

## 論 文

## [1028] 超音波スペクトロスコピーに基づいたコンクリート構造物中の欠陥評価について

正会員 ○ 坂田康徳（九州東海大学工学部）

正会員 大津政康（熊本大学工学部）

## 1. はじめに

近年、構造物中に生じた各種欠陥に基づく構造物の耐久性の欠如が問題となっている。そこで、コンクリート構造物の安全性確保と有効利用の見地から、コンクリート中の各種欠陥を効果的に評価し得る方法の開発が急務となっている。コンクリート工学の分野では、従来より超音波法、レーダー法、X線法、放射線法等、種々の方法が検討されているが、汎用性の点で未だ多くの問題点を残しており、新たな開発の余地もまだ残されている。本研究は超音波スペクトロスコピーによるコンクリート構造物中の各種欠陥を評価する方法を検討したものである。本研究の一部は既に報告済みである<sup>1)</sup>が、ここでは、各種の人工欠陥を埋め込んだ壁および床板の構造物模型を用いて、特に約10 kHz以下の低周波数領域に着目した欠陥評価の可能性を検討すると共に、レーダー法との比較検討を行なったので報告する。

## 2. 実験および解析の概要

床板模型は文献1)で使用した長さ3m、厚さ30 cmの無筋コンクリートであり、その中に内部空隙やひび割れ、蜂の巣等を想定して、厚さ約5mmのスチロール樹脂板2枚で厚さ0.5 mmの鉄板を挟み込んだ寸法の異なる角型板状の欠陥および発泡スチロール製の球状欠陥を、深さや方向を変化させて埋め込んだ。コンクリート表面に平行な角型欠陥は、一辺 $a=5, 10, 20\text{cm}$ のものを深さを変えて、また方向の異なるものは、 $a=20\text{cm}$ のものを斜め45°と鉛直にして床板中央部に埋め込んだ。

壁模型は、無筋コンクリート部分と鉄筋コンクリート部分から成り、その中に人工欠陥として約20×20×2 cmの発泡スチロール製の板状内部欠陥と蜂の巣を埋め込むと共に表面ひび割れの欠陥部を設けた。板状欠陥は深さを変えて構造物表面に平行に埋め込んだ。蜂の巣は、予め最大寸法30mmの粗骨材とセメントペーストからなる30×40×10cmのポーラスコンクリート板を作り、その表面を硬練りモルタルで目漬した後、無筋および鉄筋コンクリートの各部の中央にそれぞれ埋め込んだ。表面ひび割れは、予め厚さ約0.5mm、長さ約40cmで深さ $d=15\text{ cm}$ と $25\text{ cm}$ が得られる様な鉄板を型枠の外側より無筋コンクリート部に挿入しておき、脱型後にこれを引き抜いて導入した。図-1は壁模型における欠陥配置状況を示している。

なお、床板および壁模型の各欠陥部は、試験後にドリルで穴開けした後、ファイバースコープでその深さを確認した。図-1お

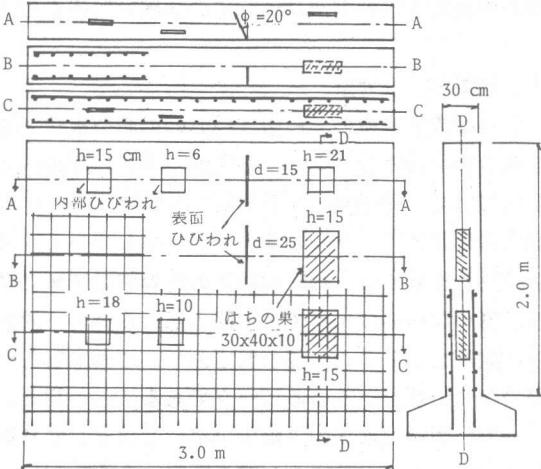


図-1 壁模型における欠陥配置状況

より図-6中の欠陥深さは確認後の四捨五入による欠陥中心までの距離を示している。構造物模型の作成には市販の生コンを使用し、その配合条件および特性値は粗骨材最大寸法20mm, スランプ18cm, 水セメント比53.4%, 呼び強度240kg/cm<sup>2</sup>である。

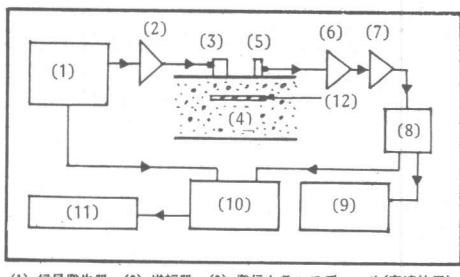
応答スペクトルの測定は、壁模型については発信および受信センサを同一面上に取り付けて行なう表面法と、相対する両面に取り付けて行なう透過法で測定し、床板模型については表面法で測定した。構造物模型の測定では、特に10kHz以下での低周波数領域の感度特性を良くするためにプリアンプおよびディスクリミネータを改良すると共に、発信センサとして音速法で用いる圧電素子トランスデューサを使用し、また受信センサとして圧電加速度計を使用した。応答スペクトル測定時の入力信号電圧は一定にし、発信および受信センサ配置間隔を5cmおよび10cm、測定周波数領域を0~10kHz間とした。発信および受信センサの取り付けでは、コンクリート表面をサンダーや紙ヤスリで平滑にした後、受信側を瞬間接着剤で固定し、発信側をグリスのみでコンクリート表面に押し付けて取り付けた。測定では受信センサを各3回ずつ付け直して測定した。図-2は本方法の計測システムを、また図-3は本計測システムにおける感度特性を示している。

レーダー法で使用した計測器は電磁波レーダー法による鉄筋探査計であり、床板、壁共に測定した。なお本方法の原理および計測法についての詳細は既報を参照されたい。

### 3. 結果および考察

図-4は床板模型の、一辺a=20cmの角型板状人工欠陥を深さh=7cmでコンクリート表面に平行に埋め込んだ位置において、発信および受信センサ間隔10cm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。欠陥から外れる部分では、約5kHz以下の低周波数領域でほとんど応答がないのに比べて、欠陥上部においては約3kHz付近に顕著なピークAが現われており、これは明らかに欠陥の存在に基づいているピークであることが判る。

一方、図-5は前述の欠陥中央部に受信センサを取り付け、発信センサと受信センサの距離Lを漸次離して行った場合の応答スペクトルの変化状況を示している。Lが



(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-2 計測システム

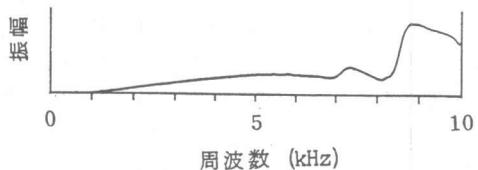


図-3 計測システムの感度特性

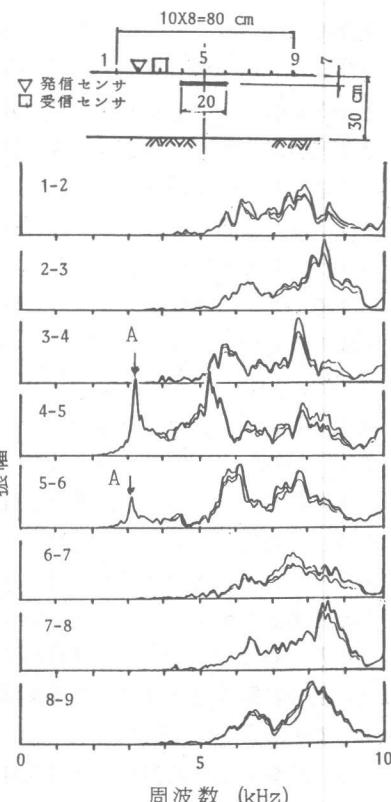


図-4 床板欠陥部における走査の一例

変化しても欠陥に基づくピーク周波数はほとんど変わらないが、 $L$ が小さい程ピーク振幅は大きく、逆に $L$ が大きくなるとピーク振幅が急激に小さくなることが判る。これは $L$ が小さい場合には入射波が欠陥表面で反射されるエネルギーが大きいためと考えられる。これより、発信および受信センサ間隔が小さい程欠陥を評価し易く、また欠陥寸法が大きく比較的浅い場合には、走査により欠陥寸法がほぼ推定出来ることが判る。

図-6は床板模型の欠陥部上で測定した応答スペクトルを示している。(1),(2),(3)は一辺 $a=20\text{cm}$ の板状欠陥をコンクリート面に平行に深さ $h=7, 16, 27\text{cm}$ に埋め込んだ場合である。(1),(2)では3 kHzと4kHz付近の低周波数領域に明瞭なピークが現われており、欠陥寸法が大きくて比較的浅い場合には欠陥の存在がはっきりと識別出来ることが判る。一方(3)では $h=27\text{cm}$ と深いため特徴有るピークが現れていないが、約3.5kHzに小さなピークがあり、また約5.7kHz付近に鈍いピークが現れている。(7),(8),(9)も同様に $a=10\text{cm}$ の板状欠陥をと $a=6, 16, 26\text{cm}$ に埋設した場合である。(3) 同様に約5.5~6.2 kHz付近に鈍いピークが有り、 $h$ が大きくなるに従って高周波数側へ移動していることが判る。特に(7)は浅いため応答振幅が大きくなっていると考えられる。(10),(11),(12)は $a=5\text{cm}$ で $h=6, 17, 27\text{cm}$ の場合であり、特に、(10)では約4kHz付近に小さいが、急激な断差を持つピークがある。故に寸法が小さくても欠陥が浅ければ、はつきり識別出来ることが判る。しかし他の深い欠陥は判然としない。(4-1),(4-2),(4-3)は $a=20\text{cm}$ の角形欠陥を斜め45°に埋め込んだ位置で、発信センサと受信センサを交互に入れ替えて測定した場合である。発信センサを欠陥傾斜面の上側配置にした場合(4-3)に比べて、下側配置にした

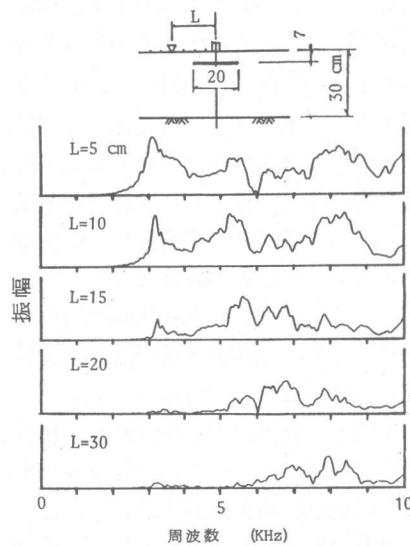


図-5 センサ間隔の変化に伴う応答スペクトルの変化状況

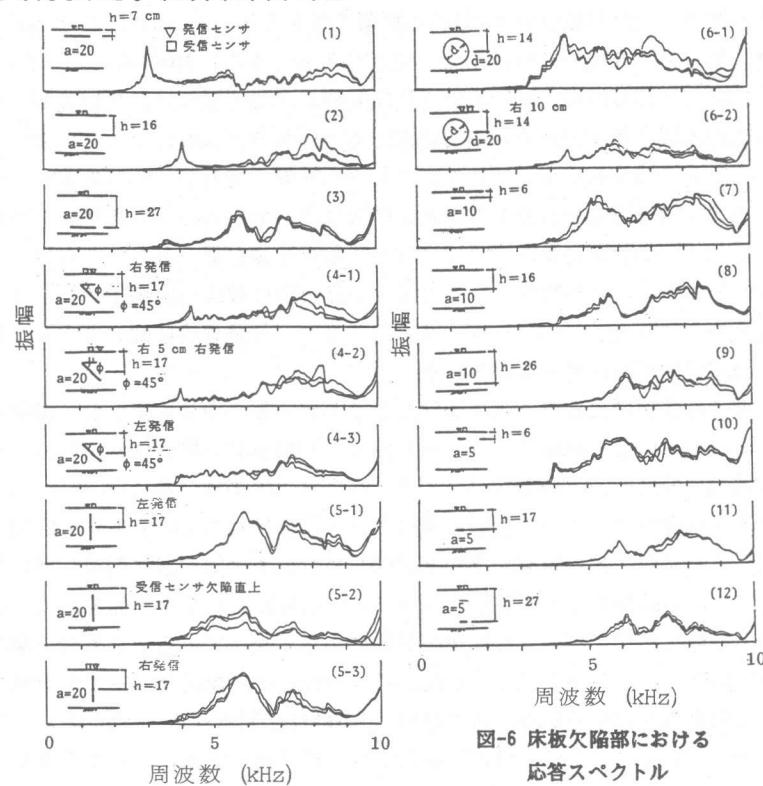


図-6 床板欠陥部における応答スペクトル

場合(4-1), (4-2) はピークが明瞭に現われ、そのピークは測定位置を少しずらせばピーク位置がずれてくることが判る。このピークの移動は欠陥の傾斜に従って深さが変化するためと考えられる。(6-1), (6-2) は直径 20cm の発泡スチロール製の球を、埋め込んだ位置における応答スペクトルを示している。この場合球の上面の深さは約 7cm と浅く、またその表面が湾曲しているため、その直上で測定した応答スペクトルのピークは大きいが、板状欠陥の場合に比べて不規則な応答が高周波数領域まで及んでいることが判る。

図-7 は床板内に配置された欠陥部を 3 列に区分してレーダー法で走査した場合の欠陥評価の結果を示している。

図中の矢印番号は図-6 中の番号に対応している。矢印(1), (2), (5), (6) は  $a=20\text{cm}$  で  $h=7\text{cm}$ ,  $16\text{cm}$  の水平板状欠陥、 $a=20\text{cm}$  の鉛直欠陥、発泡スチロール球の埋設位置における欠陥映像を示しており、いずれも明瞭であり、特に(1), (2), (6) は大きな欠陥の存在およびその深さを示している。また矢印(4) と(7) は  $a=20\text{cm}$  の斜め配置の板状欠陥と  $a=10\text{cm}$  で  $h=6\text{cm}$  の水平板状欠陥の映像であり、欠陥の存在をほぼ確認出来る程度である。さらに矢印(3) と(8) は  $a=20\text{cm}$  で  $h=27\text{cm}$  の水平板状欠陥と  $a=10\text{cm}$  で  $h=16\text{cm}$  の水平板状欠陥の埋設位置を示しているが、そこでは深さ 25~28cm 付近の縞模様に若干の乱れがある程度であり、判別が困難になっている。その他の欠陥部ではほとんど識別がつかなくなっている。これらの映像の現われなかった部分については、その後部分的にその付近を入念に走査してみたが結果は同じであった。その他に、矢印番号  $T$ ,  $T'$ ,  $T''$  と  $T_1$ ,  $T_{1}'$ ,  $T_{1}''$  の位置に予定されていない欠陥の映像が見られた。これは、後の調査で長くて連続したものであることが判り、コンクリート打設時に型枠を内側より突っ張っていた木材を埋め込んだためと判った。このレーダー法での走査で、欠陥埋設位置の若干のずれが判り、応答スペクトルの測定に反映させることが出来た。

図-8 は壁模型における各欠陥部および無欠陥部の中央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。無筋コンクリート部分で欠陥が無い場合(5) においては、約 5kHz 以下の低周波数領域にはほとんど応答が無いのに比べて、欠陥が浅い場合(2) には約 3 kHz 付近に非常に大きなピークが現われ、また中央部に埋設された場合(1) においても約 4.3kHz 付近に明瞭なピークが存在しているが、欠陥位置が深い場合(3) においては低周波数領域に顕著なピークは見られないことが判る。同様のことが鉄筋コンクリート部分においても言えるが、この場合には無筋コンクリート部分に比べてピーク振幅が相対的に小さく成っている。また蜂の巣部分においては、鉄筋および無筋コンクリート部分共に約 5~7 kHz 付近に不規則なピークが出現しており、無欠陥部に比べて異常性が認められる。また(10), (11) はひび割れ深さ  $d=25\text{cm}$  と  $15\text{cm}$  における応答スペクトルを示している。 $d=25\text{cm}$  のひび割れがコンクリート表面に対して垂直でないのは、コンクリート

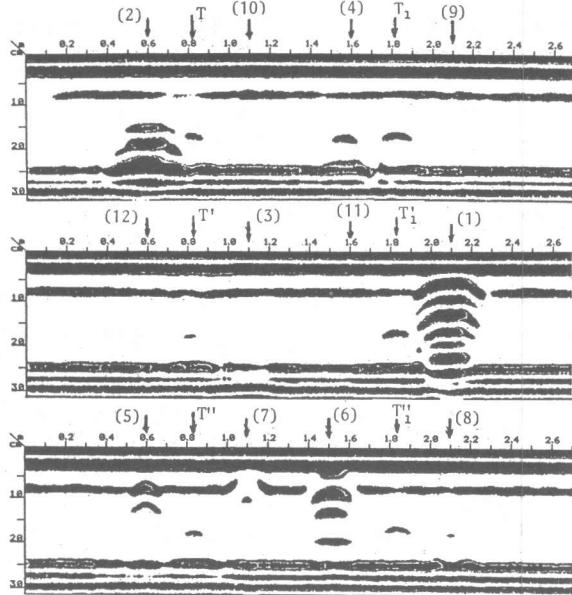


図-7 レーダー法による床板欠陥部の走査結果

打設時にゆがんだためである。(11)においてはピークが異常に細かく割れしており、また、(10)も振幅は若干小さいが同様にピークが割れていることが判る。故に発信センサと受信センサ間に表面下の打ち継ぎ目やひび割れがあるか否かの判別は容易であると考えられる。しかしながら、ひび割れ深さの評価に結びつく明瞭な識別方法は未だ明らかでない。

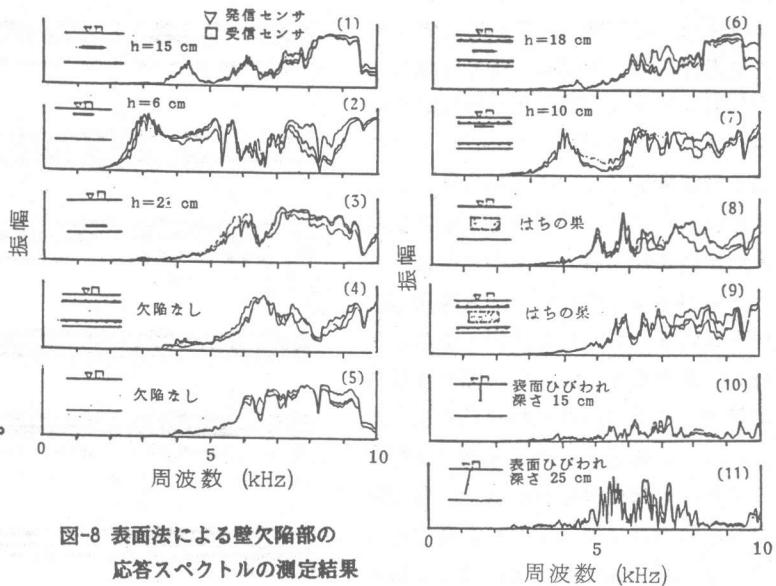


図-8 表面法による壁欠陥部の応答スペクトルの測定結果

図-9は壁模型の欠陥部を透過法で測定した場合の、各欠陥部および無欠陥部における応答スペクトルを示している。ここでは欠陥埋設位置が受信センサに近い場合を浅いケースとする。透過法の場合においても、表面法と同様にほぼ同じ周波数帯域に欠陥の影響と考えられる明瞭なピークが存在していることが判る。透過法では欠陥が深い場合(2)におけるピーク振幅がかなり小さくなっているが、これは、これらのピークが欠陥の裏側から回り込む弾性波によって、引き起される共振現象に基づいているので、その波動エネルギーが小さくなるためと考えられる。しかしながら透過法では、欠陥位置が深い場合(3)においても約3.6 kHz付近に明瞭なピークが存在している。これより、表面法では感知出来ない深い欠陥も透過法では識別可能となることも考えられ、相対的に透過法の方が評価能力が高いと考えられる。ところで、欠陥深さとピーク周波数の関係について、床板での結果も含めて考察すると、表面法のみの結果[図-6-(1)と(2)および図-8-(1)と(2)]では欠陥深さが大きくなるとピーク周波数は相対的に高周波数側へ移動する。しかしながら透過法における図-9-(3)の欠陥位置が深い場合におけるピーク周

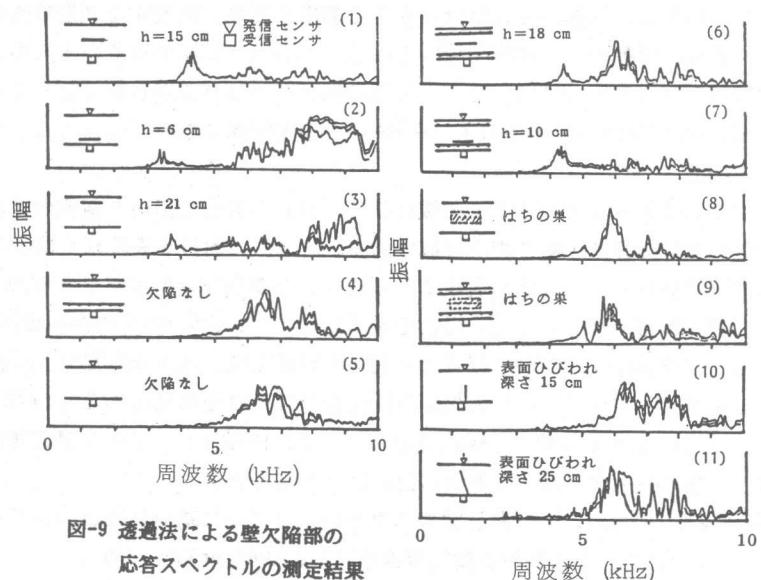


図-9 透過法による壁欠陥部の応答スペクトルの測定結果

波数は、浅い場合(2)と中程度の位置にある場合(1)の中間にきていることが判る。透過法では、欠陥部中央で発信および受信センサを入れ替えても得られる応答スペクトルは類似しており、ピークの生じる周波数はほとんど変わらない。これは応答スペクトルが発信センサと受信センサを結ぶ経路特有のものと考えられ、応答スペクトル上のピークが欠陥周辺の幾何形状に基づいているため、それらの部分の厚さや長さ、幅等の関係で部材寸法に見合って共振周波数が決まるためと考えられる。透過法では、欠陥寸法が同じで深さ $h$ が部材厚の $1/2$ 以下の場合は欠陥深さの増加に伴ってピーク周波数は小さくなるが、 $h$ が部材厚の $1/2$ を超えると、再び高周波数側へ移動することが考えられる。しかしながら、この考えが表面法にまで適用可能か否かについては判らない。

図-10はレーダー法で壁模型の上、中、下段の欠陥部を走査した結果を示している。図中の矢印番号は図-7の番号に対応している。(1),(2),(3)は無筋コンクリート部の板状欠陥の映像である。(2)は $h=6\text{ cm}$ の浅い場合であり、その大きさや深さが明瞭である。(1)は $h=15\text{ cm}$ の場合であり、欠陥の存在の影響が認められる程度であるが、(3)の $h=21\text{ cm}$ では欠陥が深いため、縞模様が若干乱れている程度であり、欠陥の存在を判別し難くなっている。(8)は無筋コンクリート部の蜂の巣欠陥部における映像である。ここでは異常性が見受けられ、欠陥の存在が認められる。しかしながら(11)と(10)の表面ひび割れの存在の影響は全く認められない。また鉄筋コンクリート部においては、鉄筋の存在ははっきり識別出来るが、隣接する鉄筋映像の相互干渉によってできる列島状の縞模様が、鉄筋間隔の差によって場所毎に異なっているため、鉄筋の内側に有る浅い欠陥部(7)( $h=10\text{ cm}$ )においても、欠陥の存在をかなり識別し難くなっている。特に(6)の中程度の深さ( $h=18\text{ cm}$ )の欠陥部および(9)の蜂の巣欠陥部においてはほとんど識別が困難である。

#### 4. 結論

以上のことまとめると次の様になる。(1) 本方法を用いて無筋および鉄筋コンクリート部材における欠陥評価がある程度可能である。本方法における表面法では、欠陥寸法が大きくて浅い程欠陥評価し易く、今回の実験より一辺 $20\text{ cm}$ で深さ $16\text{ cm}$ の水平な角形の人工欠陥の存在が表面法で明瞭に確認出来、また浅い場合でも深さ $6\text{ cm}$ で一辺 $5\text{ cm}$ のものが確認出来た。(2) 本方法では表面法より透過法の方が深い位置まで欠陥を評価出来、透過法の方がより優れていることが判った。(3) 本方法とレーダー法での欠陥評価比較ではそれぞれ長短あるものの、無筋コンクリート構造物の場合にはほぼ同等の評価結果となり、また鉄筋コンクリート構造物の場合には鉄筋の内側に有る欠陥はレーダー法では判別し難いことが判った。

参考文献 1)坂田,大津:超音波スペクトロスコピーに基づいたコンクリート床板の欠陥評価について,コンクリート工学年次論文報告集,10-2,1988,pp355~360

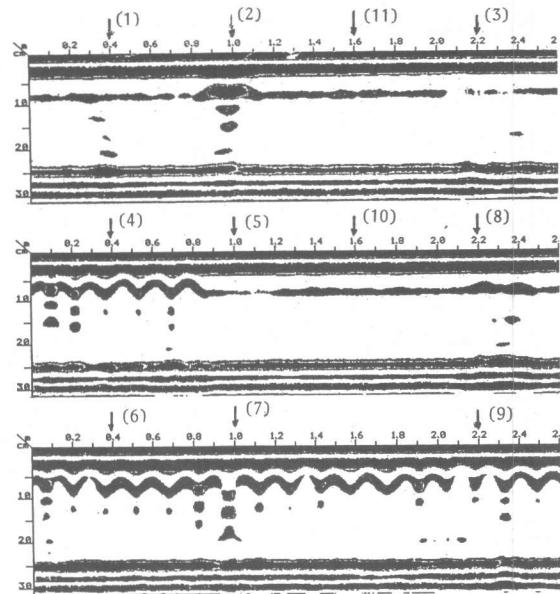


図-10 レーダー法による壁欠陥部の走査結果