

## [1063] 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内部欠陥評価について

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、

コンクリートの非破壊評価法として、従来より種々の方法が実施、検討されてきた。その中で、超音波を用いた方法としての音速法は個体中を伝わる超音波または弾性波の伝播速度に着目した方法であり、コンクリートの均一性や強度などの品質評価、あるいは、ひび割れや空隙などの評価に利用されている。このような時間領域における波動の分析とは別に、受信波をフーリエ変換して得られる周波数スペクトルを用いて欠陥評価を試みることが行なわれており、これは超音波スペクトロスコピーと称されている<sup>1)</sup>。

筆者等はA/E計測装置に発信部を付加した構造の計測システムを用いたコンクリートの非破壊評価法を提案している<sup>2)</sup>。本方法は発信器のスイープモードを利用した応答スペクトル（これまでではフィルター特性と呼んでいた）により、材料内部の諸状況（ひび割れ、空隙、劣化度など）を評価する方法で、スペクトロスコピーの一種と考えられる。

本報告はスチロール樹脂板による人工欠陥を埋め込んだ床板模型を用いて、その欠陥の位置や大きさ、方向などの評価を行なうための基礎的な実験、および、解析を行なつたものである。

### 2. 実験および解析の概要

図-1は本方法における計測システムを示している。本方法の原理および計測法についての詳細な説明は既報<sup>3)</sup>を参照されたい。実験に用いた人工欠陥を有する床板模型は幅2.0m、長さ3.0m、厚さ30cmの外形寸法を持ち、図-2に示すように、床板内部に寸法および方向の異なる欠陥を配置したものである。各欠陥は、その一辺が5, 10, 20 cmの正方形をした板状欠陥と直径φ = 20cmの発泡スチロールの球であり、型枠底板のペニアに直径約5 mmのボルトで所定深さに固定した後、コンクリートを打設した。板状欠陥は、埋め込み作業中における位置の確保を確実にするため、厚さ約0.5 mmの鉄板を上下より厚さ約5 mmのスチロール樹脂板で挟み込んだものである。表面に平行な角

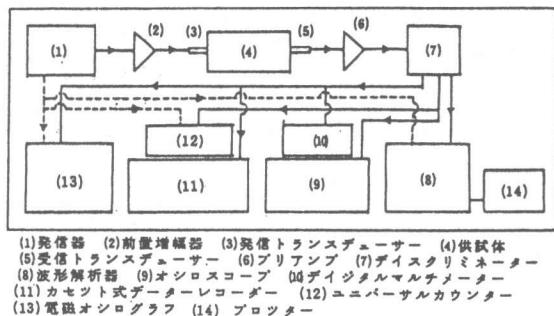


図-1 計測システム

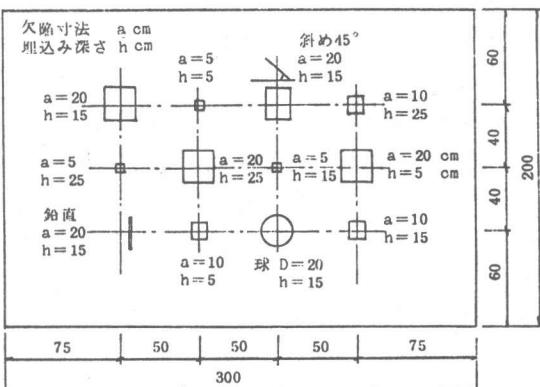


図-2 床板寸法および欠陥配置状況

形欠陥の埋め込み深さは5, 15および25 cmとした。また、方向の異なる欠陥としては、一辺20cmの板状欠陥を床板厚さの中央に表面に対して45° および垂直方向にも埋め込んだ。板状欠陥はコンクリート内部のひび割れや肌離れなどの層状欠陥を、また、球はジャンカなどの内部空隙を想定したものである。床板模型は市販の生コンクリートを用いて実験室に隣接する屋外に作られ、打設後約一年間自然養生した後測定に供された。表-1はこの床版模型の製作に使用したコンクリートの配合条件および特性値を示している。ただし、材料特性は材齢28日標準供試体のものである。

応答スペクトルの測定は、発信および受信両トランスデューサーを同一表面上に配置して測定する表面法で行なった。この時のトランスデューサー配置間隔は、欠陥の埋め込まれている部分の直上で約10cmとした。また、応答スペクトルは発信信号の電圧、受信信号の増幅利得、スイープ速度、測定周波数領域を一定にして測定した。測定は同一地点でトランスデューサーの付け替えを行なって3回ずつ測定した。この時、各測定時におけるトランスデューサー取り付け時の結合状態の相違に基づく応答スペクトルのバラツキを極力少なくするため、独自に試作した塩化ビニール製三脚アダプターを使用すると共に、トランスデューサーとコンクリート表面の間に、適当な軟らかさの結合材を挿入して測定した。結合材としては厚さ約2 mmのビニール板と厚さ約0.2mmのビニールテープを使用した。

なお、本計測においては、スイープモードによる応答スペクトルをカセット式データレコーダに記録すると共に、信号発生器よりパルス幅 $10\ \mu s$ の矩形波インパルスを $20\ ms$ 毎に送信し、その時間領域での受信波を波形解析機で収録し、フーリエ解析によりフーリエスペクトルを求めることが行なった。

### 3. 結果及び考察

#### 3.1 応答スペクトルとフーリエスペクトルの等価性

本方法では、発信器のスイープモードを利用して、一定振幅（電圧一定）で、時間と共に漸次周波数の増加するsine波形の信号を被検体中に送信し、被検体通過後にその信号が被検体の共振特性によって変化した後の受信波の各周波数に対する平均振幅を出力して、その応答スペクトルを得る。この過程は、パルス入力によって入射した信号の被検体通過後の受信波をフーリエ変換して得られるフーリエスペクトルに等価なものとなることが考えられる。波動理論的には、図-3に示されるように、理想的なパルス（デルタ信号）には全周波数帯域で一定な周波数成分が含まれている。この各周波数成分は、材料中を伝播する過程で、材料内部の物理的変化に基づく諸状況（ひび割れ、空隙、劣化度など）に応じて、通過し易い成分と通過し難い成分とでその振幅に変化をきたし、その結果、その受信波のフーリエスペクトルには材料内部の諸状況に応じた凹凸が生じてくる。同様のことは本方法でも言える。すなわち、振幅一定な周波数成分の信号を同時に送信するか個々に送信するかの違いであって、概念的に両者は等価である。図-4は床版模型上の代表的な点で、発信および受信

(表-1) コンクリートの配合条件および特性値

$\phi_{max}$ (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	W	$\sigma_{28}$	$E_0 \times 10^5$	$E_1 \times 10^5$	v
20	18	4.0	53.5	47	187	254	3.07	2.30	0.20

$\phi_{max}$  は粗骨材最大寸法  $E_0$  は初期弾性係数 ( $kg/cm^2$ )  
W は単位水量 ( $kg/m^3$ )  $E_1$  は割線弾性係数 ("")  
 $\sigma_{28}$  は圧縮強度 ( $kg/cm^2$ ) v はポアソン比

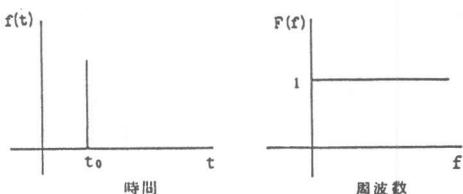


図-3 パルスの時間関数と周波数関数

トランスデューサーを固定したまま得られた周波数領域0~102.3kHz間の応答スペクトルとフーリエスペクトルを比較したものである。フーリエ変換ではウインドー操作を行なっていないため、かなり細かな変動が見られるが、そのエンベロープを考慮する時、その概形は応答スペクトルと全く一致しており、いわゆる、スペクトルの等価性が確認されたと言えよう。

### 3.2 結合材

本方法では、コンクリート表面へのトランスデューサー取り付け時における結合状態の微妙な相

違に基づくと考えられる応答スペクトルの振幅のバラツキが大きいことが供試体を用いた測定で判っている<sup>3)</sup>。構造物のような大きい躯体においては、躯体自信の剛度の増加に対して発信源の型（点発信源に近いこと）や信号の弱さなどによる影響もあって、受信波信号が非常に弱くなり、かなり高い増幅率（70~80dB）を必要とするようになる。それ故、振幅のバラツキも一層大きなものとなり、定量的評価を行なうことが非常に難しくなる。そこで、トランスデューサーとコンクリート表面間の結合状態を良くし、多少の凹凸が有っても両者の波動エネルギーの受け渡しをよりスムーズに行なえるように、適当な軟らかさの結合材を使用してみた。結合材を使用した場合の予備実験は、(1) グリースのみの場合、(2) コンクリート表面に厚さ約2mmのビニール版を瞬間接着剤で接着し、グリースを介した場合、(3) トランスデューサー先端表面に厚さ約0.2mmのビニールテープを接着し、グリースを介した場合の3通りで行なった。使用した供試体は普通コンクリート角柱供試体（10×7.5×40cm）で、供試体側面の同一面において両端部より約5cmの位置にそれぞれ発信および受信トランスデューサーを取り付けて行なった。図-5は周波数領域1~30kHz間の上記3方法における応答スペクトルを比較したものである。トランスデューサー取り付け直しによる3回の測定に対して、(2)、(3)の両方法とも振幅の整合性は非常に良く、有効であることが認められた。また、(2)の場合と(3)の場合における応答スペクトルを比較すると、ピーク周波数は変わらないが、その振幅が著しく違って現われてくるピークが有ること、(2)の場合よりも(3)の場合の方が(1)に近い応答を示していることが判る。これはトランスデューサー同志の感度特性が、結合材を入れることによって変化するためであり、また、ビニールテープの方がビニール板より厚さが薄く、(1)の場合に近いためと考えられる。

図-6は床板模型上の代表的な同一測定点において、上記(2)および(3)の方法を用いて、パルス

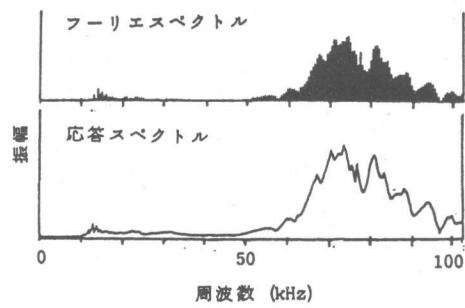


図-4 床板上の同一点でトランスデューサーを固定して得られたフーリエスペクトルと応答スペクトルの比較

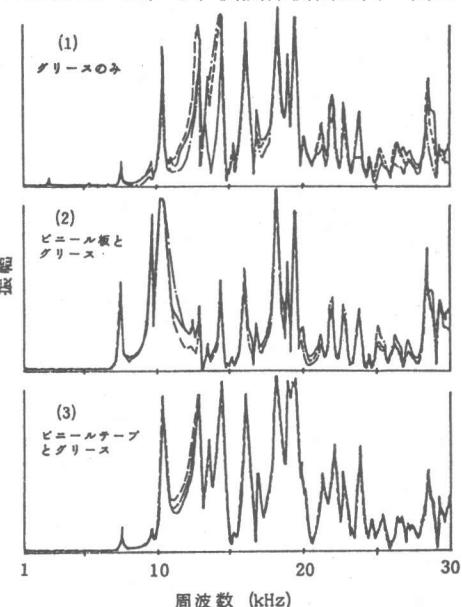


図-5 同一供試体における結合材の種類の違いに基づく応答スペクトルの変化と再現性

入力による受信波の時間一振幅曲線を波形解析機で収録し、フーリエ解析を行なった結果を示している。(2)の方法では比較的波長の長い波が明瞭に現われており、また、そのフーリエスペクトルにも低周波数の波の成分が大きなピークを形成しているのに比べて、(3)の方法では波長の短い振幅の大きな波が、波長の長いうねりに乗って現われ、そのフーリエスペクトルにも高周波数成分が大きなピークを形成していることが判る。これより、(2)の方法におけるビニール板は高周波数成分を吸収する能力を持ち、低周波数成分を明瞭にする働きをすることが判る。一方、(3)の方法では低周波数成分のピークは非常に小さく、不明確であるのに比べて、高周波数成分に大きなピークを形成していることが判る。これより、適当な軟らかさや厚みを持つ結合材を使用することにより、応答スペクトルのピーク振幅のバラツキを少なくし、希望する周波数帯域の波動観測をより効果的に行なうことができるものと考えられる。但し、結合材の材質は温度による軟らかさへの影響が極力少ないものが望ましく、ビニール樹脂はその点で必ずしも最良の材質とは言えない。

### 3.3 欠陥評価

図-7は結合材としてビニール板とビニールテープを使用した場合の、結合材を介してトランステューサー同志を接合した場合(I-1, II-1)と、大きさ一定( $a=20\text{cm}$ )で、深さの異なる欠陥の埋め込み位置上において測定した場合(I-2~4, II-2~4)の、入力インパルスに対する受信波の時間一振幅曲線の一例を示している。前者(I-1, II-1)においては結合材のいかんにかかわらず、かなり規則正しいスムーズな波が現われているのに比べて、前者(I-2~4, II-2~4)では、

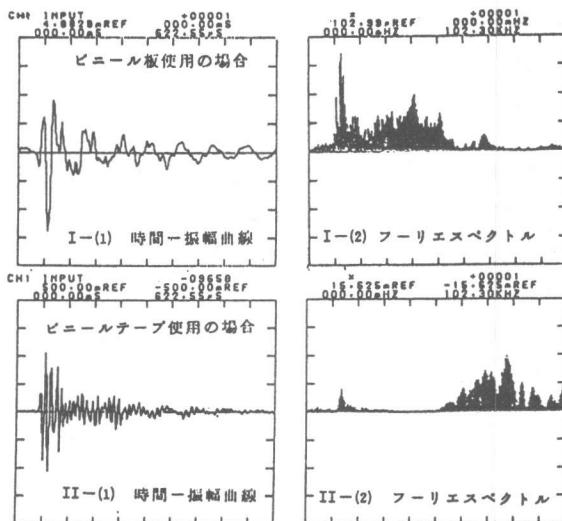


図-6 時間一振幅曲線とフーリエスペクトル

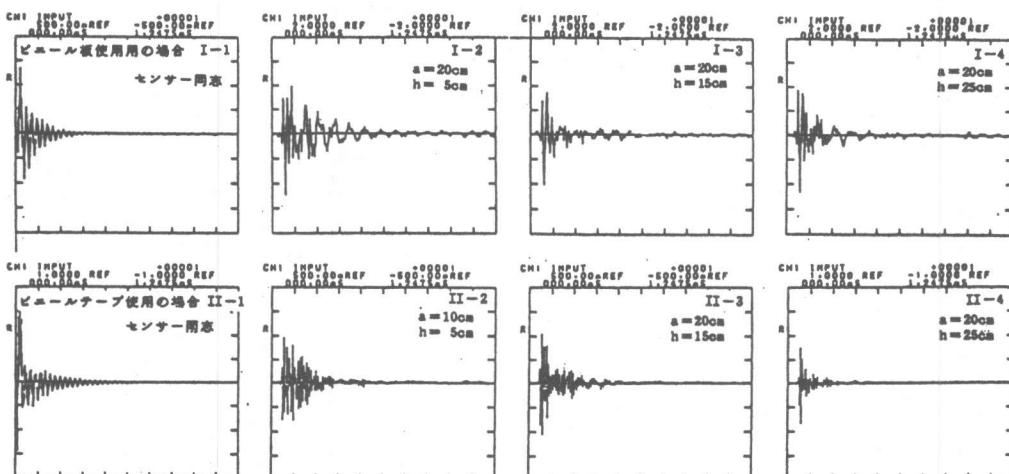


図-7 欠陥深さに応じた時間一振幅曲線とセンサー同志の場合の時間一振幅曲線

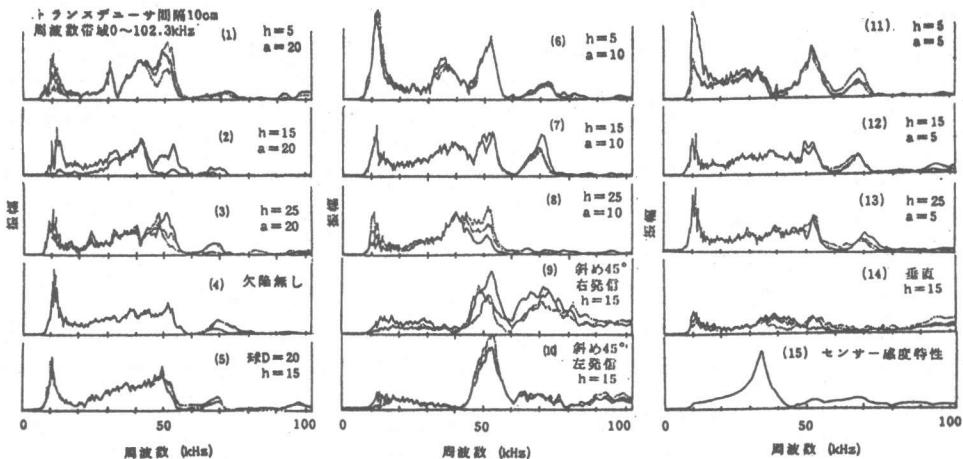


図-8 床板の各欠陥部における応答スペクトルとセンサー感度特性  
(ビニール板使用の場合)

欠陥の深さに応じて波形が不規則に変化する様子が判る。これは入力トランステューサーより入射した波が、コンクリート中を伝播する過程で遭遇する種々の物理的変化（部材表面や欠陥との境界面など）に応じて反射やモード変換、屈折、回折、分散、減衰などの現象を起こし生じる波が、お互いに複合を繰り返した結果と考えられる。これらの変化を時間領域で検討するのも有意義であるが<sup>4)</sup>、かなり煩雑であり、より簡便な方法が望まれている。

図-8は結合材としてビニール板を使用した場合の、床板模型における各欠陥部の応答スペクトルを周波数領域0~102.3 kHz間で示したものである。まず、トランステューサーの感度特性(15)では約9kHzで急激に段差を生じ、約33kHz付近でピークを生じているが、他は比較的滑らかな曲線となっている。欠陥の無い部分における応答特性(4)では約12kHz付近にピークを生じ、約60 kHzで谷を生じているが、他は比較的凹凸の小さいものとなっている。これに比べて欠陥埋め込み位置の浅い部分(1), (6), (11)では、欠陥寸法の大小にかかわらず、周波数変化に伴って、ピーク振幅の変化がかなり激しいものとなっている。そして、その変化は欠陥寸法が小さくなるに従って、また、欠陥深さが深くなるに従って次第に小さくなっている。無欠陥部の応答スペクトルに近づくことが判る。これらのスペクトルの内、(15)を除く全てにおいて、約12 kHz付近にピーク群が生じていることが判る。それ故、このピーク群は床板厚さに関するものと考えられる。また、欠陥が床板表面に対して斜め45°に配置されている場合には、発信および受信トランステューサーを入れ替えた時、高周波数領域における振幅の変化が大きいこと、床板表面に対して垂直に配置されている場合はピーク振幅が全体的に小さくなっていること、球の場合は比較的凹凸の少ないスペクトルとなっていることなどが判る。これらの応答スペクトルは欠陥の位置や方向、大きさなどに対して、それぞれ特徴的なものとなっている。

図-9は結合材としてビニールテープを使用した場合の一辺20cmの正方形の板状欠陥を、深さ5, 15および25cmと変化させて埋設した場合の応答スペクトルを示している。スペクトル振幅が低周波数領域では小さく、高周波数領域で大きくなっている。高周波数領域におけるスペクトル振幅の大きな部分が、欠陥深さが深くなるに従って低周波数側へ移動する傾向があることが判る。

図-10は、図-9中の高周波数領域における周波数成分の大きな部分の、矢印で示される最

初のピークの周波数  $f_p$  と欠陥深さ  $h$  の関係をプロットしたものである。欠陥深さの増加に従ってピーク周波数が漸次減少する様子が判る。

この表面法においては、欠陥からの反射波のエネルギーが小さいのに比べて、表面波の影響が大きくなることが考えられる。また、低周波数領域では欠陥寸法に比べてその波長が長くなるため通過して、部材厚の影響のみが強く現われてくることが考えられる。逆に、高周波数領域では波長が短くなるため反射する波が多くなり、小さな欠陥に対してもその影響が現われ易くなることが考えられる。

#### 4. 結論

以上の検討結果を要約すると以下のようになる。

- (1) 発信機のスイープモードを利用した本方法による応答スペクトルと、インパルスによる受信波のフーリエスペクトルは等価である。
- (2) A E トランスデューサーとコンクリート表面との間に、適当な軟らかさの波動エネルギーの伝達を助ける結合材を置くことによって、応答スペクトルの再現性を良くし、また、希望する周波数帯域の応答スペクトルを効果的に取り出すことができる。
- (3) 表面法を用いて、本方法による欠陥の位置や大きさ、方向などの評価が可能であると考えられる。この場合、約50kHz 付近より高い周波数領域において、欠陥深さに対する影響が比較的明瞭に現われてくる。

#### 参考文献

- 1) 明石、尾崎：超音波スペクトロスコピーによるコンクリートの品質評価、セメント・コンクリート、No.489, Nov. 1987, pp23~30
- 2) 坂田、大津：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に関する基礎研究、コンクリート工学、Vol.24, No.7 July 1986 pp135~145
- 3) 坂田、大津：超音波フィルター特性によるコンクリート部材の劣化度判定法に関する研究、熊本大学工学部研究報告、Vol. 33, No. 3, 1984, pp9~21
- 4) Carino N.J., M.Sansalone and N.N.Hsu: Flaw Detection in Concrete by Frequency Spectram Analysis of Impact-Echo Wavefomes, International Advances in Nondestructive Testing, 1986 1~2, pp.1~30

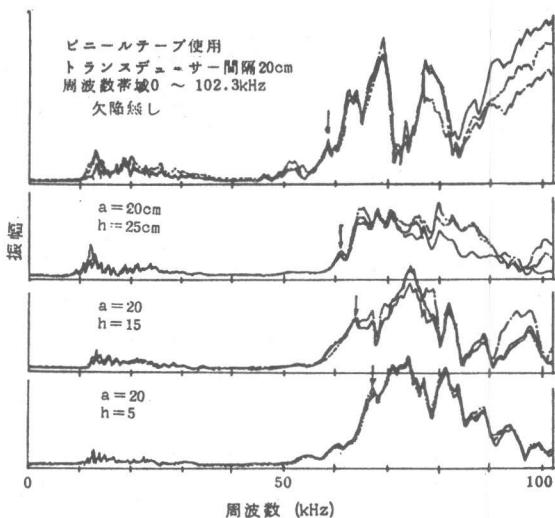


図-9 結合材としてビニールテープを使用した場合の欠陥深さの増加に伴う応答スペクトルの変化状況

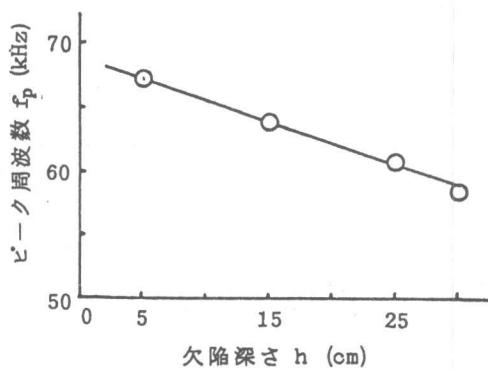


図-10 欠陥深さ  $h$  とピーク周波数  $f_p$  との関係