

衝撃弾性波法によるコンクリートの内部欠陥探査において打撃に使用する鋼球の大きさが試験精度に及ぼす影響

リック (株) 正会員 ○岩野 聡史 富山県立大学 正会員 内田 慎哉

1. はじめに

衝撃弾性波法を利用した試験の一つにコンクリートの内部欠陥を探査する試験がある。また、この試験方法にはコンクリート表面を鋼球で打撃し、近傍の受信点に設置したセンサでの測定振動を解析して、内部で多重反射する縦波の往復時間を測定する方法がある¹⁾。測定される往復時間はコンクリートの内部欠陥の有無によって変化する性質があり、これを測定原理としている。解析方法には一般的にフーリエ解析が用いられている。ただし、フーリエ解析の結果は内部欠陥の有無だけでなく、測定条件によっても変化する。つまり、不適切な条件で測定すれば、内部欠陥の有無を誤って判断する危険性がある。しかしながら、この危険性は十分に認知されていない。そこで本研究では、測定条件のうち内部に入力される弾性波の周波数(入力周波数)を決定することとなる打撃に使用する鋼球の大きさに着目した。この条件を複数変化させた模擬波形および試験体での測定振動を得て、フーリエ解析を行った。両結果から、この条件が試験結果に及ぼす影響を把握することとした。

2. フーリエ解析を利用した方法の測定原理

図1に内部に欠陥が存在しないコンクリートでの鋼球打撃で発生する弾性波の模式図を示す。複数の波動が同時に発生し、縦波は打撃点から内部に伝搬して底面で反射する。レイリー波は表層を伝搬して振幅が最も大きい弾性波となる。打撃点近傍の受信点での測定振動の模式図を図2に示す²⁾。最初に測定される振幅の大きい振動はレイリー波の到達による振動となる。また、この振動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、そ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、底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。縦波はコンクリート表面と底面で多重反射し、縦波が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、測定振動中の振動の数が縦波の往復回数であり、特に単位時間当たりの往復回数 (T_p の逆数) を基本周波数 f_0 と定義している。一方、衝撃弾性波法による内部欠陥探査では、測定振動をフーリエ解析し、振幅が最も大きくなる周波数(卓越周波数)を求め、基本周波数 f_0 と比較する。その結果、卓越周波数が f_0 と異なれば、内部に縦波が反射する空隙、つまり、欠陥が存在していると判断される。

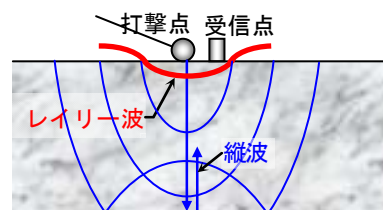


図1 鋼球打撃による発生する弾性波

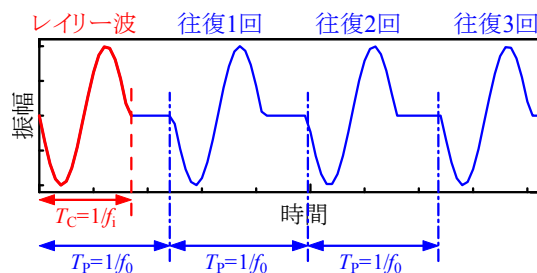


図2 測定振動の模式図

図1に内部に欠陥が存在しないコンクリートでの鋼球打撃で発生する弾性波の模式図を示す。複数の波動が同時に発生し、縦波は打撃点から内部に伝搬して底面で反射する。レイリー波は表層を伝搬して振幅が最も大きい弾性波となる。打撃点近傍の受信点での測定振動の模式図を図2に示す²⁾。最初に測定される振幅の大きい振動はレイリー波の到達による振動となる。また、この振動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、そ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、底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。縦波はコンクリート表面と底面で多重反射し、縦波が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、測定振動中の振動の数が縦波の往復回数であり、特に単位時間当たりの往復回数 (T_p の逆数) を基本周波数 f_0 と定義している。一方、衝撃弾性波法による内部欠陥探査では、測定振動をフーリエ解析し、振幅が最も大きくなる周波数(卓越周波数)を求め、基本周波数 f_0 と比較する。その結果、卓越周波数が f_0 と異なれば、内部に縦波が反射する空隙、つまり、欠陥が存在していると判断される。

3. 健全なコンクリートを想定した模擬波形での検証

フーリエ解析では、内部に欠陥が存在しない健全なコンクリートであっても、入力周波数が基本周波数から大きく乖離すると、測定される卓越周波数は基本周波数と異なる性質がある。つまり、健全なコンクリートであっても、誤った大きさの鋼球を使用して測定すれば、内部欠陥が存在すると誤って判断する危険性がある。そこでこの影響を検証するため、部材厚さ 100mm~2500mm の 11 種類の健全なコンクリートを想定し、入力周波数を変化させた模擬波形を作成して、フーリエ解析の結果を比較した。なお、弾性波伝搬速度は 4050m/s、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 に設定した。入力周波数は基本周波数との比 (f_i : 入力周波数) / (f_0 : 基本周波数) に基づき、0.50~2.25 間で 10 種類となるように設定した。

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（基本周波数 4.05kHz）での一部の結果を図 3 に示す。図 3(b)より、 f_i/f_0 が 1.00 では卓越周波数は基本周波数と一致し、この周波数のみで振幅が大きくなった。これに対して、 f_i/f_0 が 1.50 以上となると、基本周波数の 2 倍となる周波数でも振幅が大きくなった。入力周波数が基本周波数と乖離し、高くなったことにより、基本周波数の整数倍の周波数の振動（高調波）の振幅が大きくなったと考えられる。部材厚さ 100mm~2500mm の全模擬波形での高調波による影響を確認するため、周波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 に示す。なお、基本周波数は式(1)により算出される。

$$f_0 = V_p / (2D) \quad (1)$$

ここで、 f_0 ：基本周波数、 V_p ：弾性波伝搬速度、 D ：部材厚さである。図 4 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、高調波の振幅が大きくなることが確認される。衝撃弾性波法による内部欠陥探査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コンクリートに内部欠陥が存在すると判断される。以上の結果より、卓越周波数から基本周波数を正しく測定するには、入力周波数を基本周波数の 0.75 倍~1.10 倍に設定することが必要不可欠であるといえる。

4. 試験体を対象とした試験における測定結果

部材厚さ 250mm（基本周波数 8.10kHz）の健全なコンクリート試験体で、打撃する鋼球の直径により入力周波数を変化させて測定した。得られた測定振動と周波数スペクトルを図 5 に示す。図 5(b)より、直径 15mm の鋼球での測定では卓越周波数は基本周波数と一致し、この周波数のみで振幅が大きくなった。これに対して、入力周波数が低くなる $\phi 20\text{mm}$ では 5kHz 以下、入力周波数が高くなる $\phi 10\text{mm}$ では 10kHz~15kHz で振幅が大きくなった。これらの鋼球のみで測定すれば、コンクリートに内部欠陥が存在すると誤った判断をする可能性がある。正確な試験結果を得るには、直径の異なる複数の鋼球で測定し、解析結果を比較することが重要になるといえる。

5. まとめ

衝撃弾性波法でのフーリエ解析の結果は、打撃に使用する鋼球の大きさにより変化することが確認された。コンクリートの内部欠陥を探査では、この点に留意して試験することが重要になるといえる。

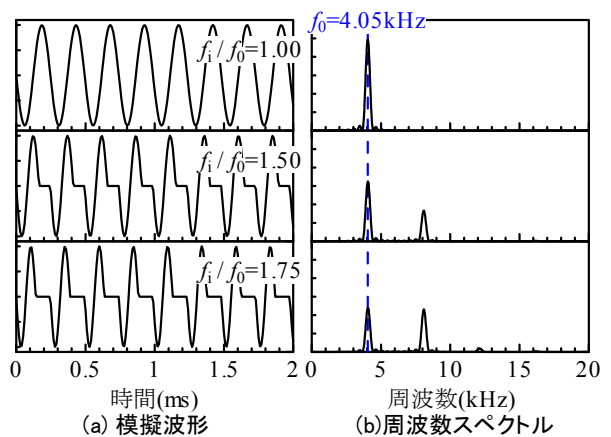


図3 模擬波形での結果例（部材厚さ500mm）

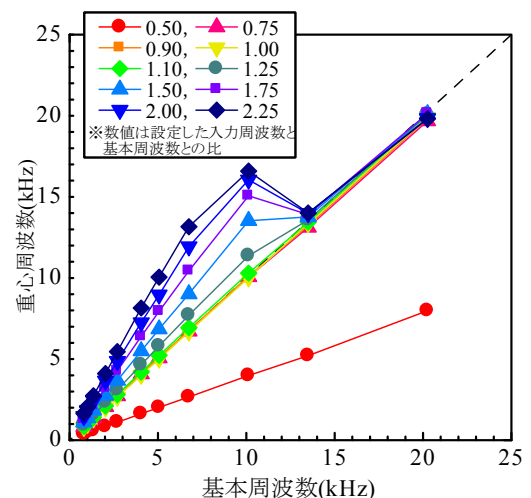


図4 設定した基本周波数と重心周波数との比較



写真1 試験体での測定状況

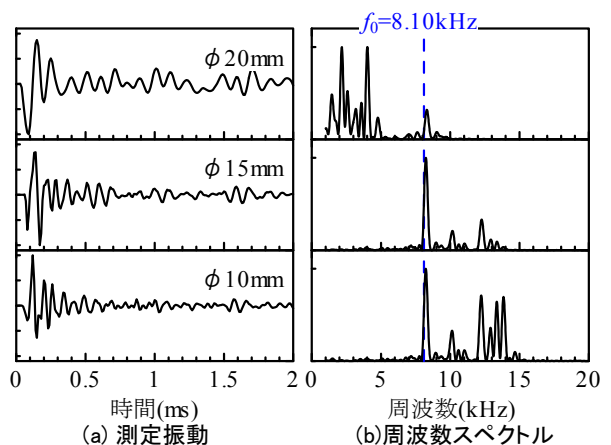


図5 試験体での測定結果

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.70-71, 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