



iTECS 法 規格

測定 : 01

多重反射による 1 次共振周波数の測定方法

SIA - M - 01

平成 25 年 7 月制定

一般社団法人 iTECS 技術協会

iTECS 技術協会 規格作成委員会構成表

氏 名	所 属
(委員長) 岩野 聡史	リック株式会社
(委員) 石垣 享一	オリジナル設計株式会社*
内田 美生	株式会社中研コンサルタント
岡崎早出智	株式会社プラグレス
久保 元樹	日東建設株式会社
斉藤 昌稔	株式会社建材サービスセンター
鈴木 拓也	株式会社コサカ技研
炭谷 浩一	株式会社大進コンサルタント
高橋 功	計測技研株式会社
那須 政人	株式会社大進コンサルタント
原 学	株式会社サンテクノス
山下 一樹	株式会社丸福久保田組
山下健太郎	株式会社東洋計測リサーチ
* 前任者 鈴木 克利	前オリジナル設計株式会社

この規格群は、一般社団法人 iTECS 技術協会 規格整備委員会の審議を経て、一般社団法人 iTECS 技術協会が制定した規格群であり、著作権法で保護対象となっている著作物である。

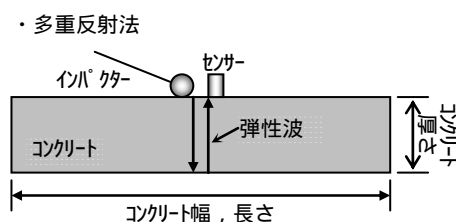
また、この規格群の一部が、特許権、出願交会後の特許出願、実用新案権または出願公開後の実用新案に抵触する可能性があることに注意を喚起する。一般社団法人 iTECS 技術協会は、このような特許権、出願公開後の特許出願、実用新案権または出願公開後の実用新案登録出願に関わる確認について責任は持たない。

1. 適用範囲

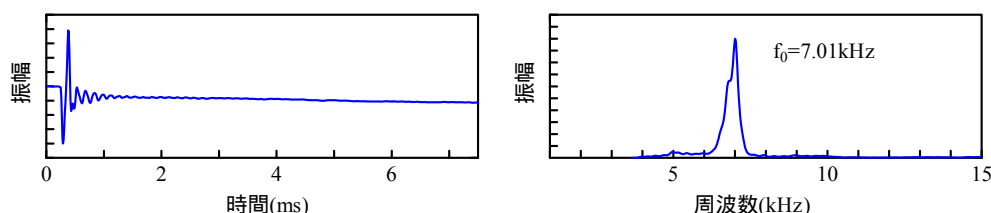
弾性波によるコンクリート版の厚さ方向の1次共振周波数の測定方法を規定する。コンクリート版を厚さ方向に伝搬する弾性波は、測定面および対向反射面の間で多重反射し、特定周波数を基本周波数とする定在波を生成する。本規格は、この定在波の基本周波数を測定する方法について規定する。

【解説】

a) 弾性波の多重反射について



解説図1 コンクリート内部で多重反射する弾性波の模式図



解説図2 測定波形（左図）と周波数解析結果（右図）の例

コンクリート内部で多重反射する弾性波の模式図を解説図1に示す。コンクリート表面をインパクトで打撃すると内部を球面状に伝搬する弾性波が発生する。この弾性波にはコンクリートと音響インピーダンス（材料中を伝搬する弾性波速度と媒体の密度との積）が異なる不連続面で反射する成分が存在する。この不連続面を対向反射面とする弾性波は、その後、インパクトの打撃により弾性波を入力した測定面とこの対向反射面で反射を繰り返す性質がある。

受信センサーの測定波形および周波数解析結果の例を解説図2に示す。表面に設置した受信センサーでは、弾性波が反射して表面に到達する度に振動が測定されることから、測定波形には弾性波の往復時間と一致する周期性が生じることとなる。これから、多重反射による1次共振周波数の測定では、測定波形に対して周波数解析を行ない、卓越した周波数の逆数から弾性波の往復時間などを測定する。

b) 弾性波の多重反射による1次共振周波数を用いた試験方法

コンクリート内部を多重反射する弾性波の往復時間は、往復距離や弾性波速度によって変化する。また、コンクリートの弾性波速度は弾性係数によって変化する性質がある。これに対して、コンクリート内部に欠陥が存在すれば、弾性波の伝搬距離や弾性波速度が変化する性質がある。また、コンクリートの弾性係数と圧縮強度には正の相関関係があると言われている。これらから、弾性波の多重反射による1次共振周波数の測定結果は、コンクリートの圧縮強度試験、部材厚さの試験、内部の欠陥探査に利用できる。

c)適用条件

以下 ~ の条件を全て満たすコンクリートに対して適用される。

厚さが 100mm 程度 ~ 2500mm 程度である。

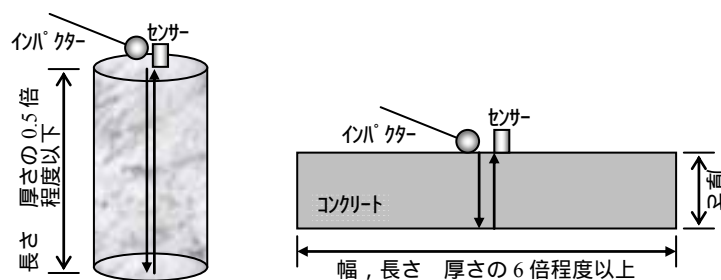
コンクリート部材が厚くなると、弾性波の減衰によって多重反射により生成される周波数を精度良く測定することが困難な場合がある。適用できる厚さの上限値は使用する測定装置の性能にも依存されるが、これまでの実績としては、厚さ 2500mm 程度まで適用可能であることが確認されている。一方、コンクリート部材が薄い場合では、多重反射により生成される周波数は高域となり、受信センサーの測定周波数範囲を超える可能性がある。また、弾性波の 1 往復する時間が短くなることから、多重反射により生成される周波数を精度良く測定するには、サンプリング間隔を短く設定する必要がある。例えば、サンプリング間隔を縦弾性波が厚さ方向の距離を 1 往復する時間の 1/5 倍以下に設定した場合（「2．測定装置」(3)参照），サンプリング間隔 $10\mu\text{s}$ では、1 往復する時間は $50\mu\text{s}$ 以上が必要となり、弾性波速度が 4000m/s の場合では、厚さ 100mm 以上が必要となる。

背面が地盤等と完全に密着していない状態である。

多重反射による 1 次共振周波数の測定では、コンクリート表面から入力した弾性波が、コンクリートと音響インピーダンスの異なる材質との境界面で反射する性質を利用するが、背面がある程度の音響インピーダンスを持つ地盤等の材料と完全に密着していると、多重反射による周波数が変化し、正確な周波数を測定することが困難となる。

ただし、背面と地盤等の材料との間にある程度の空隙が存在する場合や、防水シート等の音響インピーダンスが空隙に近い材料で遮断されている場合では、適用可能である。

測定面と対向反射面が平行とみなし得る形状であり、幅、長さが厚さの 0.5 倍程度以下、または、6 倍程度以上である。



解説図3 幅、長さが0.5倍程度以下の例（左図）と6倍程度以上の例（右図）

適用可能な形状の一例を解説図3に示す。弾性波は厚さ方向のみでなく、幅・長さ方向に対しても多重反射する。従って、幅・長さが厚さに対して十分でなければ、幅・長さ方向での多重反射による周波数が観測され、厚さ方向に多重反射する弾性波の周波数を正確に測定することが困難となる。また、測定面と対向反射面に大きな傾斜が生じていれば、厚さ方向に多重反射する弾性波の往復距離は不均一となり、周波数を正確に測定することが困難となる。

本法では、幅・長さが厚さの 6 倍程度以上である版形状のコンクリートを測定対象としている。

ただし、コンクリートの厚さに対して、幅、長さが 0.5 倍程度以下と短い場合には、厚さ方向に多重反射する周波数成分と幅・長さ方向での多重反射による周波数成分とが混在しないことから、適用可能となる。

2. 測定装置

(1)インパクト

弾性波を入力するためのインパクトは、コンクリート表面との接触面が鋼製のものとする。インパクトの質量は、測定対象のコンクリートの厚さに対応させて選定する。

(2)受信センサー

周波数 80Hz～25kHz を精度良く検知できるものとする。

(3)測定器

サンプリング間隔，計測時間長さ，測定チャンネル数を適切に設定できる装置とする。

【解説】

解説表1 多重反射による1次共振周波数の測定で使用が推奨されるインパクトの条件

測定対象 コンクリート の厚さ(mm)	弾性波速度 4000m/sでの 往復時間(μs)	使用が推奨されるインパクトの条件	
		質量 (g)	直径(mm) 鋼球の場合
100 ~ 150	50.0 ~ 75.0	4	10
150 ~ 250	75.0 ~ 125.0	14	15
250 ~ 350	125.0 ~ 175.0	33	20
350 ~ 450	175.0 ~ 225.0	110	30
450 ~ 600	225.0 ~ 300.0	261	40
600 ~ 1500	300.0 ~ 750.0	1022	63
1500 ~ 2500	750.0 ~ 1250.0	1795	76

(1)について

弾性波の多重反射による1次共振周波数の測定では、インパクトの接触時間によって弾性波の入力波長が変化し、周波数解析結果に影響を及ぼす場合がある。従って、測定対象コンクリートの厚さに対応させて、インパクトの接触時間を適切に設定する必要がある。インパクトの接触時間は弾性波が厚さ方向の距離を1往復する時間を考慮して設定する。また、境界面において多重反射を生じさせるための十分なエネルギーを励起できるよう鋼製のものとする。各測定対象コンクリートの厚さで使用が推奨されるインパクトの条件の一例を解説表1に示す。解説表1は過去の実績から示した一例であり、コンクリート表面の弾性率、弾性波速度によって変化することに留意する必要がある。測定対象コンクリートの厚さが分からない場合には、複数の質量のインパクトでの測定により周波数スペクトルを求め、複数のインパクトで共通して卓越した周波数が弾性波の多重反射による周波数であると判断して、この周波数が明瞭に測定できる質量のインパクトを用いることが望ましい。



解説図4 測定器の一例

解説表2 測定器の仕様の一例

入力	ICP入力2ch . 入力アンプのゲイン調整：×0.1，×1.0，×10 各ch独立 周波数範囲：80Hz～35kHz 35kHz Cut Off-18dB/Oct. S/N 65dB以上 A/D変換器：12Bit以上，5MHz 2ch同時測定，データ数1000以上
システム機能	A/D変換速度（サンプリング間隔）：10μs以上 計測データ数：1000個以上

(2)について

受信センサーは，インパクターにより入力された弾性波を受信するために十分な感度を有し，その振幅特性は，使用する周波数の範囲内で平坦なものが必要である。

の一例

(3)について

弾性波の往復中に5回以上のデータをサンプリングできるよう，サンプリング間隔は弾性波の厚さ方向への往復時間の1/5倍以下に設定することが推奨される。これは，弾性波の厚さ方向への往復時間を1周期とする振動の振幅最大値，振幅最小値，および変曲点（3点）を測定し，この振動を正弦波として測定することを想定したものである。計測時間長さは4回以上の弾性波の往復を計測できるよう，弾性波の厚さ方向への往復時間の4倍以上に設定することが推奨される。測定器および仕様の一例として，これまで使用されている装置の情報を**解説図4**，**解説表2**に示す。

3. 多重反射による1次共振周波数の測定方法

測定表面の処理

測定表面に凹凸がある場合は、ヤスリ・砥石等により測定表面が平滑になるように処理する。

測定点の設置，測定波形の取得

コンクリート表面に受信センサーを設置し，近傍（部材厚さの0.4倍以下）をインパクトで打撃する。

測定波形の記録

測定波形に再現性があることを確認し，受信センサーの測定波形を測定器に記録する。

周波数測定

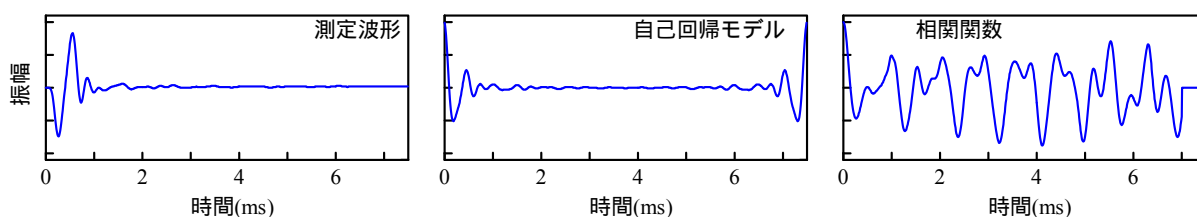
記録した測定波形に対して周波数スペクトルを求め，振幅値が卓越する周波数を有効数字3桁で測定する。

【解説】

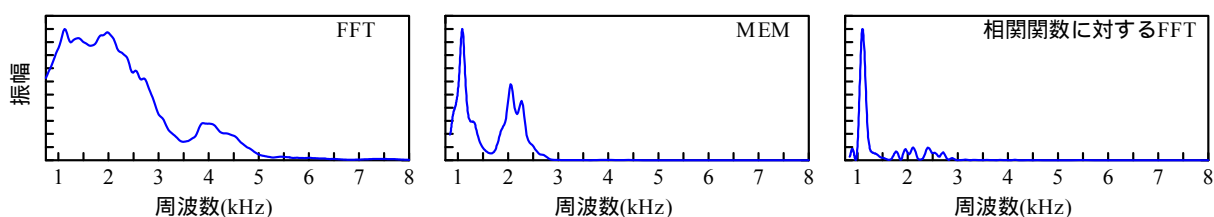
a) 周波数解析方法について

iTECS法では，最大エントロピー法（以下，MEMという）又は測定波形の相関関数を求め，相関関数に対してFFTを行う方法（以下，相互相関法という）を採用している。コンクリート表面をインパクトで打撃すると，コンクリート内部を多重反射する弾性波以外にレイリー波などの弾性波も発生する。多重反射による1次共振周波数の測定では，レイリー波などの弾性波の振動は測定対象外のノイズである。これから，コンクリート内部を多重反射する弾性波の周期性を強調させ，ノイズの影響を低減するために，MEMでは自己回帰モデル，相互相関法では相関関数を求めている。

特に測定対象部材が厚さ600mm程度以上の場合では，コンクリート内部を多重反射する弾性波が著しく減衰するため，周波数解析結果では，多重反射による周波数よりもレイリー波などの周波数が卓越し，測定対象である多重反射による周波数を正確に測定できない場合がある。この例として，多重反射による周波数が1.1kHzとなる厚さ1900mmのコンクリートでの測定波形および周波数解析結果



解説図5 測定波形（左図）とMEMによる自己回帰モデル（中図）と測定波形の相関関数（右図）



解説図6 周波数解析結果の比較：測定波形に対するFFT（左図）とMEM（中図）と相互相関法（右図）

を**解説図 5**，**解説図 6**に示す。測定波形に対する FFT では，周波数 1kHz ~ 2kHz の広帯域で振幅値が大きくなり，多重反射による周波数を判別することが困難である。これに対して，MEM，相互相関法では，厚さ 1900mm での多重反射による周波数 1.1kHz が明瞭に測定されていることがわかる。

ただし，部材厚さの厚いコンクリート（厚さ 1500mm 程度以上）では，MEM の自己回帰モデルでは，多重反射する弾性波の減衰の影響を除去できずに，ノイズの周波数が卓越する場合がある。**解説図 6**において MEM では 2kHz で卓越しているのが，これはノイズの周波数である。この場合には，相互相関法により解析をすることが推奨される。

b) 周波数分解能について

周波数分解能は，各試験方法で求められる精度から決定する。例えば，多重反射による 1 次共振周波数の測定により求めた周波数から弾性波速度を 1% の精度で測定する場合には，周波数分解能は測定される 1 次共振周波数の 0.5% 程度以下に設定する必要がある。

SIA-M-01

Standard of the iTECS Association

Measuring method for obtaining the resonant frequency
by the flutter echo

SIA - M - 01

Established 2013-7-30

Published by
iTECS association

1-6-6 Tokodai
Tsukuba-city Ibaraki 300-2635, Japan

Printed in Japan