

論文 多重反射の周波数特性を利用した測定でのフーリエ解析結果に影響を及ぼす測定条件の検証

岩野 聡史*1・内田 慎哉*2

要旨: 本研究では、衝撃弾性波法による多重反射法でのフーリエ解析について、測定条件による精度の変化について検証した。鋼球打撃により測定される振動の模擬波形を、測定条件を変化させて作成し、この模擬波形に対するフーリエ解析の結果を比較した。その結果、フーリエ解析の結果は試験対象となるコンクリートの性質以外にも、入力周波数、測定時間長、サンプリング時間間隔、これらの測定条件によっても変化することを確認した。さらに、コンクリートの性質を判断する試験において適切な精度を得るための、多重反射法での測定条件についても考察を加えた。

キーワード: コンクリート, 非破壊試験, 衝撃弾性波法, 多重反射法, フーリエ解析

1. はじめに

衝撃弾性波法による測定方法の一つに、コンクリート表面を鋼球等により打撃し、この打撃によりコンクリート内部に入力された縦波がコンクリート表面と対向面との間で多重反射する性質を利用する方法（以下、多重反射法という）がある¹⁾。多重反射法では、鋼球等による打撃点の近傍に振動センサを設置し、振動センサが測定した振動（以下、測定振動という）を解析して、多重反射する縦波の往復時間を測定する。縦波の往復時間は、コンクリートの部材厚さ、縦波の伝搬速度（以下、弾性波伝搬速度という）および弾性係数、コンクリート内部の空隙等の欠陥の有無、これら測定するコンクリートの性質によって変化する。この性質から、多重反射法による縦波の往復時間の測定結果は、コンクリートの性質を判断するための様々な試験に利用されている。

多重反射法での解析方法としては、フーリエ解析を利用するのが一般的であり、時間波形として得られる測定振動の周波数スペクトルを得て、縦波の往復時間を決定している。ただし、フーリエ解析の結果は、コンクリートの性質以外にも測定振動を得るための測定条件によっても変化する。このことから、コンクリートの性質を判断する試験のために多重反射法で測定するのであれば、試験において適切な精度が得られるように測定条件を設定することが必要になると考えられる。

これに対して、(一社)日本非破壊検査協会から制定されている規格である参考文献1（以下、NDIS2426-2という）では、測定振動を得るための測定条件については、入力する弾性波の周波数（以下、入力周波数）、測定時間長、サンプリング時間間隔、これらの項目についての望ましい条件が解説等に記載されている。ただし、明確に規定するまでには至っていない。また、この記載内容は経験則に基づいたものであり、その根拠についての検証

は行われていない。

そこで本研究では、NDIS2426-2に記載されている項目について、条件を変化させた模擬波形を作成してフーリエ解析を実行した。この結果から、精度を検証し、さらに、コンクリートの性質を判断するための試験において適切な精度を得るための測定条件について検討した。

2. 検証方法

2.1 多重反射法の測定原理

鋼球打撃により発生する弾性波の模式図を図-1に示す。縦波、横波、レイリー波等の弾性波が同時に発生する。縦波は打撃点から内部に伝搬し、底面等の対向面で反射する成分と表面を伝搬する成分が存在する。レイリー波はコンクリート表面を伝搬し、振幅が最も大きい弾性波である。打撃点の近傍の受信点に設置した振動セ

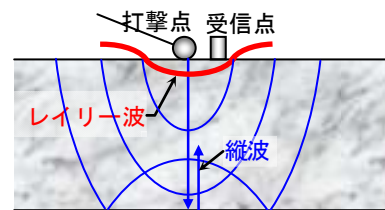


図-1 鋼球打撃による発生する弾性波の模式図

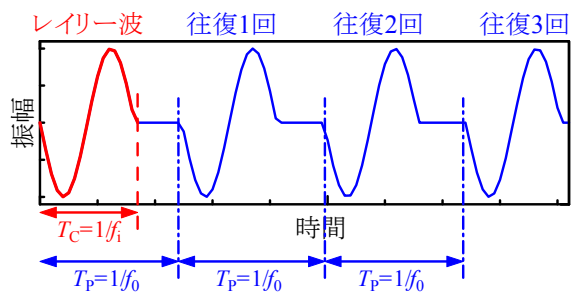


図-2 測定振動の模式図

*1 リック (株) 技術研究所課長 博士(工学) (正会員)

*2 富山県立大学 工学部環境・社会基盤工学科准教授 博士(工学) (正会員)

ンサでの測定振動の模式図を図-2 に示す²⁾。受信点に最初に到達する波動は表面を伝搬する縦波であるが、その振幅はレイリー波と比較すると著しく小さい。したがって、測定振動で最初に測定される振幅の大きい振動(第一波)はレイリー波の到達による振動となる。また、この第一波の周期は打撃した鋼球とコンクリート表面との接触時間 T_c となり³⁾、 T_c の逆数が入力周波数 f_i となる。次に測定振動で測定される振幅の大きい振動(第二波)は、対向面で反射した縦波が往復したことによる振動となる。つまり、コンクリート表面を鋼球で打撃してから第二波が測定されるまでの時間が縦波の往復時間 T_p となる。なお、この第二波の周期も T_c となる。その後、縦波はコンクリート表面と対向面との間で多重反射するが、縦波が2回、3回と往復して受信点に到達する度に、測定振動での第三波、第四波となる。

以上の性質から、縦波がコンクリート中を往復した回数は測定振動での振動の数から判断できる。なお、NDIS2426-2 では、縦波がコンクリート中を単位時間あたりに往復する回数、つまり、縦波の往復時間の逆数を基本周波数 f_0 と定義し、さらに、測定振動に対してフーリエ解析により周波数スペクトルを得て、周波数スペクトルで振幅が最大となった周波数(以下、卓越周波数という)からこの基本周波数を決定するよう規定している。

2.2 模擬波形の作成方法

本研究で作成した模擬波形は図-2 に示した測定振動

に基づき設定した。基本周波数は、弾性波伝搬速度を4050m/sと想定し、コンクリートの部材厚さを100, 150, 200, 300, 400, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 2500mmと想定し、11種類設定した。入力周波数、測定時間長、サンプリング時間間隔、これらの項目についての望ましい設定条件を検討するため、第3章から第5章に示すとおりに、これらの条件を変化させて模擬波形を作成した。なお、この目的から、測定振動の時間減衰が測定誤差の要因にならないよう、模擬波形は時間減衰が生じない条件に設定した。

2.3 フーリエ解析の方法

各測定条件で作成した模擬波形に対してフーリエ解析により卓越周波数を得た。この結果と模擬波形で設定した基本周波数とを比較して、基本周波数の測定精度、測定誤差を検証した。フーリエ解析は、周波数0.10kHzから0.10kHz間隔で25.00kHzまでの任意の周波数の振幅値を、式(1)および式(2)により算出する方法⁴⁾を用いた。

$$\left. \begin{aligned} a_f &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(2\pi f t) dt \\ b_f &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(2\pi f t) dt \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$P_f = \sqrt{a_f^2 + b_f^2} \quad (2)$$

ここで、 f : 周波数、 P_f : 周波数 f の振幅値、 $x(t)$: 時刻 t での模擬波形の振幅値、 T : 測定時間長である。

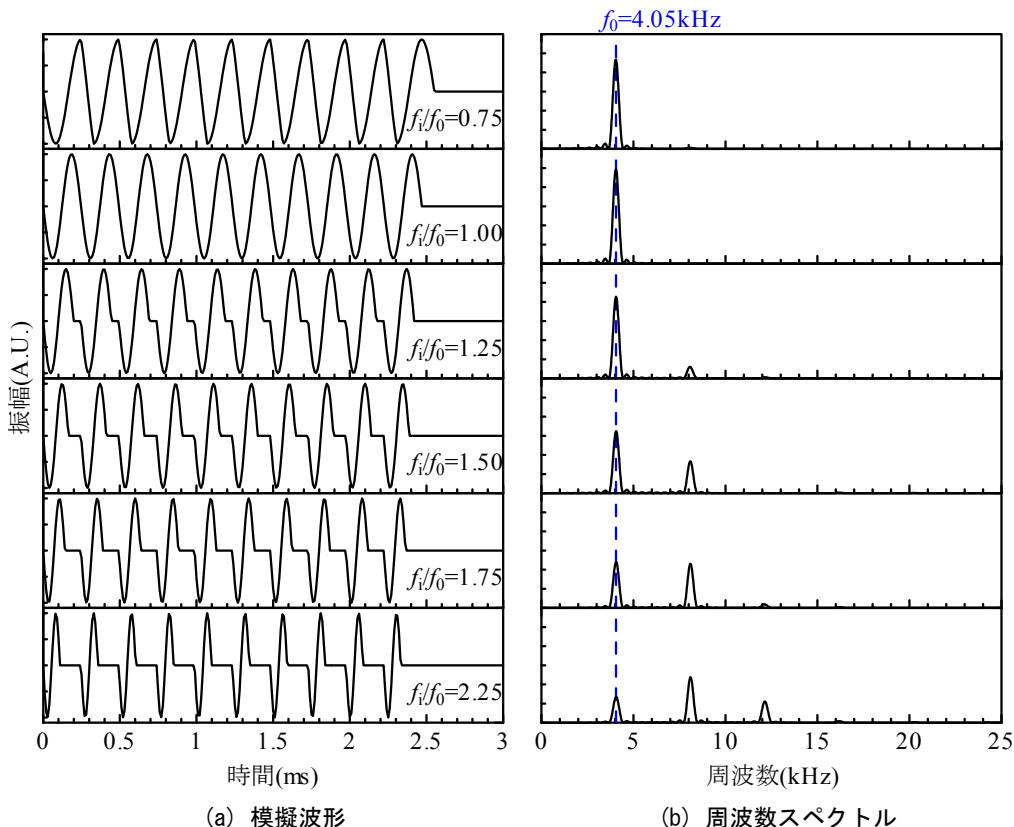


図-3 入力周波数の検討における模擬波形とフーリエ解析結果の一例(部材厚さ500mm)

3. 入力周波数についての検証

3.1 検証方法

多重反射法による測定では、入力周波数が基本周波数から大きく乖離していると、測定される卓越周波数は基本周波数とは大きく異なる性質がある。入力周波数は打撃する鋼球の質量（直径）によって変化することから、測定するコンクリートの基本周波数に対応して、打撃する鋼球の直径を適切に選定する必要があることが指摘されている。NDIS2426-2では、測定対象のコンクリートの部材厚さによって打撃に使用する鋼球の直径が例示されている。また、筆者らの既往の研究では、測定に適切な入力周波数を、SansaloneらがHerzの接触理論に基づき定義した上限周波数から検討し⁵⁾、さらに、NDIS2426-2で例示される鋼球よりも直径の小さい鋼球での測定が適切であることを示している⁶⁾。これらに対して本章では、測定に適切な入力周波数を基本周波数との比（（入力周波数）/（基本周波数））から検討した。設定した入力周波数は基本周波数との比が0.50, 0.75, 0.90, 1.00, 1.10, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00, 2.25となる10種類である。各入力周波数の模擬波形に対して周波数スペクトルを求め、基本周波数と比較した。また、第4章、第5章での検証対象となる測定時間長、サンプリング時間間隔については、ここでは測定誤差の要因にならないよう、測定時間長は縦波が9回往復した時間、サンプリング時間間隔は1 μ sと理想的な条件に設定した。

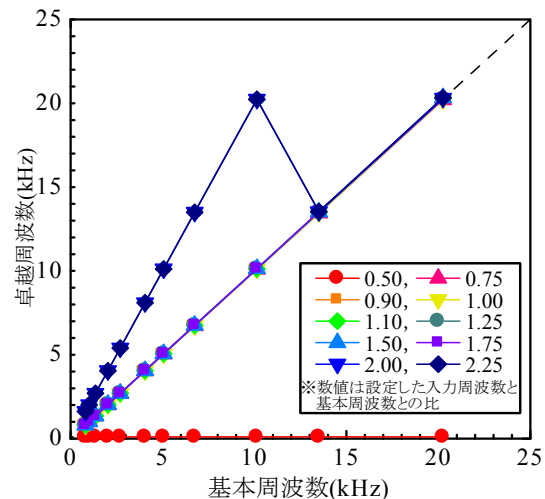
3.2 検証結果

模擬波形および周波数スペクトルの一例として、部材厚さ500mmの一部の結果を図-3に示す。なお、この部材厚さでの基本周波数は、式(3)により4.05kHzとなる。

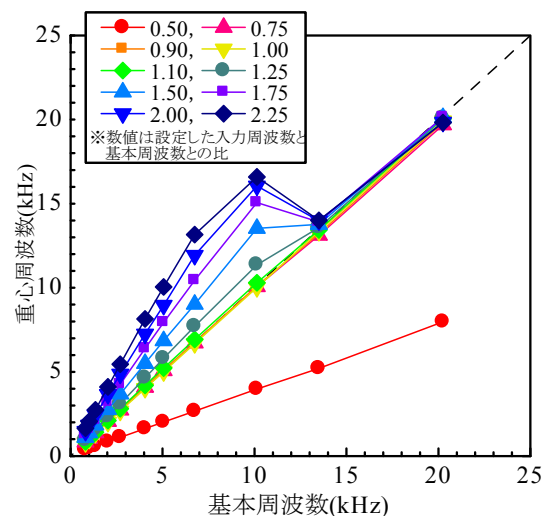
$$f_0 = V_p / (2 \cdot D) \quad (3)$$

ここで、 f_0 : 基本周波数(Hz), V_p : 弾性波伝搬速度(m/s), D : 部材厚さ(mm)である。

図-3の周波数スペクトルと基本周波数4.05kHzとを比較すると、入力周波数が基本周波数の1.75倍までであれば、卓越周波数は基本周波数とほぼ一致していることが確認される。一方、入力周波数が基本周波数の2倍以上になると、基本周波数の整数倍の周波数の振動（高調波）による周波数が卓越周波数となり、正確に基本周波数を測定できないことが分かる。図-4(a)に全部材厚さでの基本周波数と測定した卓越周波数とを比較した結果を示す。部材厚さ500mmでの結果と同様に、入力周波数が基本周波数の0.75倍~1.75倍の範囲であれば、卓越周波数から基本周波数を正確に測定できることが確認される。ただし、図-3(b)より、入力周波数が高くなると高調波による周波数の振幅が大きくなることを確認される。この現象を客観的に判断するため、式(4)により周波



(a) 設定した基本周波数と卓越周波数との比較



(b) 設定した基本周波数と重心周波数との比較

図-4 入力周波数による誤差の検証結果

数スペクトルの重心周波数を求め、基本周波数と比較した。その結果を図-4(b)に示す。

$$f_B = \frac{\sum_{f=0.10}^{25} (P(f) \cdot f)}{\sum_{f=0.10}^{25} P(f)} \quad (4)$$

ここで、 f_B : 重心周波数, f : 周波数, P_f : 周波数 f の振幅値である。

図-4(b)より、入力周波数が基本周波数の1.25倍以上になると重心周波数は基本周波数よりも高くなり、高調波による周波数の振幅が大きくなることを確認される。多重反射法を利用した試験の一つに、コンクリート内部の空隙等の有無を判断する試験があるが、この試験では基本周波数よりも高い周波数の振幅が大きくなる場合には、コンクリート内部に縦波が反射する面、つまり、空隙が存在すると判断される。図-4(b)の結果より、入力周波数が基本周波数の1.25倍以上となる測定条件でのこの試験を実施すれば、誤った評価をする可能性がある。この試験のために多重反射法で測定するのであれば、入力

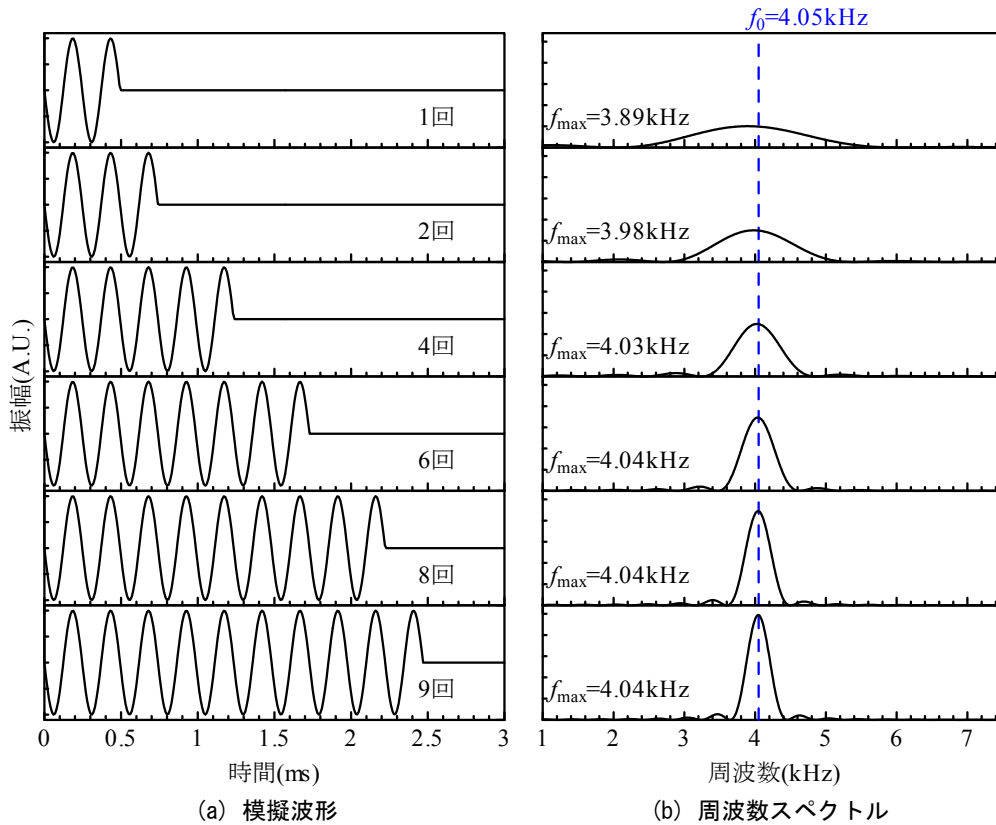


図-5 測定時間長さの検討における模擬波形とフーリエ解析結果の一例

周波数が基本周波数の0.75倍～1.10倍となる条件で測定することが必要になると判断される。なお、基本周波数13kHz以上では、入力周波数が基本周波数の1.25倍以上であっても重心周波数と基本周波数は一致した。これは基本周波数13kHz以上の高調波の周波数は26kHz以上となり、今回の測定範囲外となることによるものである。

4. 測定時間長についての検証

4.1 検証方法

測定時間長については、NDIS2426-2では解説に縦波が4回以上往復した時間とすることが望ましいと記載されている。しかしながら、この根拠は示されていない。そこで本章では、測定振動の測定時間長を、縦波が何回以上の往復した時間とすれば適切な測定ができるのかを検証するため、縦波の往復回数を変化させた模擬波形を作成した。設定した往復回数は1回から9回の9種類である。また、第3章、第5章での検証対象となる入力周波数、サンプリング時間間隔については、ここでは測定誤差の要因にならないよう、入力周波数は基本周波数との比が1.00、サンプリング時間間隔は1 μ sと理想的な条件に設定した。

4.2 検証結果

模擬波形および周波数スペクトルの一例として、部材厚さ500mmでの結果を図-5に示す。図-5(b)より、縦波の往復回数が少ない場合には、卓越周波数だけでなく

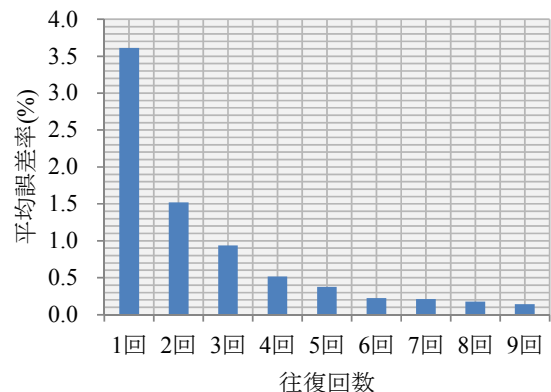


図-6 測定時間長さによる誤差の検証結果

卓越周波数付近を中心とした広範囲の周波数で振幅が大きくなるという特徴がある。さらに、卓越周波数と基本周波数4.05kHzとを比較すると、往復回数が少ない場合には、卓越周波数と基本周波数に差が生じていることが確認される。測定した卓越周波数と基本周波数との誤差率を式(5)により求め、往復回数毎に全部材厚さでの誤差率の平均値を求めて比較した。その結果を図-6に示す。

$$E = |f_0 - f_{\max}| / f_0 \quad (5)$$

ここで、 E ：誤差率、 f_0 ：基本周波数、 f_{\max} ：卓越周波数である。

図-6より、往復回数が多くなるのにしたがって、誤差は小さくなることが確認される。往復回数が4回以上となれば誤差は0.5%以下、9回以上となれば誤差は0.1%

以下となった。多重反射法で要求される精度は、多重反射法を利用する試験によって異なると考えられるが、以上の結果より、試験で要求される精度を考慮して、測定する縦波の往復回数、つまり、測定振動の測定時間長を判断することが妥当であると考えられる。

5. サンプル時間間隔についての検証

5.1 検証方法

サンプル時間間隔については、NDIS2426-2 では解説に、縦波の往復時間中に5個以上のデータをサンプリングすることが望ましいと記載されている。しかしながら、この根拠は示されていない。そこで本章では、測定振動のサンプリング時間間隔について、縦波の往復時間中に何個以上のサンプリングをすれば適切な測定ができるのか検証するため、縦波の往復時間中のサンプリング個数を変化させた模擬波形を作成した。設定した縦波の往復時間中のサンプリング個数は2, 3, 4, 5, 10, 20,

40個の7種類である。また、第3章、第4章での検証対象となる入力周波数、測定時間長については、ここでは測定誤差の要因にならないよう、入力周波数は基本周波数との比が1.00、測定時間長は縦波が9回往復した時間と理想的な条件に設定した。

5.2 検証結果

模擬波形および周波数スペクトルの一例を図-7に示す。図-7より、測定した卓越周波数と基本周波数との誤差は、サンプリング個数だけでなく、部材厚さでも異なる結果となった。部材厚さ500mmでのサンプリング個数5個、部材厚さ1000mmでのサンプリング個数5個および10個では、高調波による周波数が卓越周波数となり、正確に基本周波数を測定できないことが分かる。これに対して、部材厚さ150mmでの基本周波数は13.5kHzであり、高調波による周波数は今回の測定範囲(周波数0.10kHz~25.00kHz)外となることから、サンプリング個数が5個であっても10個であっても、卓越周波数と基本

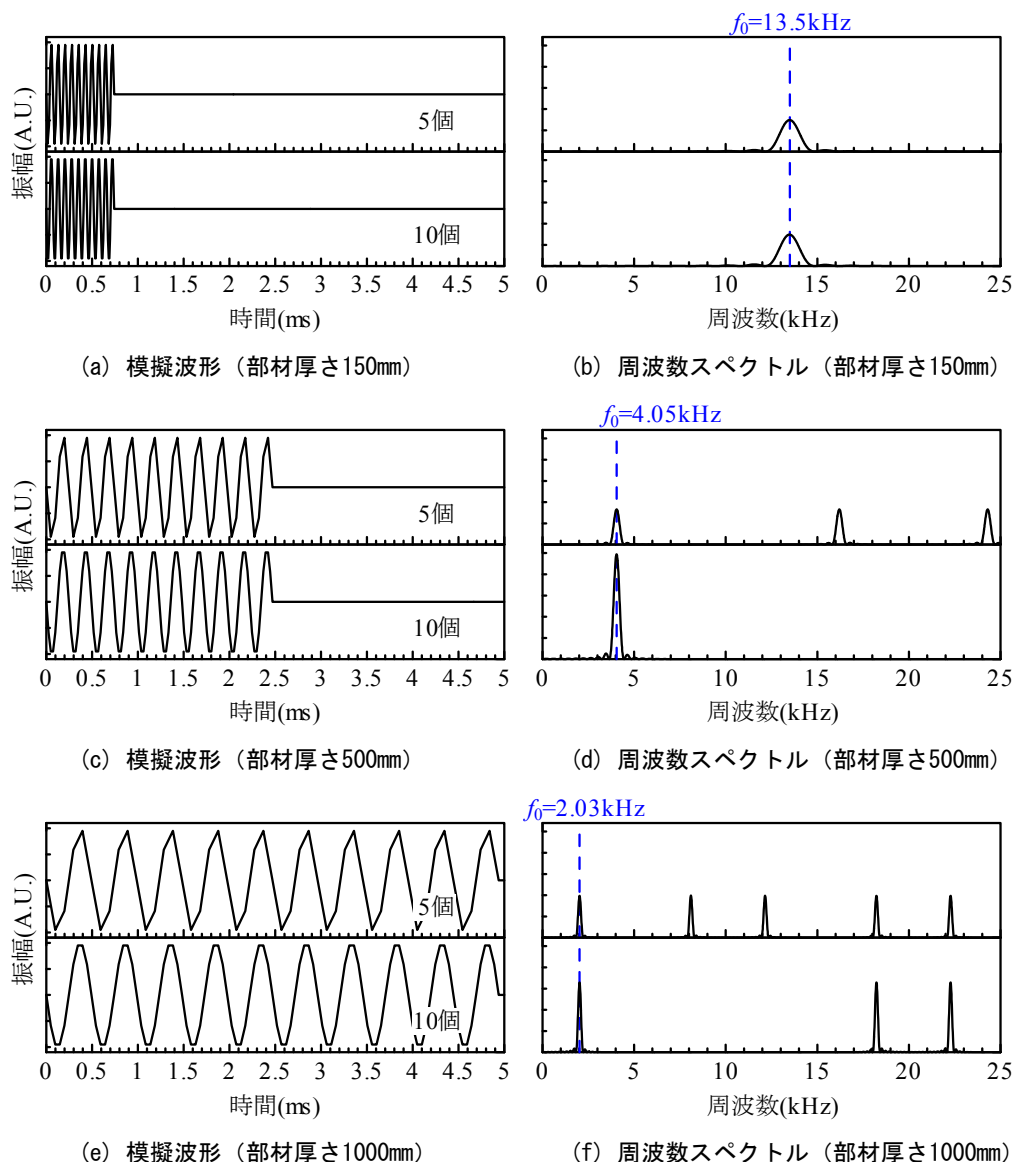


図-7 サンプル時間間隔の検討における模擬波形とフーリエ解析結果の一例

周波数が一致する結果である。全部材厚さでの基本周波数と測定した卓越周波数とを比較した結果を図-8に示す。部材厚さが大きく、基本周波数が低くなると、サンプリング個数を多くしなければ誤差が大きくなるのがわかる。一例を示すと、部材厚さ 1000mm（基本周波数 2.03kHz）ではサンプリング個数を 20 個、部材厚さ 2000mm 以上（基本周波数 1.01kHz 以下）ではサンプリング個数を 40 個とする必要がある。ただし、部材厚さが大きくなれば、縦波の往復時間は大きくなる。これにより、部材厚さの大きいコンクリートでサンプリング個数を多くするにしても、サンプリング時間間隔を極端に小さく設定する必要はない。具体的な例として、部材厚さ 2000mm（往復時間 1.235ms）でサンプリング個数を 40 個とするためのサンプリング時間間隔は 30.9 μ s となる。以上の関係から、部材厚さ 100mm~2500mm のコンクリートに対しては、サンプリング時間間隔を 20 μ s に設定すれば、誤差が小さく基本周波数を測定できることとなる。

6. まとめ

多重反射法でのフーリエ解析による測定精度を、測定条件を変化させて比較した。得られた結論を以下に示す。

- (1) 入力周波数を変化させた条件で比較した結果、入力周波数が基本周波数の 0.75 倍~1.75 倍の範囲であれば、卓越周波数から基本周波数を正確に推定できることが確認された。ただし、入力周波数が高くなると高調波成分が確認され、基本周波数よりも高い周波数の振幅が大きくなることも確認された。多重反射法を利用してコンクリート内部の空洞の有無を検出する場合は、入力周波数が基本周波数の 0.75 倍~1.10 倍となる条件で測定することが必要になると判断される。
- (2) 測定時間長を変化させた条件で比較した結果、測定時間長を大きくし、多重反射する縦波をより多くの往復回数で測定することにより、誤差は小さくなることを確認された。したがって、多重反射法を利用する試験では、要求される精度を考慮して、測定時間長を決定することが重要である。
- (3) サンプリング時間間隔を、縦波の往復時間中のサンプリング個数を変化させた条件で比較した。その結果、誤差はサンプリング個数だけでなく、測定するコンクリートの部材厚さによっても変化することが確認された。部材厚さが大きく、基本周波数が低くなるほど、誤差を小さくするにはサンプリング個数をより多く設定する必要がある。ただし、部材厚さが大きくなれば往復時間も大きくなるので、サンプリング個数を多くするためにサンプリング時間間隔を極端に小さく設定する必要はない。

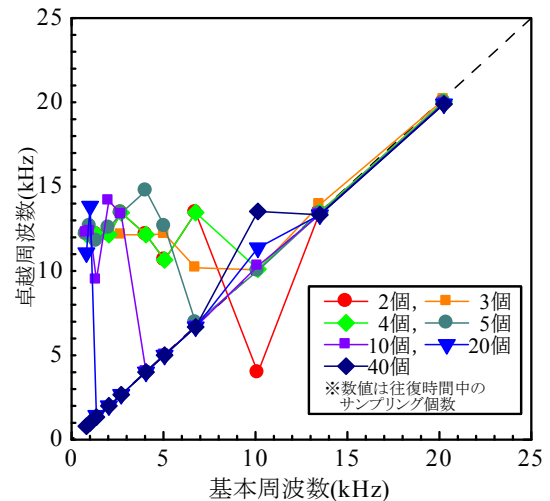


図-8 サンプリング時間間隔による誤差の検証結果

- (4) 上記(3)より、サンプリング時間間隔を 20 μ s に設定すれば、部材厚さ 100mm~2500mm のコンクリートに対しては、誤差が小さく基本周波数を測定できることが確認された。

参考文献

- 1) NDIS 2426-2^{:2014}: コンクリートの非破壊試験—弾性波法—第 2 部: 衝撃弾性波法, 一般社団法人日本非破壊検査協会, pp.9-12, 2014.9
- 2) Carino, N. J., Sansalone, M. and Hsu, N. N.: A Point Source-Point Receiver, Pulse-Echo Technique for Flaw Detection in Concrete, ACI Journal, Vol.83, pp. 199-208, 1986.3
- 3) 岩野聡史, 内田慎哉, 久保元樹, 山下健太郎, 渡部正: コンクリート表面での振動測定による鋼球とコンクリートとの接触時間の測定方法の検討, コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集, Vol17, pp.509-514, 2017.10
- 4) 三谷宗平, 内田慎哉, 岩野聡史, 久保元樹: 周波数解析方法の違いが衝撃弾性波法によるコンクリートの圧縮強度および部材厚さの評価に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1957-1962, 2017.6
- 5) 鎌田敏郎, 内田慎哉, 前裕史, 山本健太: 弾性波の入力方法がインパクトエコー法によるコンクリート版厚推定に与える影響, 材料, Vol. 58, No. 8, pp. 684-690, 2009. 8
- 6) 久保元樹, 内田慎哉, 岩野聡史, 森和也, 炭谷浩一: 鋼球打撃によるコンクリートへ入力される弾性波の周波数特性に関する実験的検討, コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集, Vol17, pp.515-520, 2017.10