

# 超音波スペクトロスコピーを用いたコンクリート 構造物の欠陥評価法の研究

坂田康徳\*・大津政康\*\*

本研究は、発信器のスイープモード入力を利用して得られる応答スペクトルを用いて、コンクリート構造物中に生じる内部欠陥を評価する方法について検討したものである。ここでは、形状寸法や埋め込み深さが予め分っている板状の人工欠陥を埋設した無筋および鉄筋コンクリートの壁および床板模型を作製し、表面法（発信および受信センサを同一表面に配置）や透過法（受信センサを板部材の裏面に配置）による板状欠陥の評価法を実験的に検討すると共に、レーダー法との比較検討を行っている。また境界要素法による欠陥部の2次元共振解析を行って、欠陥評価の定量化について検討している。

**Keywords** : ultrasonic spectroscopy, non-destructive testing, internal defect

## 1. まえがき

東京オリンピックや大阪万博等を契機とする戦後の急激な建設投資の増加と我国におけるセメント産業の発展は、国内各地に膨大なコンクリート構造物を生み出してきた。しかしながら、約30年経過した今日、これらの中には、アルカリ骨材反応や塩害、重交通量の増加や乱雑施工等に基づくと考えられる鉄筋の発錆、ひびわれ、空隙、急激な劣化、シックイやタイルの剝離等、種々の欠陥が指摘され、コンクリート構造物の耐久性の欠如が大きな社会問題となっている<sup>1), 14), 15)</sup>。そこで、構造物の安全性確保と有効利用の見地から、これらの構造物中の各種欠陥を早期に発見し、適当な処置を施して安全性を確保するために、有効な非破壊評価法の開発が急務となっている。

コンクリート中の欠陥を評価する方法として、従来より超音波法、AE法、レーダー法、赤外線サーモグラフィ、X線や放射線による方法等、種々の方法が検討され、かつ実施されているが<sup>2)</sup>、大部分は未だ開発途上にあり、新たな開発の余地も残されている。これらの非破壊評価法の発展の歴史は種々の文献<sup>3)</sup>で紹介されているが、従来、超音波（または弾性波）を利用した方法は、材料中を伝播する超音波の伝播速度を利用した音速法が大部分であった。ところが、近年、材料中を伝播する超音波の周波数特性に着目した非破壊評価法に関する研究も盛んに行われるようになってきた。この方法は、Gerickeが金属材料中の欠陥評価に使用したのが最初と言われており、超音波スペクトロスコピーと呼ばれている<sup>4)</sup>。この方法のコンクリート工学の分野への適用としては、インパクトエコー法と呼ばれる鋼球の衝突による

衝撃波入力に対する受信波のスペクトル解析に基づく構造物内部の各種欠陥評価に関する研究<sup>5)</sup>、パルス入力に対する受信波のフーリエ解析によるコンクリート打設時の締固め効果の評価に関する研究<sup>6)</sup>、繰り返し荷重を受けたコンクリートの劣化度評価に関する研究<sup>7)</sup>等がある。この他にも、衝撃共振法(Inpact Resonance Testing)と呼ばれる構造物内の欠陥評価に関する研究<sup>8)</sup>も見られる。筆者らも以前より、発信器のスイープモードを利用して得られる応答スペクトル（以前はフィルター特性<sup>9)</sup>と呼んでいた）を用いて、コンクリート中の各種欠陥（ひびわれ、空隙、劣化度等）評価に関する研究を種々検討している<sup>10), 11)</sup>。フーリエ変換による方法が、高速、大容量のデジタルメモリーや解析器またはコンピュータを要するのに比べて、この方法は、安価で簡単な装置で構成出来る上に、任意の周波数領域を簡単な操作で計測出来るので、手軽で現場計測が容易であり、経済性や操作性の点でフーリエ解析による方法より有利という点に特徴がある。本方法の理論的背景や応答スペクトルとフーリエスペクトルの等価性等については既報<sup>10)</sup>を参照された

い。コンクリート構造物内に生じる実際的な欠陥は種々あるが、ここでは、主にコンクリート表面にほぼ平行なひびわれや打ち継ぎ目、あるいはタイルやモルタル仕上げの漆喰などにおける層状剝離または肌離れなど、扁平な空隙に基づく欠陥を対象として、その欠陥評価法を検討した。以下では、形状寸法、埋め込み深さ等の異なる各種の人工欠陥を設けた壁および床板構造物模型を用いて、構造物中の欠陥評価に関する実験、および境界要素法(BEM)による欠陥部の2次元共振解析を行って、コンクリート表面に平行な板状欠陥の、欠陥深さ評価に対する定量化を試みている。また、壁模型については、レーダー法との比較検討も行っており、本方法による鉄筋および無筋コンクリート構造物内の欠陥評価の可能性を検

\* 正会員 九州東海大学助教授 工学部 土木工学科  
(〒862 熊本市大江町渡鹿 223)

\*\* 正会員 熊本大学助教授 工学部 土木工学科

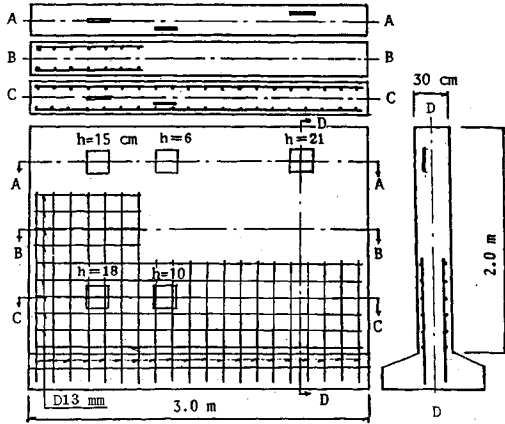


図-1 壁模型 (ST-1) の形状寸法および欠陥配置状況

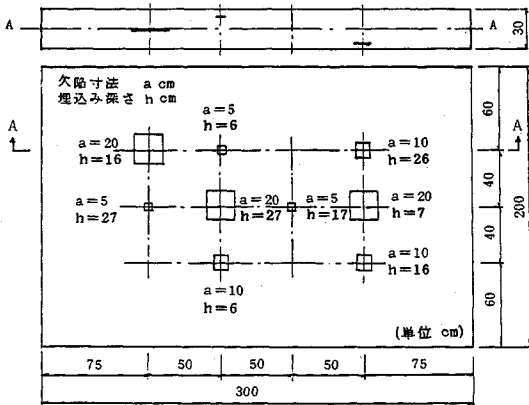


図-2 床板模型 (ST-2) の形状寸法および欠陥配置状況

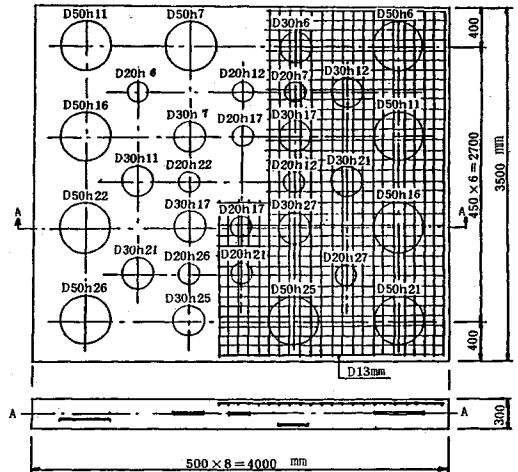


図-3 床板模型 (ST-3) の形状寸法および欠陥配置状況

さを約 5 cm 毎に変化させて埋め込んだ。ST-2, ST-3 共に、板状欠陥は、厚さ約 5 mm のスチロール樹脂板 2 枚で厚さ約 0.5 mm の鉄板を挟み込んだものを用いた。ST-2 では、地盤上に敷いた厚さ 2 mm の底板ベニヤに所定の位置、深さとなる様に欠陥を直径 6 mm のネジ付き棒鋼で固定した。また ST-3 では、地盤上に厚さ約 2 cm の敷きモルタルを布設し、その上に厚さ約 8 mm の底板ベニヤを敷いた後、直径 6 mm のネジ付き棒鋼を底板ベニヤおよび敷きモルタルを貫通して地中に約 20 cm 程度打ち込み、これに欠陥を固定してコンクリート中に埋め込んだ。なお、疑似欠陥として用いた発泡スチロールやスチロール樹脂板等の埋設物は、コンクリートに比べてその密度が著しく小さいため、音響インピーダンスの相違から、その接触面における超音波(または弾性波)の透過率<sup>16)</sup>が極端に小さくなることが判っている。それ故、スチロール樹脂板 2 枚で鉄板を挟み込んだサンドイッチ構造の人工欠陥は、コンクリートと鉄板の接触を断っているため、本計測における鉄板の影響はほとんどないものと考えられる。故に、これらの埋設物(人工欠陥)は空隙とほとんど等価であると考えられる。欠陥各部分は、応答スペクトル測定後に直径 12 mm のドリルにて穴を開けた後、ファイバースコープで欠陥位置を確認した。図中に示される欠陥深さ h は、確認された欠陥中央部の深さを四捨五入し、(cm) 単位で示したものである。またこれらの各構造物模型は、実験室に隣接する屋外に設け、自然環境のもとで長期間(約 2 か月以上)養生した後、測定に供した。3 基の構造物模型の作成に使用したコンクリートは、全て同一配合の普通ポルトランドセメントを使用した市販のレディーミクストコンクリートであり、表-1 はその配合条件、および標準供試体 (D15×30 cm) を使用して求めた標準養生、材令 28 日後における特性値を示している。

討している。

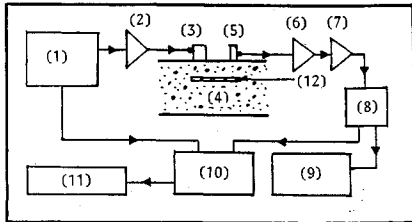
## 2. 実験および解析の概要

実験に使用した構造物模型は、形状寸法や埋め込み深さの異なる板状欠陥を、コンクリート表面に平行に埋設した壁および床板模型である。壁模型 (ST-1) は、図-1 に示す様に、無筋および鉄筋コンクリートの部分からなる約 2×3×0.3 m の板状部分を持つものであり、その中に一辺  $a=20$  cm で厚さ約 2 cm の発泡スチロール製の角形板状欠陥を埋め込んでいる。鉄筋は、D13 mm 異形鉄筋 (SD 30) をかぶり 2 cm で約 15 cm 間隔に縦横に配置した。床板模型は 2 基作成し、その内の 1 基は、図-2 に示す様に約 2×3×0.3 m の無筋コンクリート (ST-2) であり、その中に一辺  $a=5, 10, 20$  cm で厚さ約 10 mm の角形板状欠陥を浅い場合、中程度、深い場合に分けて埋設した。また、他の 1 基は、図-3 に示す様に約 4×3.5×0.3 m の無筋および鉄筋コンクリート部分を持つ ST-3 である。ST-3 には、直径  $D=20, 30, 50$  cm で厚さ約 10 mm のディスク状欠陥を深

表-1 コンクリートの配合条件および特性値

$\phi_{max}$ (mm)	スラブ* (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	W (%)	$f_{c'}$ (MPa)	E $\times 10^5$ (GPa)	$\rho$ ( $ton/m^3$ )	$\nu$
20	18	4.0	53.5	47	187	24.9	30.1	2.32	0.2

$\phi_{max}$ : 粗骨材最大寸法, W/C: 水セメント比  
 s/a: 細骨材率, W: 単位水量 ( $kg/m^3$ ),  $\nu$ : ポアソン比  
 E: 初期弾性係数 (GPa),  $\rho$ : 単位容積重量 ( $ton/m^3$ )  
 $f_{c'}$ : 材令28日圧縮強度 (MPa)



- (1) 信号発生器, (2) 増幅器, (3) 発信トランスデューサ(音速法用)
- (4) コンクリート, (5) 受信トランスデューサ(加速度センサ)
- (6) 加速度計増幅器, (7) プリアンプ, (8) ディスクリミネータ
- (9) オシロスコープ, (10) 記録計, (11) 出力計, (12) 人工欠陥

図-4 計測システム

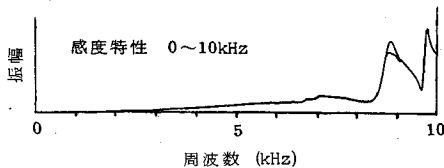


図-5 計測システムの感度特性 (0~10 kHz間)

応答スペクトルの測定は、壁模型については発信および受信センサーを同一表面に取り付けて行う表面法と、受信センサーを欠陥部の裏側に取り付けて行う透過法で、また床板については表面法で実施した。本計測では、発信側に音速法で一般に使用されている圧電素子トランスデューサを、また受信側に圧電加速度計(3~10 kHz)を使用した。応答スペクトルは発信側の電圧およびシステム全体の増幅率を一定にし、測定周波数領域を0~10 kHz間で測定した。発信および受信センサーは、欠陥部のコンクリート表面をサンダーや紙ヤスリで平滑にした後、受信側(圧電加速度センサ)を瞬間接着剤で固定すると共に、発信側をグリースを介してコンクリート表面に押し付けて取り付けた。応答スペクトルの測定では、発信側センサーを各3回ずつ付け直して測定した。なお本計測では、発信および受信センサーを直接接触して得られるシステムの感度特性が被検体の応答に比べてかなり滑らかであるため、応答スペクトルの感度補正を行わずともその特徴が判ることが実験的に確認されている<sup>10)</sup>。故に、以下のスペクトル振幅は相対的であり、その単位は示していない。図-4は本方法の表面法の場合の計測システムを、また図-5は本計測システムにおける感度特性を示している。

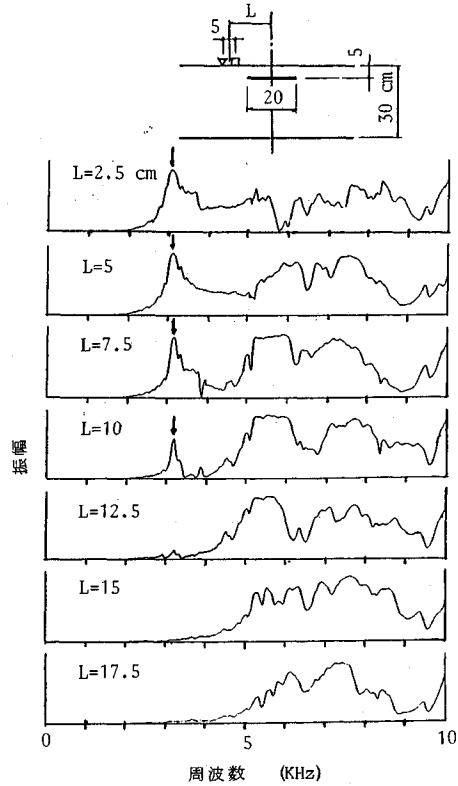


図-6 床板模型(ST-2)の欠陥部における表面法による走査の一例

レーダー法で使用した計測器は電磁波法による鉄筋探査計である。レーダー法では、壁模型の欠陥部をその中心線に沿って計測すると共に、欠陥部の各部について個々に詳細に計測した。

境界要素法(BEM)による解析は、壁および床板について、無筋コンクリート部における、表面に平行な直径20 cmの板状欠陥部を、その深さが変化するケースについてモデル化し、2次元共振解析を行った。本解析におけるコンクリートの特性値は、実験に使用したコンクリートの特性値を基に、コンクリートの一般的な値として、弾性係数  $E=29.4$  GPa, 単位容積重量  $\rho=2.3$   $ton/m^3$ , ポアソン比  $\nu=0.2$  を選んで行った。また解析する周波数領域は0~10 kHz間とし、その周波数の増分は0.1 kHz間隔とした。なおBEM解析におけるモデル部材の形状寸法および拘束条件は、解析結果と共に示すことにする。

### 3. 実験結果

図-6は、床板模型(ST-2)における一辺  $a=20$  cm, 深さ  $h=7$  cmの水平に埋設した角形板状欠陥部上を、発信および受信センサー間隔5 cmの表面法で走査した場合の応答スペクトルの変化状況を示している。セン

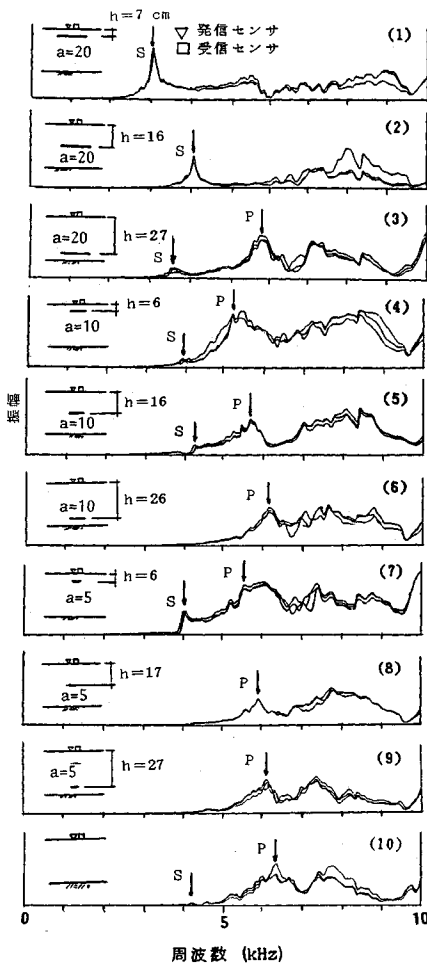


図7 床板模型 (ST-2) のコンクリート表面に平行な板状欠陥部における応答スペクトル

サーが欠陥の無い部分の上にある場合には、約 5 kHz 以下の低周波数領域において顕著な応答がほとんど見られないのに比べて、センサーが欠陥部に有る場合には矢印で示す顕著なピークが出現している様子が判る。このピークは明らかに欠陥の影響によるものであり、これより、欠陥寸法が比較的大きくて浅い場合には容易にその存在を識別出来、また、その付近を詳細に走査することにより、欠陥のおおよその寸法も把握出来ることが判る。さらに、これと同じ欠陥部の中央に受信センサーを固定し、発信および受信センサー間隔  $L$  を変化させた場合には、 $L$  が小さい程ピークの振幅は大きくなることが判った。故に、表面法における発信および受信センサー間隔は、小さい程このピークをより明瞭に識別出来るので、以後の表面法における測定では、発信および受信センサー間隔を 5 cm として測定することにした。

図7は、ST-2における板状欠陥部の中央部を、発信および受信センサー間隔 5 cm の表面法で測定した場

合の応答スペクトルを示している。始めに (10) は無欠陥部の応答スペクトルを示している。約 4.1 kHz 付近に小さなピーク S と、約 6.5 kHz 付近に大きなピーク P が現われているのが判る。これらのピークについては次の様なことが考えられる。すなわち、コンクリート中の縦波速度  $V_p$  を約 4000 m/s、横波速度  $V_s$  を約 2450 m/s として、後述する式 (3) を用いてその共振周波数  $f_p, f_s$  を求めると、 $f_p$  は約 6.7 kHz、 $f_s$  は約 4.1 kHz となり、おおよそ矢印で示すピークの位置になる。故に、これらのピーク P と S は、板厚に対して半波長の縦波と横波の、厚み共振によるピークと考えられる。(1), (2), (3) は、一辺  $a=20$  cm の板状欠陥を深さ  $h=7, 16, 27$  cm の位置にコンクリート表面に平行に埋め込んだ場合である。 $h=7$  cm と 16 cm では、約 3 kHz と 4 kHz 付近に明瞭なピーク S が現われている。これに比べて  $h=27$  cm では、欠陥位置が深いため尖鋭な特徴有るピークは現われていないが、約 3.5 kHz と 5.7 kHz 付近に鈍いピーク S と P が現われ、この内の約 3.5 kHz のピークは (1), (2) のピーク S と同じモードのピークと考えられる。(4), (5), (6) は、 $a=10$  cm の板状欠陥を、 $h=6, 16, 26$  cm の位置に配置した場合である。 $h=6$  cm では、3.9 kHz の小さなピーク S と、5.3 kHz 付近に振幅が大きくて比較的なだらかなピーク P が有り、振幅の大きな応答が高周波数領域にまで及んでいるのに比べて、欠陥位置が深く成るとピーク S はほとんど見えなくなり、またピーク P は漸次高周波数側へ移動する様子が判る。(7), (8), (9) は、 $a=5$  cm の板状欠陥を  $h=6, 17, 27$  cm に配置した場合である。 $h=6$  cm では約 4 kHz 付近に急激な断差状の小さなピーク S が現われ、振幅の大きな応答が高周波数領域にまで及んでいるが、 $h=17$  cm と 27 cm では低周波数側のピークはほとんど消失し、またピーク P は漸次高周波数側へ移動している様子が判る。

この実験から判るように、実験における欠陥評価は、構造物中の欠陥、またはコンクリート板の底面からの反射に基づいて起こると考えられる応答スペクトル上のピーク S あるいは P を基に議論し、特に第 4 章では、ピーク S を対象に、式 (3) や BEM による 2 次元共振解析を用いてその定量化を検討している。このピーク P と S の区別は、コンクリートの板厚と縦波速度やせん断波速度との関係を基に、現段階では経験的に底周波数側の最初の比較的尖鋭なピークを S、次に現われる比較的丸みのある振幅の大きなピークを P と定めている。しかしながら、実際構造物における共振現象は複雑であり、また計測システムの感度特性の特徴もあって、全てのケースに対して式 (3) の概念をそのまま適用できるとは限らないようである。例えば、欠陥位置が深い場合や欠陥寸法が小さい場合には、板の底面や欠陥より反射

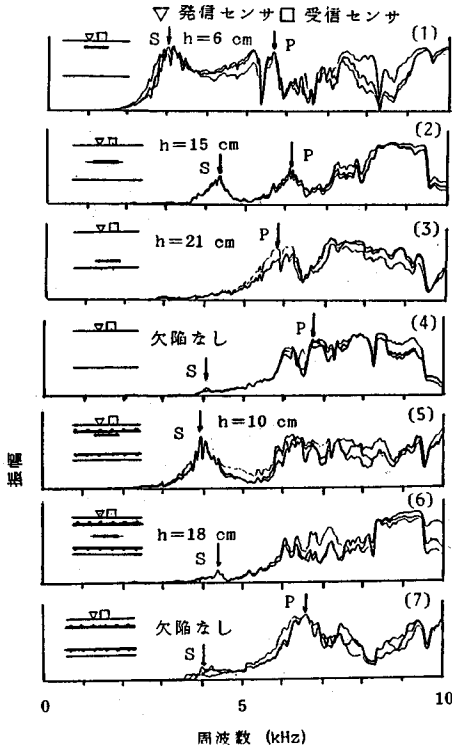


図-8 壁模型 (ST-1) の各欠陥部を表面法で測定した場合の応答スペクトル

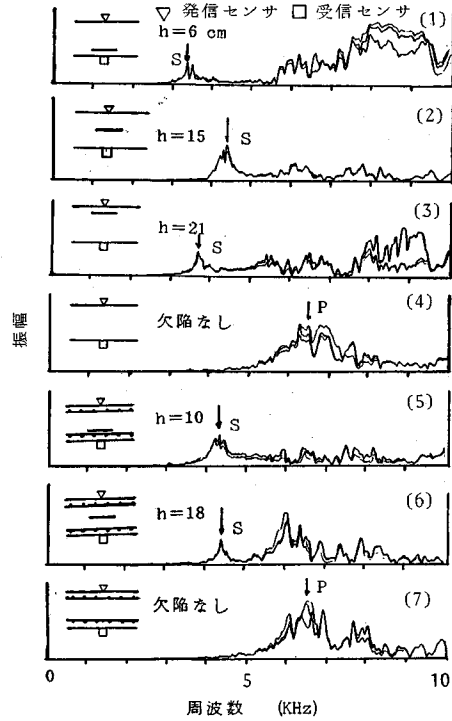


図-9 壁模型 (ST-1) の各欠陥部を透過法で測定した場合の応答スペクトル

する波のエネルギーが小さくてピーク S が見え難くなり、また欠陥寸法が非常に大きくて浅い場合でも、板の底面より反射し、欠陥を迂回してくる波は、そのエネルギーは小さくてその厚み共振のピーク振幅は小さくなるものと考えられる。そして、これに代わってコンクリート表面と欠陥で挟まれる板状部分の、各種の波によるより高次のいくつもの共振が起こり、そのため、複数のピークが重複して、特にピーク P の識別が困難になることが起こり得る。そこで、現段階では、これらを正確に識別し得ない場合もあると考えられるが、これらを解決するには、例えば 3 次元的な応答スペクトルの測定や、欠陥部表面の複数点における応答スペクトルの同時測定等、コンクリート表面におけるより多くの情報を収集し、また、それらを組み合わせることによって、より正確な識別が可能になるものと考えられる。

図-8 は、壁模型 (ST-1) における欠陥部および無欠陥部を表面法で測定した場合の応答スペクトルを示している。(1), (2), (3) は、 $a=20$  cm の板状欠陥を無筋コンクリート部に  $h=6, 15, 21$  cm で壁面に平行に埋設した場合である。 $h=6$  cm の場合には約 3 kHz 付近に振幅の大きなピーク S が出現すると共に、振幅の大きな応答が高周波数領域にまで及んでいることが判る。また、 $h=15$  cm と深くなると、ピーク S の周波数

が約 4.5 kHz と高くなると共にピーク振幅も小さくなり、またピーク P と考えられるピークが約 6 kHz 付近に現われている。さらに、 $h=21$  cm と深くなると、低周波数側には顕著なピークは認められず、約 6 kHz 付近に大きなピーク P が現われているのが判る。(5), (6) は、鉄筋コンクリート部に板状欠陥を  $h=10$  cm と  $h=18$  cm で配置したケースである。 $h=10$  cm では、約 4 kHz 付近に大きなピーク S が有り、鉄筋コンクリート中でも欠陥が浅い場合にはその存在の影響が明瞭に現われていることが判る。しかしながら  $h=18$  cm と深くなると、そのピーク周波数は約 4.5 kHz と若干高くなるが、その振幅はかなり小さくなっている。

図-9 は、同じく ST-1 の欠陥部を透過法で測定した場合の応答スペクトルを示している。この場合、欠陥が受信センサーに近い方を浅い場合とする。板状欠陥部 (1), (2), (5), (6) では、図-8 (表面法) とはほぼ同じ周波数帯域にピーク S が発生しているが、(1) および (5) では、欠陥深度が浅くても、ピーク S の振幅が、図-8 の (1), (5) に比べてかなり小さくなっていることが判る。これは、表面法の場合には発信センサーから入射した弾性波が欠陥とコンクリートの表面間の板状部分を直接的に共振を起こさせるのに比べて、透過法では壁裏面より入射した弾性波が欠陥を迂回して到達し、

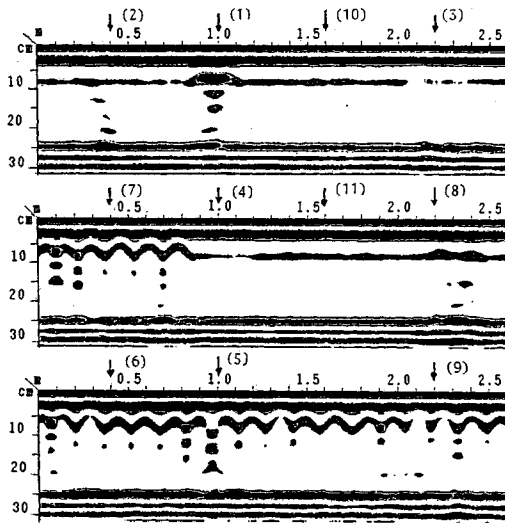


図-10 壁模型 (ST-1) の各欠陥部をレーダー法で測定した結果

板状部分を共振させるため、その共振エネルギーが小さくなるためと考えられる。一方 (3) では、約 3.6 kHz 付近に表面法では見えなかったピーク S が明瞭に現われており、これより、表面法に比べて、透過法では、より深い位置の欠陥までその存在を評価出来ることが判る。この場合、ピーク S の周波数は  $h=6\text{ cm}$  のケースと 15 cm のケースの中間に来ていることが判る。透過法においては、発信センサーと受信センサーを入れ替えてもほとんど同じ応答スペクトルが得られる。故に透過法では、欠陥寸法が同じで、その位置が壁の中央から等距離に有る浅い場合と深い場合とでは、同じ周波数でピークが生じると考えられる。

図-10 は、同じく ST-1 の上、中、下段の各欠陥部をレーダー法で走査した結果を示している。(1), (2), (3) は無筋コンクリートの板状欠陥部であり、(1) の浅い欠陥部 ( $h=6\text{ cm}$ ) では欠陥の大きさや深さも明瞭であるが、(2) の中程度の深さ ( $h=15\text{ cm}$ ) では欠陥の存在が判る程度となっている。また、(3) の深いケース ( $h=21\text{ cm}$ ) では深部に縞模様の乱れが有り、欠陥の存在をうかがわせるが、確定的とはいえない程度である。(5), (6) は鉄筋コンクリート部における板状欠陥の埋設部である。(5) は欠陥位置が浅い場合 ( $h=10\text{ cm}$ ) であり、ここでは欠陥の存在は予想されるが、隣接する鉄筋による縞模様の干渉縞が列島の様に尾を引いているため、その干渉縞の影響で深さや寸法が判り難くなっており、また (6) の中程度の深さ ( $h=18\text{ cm}$ ) ではほとんど識別出来なくなっている。なお、このレーダー法では、校正により一番浅い影を残して干渉縞の部分を消すことが出来るが、鉄筋間隔が 10~15 cm と比

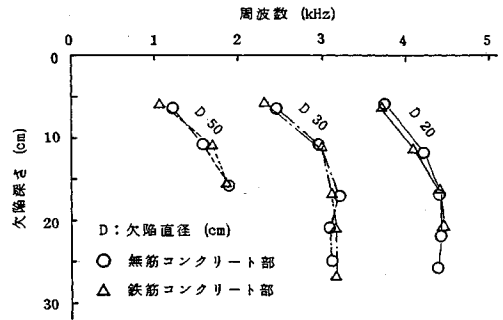


図-11 床板模型 (ST-3) の各欠陥部における欠陥直径  $D$  とその深さ  $h$  の変化に伴う  $f_s$  の変化状況

較的狭い場合には、鉄筋より深い部分の干渉縞はほとんど消されてしまうため、鉄筋より内側に有る欠陥は校正図を用いても識別出来ない様である。(4), (7) は無筋および鉄筋コンクリート部の無欠陥部であるが、(7) の左側には、鉄筋間隔が他の部分より幾分小さいためと考えられる干渉縞の大きな部分があり、欠陥がないにもかかわらず、(5) と類似の縞模様となっている。なお本模型では、(8)~(11) の部分にも板状欠陥以外の他の欠陥も設けているため、他に縞模様の乱れのある部分も見られるが、ここでは、板状欠陥に議論を絞っているため、他の部分については考察を省略する。

#### 4. 深さ評価の定量化に関する考察

第 3 節の床板および壁模型における板状欠陥の深さと応答スペクトルとの関係についての観察の結果、次のような点が明らかになった。すなわち、表面法の場合には、欠陥深さが部材厚さの約 1/2 より浅い場合は、欠陥が浅い方がピーク周波数  $f_s$  が低いこと、欠陥が深い場合や欠陥が小さい場合にはピーク S が不明瞭で判り難いこと、無筋コンクリート部と鉄筋コンクリート部では応答振幅に若干の差があるものの、欠陥が深い場合を除けば、鉄筋コンクリート部分でも無筋コンクリート部分とほぼ同様に欠陥評価が可能であること、透過法では欠陥が部材厚さの中央で  $f_s$  が最大となり、これより浅くても深くても  $f_s$  は小さくなる傾向があること、透過法では表面法に比べて、より深い欠陥でも評価が可能であることなどである。そこで、板状欠陥寸法や深さの変化と  $f_s$  の関係を明らかにするため、図-3 に示すように、無筋および鉄筋コンクリート部分を持つ床板模型 (ST-3) を造り、その中に直径  $D=20, 30, 50\text{ cm}$  の円板状欠陥を、その深さ  $h$  の変化量を小さくして埋め込み、再度、表面法による実験を行った。図-11 はその結果得られたピーク周波数  $f_s$  と  $D$  および  $h$  との関係を示している。これより、同一寸法であれば、無筋コンクリート部分でも鉄筋コンクリート部分でも、欠陥深さ

の増加に伴う  $f_s$  の変化状況はほとんど同じであること、欠陥深さが同じであればその寸法が大きいほど  $f_s$  は小さくなること、床板では欠陥深さ  $h$  が床板厚さの約 1/2 以下では放物線状に大きくなり、 $h$  がそれ以上に大きくなるとほぼ一定または若干小さくなる傾向があることが判る。この様に、床板では欠陥寸法が一定であれば、 $h$  の増加に対してそのピーク周波数の変化状況がほぼ放物線状に変化するのに比べ、壁（透過法、図-9）では、欠陥位置が壁厚の  $\frac{1}{2}$  付近で  $f_s$  は最大となり、また、壁厚の 1/2 より深くなると  $f_s$  は逆に小さくなる。故に、欠陥寸法一定とした場合における  $h$  と  $f_s$  との関係は、壁と床板で若干異なるものと考えられる。この床板と壁で欠陥深さの変化に対するピーク周波数の変化状況の相違は、床板の場合にはその底面が直接地盤に接しているため、底面の変位が拘束を受け、両面が自由な壁の場合と境界条件が異なってくるためと考えられる。

これらの欠陥存在を示すピークは、コンクリート表面と欠陥で挟まれる板状のコンクリート部分が板振動による共振を起こすためと考えられるが、これらのピークを、全周囲を固定的に支持した板の振動として、振動理論を用いて取り扱おうとする場合、若干の矛盾が生じる。すなわち、板の振動理論<sup>12)</sup>に従えば、厚さ  $h$  で全周囲を固定的に支持された直径  $D$  の円盤に対して、次式が与えられている。

$$f_{ij} = \frac{\lambda_{ij}^2 h}{2\pi D^2} \sqrt{\frac{Eg}{12(1-\nu)\rho}} = k \frac{h}{D^2} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $k = \frac{\lambda_{ij}^2}{2\pi} \sqrt{\frac{Eg}{12(1-\nu)\rho}}$

ここで、 $\lambda_{ij}$  は固有値、 $E$  は弾性係数、 $\nu$  はポアソン比、 $g$  は重力加速度、 $\rho$  は密度である。さらに  $i, j$  は振動モードを示す正の整数であり、その時の円盤の振動モードは、次数により縦横の直径と同心円またはその組み合わせによって形成される節と腹を持つ固有振動を起こすとされている。ここで、 $k$  は  $i, j$  一定、すなわち同じ振動モードを取る場合には定数となる。結局、 $f_{ij}$  は、欠陥直径  $D$  が一定であれば、その深さ  $h$  の増加に対して比例することになるが、実験結果では放物線状の曲線になっている。また、欠陥深さ  $h$  が一定の場合には、欠陥寸法  $D$  の増加に対して  $1/D^2$  の割合で変化することになる。つまり、 $h$  が一定の場合には、 $D=20:30:50$  (cm) ではその比は  $1:0.44:0.16$  とならねばならないが ST-3 の無筋コンクリート部における実験結果では、 $h=5$  cm で  $D=20:30:50$  (cm) の周波数比は、 $3.72:2.44:1.23$  (kHz) =  $1:0.66:0.33$  となり、ここでもかなりの差異が見られる。これらの差異は、板厚に対するその直径（またはスパン）の比が非常に小さなディープビーム的な要素が有るため、固定的に考えている支点のスパ

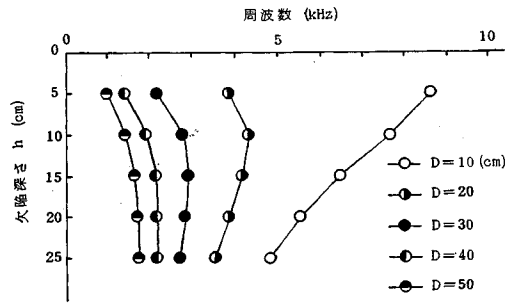


図-12 式(2)に基づく欠陥寸法  $D$  とその深さ  $h$  の変化に伴う共振周波数  $f_{01}$  の変化状況

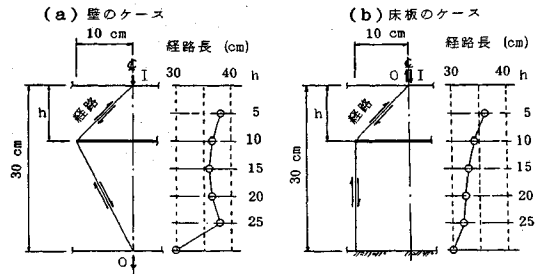


図-13 欠陥を有する壁および床板中の弾性波経路と欠陥深さ  $h$  の増加に伴う経路長  $L$  との関係

ン方向の変位が無視できなくなるためと考えられる。Kim はこれらの矛盾を解決するため、板の振動理論における直径  $D$  の代りに、 $h$  で補正した有効直径  $D'$  を用いた次式を提案している<sup>8)</sup>。

$$f_{01} = 1.87 \frac{h}{D'^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu)}} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $D' = D + 2h \tan \theta$

ここで、 $f_{01}$  は  $i=0, j=1$  の場合の、周囲を固定的に支持された円盤の、共振モードに対する周波数を示している。そして、 $\theta$  は板を支持する固定端の支持条件にかかわる定数とし、 $\theta=45^\circ$  が適当であるとしている。この式に従って、 $D=10\sim 50$  cm、 $h=5\sim 25$  cm 間で、コンクリートの特性値として  $E=29.4$  GPa、 $\rho=2.3$  ton/m<sup>3</sup>、 $\nu=0.2$  を使用して  $f_{01}$  の値を求めると図-12 の様になる。この図では、 $D$  が 30 cm 以上では実験値に良く似た傾向を示すが、 $D=20$  cm では  $h=10$  cm 付近で共振周波数が最大となり、 $D$  が小さくなれば、さらに実験結果と合わなくなる傾向が見られる。

ところで、壁や床板中に存在する比較的小さな欠陥については、次の様な考え方をすれば、その共振に関して、おおよその傾向を説明することが出来る。入力点と出力点の間を伝播する弾性波の経路は、その発信点と受信点との間に介在する寸法一定の欠陥の位置が変化すれば、その経路長も変化する。そこでコンクリートの表面とその裏面間で往復する弾性波の経路は、壁の場合には裏面

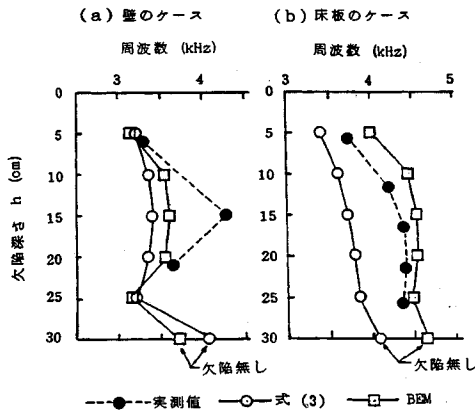


図-14 無筋コンクリートの壁および床板中に寸法  $D=20$  cm の欠陥が存在する場合の、欠陥深さ  $h$  の増加に伴う式 (3) および BEM による解析値と実験値比較

の変位拘束がないため、図-13 (a) (左側) に示す様に、欠陥部表面中央部付近の入力点 I から入射した弾性波が欠陥とコンクリート表面間の板状部分をまず揺動動かすが、その時の弾性波の一部が欠陥端部を迂回して壁の裏面に至り、裏面中央部の O 点の大きな変位の反動を受けて再び同じ経路で帰還するものとする。また床板については、入力点 I より入射した弾性波が、同様の経緯で欠陥端部を迂回した後、欠陥の裏側へ回り込むが、裏面の変位が拘束されているため欠陥端部の直下での反射エネルギーが大きくなり、その経路は図-13 (b) (左側) の様になると仮定する。この様に仮定すれば、その経路長  $L$  は欠陥寸法やその位置によって変化し、例えば、壁および床板における  $D=20$  cm の場合の、 $h$  の増加に対する経路長  $L$  の変化状況は図-13 (a), (b) (右側) の様になる。ただしこの仮定は、板状部分の厚さ  $h$  に対する欠陥寸法  $D$  の比が非常に小さく、板状部分のたわみ振動のみが卓越する場合は除くものとする。そこで、それらの経路で共振が起こるとすれば、弾性波動理論より  $F=V/nL$  (ただし、 $V$ : 波速、 $F$ : 共振周波数、 $n$ : 定数) となるはずである。弾性波が部材の表面と裏面間を一波長で往復する波によって共振を起こすとすれば、 $n=2$  であり、

$$F=V(2L) \dots \dots \dots (3)$$

となる。材料中を伝播する弾性波速度  $V$  は一定であるので、経路長  $L$  が欠陥寸法やその位置によって変化すれば、 $F$  は  $L$  に反比例的に変化することになる。そこで式 (3) を用いて板状欠陥を有する壁および床板について、欠陥深さの増加に対する共振周波数の変化状況を求め、境界要素法 (BEM) による 2 次元共振解析結果および実験値と比較検討してみた。この場合、コンクリート中を伝播する縦波速度を  $V_p$ 、せん断波速度を  $V_s$  とすれば、 $V_p$  と  $V_s$  の関係は

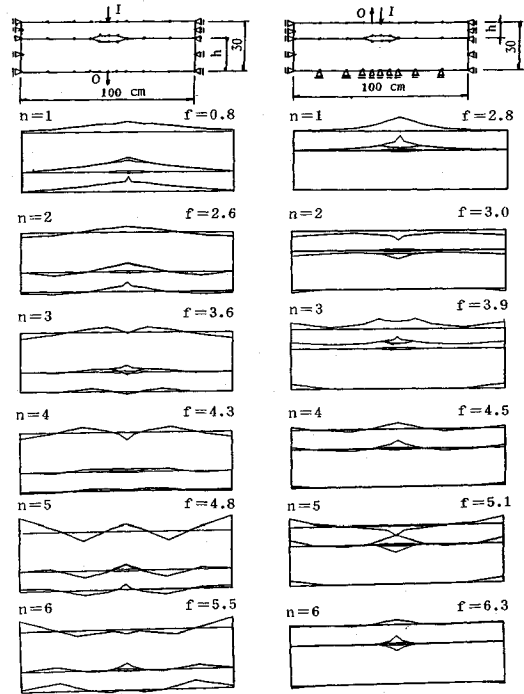


図-15 BEM 解析による壁および床板の共振モードの一例 (欠陥深さ  $h=10$  cm のケース)

$$V_s = V_p \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \dots \dots \dots (4)$$

となる。この式にコンクリートにおける代表的な縦波速度  $V_p=4000$  m/s とポアソン比  $\nu=0.2$  を用いれば、せん断波速度  $V_s$  は約 2450 m/s となる。図-14 (a), (b) は、無筋コンクリート部の壁および床板中に  $D=20$  cm で  $h=5\sim 25$  cm まで 5 cm 毎に変化する板状欠陥がある場合の、 $V_s$  および式 (3) より求められる共振周波数  $F_s$  と、BEM 解析におけるピーク周波数および実験値の関係を示している。壁の場合には、式 (3) の結果は  $h$  の増加に対してその変化量が BEM 解析結果より若干小さくなっているが、良く似た傾向を示していることが判る。この壁モデルでは、実験値が少ないため十分な検討が出来ないが、 $h=5$  cm と 20 cm 付近で BEM 解析や式 (3) の結果に近くなっている。そして、 $h=15$  cm 付近では実験値がかなり大きくなっていることが判る。また、式 (3) より BEM 解析値の方が若干大きくなっている。これは、式 (3) が一次元的な式であり、また BEM は 2 次元解析であるためではないかと考えられる。

床板のケースでは、式 (3) の結果と BEM 解析の結果は若干差があるが、その変化の傾向は良く似ており、また実験値は式 (3) と BEM 解析値との間にあることが判る。実験値は BEM 解析値にかなり近くなって



おり、またその変化状況も類似しているが、欠陥が浅い場合には、BEM解析によるピーク周波数の変化率が実験値に比べて若干小さくなっていることが判る。これは壁のケースと同様、BEM解析が2次元解析であるためではないかと考えられる。以上のことより、床板の場合には欠陥とコンクリート表面間の板状部分のたわみ共振の影響が強くなるのに対して、壁の場合には、部材の厚み共振の影響が大きくなるため、同様の欠陥を含む部材であっても、壁と床板では欠陥深さの増加に伴う応答スペクトル上のピーク出現状況に差異が生じるものと考えられる。

図-15は、壁(透過法、左側)および床板モデル(表面法、右側)における $D=20\text{ cm}$ で、 $h=10\text{ cm}$ の場合の、BEM解析における共振モードを示している。各モード共に、コンクリート表面と欠陥とで挟まれた板状部分の、たわみによる変位が卓越していることが判る。この解析では節点数が少ないため、コンクリート表面と欠陥とで挟まれた板状部分の2次、3次モードの有無や部材各部の詳細な変形状況が判り難いが、部材自身の変形モードには各種のものがあることが判る。なお、BEM解析では、欠陥部をモデル化する場合の部材長や節点数、支点拘束条件等の相違により、応答スペクトルやピーク周波数が若干変化するので、実験結果との厳密な整合性を得ることはできなかった。以上のことより、壁モデルの場合には、式(3)による評価でも欠陥深さが推定出来るのではないかと考えられる。もちろん、さらに詳細なBEM解析によれば、ここで実験を行った壁および床板での欠陥深さと卓越周波数との関係の解明がなされるものと考えられる。従って、実験的に得られた図-11の結果、あるいはそのBEM解析による欠陥深さと卓越周波数の関係を用いれば、欠陥の存在ばかりでなく、その深さまで評価する可能性が示されたと考えられる。

## 5. 結 論

以上、コンクリートの表面に平行で、かつ扁平な人工欠陥を用いての、応答スペクトルによる構造物中の欠陥の評価法に関する実験、並びにBEMおよび式(3)による解析結果を比較検討してきたが、これらの結果を要約すると次の様な結論が得られる。

(1) 本方法を用いて鉄筋および無筋コンクリートの区別無く、コンクリート構造物中の欠陥の存在を特定できる。

(2) 応答スペクトル中のピークSを用いて欠陥深さを評価する場合には、床板と壁では板部材の裏面の支持条件の相違により、欠陥深さの増加に伴うピーク周波数の変化状況が異なるので、これを区別して取り扱うべきである。また、壁の場合には、表面法より透過法の方が、より深い位置の欠陥まで評価が可能である。

(3) コンクリート表面に平行な内部欠陥を持つ壁や床板の低周波数領域における応答スペクトル上の主なピークには、コンクリート表面と欠陥との間の板状部分のたわみ共振と、コンクリート表面とその裏面間の厚み共振に基づくピークがある。これらは、欠陥の大きさや構造物の種類によって応答スペクトル上のピーク周波数に影響を及ぼすものと考えられる。

(4) レーダー法と本方法の比較では、両者にそれぞれ長短があるものの、無筋コンクリート部ではほぼ同等程度である。しかしながら、鉄筋コンクリート部では、レーダー法が本来鉄筋探査計であるため、鉄筋の干渉縞の影響により、鉄筋の下に有る欠陥が評価し難くなるのに対して、本方法では無筋コンクリート部、鉄筋コンクリート部の区別無く、ほとんど同程度に評価が可能である。

(5) 実験的に得られた欠陥深さと卓越周波数との関係を用いれば、欠陥の存在ばかりでなくその深さまで評価する可能性が示された。

## 参 考 文 献

- 1) コンクリート工学編集委員会：特集/コンクリートとひびわれ、コンクリート工学, Vol.20, No.11, 1982.11.
- 2) コンクリート工学編集委員会：特集\*コンクリートの非破壊検査、コンクリート工学, Vol.27, No.3, 1989.3.
- 3) 明石外世樹：コンクリートの非破壊試験(II)、材料, 第28巻, 第314号, pp.49~60, 1979.11.
- 4) Gericke, O.R. : Determination of the Geometry of Hidden Defects by Ultrasonic Pulse Analysis Testing, J. Acoust. Soc. Am., Vol.34, No.3, pp.364~368, 1963.3.
- 5) Sansalone, M. and Carino, N.J. : Detecting Honey-combing, the Depth of Surface-Opening Cracks, and UngROUTED Ducts, Concrete International, pp.38~46, 1988.4.
- 6) 尼崎省二：超音波スペクトル解析によるフレッシュコンクリートの締固め評価について、第44回セメント技術大会講演集, pp.368~373, 1990.
- 7) 山田和夫・小阪義夫：超音波スペクトロスコーピー法によるコンクリートの劣化度評価に関する研究、第44回セメント技術大会講演集, pp.352~357, 1990.
- 8) Kim, Y.H., Lee, S. and Kim, H.C. : Quantitative Vibration Mode Analysis of Mortar and Concrete Blocks Containing Flaws, NDT International, Vol.23, No.2, pp.67~74, 1990.4.
- 9) 坂田康徳・大津政康：弾性波フィルター特性によるコンクリートのひび割れ評価法に関する基礎研究、コンクリート工学, Vol.24, No.7, pp.135~145, 1986.7.
- 10) 坂田康徳・大津政康：超音波スペクトロスコーピーに基づくコンクリートのひびわれ深さ評価に関する基礎研究、土木学会論文集, 第414号/V-12, pp.69~78, 1990.2.
- 11) 坂田康徳・大津政康：超音波スペクトロスコーピーに基づくコンクリート構造物中の欠陥評価について、第12回コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.173~178, 1990.

- 
- 12) 小坪清真：土木振動学，森北出版，1977. 構造物の塩害劣化，コンクリート工学，Vol. 25，No. 11，  
13) 佐藤泰夫：弾性波動論，岩波書店，1978. 1987. 11.  
14) コンクリート工学編集委員会：特集＊アルカリ骨材反応， 16) 藤森総雄：やさしい超音波の応用，産報出版，1982. 1.  
コンクリート工学，Vol. 24，No. 11，1986. 11. (1991. 3. 4 受付)  
15) コンクリート工学編集委員会：特集＊鉄筋コンクリート
- 

## EVALUATION OF INTERNAL DEFECTS IN CONCRETE STRUCTURES BY ULTRASONIC SPECTROSCOPY

Yasunori SAKATA and Masayasu OHTSU

A non-destructive method based on the ultrasonic spectroscopy is studied for the evaluation of internal defects in concrete. A surface method, both a transmitter and a receiver are attached on the same surface, and a through-transmission method, a receiver is attached on the opposite side of a transmitter, are investigated. Spectral responses are measured by driving sinusoidal waves of sweep mode. Models of a reinforced concrete (RC) wall, a plain concrete slab and a RC slab with simulated defects are tested. Internal defects are buried in these models. In tests, ultrasonic spectral responses by the surface method and the through-transmission method are obtained and applied to the evaluation of defects. These results are compared with scanning results by a radar method and with analytical results by the Boundary Element Method (BEM) analysis. These experimental and analytical results show that the present method is available for evaluating depths and sizes of defects located in reinforced and plain concrete structures.

---