
弾性波レーダシステム(iTECS-3)

iTECS-3 の概要

iTECS-3(Integrity Test Equipment for Concrete Structures Type III)は、ITEC-2(東海大学と民間3社の共同研究による「構造物診断技術の開発」の成果を具体的な測定装置として実現化したもの)の後継機として開発したものです。装置の製作、システムの開発に当たっては、東海大学での共同研究の成果を反映するとともに、時間窓 MEM 解析法のように新しい解析技術を組み込んでいます。

iTECS-3 は、原則として現場で、場合によっては商用電源が供給されない現場でも稼働できるように乾電池(単3)で駆動できるように設計されています。ただし、コントローラとして使用しているサブノート PC(パソコン)は使用条件によって外部電池が必要な場合があります。

iTECS-3 に搭載した技術は、コンクリート板の厚さ測定、厚さの延長概念としての内部欠陥の位置測定を含め、これから更に発展する技術です。基本技術も今後の研究によって更に発展する余地があります。

測定原理

衝撃弾性波の入力

iTECS-3 は、構造物の表面に弾性波を発生させ、測定面に戻ってきた反射波を加速度計で測定し、この波形を解析して構造物の厚さ、構造物内部の境界(インピーダンス不連続境界)の位置を計測する装置です。弾性波は、鋼球で表面を打撃することによって発生させます。



図-1 基本的な測定方法

[弾性体内の波動]

弾性体の表面が打撃されると波動が発生します。打撃エネルギーの大半は、表面波(レリー波)となって弾性体の表面を伝搬します。また、縦弾性波(P波)および横弾性波(S波)として、弾性体の表面および内部に伝搬します。表面を伝搬する縦弾性波および横弾性波は、

振動が水平方向であるため、表面に鉛直方向の軸特性を持つ加速度計では捉えられないので、あまり考慮する必要はありません。これらの波は、伝搬速度は異なりますが、発生源が同じであるため周波数はほぼ同じです。弾性体の表面を伝搬する表面波は、振幅が大きく、弾性波よりも減衰が小さいという特徴があります。コンクリート版のように半無限の平面を持つ弾性体では、表面波は打撃点から同心円上に拡散し、測定点を1回のみ通過します。



図-2 2重鏡による像

弾性体の内部に伝搬した波動は、音響インピーダンス(質量と弾性波速度の積に等しい)が異なる境界で反射します。厚さ方向にのみ境界があるような弾性体では、弾性体内部に伝搬した波動は厚さ方向に多重反射し、やがて減衰します。つまり、理想的な条件で弾性体の板厚を測定するには、厚さ方向の多重反射の周期を求めれば良いことになります。多重反射によって、独自の周波数成分が卓越するエコー現象が発生します。一般に、鳴き竜(フラッターエコー)と呼ばれる現象です。この現象は、2枚の鏡を平行に置き、1枚の鏡の面に絵を描くと簡単に実現できます。つまり、図-2 のようになります。元々の絵は、いつまでも見えますが、それぞれの絵は等間隔に並んで見えます。(遠近法の関係で、遠くに行くに従って絵と絵の間隔は狭くなりますが・・・)

しかし、ここには大きな問題があります。打撃力は、打撃体の接触時間を半周期とする振動であり、測定点では大振幅の表面波として観測されます。多重反射する弾性波もこの基本周波数を含んでいます。図-2 の写像にもそれぞれ元の絵が写っています。つまり、打撃力の周波数成分(絵の成分)と多重反射の周波数成分(絵の間隔の成分)をどのようにして分離するかが、問題となります。図-3 に測定した波形の1例を示しますが、この波形から反射波の存在を先験的に推定することはできません。

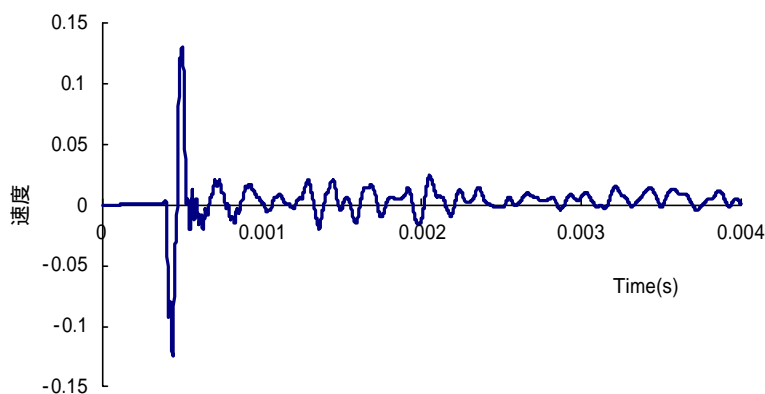


図-3 測定波形(速度)の例

この点、超音波は周波数の高い成分のみを持つ弾性波を使用しますので、周波数分析をするまでもなく反射波の周期から弾性体の厚さを測定することができます。弾性波の場合、

使用する周波数が低いため、反射波の周期を弁別することは非常に困難です。この弁別の方法として、色々な技術が使われています。iTECS-3 では、打撃力の波形をテンプレートとして自己相関関数を求め、これを周波数分析して多重反射の周波数を分析する方法、MEM(最大エントロピー法)および時間窓 MEM を用いています。多重反射の周波数が弁別できた場合、

$$D = \frac{V_p}{2f_0}$$

として、弾性体の厚さ D が得られます。ここで、 V_p, f_0 は、それぞれ縦弾性波の伝搬速度および厚さ方向の固有振動数です。

[解析方法]

測定では、図-1 に示すように鋼球、もしくは専用の打撃装置(インパクト)を用いて、コンクリート表面を打撃して、弾性波を発生させます。発生する弾性波の周波数は、使用する鋼球に質量とコンクリートの硬さに影響されます。

鋼球落下によって発生した波動は、表面を通過して加速度計に達する他、コンクリートの底面で反射して加速度計に到達します。この時、加速度計の測定軸がコンクリート表面に対して鉛直となっていますので、打撃点と加速度計の位置の中間付近で反射した波動に対して強い指向性を持つこととなります。測定した波形を $y(t)$ 、打撃力の波形を $x(t)$ とし、

表面波及び弾性波のインパルス応答関数を $h_s(t)$ 、 $h_r(t)$ とすると、次の式(1)が成立します。

$$y(t) = \int h_s(\mathbf{t})x(t-\mathbf{t})d\mathbf{t} + \int h_r(\mathbf{t})x(t-\mathbf{t})d\mathbf{t} \quad (1)$$

コンクリートが無敵大の平面であれば、表面波は1回だけ測定点を通過して後は戻って来ません。これに対し、底面で反射した弾性波は、再度表面で反射し、また底面で反射することを繰り返します。コンクリートの厚さの測定問題は、この弾性波のインパルス応答関数を求めることとに帰着します。

弾性波が多重反射すれば、このインパルス応答は、図-3 に示すようになり、周期性、すなわち、特定周波数成分を持ちます。この解析を行うには、式(1)を周波数変換し、

$$Y(\mathbf{w}) = H_s(\mathbf{w})X(\mathbf{w}) + H_r(\mathbf{w})X(\mathbf{w}) \quad (2)$$

から、

$$H_r(\mathbf{w}) = \frac{Y(\mathbf{w}) - H_s(\mathbf{w})X(\mathbf{w})}{X(\mathbf{w})} \quad (3)$$

とする方法があります。しかし、これでは表面波のインパルス応答関数が既知でないと弾性波のインパルス応答関数が得られません。

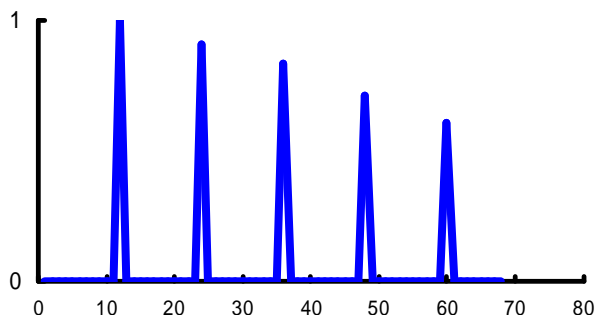


図-4 弾性波のインパルス応答関数

例えば、図-3 の測定波形のように最初から表面波と推定できる波形と反射波が分離できるような場合には、

$$H_r(\omega) = \frac{Y(\omega) - S(\omega)}{S(\omega)} \tag{4}$$

として簡便に求めることもできます。ここで、 $S(\omega)$ は、表面波の周波数スペクトルです。つまり、表面波の成分を測定波形から切り出してこの周波数変換を行い、これで、測定波形の残り部分の周波数変換を割れば良いことになります。

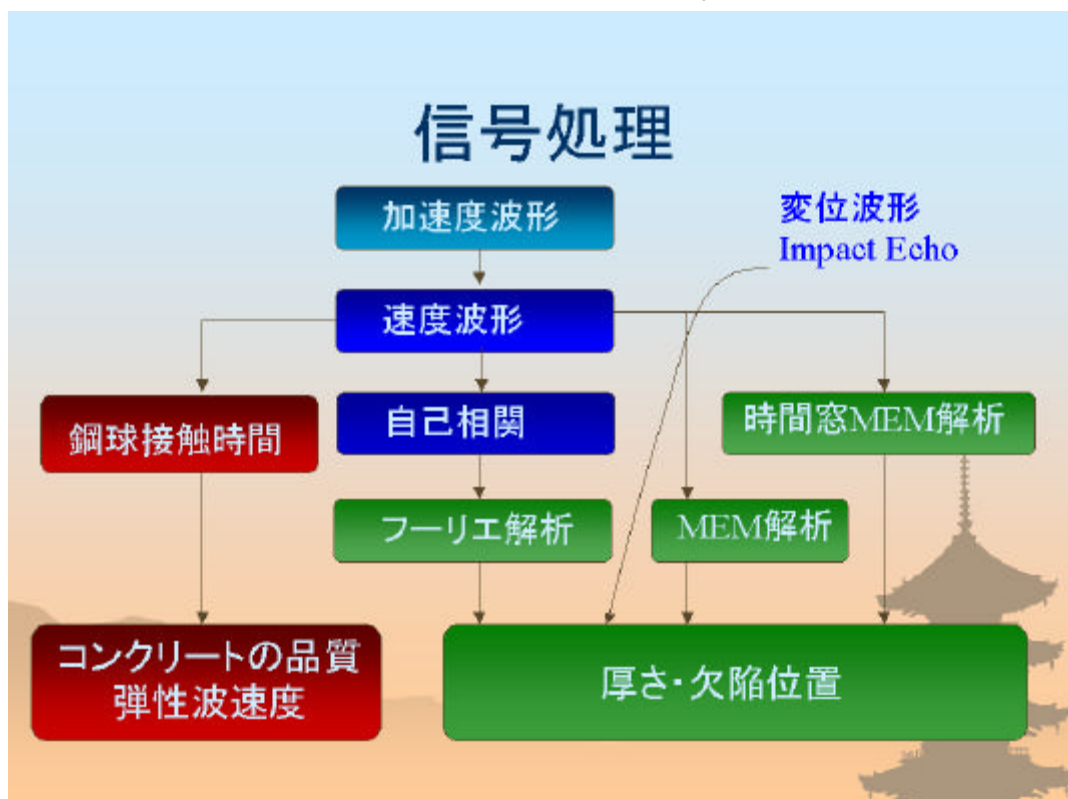


図-5 信号処理の流れ

インパクトエコー法 (IE 法) では、このようなことを考慮せずに、測定波形を直ちに DFFT (離散型高速フーリエ変換) を行って多重反射の周波数を求める方法を用いています。

iTECS-3では、上記の方法ではなく、直接MEM(最大エントロピー法)によって周波数スペクトルを求める方法を用いています。これは、多重反射によって特定の周波数が成立するシステムがあるとすれば、これをランダムノイズ(理想的には全周波数帯域で平等の強さを持つ信号：ホワイトノイズ)で駆動した時のスペクトルは、簡単にMEM法で求められるからです。つまり、打撃によるインパルスは、ホワイトノイズほどではありませんが、広帯域の周波数成分を持っており、実用的にはランダムノイズと考えても問題は小さいからです。信号処理の流れを図-5に示します。

[打撃装置]

鋼球

打撃は、原則として鋼球で行います。使用する鋼球は、ボールベアリング用のもので、非常に硬く、ほぼ真円です。打撃は、鋼球を手で持って軽く表面を打撃します。打撃の強さは、iTECS-3の波形表示画面にA/D変換の電圧比が100分率で表示されますので、これを見ながら調整することになります。A/D変換率が40%以上、80%以下位となるような強さで打撃します。100%を越えた場合には、打撃力がスケールオーバーしたことを注意するメッセージが表示されます。この場合、測定をやり直すのが最適の判断です。iTECS-3には、表-1に示す鋼球が準備されています。表中の適用板厚は、あくまでも目安です。コンクリートの硬さによって適用できる鋼球の質量は異なります。また、厚さのみを測定する場合には比較的重い鋼球、内部の欠陥を検査するような場合には軽い鋼球を使用するようにします。

表-1 iTECS-3の鋼球

鋼球の径	質量	適用板厚(コンクリート)
5mm	0.5g	15cm以下
10mm	4g	20cm以下
15mm	14g	15cmから70cm以下
30mm	110g	50cmから1.5m



図-6 iTECS-3 用のインパクト

[打撃の方法]

鋼球で打撃する場合には、鋼球の柄を手で持って弾性体の表面を軽く叩きます。打撃力が一定になるようにし、また打撃の強さは、測定波形に示される A/D の電圧率表示を見ながら調整してください。

(注意)

鋼球は、ピアノ線の柄に取り付けられていますが、打撃するとき、ピアノ線を撓ませて、バネとして使用するようなことはしないでください。インパクトエコー法では、鋼球に取り付けられているピアノ線をバネとして用い、その力を利用してコンクリート表面を強く弾くようになっているようですが、iTECS-3 では、軽い打撃で十分なため、ピアノ線をバネとして使うことはありません。

手動式、電動式(iTECS-3 ではオプションです)でカートリッジを使用する場合、打撃力は一定となるように設計されています。この打撃力で測定装置の A/D 電圧率が 100%を越えるような場合、もしくは電圧が低いような場合には iTECS-3 本体のゲインを調整することになります。

[iTECS-3 の測定項目]

iTECS-3 は、主として(1)コンクリート構造物の厚さ測定を対象としますが、(2)鋼球の接触時間によるコンクリート表面硬さの指標化、(3)鋼球接触時間によるコンクリートの弾性波速度の推定、を行います。また、厚さの測定時には、弾性体内部の欠陥(反射波を発生させる位置)の検出も行います。

[iTECS-3 の測定モード]

iTECS-3 には、ポイントモードとラインモードという 2 つの表示モードがあります。た

だし、測定時には、ポイントモードのみです。ポイントモードは、測定した点での(1)弾性体の厚さ、(2)表面波の伝搬速度、(3)打撃力の継続時間を測定します。

ラインモードでは、これらの測定結果を連続的なグラフとして表示します。この測定によって、測定対象の状況が空間的に把握され、欠陥の位置などを見つけやすくなります。

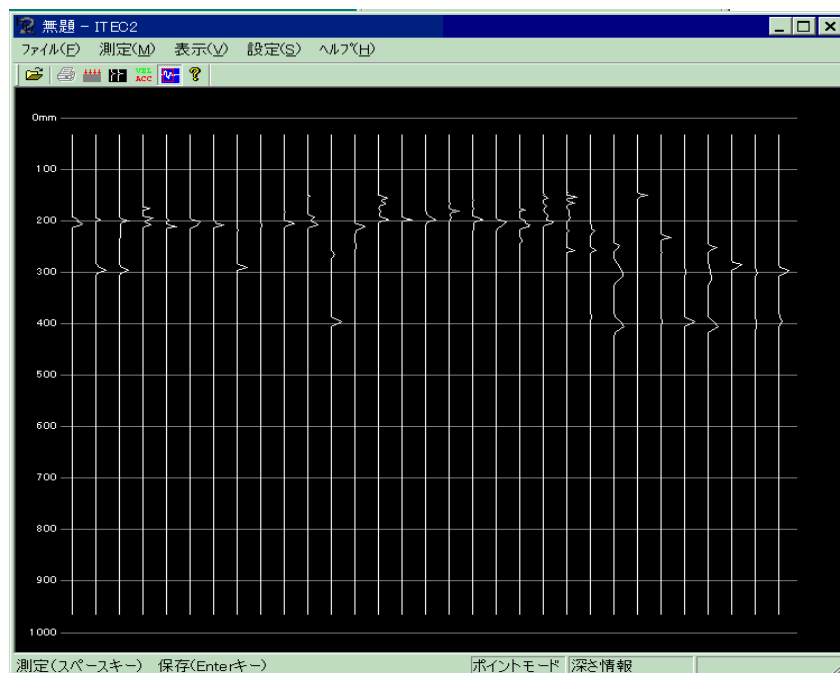


図-7 ラインモード時の表示

ラインモード時の表示波形の例を図-7に示します。図は、厚さ 30cm から 20cm、40cm(20cm 位置に空洞)そして 40cm と厚さが変化しているコンクリート構造物のモデルを測定したものです。縦軸は、測定表面からの距離、横軸は、測定したデータの数を等間隔に並べたものです。図から、構造物の断面形状がおおよそ判断できます。

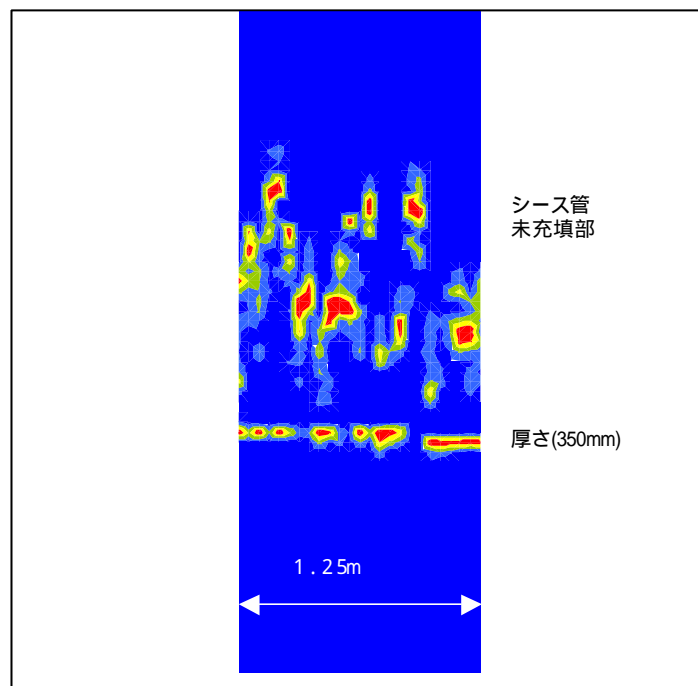


図-8 ラインモード表示データをコンター図としたもの(iTECS-3の基本仕様外)

図-8は、PC橋梁での測定結果をコンター表示したものです。地下レーダなどの表示画像と同じように加工したものです。iTECS-3では、直接このような処理は行いませんが、測定データを再度解析するような場合には、わかりやすい測定結果となるかもしれません。

測定方法の実際

鋼球質量の決定

不適切な質量の鋼球を選定した場合、測定結果は妥当性を欠く場合があります。したがって、測定に際して、どの質量の鋼球を選定するかは測定の成否を決定する要因となります。まず、測定波形のパワースペクトルに現れる周波数が、測定対象の厚さに相当する周波数と鋼球の接触時間に起因する周波数によって構成され、後者は、打撃する鋼球の質量を変化させるとそれに伴って変化するが、前者は測定されている限り一定であることを思い起こします。鋼球の質量が小さい場合には、発生する周波数が高く、したがって測定対象が薄い場合により適合します。質量が大きい場合にはその逆で厚い場合には適用できませんが、薄い時には測定できなくなります。

(1) 測定結果を解析してみる

コンクリートの厚さについて全く情報が得られない場合、まず適当な質量の鋼球で打撃してみます。その結果を時間窓MEM解析波形で見ます。

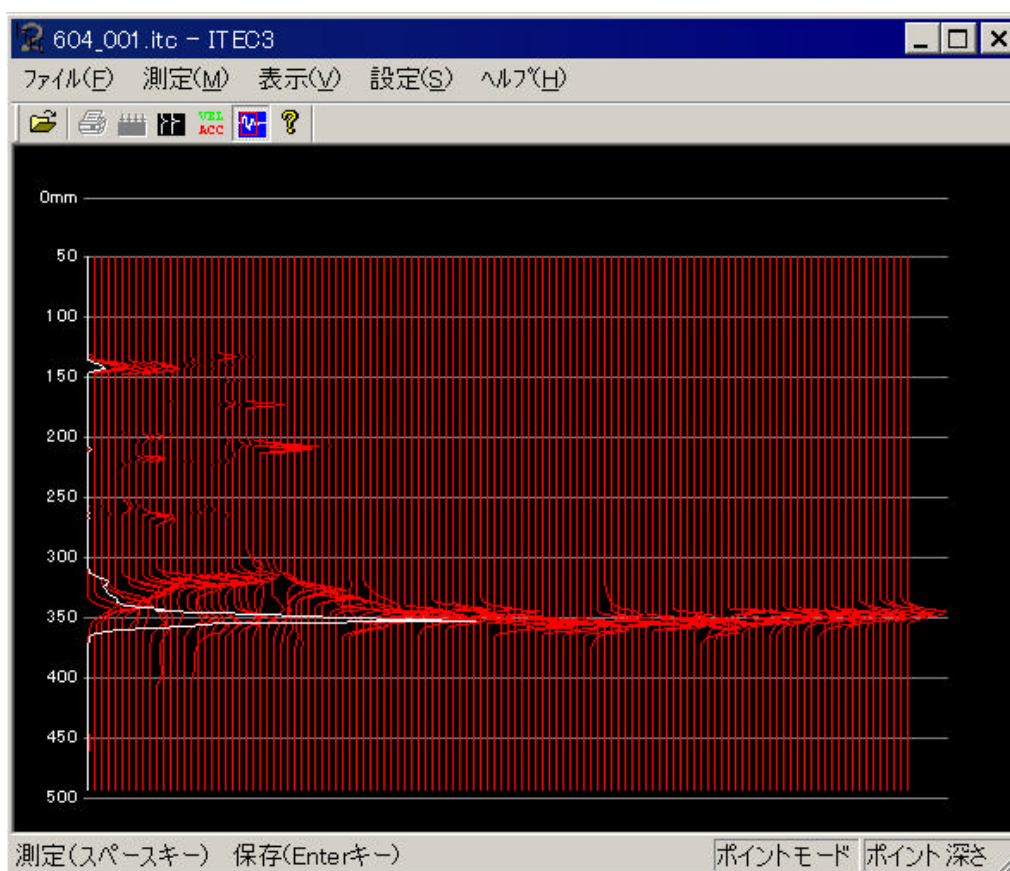


図-9 時間窓 MEM による波形解析

図-9のような画面が得られた場合には、まず(a)鋼球の選択が適切である、(b)測定したコンクリートは比較的広い面積を持つ、(c)15cm位のところに微小な反射面がある、と判断されます。鋼球サイズが大きいと、コンクリート版は、板振動を生じますので、時間とともにスペクトルの位置が変動します。鋼球が小さすぎた場合には、実際のコンクリートの厚さよりも浅い位置で多数の反射波が発生します。

(1) 設計寸法が分かっている場合

設計資料が保存されている多くの構造物の場合、測定対象の厚さはおおよそ把握されています。この場合には、その厚さに適合する前後の鋼球を用いて試験打撃し、安定して観測されるパワースペクトルの周波数(iTECS-3では、これを厚さで表示します)を探します。鋼球を変えても変化しない周波数(厚さ)が観測された場合には、表示厚さを、測定対象の厚さとみなし、その測定に使用した鋼球を使用鋼球の候補とします。

(a) 厚さ測定

測定が構造物の厚さのみの場合には、候補となった鋼球の内最も重いものを打撃用の鋼球として選定します。打撃カートリッジに適合する質量があった場合には、これを選択することができます。

(b) 内部欠陥の測定

内部の欠陥などを測定する場合には、候補となった鋼球の内、最も軽いものを選択します。これは、内部の欠陥があるとすれば、その位置は、構造物の厚さよりも測定面に近い深度にあり、発生する周波数が高くなるからです。

(2) 設計寸法が分かっていない場合

設計資料などが全くない場合や、構造物の設計について何も知らされていない場合には、手探りでおおよその厚さを測定する必要があります。この場合も同様に、鋼球の質量を変化させて、測定される周波数(厚さ)が一定となる場所を選定します。ただし、測定している位置に内部の欠陥があって、実際の構造物の厚さよりも薄く評価している場合もありますので、測定位置を前後に移動させ、安定した値として測定される厚さを求めます。鋼球の質量を段階的に大きくしていく方が測定上、分かり易いかもしれません。構造物の厚さが推定された場合の鋼球の選定方法は、方法は、(1)と同様です。

弾性波速度の決定

構造物の厚さを測定するためには、固有振動数のみではなく、弾性波速度を知る必要があります。弾性波速度としては、一般に、弾性体の表面を伝搬する弾性波(地震波で言うところのP波)を測定し、これを用いることが多いようです。多くの、超音波測定でこの方法が使用されています。また、弾性波を用いた技術では、IE法は同様に表面P波を測定し、その値を形状補正して使用するという方法を用いています。

しかし、表面弾性波の速度は、コンクリート構造物では、測定線の直下に鉄筋が存在した場合、その影響を受けることが判明しています。つまり、鉄筋の直上で表面弾性波の速度を測定すると、通常の鉄筋コンクリートの平均的な弾性波速度よりも速くなる傾向があります。

iTECS-3では、基準となる鋼球の接触時間を求めこれを基に、弾性波の伝搬速度を決定します。

測定時間長の決定

測定面が半無限の広がりを持つような場合には、それ程測定時間を気にする必要はありません。これは、厚さや測定点直下の欠陥以外からの反射波が混入する恐れが小さいからです。ところが、構造物の端部や比較的小面積の場合には、厚さ方向の反射波のみではなく、端部で反射した表面波や境界で反射した弾性波など、様々な反射波が存在しそれぞれに特異の固有振動数を持ちます。当然、構造物の厚さや欠陥に起因する周波数もこの中に含まれていますが、表面波の振幅と比較すると弾性波の振幅は小さく、種々の雑音の中に紛れてしまう可能性もあります。このため、測定時間の設定を行います。

iTECS-3は、サンプリング速度 $10\mu\text{s}$ 固定で、最大 10ms までの測定を行います。解析では、 8ms までの信号を使用します。 8ms という時間は、コンクリートの場合、弾性波が約 32m を進行する時間です。例えば、厚さ 1m のコンクリートの場合でも波動は、厚さ方向に16往復する時間となります。この測定時間の中に、種々の経路を辿った反射波が観測されることとなります。測定時間を短くすると、その分、経路の長い反射波影響を抑制することができます。鋼球の質量が適切に選択されている場合には、2往復くらいの反射波が測定されれば、厚さの算出を行うことができます。短すぎる測定時間は、逆に測定値を不安定にします。実際に測定時間長を決定する場合には、測定波形の一つを例にとり、分析時間を 8ms から順次短くし、それでも安定して分析できる測定時間長を選定します。ただし、 2ms よりも短い時間長を選択することはできません。

測定手順

表面処理

表面がなめらかな測定対象の場合には、表面処理の必要はありません。この意味で通常

のコンクリートであれば、そのままの表面状態で測定が可能です。しかし、風化が進行しているコンクリートや岩の場合には、センサーを接地できる程度に表面を平らに、かつフレッシュにする必要があります。指先でポロポロと剥離するような表面を完全弾性体とみなすことは危険です。また、表面に埃や煤などの汚れがある場合には、ある程度除去することをお勧めします。

オフィスビルの床では、プラスチックタイルやカーペット敷きの場合があります。表面が柔らかいもので覆われている場合には、弾性波の測定が著しく困難となりますので、厚さや健全性の測定をする時には、これらをはがす必要があります。しかし、非常に薄い壁紙などでは、そのまま測定することも可能でしょう。ただし、使用する鋼球の寸法を通常より小さくする必要があります。つまり、表面のクッション効果によって発生する周波数が低下することが考えられるからです。

注意事項

正しい波形の選定

コンクリートのように複合する材料からなる弾性体では、鋼球打撃する直前に大きい骨材がある場合や、逆に砂粒のような小さな突起があることも考えられます。センサーで測定された加速度あるいは速度波形は、まさに測定された真実ですが、しかし、**弾性波動理論の枠組み内の波形であるかどうかを保証するものではありません。**センサーの接地位置での接地共振の問題、打撃点に存在する局所的な条件による波形の変形など、色々な外乱要因が考えられます。波形を見ただけで、その波形が弾性理論の枠内のものであるかどうかを判別することはスキルの高い測定技術者にとっても非常に難しい仕事です。

iTECS-3 では、直前の測定波形を画面に残して、現在の測定波形を表示する機能があります。つまり、前後の測定波形を比較することによって、測定波形が雑音の影響によるものか、安定して得られる波形なのかを判別することができます。最初の波形は、正しく測定されているのかどうかさえ分かりませんが、2回目に測定した波形が1回目のものと同じであれば、再現性のある測定ができたことを示しており、測定データとして記録することにためらいは少なくなります。

ゲイン調整(GAIN)

アンプの増幅率は、iTECS-3 の背面操作パネルの GAIN で行います。打撃装置を使用する場合に、A/D 変換の電圧率が小さい場合、あるいは大きすぎる場合に使用します。コントロールは、1 回転するボリュームコントロールです。左回転で GAIN が小さくなり、右回転で GAIN が大きくなります。増幅率は、0.3 から 3 倍です。

スペクトルの判定

MEM スペクトルは、FFT と比較してスペクトルの分解能が高いという特徴があります。また、繰り返し回数が少ない場合でも自己相関関数の振幅が大きい周波数では鋭いスペクトルが成立します。

iTECS-3 では、MEM 解析法として時間窓 MEM 法と全時間帯での MEM スペクトル解析法の 2 種が用意されています。時間窓 MEM 法は解析に時間がかかりますが、反射波の発生原因を探するためには有効な解析方法です。大まかに、スペクトルを調べる場合、真の厚さを解析する場合には、全時間での MEM 解析法を用います。

コンクリートの厚さを測定する場合、できるだけ複雑なスペクトルが生じないようにします。この技法のひとつは、適用できる鋼球の範囲内でできるだけ大きい鋼球を使用することです。弾性波法で同時に判別できるのは、厚さとせいぜい 2 カ所位の内部欠陥です。したがって、ピークとなるスペクトルがこれ以上発生した場合には、測定波形に問題があることが考えられます。このような場合には、再度測定を行います。また、近接した深さ

に複雑なスペクトルが発生する場合があります。この時には、スペクトル分析の分解能を変えて、再度解析してみる必要があります。

iTECS-3 技術とインパクトエコー法の比較

	iTECS-3	インパクトエコー法
衝撃弾性波入力方法	鋼球打撃(軽打)	鋼球打撃(パネによる強打)
測定チャンネル	1ch	2ch(厚さ測定時は 1ch)
測定物理特性	加速度(速度)	変位
測定項目	厚さ、鋼球接触時間	P 波速度、厚さ
厚さ解析方法	MEM 解析(時間窓 MEM 解析)	DFFT 解析
厚さ計算精度	任意設定(コンピュータに依存)	周波数分解能依存
弾性波速度	鋼球接触時間からの推定	表面 P 波による測定
弾性波計算精度	任意設定(m/s 単位)	A/D 速度に依存
測定人員	1 人	2 人 1 組
測定基準	国内基準なし	ASTM C 1383- 98a

鉄筋コンクリートに関する種々の検査技術

	弾性波	超音波	電波レーダ	打音法	X 線	線
主たる用途	構造物の内部欠陥・厚さ	構造物の内部欠陥	鉄筋の位置	コンクリートの剥離、亀裂	鉄筋位置	構造物の密度
原理	弾性波動、振動応答	弾性波動	電磁波伝搬	振動応答	電磁波吸収	電磁波吸収
適用限界	厚さ 0.1m 以上 4m	深さ 0.2m	400Mz 2m 1GHz 0.3m	0.1m 以下	0.5m	
精度	5%	5%	鉄筋位置 3%	精度不明	1%	1%