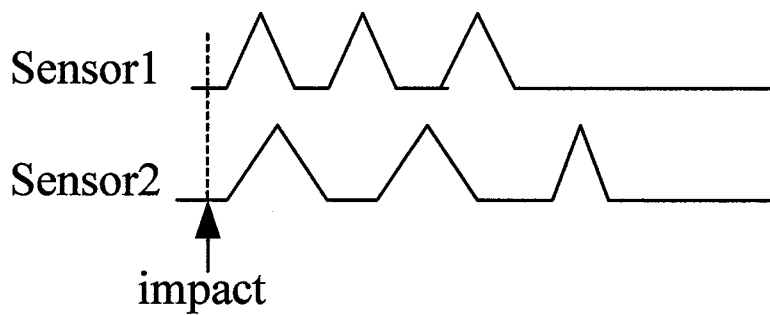
簡単のため，センサが2つの場合について説明する．図13に模式図を示す．センサ1で得られたオリジナルの波形に対して，前節で述べた表面波の除去処理を行った結果，欠陥からのP波の反射波のピークが時間 t_1 の位置で観測された場合，そのP波の伝播距離は vt_1 である．但し v はP波の音速である．それをコンクリート構造体上で考えると，打撃位置(impact)とセンサ1の位置を焦点として，2つの焦点と欠陥予測位置を結ぶ距離(P波の伝播距離)が vt_1 になるような軌跡は図に示すような楕円状になる．同様にセンサ2では t_2 の位置に欠陥からのP波のピークが見られることから，打撃点とセンサ2の位置を焦点として伝播距離が vt_2 になるような楕円状の軌跡となる．それぞれ楕円上にそれぞれのセンサのピーク値を加算すると，2つの楕円の交点付近のピークが高くなるため，ピークの高さから欠陥位置が推定できる．推定結果はdB表示とし最大値から10dB以下の値はすべて雑音とみなして表示しないこととした．

センサ波形について，実際は欠陥からの反射波のピークのみが現れるわけではなく，表面波や横の壁からの反射波等の雑音波形が存在すると，それらに起因して欠陥以外のところにもピークができてしまい欠陥位置を推定するのが困難であった．しかしながら前節で示したような雑音除去処理を行うことで，エネルギーの大きな表面波による雑音ピークを除去でき，欠陥位置推定の精度をより向上させることが期待できる．

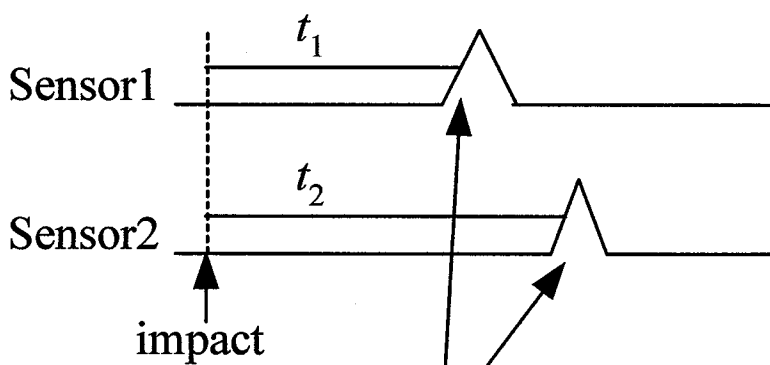


v : velocity of the primary wave

Original sensor output



After eliminating surface wave



Reflection from the crack

図 13 欠陥位置推定処理の模式図

3.6 実験結果

実験用のコンクリート供試体を用いて、従来の方法と本論文で提案した方法について欠陥位置推定の結果を比較する。

コンクリート供試体は図 9 に示すように、縦 1.2m, 横 1.2m, 高さ 0.3m の立方体で、図のように 6 つのセンサを等間隔に取り付ける。3 種類の供試体があり、(i) は欠陥が無い健全な供試体であり、(ii) は打撃面から 1m 離れて打撃面に平行な欠陥を模したベニヤ板 (縦 0.3m, 横 0.8m, 厚さ 1cm) が埋められている。また (iii) は打撃面に対して斜めにベニヤ板 (縦 0.3m, 横 0.89m, 厚さ 1cm) が埋められている。P 波の速度は 3800m/s とした。これはセンサ出力のピークの立ち上がり位置を用いて推定した値である。 i 番目のセンサ位置は図 9 に示すように、 $(x, y, z) = (0.075 + 0.15 * i \text{ m}, 0.0 \text{ m}, 0.15 \text{ m})$ であり、打撃位置は $(x, y, z) = (0.6 \text{ m}, 0.0 \text{ m}, 0.15 \text{ m})$ である。

3.6.1 欠陥が無いコンクリート供試体の場合

従来の手法

図 14 に従来の手法[8]すなわち表面波と横壁からの反射波の影響を同時に除去する方法を用いて欠陥位置推定を行った結果を示す。図 14 のグラフ内部に描かれた四角形がコンクリート供試体の位置を示す。

まず、打撃位置の反対側の面($y=1.2\text{m}$)上に最大のピーク(97dB)が見られる。これは打撃位置の反対側の面から P 波の大きな反射波があったことを示しているもので、期待されたピークといえる。一方、打撃面から 0.8m のところに他の大きなピーク(94dB)が見られる。これは雑音ピークであり、横壁からの反射波の除去が不十分であったためと考えられる。このとき雑音ピークは打撃面の反対面のピークより 3dB 低くなっている。

打撃位置の直下にある欠陥から直接到達する反射波に関して、P 波が支配的であることが知られている。よって打撃位置を中心とする半径 1.2m 及び 0.8m の円弧状のピークにおいて、その最大値の x 座標は、打撃位置の x 座標にほぼ一致する。一方、半径 1m の円弧状のピークについて最大値の x 座標は 1.3m 付近であり、 $x=0.6\text{m}$ におけるピーク値は小さい。そのような理由から、 $(x, y)=(0.6\text{m}, 1.0\text{m})$ 付近に存在するピークは欠陥によるものでは無いと推論する。

本論文で提案した手法

図 15 に本論文で提案した新しい手法すなわち高精度に推定した表面波の除去による欠陥位置推定を行った結果を示す。従来の手法と同様に、打撃位置の反対側の面上に最大のピーク(97dB)が見られる。また、打撃位置を中心として半径 0.4m 及び 0.8m 付近に円弧状のピークが見られるが、それらの最大値の位置は打撃位置の x 座標($x=0.6$)付近ではなく、 $x=0.6$ 付近では値は小さい。従って、それら円弧状ピークは内部の欠陥からの反射ではないと推論する。半径 0.4m 付近の円弧状ピーク(93dB)は横壁からの反射波に起因するものと考えられる。これは新しい手法では横壁からの反射波を除いていないために残ってしまったと考えられる。従来の手法の場合は図 14 に示すように半径 0.4m 付近の円弧状ピークは存在しない。従来の手法では横壁からの反射波の影響を除いているためである。半径 0.8m 付近の円弧状のピーク(92dB)に関しては、半径 0.4m の倍であることから、横壁の反射波の多重反射と考えられる。

コンクリート構造物の形が既知である場合、横壁からの反射波の到着時間を計算でき、円弧状ピークの半径を求めることができる。それゆえ、横壁からの反射に起因する円弧状ピークが現れないはずの位置にピークが観測された場合、そのピークは欠陥に起因するものと考えることができる。

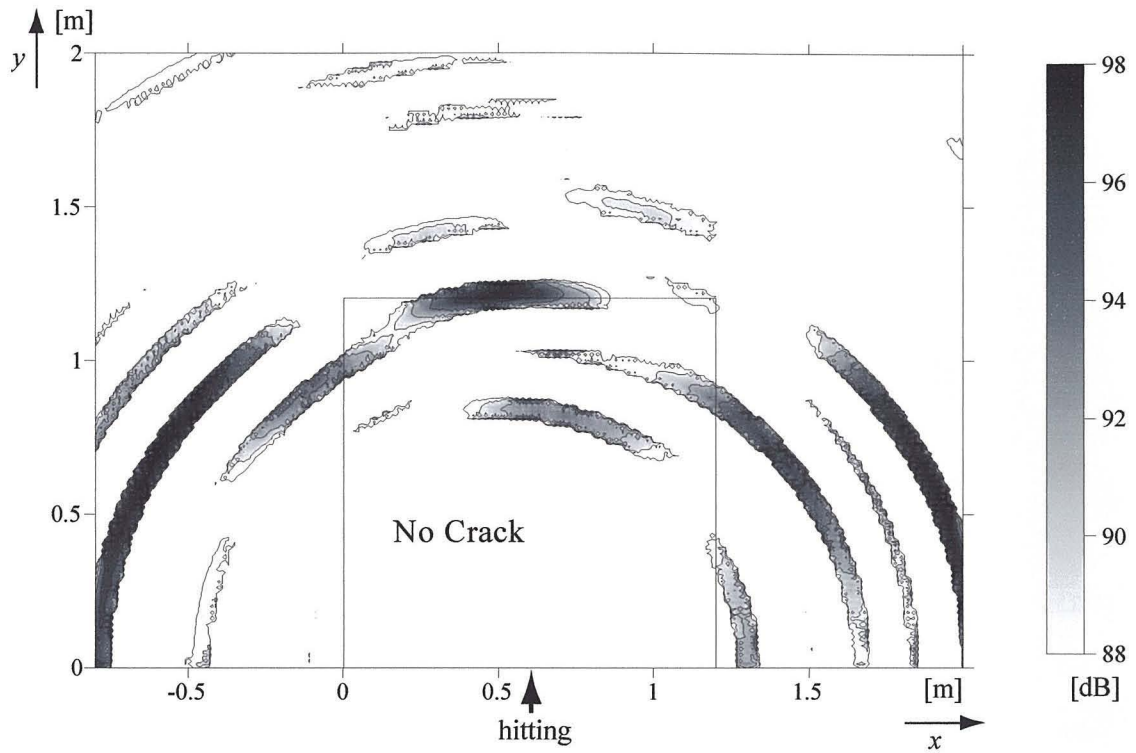


図 14 欠陥の無いコンクリート供試体における，従来法による欠陥位置推定結果．

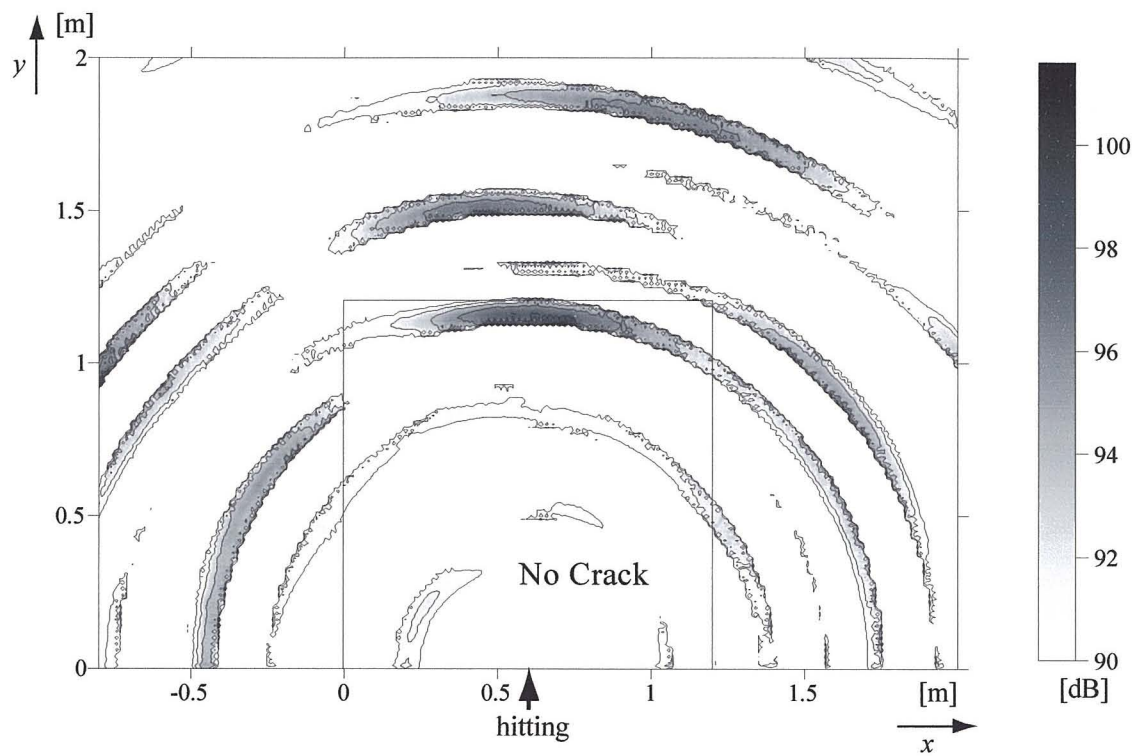


図 15 欠陥の無いコンクリート供試体における，新しい手法による欠陥位置推定結果．

3.6.2 平行な欠陥があるコンクリート供試体の場合

リソナント周波数を用いた手法

平行な欠陥があるコンクリート供試体を打撃したときのセンサ波形について、FFTを行った結果を図 16 に示す。このコンクリート供試体の場合、打撃点から 1m 離れたところにある平行な欠陥と打撃面の上に定常波が発生し、その周波数付近にピークが発生することが予測される。打撃面と欠陥との間に発生する定常波の周波数について次の式が成り立つ。

$$f_{\text{crack}} = \frac{nc}{2d_{\text{crack}}} = \frac{1 \times 3800}{2 \times 1.0} = 1900[\text{Hz}]$$

f_{crack} : 打撃面と欠陥の間の定常波の周波数 (n=1, 1/2 波長)

c : 音速[m/s]

d_{crack} : 欠陥と打撃面の距離

また、打撃面と反対面との間については以下の式が成り立つ。

$$f_{\text{opp}} = \frac{nc}{2d_{\text{opp}}} = \frac{1 \times 3800}{2 \times 1.2} = 1583[\text{Hz}]$$

f_{opp} : 打撃面と反対面の間の定常波の周波数 (1/2 波長)

d_{opp} : 打撃面と反対面の距離

図 16 より、ちょうど f_{crack} 及び f_{opp} 付近にピークが見られ、定常波による手法が有効に思えるが、 f_{crack} 及び f_{opp} の他にも多くのピークが存在しており、これらの

ピークは横の壁からの反射波や、除いていない表面波に起因するピークと考えられる。このために、現実的にはどれが欠陥からのピークか把握するのは難しい。欠陥の無い全く同じコンクリート構造物で定常波の周波数を調べ比較する方法も考えられるが、実際に同じ条件のコンクリート構造物を見つけることは困難である。また欠陥位置が深い場合、反射波のエネルギーが小さくなるために定常波が発生しない可能性がある。

従来の手法

図 17 に従来の手法で欠陥位置推定を行った結果を示す。打撃面の反対側の面 ($y=1.2\text{m}$) 付近に大きなピーク (81dB) が、欠陥位置 ($y=1\text{m}$) 付近にも大きなピーク (83dB) が見られ、期待されたピークが現れている。しかしながら、欠陥位置の下側 ($y=0.8$) 付近にも欠陥位置のピークと同程度のピーク (82dB) が見られる。このため図 17 から実際の欠陥位置を推定することは難しい。欠陥や反対面のピークの値が、横壁からの反射に起因するピーク ($x=0.6$ 以外の場所のピーク、例えば $(x, y)=(-0.7\text{m}, 0.8\text{m})$ 付近のピーク) より小さいことから、雑音除去処理の際、横壁からの反射波だけでなく、欠陥や反対面に起因するピークまで除去したものと考えられる。

本論文で提案した手法

図 18 に新しい手法で欠陥位置推定を行った結果を示す。打撃面の反対側の面 ($y=1.2\text{m}$) 付近に大きなピーク (92dB) が見られ、また欠陥位置 ($y=1\text{m}$) にも大きなピーク (91dB) が見られる。また、図 15 と同様に横壁の反射に起因して、供試体内部にいくつかのピークが見られる。それらピークの値は最大 86dB ほどで、反対面のピークや欠陥位置のピークより約 5dB ほど小さく、これは図 15 で示した欠陥の無い供試体の場合とほぼ同等である。

打撃位置の直下にある欠陥から直接到達する反射波に関して、P 波が支配的であることから、打撃位置の直下に欠陥が存在する場合、打撃位置の真下に最も大きな円弧状のピークが現れる。しかし、打撃位置の真下に欠陥が無い場合は、打撃位置の直下の円弧状のピークは小さくなる。それゆえ、打撃位置を色々変更することによって、欠陥のサイズを大まかに評価できると考えられる。

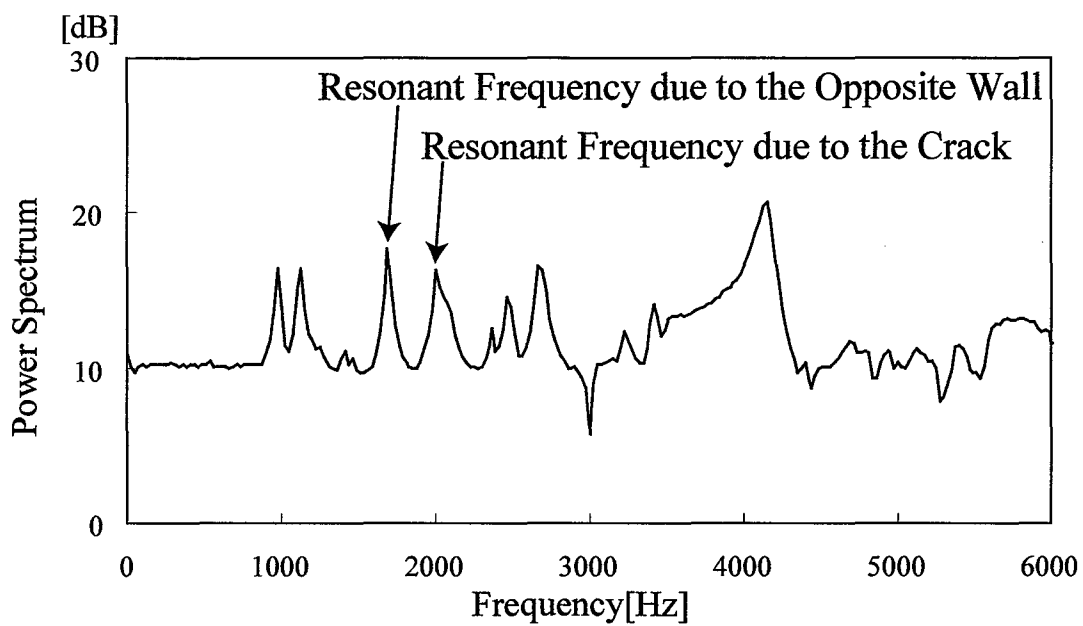


図 16 図 9(ii)の供試体におけるセンサ波形の
パワースペクトル

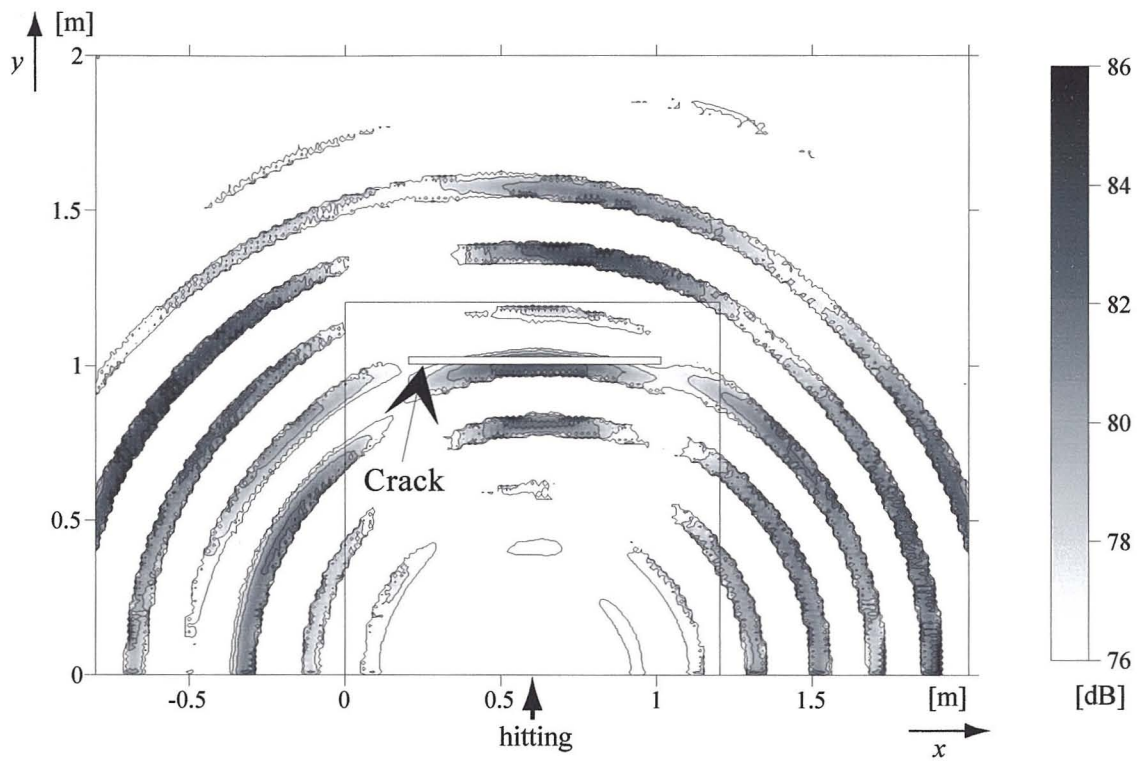


図 17 打撃面に対して平行な欠陥のあるコンクリート供試
体における，従来法による欠陥位置推定結果．

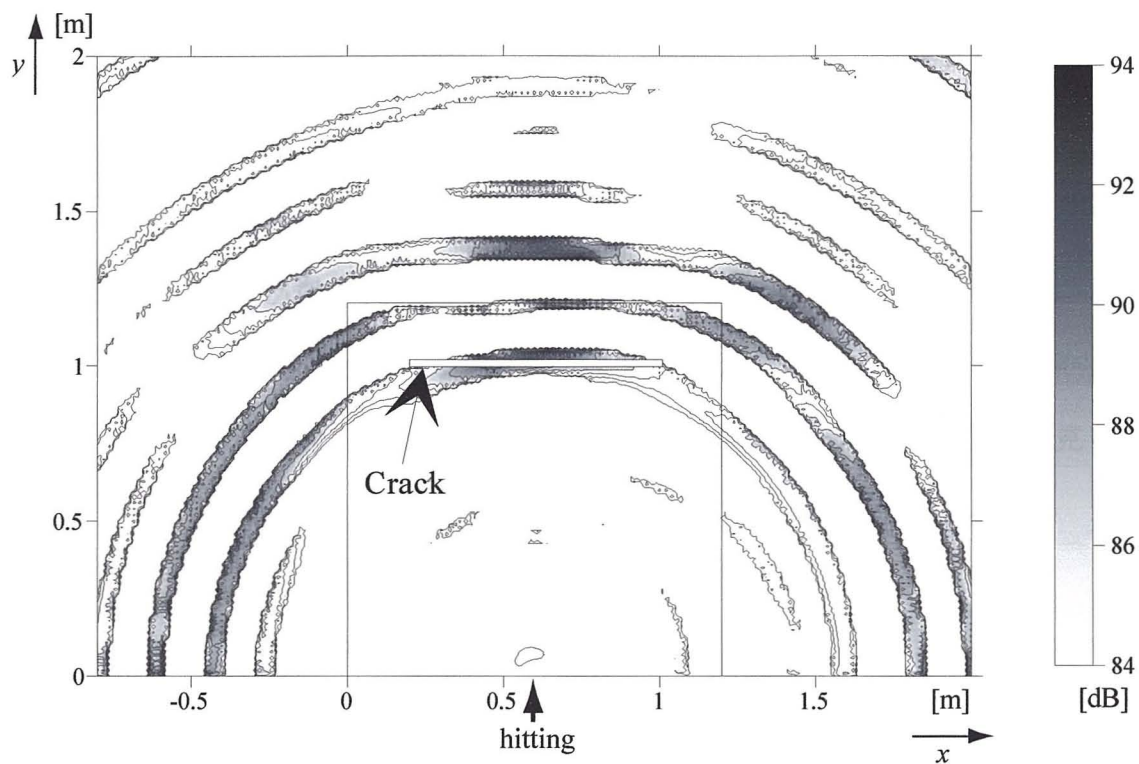


図 18 打撃面に対して平行な欠陥のあるコンクリート供試体における，新しい手法による欠陥位置推定結果.

3.6.3 斜めの欠陥があるコンクリート供試体の場合

リソナント周波数を用いた手法は、欠陥と打撃面が平行でないため定常波が発生せず理論的に適用できない。

従来手法

図 19 に従来手法で欠陥位置推定を行った結果を示す。打撃面の反対側の面 ($y=1.2\text{m}$) 付近に大きなピーク (91dB) が見られる。また、斜めの欠陥位置付近にも大きなピーク (92dB) が見られ、理論的に適用できないリソナント周波数を用いた手法よりも有効であることがわかる。しかしながら、横壁の反射や表面波除去の失敗に起因すると考えられる 86~92dB 程度の他のピークが供試体内部に見られる。

本論文で提案した手法

図 20 に新しい手法で欠陥位置推定を行った結果を示す。打撃面の反対側の面と欠陥位置に図 19 とほぼ同等の大きなピークが見られる。その他のピークは、横壁の反射に起因するピーク (86dB) のみ若干発生しているだけで、これらの値は反対面のピークよりも約 5dB 低く、供試体(i)及び(ii)と同様に雑音ピークが従来方法と比較して低く抑えられている。

新しい手法を用いて得られた図 15、図 18 及び図 20 において、横壁 ($z=0.0\text{m}$ 及び 0.3m) の反射波に起因するピークの値は、打撃面の反対面 ($y=1.2\text{m}$) に起因するピークよりも一様に約 5dB 小さい。また、欠陥に起因するピークは、打撃面の反対面のピークと同程度の値となる。よって、従来手法と比較して、図か

ら欠陥位置を推定することが非常に簡単である。

新しい方法で欠陥位置を検出できないケースとしては、欠陥から生じるピークと横壁からの反射によって生じるピークが重なり合う場合や、欠陥のサイズが小さくて欠陥からの反射波が小さい場合が考えられる。そのような欠陥を検出するためには、横壁からの反射波を正確に抽出する必要があるが、反射波の形状は直接波とは異なるため、抽出することは困難である。この問題に関しては今後の課題とする。

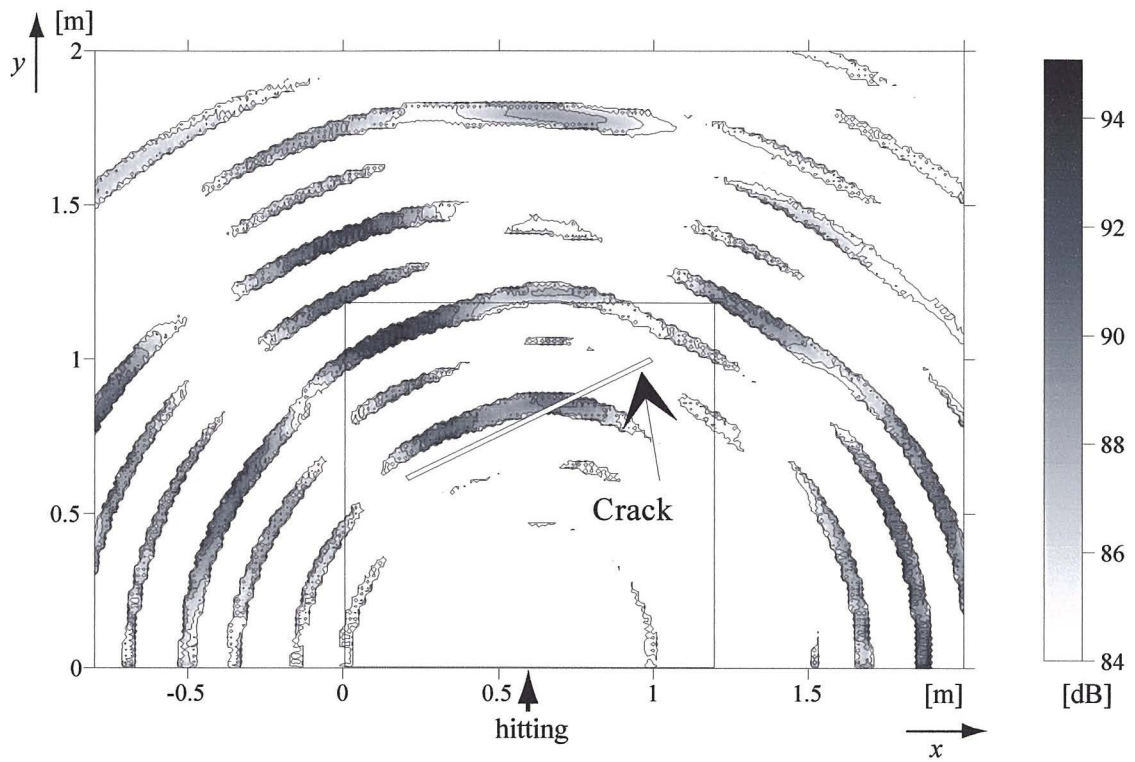


図 19 打撃面に対して斜めの欠陥のあるコンクリート供
試体における，従来法による欠陥位置推定結果。

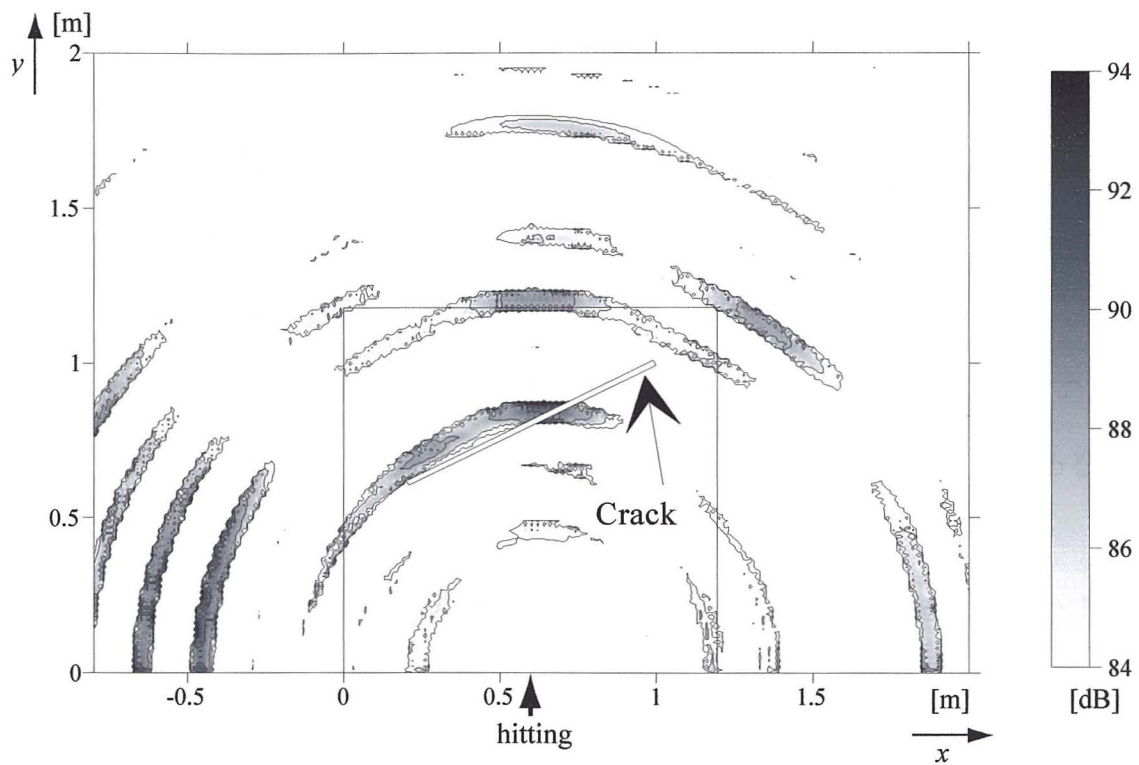


図 20 打撃面に対して斜めの欠陥のあるコンクリート供試体における，新しい手法による欠陥位置推定結果.

3.7 結論

本章では、安倍らの提案した方法[8]の問題点である、欠陥等から反射した比較的小さいP波の妨げとなる表面波や横壁からの反射波による影響を取り除くために、エネルギーの大きな表面波に注目して、表面波のより高精度な推定に関する考察を行った。

欠陥や反射波が無いと仮定される巨大なコンクリート構造物上で打撃実験を行った結果、表面波は単純な減衰する振動波形であることが分かり、その表面波をモデル化して推定することができた。

推定した表面波をオリジナルのセンサ波形から除くことにより、欠陥からのP波の反射波がより強調されて観測でき、提案した表面波推定手法が有効であることを示した。

最後に幾つかのコンクリート供試体を用いて実験を行った結果を示し、いずれの供試体においても、従来法と比べ供試体内部の雑音ピークの減少が見られ、欠陥位置推定がより容易になったことを示した。

第4章 結言

4.1 まとめ

本論文はコンクリート構造物の非破壊検査技術における、安倍らの提案した手法の改善を目的としている。即ち、衝撃弾性波法を用いたコンクリート構造物中の欠陥位置推定において、センサ波形に欠陥からの反射波以外に、表面波や横壁からの反射波等の雑音成分が含まれており、安倍らの手法ではそれら雑音成分の除去が不十分なため、雑音成分の高精度な除去が望まれていたことから、この研究が始まった。

本書の主張点は、表面波や横壁からの反射等の雑音成分について、最もエネルギーの大きな表面波のみを高精度に推定して除去することにより、欠陥位置推定に必要な欠陥からのP波の反射波が強調され、欠陥位置推定精度が向上する点である。

第1章では研究の背景、目的について述べた。

第2章ではコンクリート構造物に対する従来の非破壊診断技術について述べ、本研究で対象とする大規模のコンクリート構造物において、深い位置にある欠陥を見つけるための方法として衝撃弾性波法が適していることを示した。また衝撃弾性波法の中で、安倍らが提案した方法について実験方法、雑音成分除去の方法、欠陥位置の推定方法を述べ、横壁が近く表面波と横壁の反射波が重な

る状況では、欠陥位置推定の精度が不十分であることを示した。

第3章では、第2章で示した課題を解決するための新しい方法として、エネルギーの大きな表面波に着目し、表面波をより高精度に推定する方法について述べた。欠陥や反射波が無いと仮定される巨大なコンクリート構造物上で打撃実験を行った結果、表面波を減衰する振動波形としてモデル化することができた。高精度に推定した表面波をオリジナル波形から除くことにより、欠陥からの反射波が強調されて、欠陥位置の推定精度が向上し、提案した表面波推定法が有効であることを示した。

4.2 今後の課題

欠陥位置推定するうえで、邪魔になる波形は、

- ・ 表面波
- ・ 減衰波形
- ・ 壁や不連続面からの反射波
- ・ 多重反射波

などがあり、それらを全て除去することで雑音の無い欠陥位置推定が可能になると考えられる。表面波については本研究により解決できたので、その他の問題点について考察する。

減衰波形

図 5 に示したように、打撃により発生する弾性波は一つのピークだけではなく、減衰しながら振動し、複数のピークをもつ。そのため、欠陥位置推定結果において、特に図 18 が顕著であるが、供試体の外側に多くのピークが現れると考えられる。この場合、さらに奥に欠陥があるとき見つけることは困難である。欠陥からの反射波に関して、欠陥位置推定のためには最初のピークのみ必要なだけで、残りのピークは必要ないので、最初のピークだけを残して、残りのピークを除去することで減衰波形による影響を除去できると考えられる。

壁や不連続面からの反射波、多重反射の問題

本研究で用いた実験用の供試体では問題にはならなかったが、探査するコンクリート構造物が大規模で構造が複雑になると、それに伴い、様々な面からの反射波や多重反射が問題になる。

例として、港湾等に設置される防波堤の下部を構成するケーソンの非破壊検査について紹介する。図 21 に防波堤の模式図を示す。防波堤は上部コンクリートと下部のケーソンから構成され、上部コンクリートにはベニヤ板の目地が設けられている。下部のケーソンはコンクリート製の箱であり、内部は砂で満たされ、上にふたコンクリートが載せられている。一般に防波堤の港外側には波消しブロックが配されるが、これが大きな波によりブロックが動き、ケーソンを損傷すると内部の砂が流出し、ケーソンの重量が軽くなって防波堤が動いてしまい、最悪の場合倒れてしまうという問題があった。従来、ケーソンの損傷を調べるためにダイバーの目視検査によって行われてきたが、もっと簡単に調べる方策が期待されており、衝撃弾性波法による非破壊検査法が試された。欠陥部は水面下に隠れているために、欠陥部の真上の上部コンクリート上で打撃実験を行い、センサ波形の解析を行った。その結果、本研究で用いた供試体と異なり、構造が複雑なため 2 つの問題点が発生した。1 つは多くの反射面が存在することである。鉛直方向に進む P 波に関しては、上部コンクリート下面、ふたコンクリート下の空洞、海面、及びケーソンの底による反射面が存在する。また、横方向に進む S 波及び表面波に関しては、上部コンクリートの壁面や目地が反射面となる。2 つ目の問題点は多重反射の影響である。深い位置にある欠陥を調べる場合、欠陥からの反射波がセンサに入力されるまでに、打撃位置から近い反射面において何度かの多重反射波がセンサに入力される。このように、欠陥からの反射波が様々な反射面による反射波及び多重反射に妨害される可能性が大きい。コンクリート構造物の形状がわかる場合には、反射波及び多重反射の位置が特定できるため、これらの雑音成分を取り除く処理を開発し、より高精度な欠陥位置推定が望まれる。

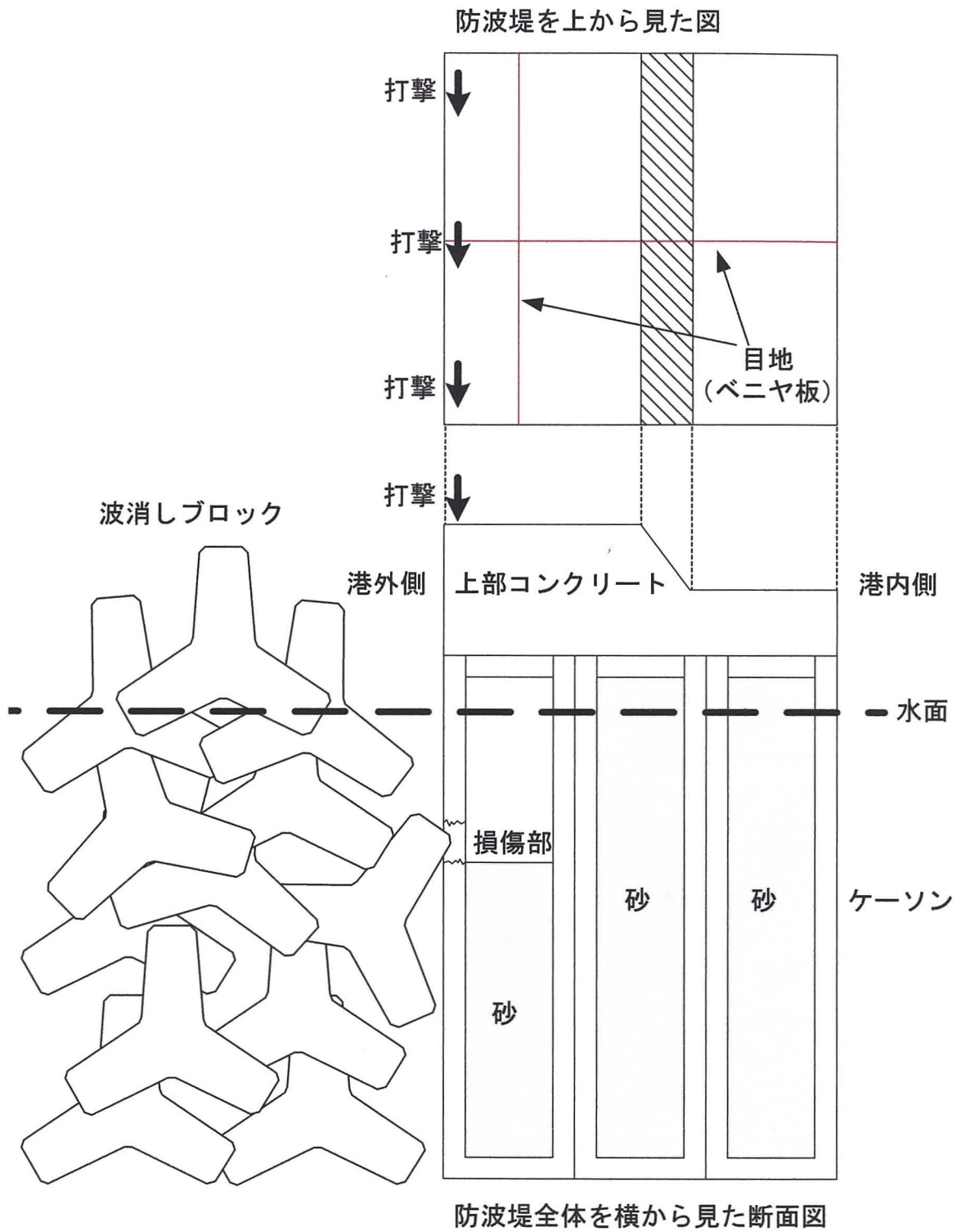


図 21 防波堤の模式図

謝辞

本研究を進めるにあたり多大なる助言と御指導をいただきました岩手大学安倍正人教授には心より深く感謝申し上げます。また、貴重な助言を頂いた岩手大学渡邊孝志教授、藤原忠司教授、及び永田仁史助教授に深く感謝いたします。計算機の運用、管理、プログラムの開発等において多大なる協力、助言を頂いた岩手大学藤岡豊太助手に深く感謝いたします。本実験に多大なる協力をいただいた鷲塚大輔氏、柴田竜太氏、吉田優氏、受川弘氏、嶋田一太郎氏に感謝いたします。また、本研究室での生活を有意義なものとしてくれた大学院生、4年生の皆様に感謝いたします。

参考文献

- [1] K. Preiss, "Checking of Cast in Place Concrete Piles by Nuclear Radiation Methods," *British Journal of Non-Destructive Testing*, pp.70-76, May 1971
- [2] J.K.C. Shih, R. Delpak, C.W. Hu, D.B. Tann & D.B. Moore, "The use of IR thermography in structural health monitoring," *Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure Vol. 2*, pp.687-692, 2003
- [3] M. Sansalone & N.J. Carino, "Detecting delaminations in concrete slabs with and without overlays using the impactecho methods," *ACI Materials Journal No. 86-M18*, pp.175-184, 1989
- [4] K. Kaito, M. Abe, Y. Fujino & K. Kumasaka, "Detection of internal voids in concrete structures using local vibration information," *J. Materials, Concrete Structures and Pavements*, No. 690/V-53, pp.121-132, 2001 (in Japanese)
- [5] 金子祐, 安倍正人, 牧野正三, 曾根敏夫, 城戸健一, "非線形最小2乗法を用いた地中杭の形状の高精度推定," *信学技報*, EA90-42
- [6] M. Abe, S. Hongo, Y. Nemoto & Y. Chubachi, "Nondestructive Technique to Estimate the Position of a Crack in a Concrete Block Buried in the Ground," *Proc. Third International Congress on Air- and Structure-Bone Sound and Vibration*, Vol. 3, pp. 2045-2052, June 13-15, 1994
- [7] M. Abe, Y. Nagata & K. Kido, "A new method to locate vibration sources by searching the minimum value of error function," *Proc. IEEE International Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, pp.18B.2.1-2.4, April 7-11, 1986
- [8] M. Abe, T. Fujioka & Y. Nagata, "Location of a defect in a concrete block by a non-destructive technique," *Acoust. Sci. & Tech.* 23, pp.308-312, June 2002
- [9] T. Murakami, T. Fujioka, Y. Nagata & M. Abe, "Non-destructive Technique to Detect a Crack in a Concrete Block by Precise Estimation of the Surface Wave," *Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan, 4th Joint Meeting*, 29 Nov. – 2 Dec. 2006
- [10] T. Murakami, T. Fujioka, Y. Nagata & M. Abe, "Nondestructive technique for estimating crack positions in a concrete structure by subtraction of the surface-wave component," *Acoust. Sci. & Tech.* (採録決定)