

弾性波によるコンクリート表層付近の剥離探査での解析方法の検討

Study on Method of Analysis to Detection for Surface of Concrete Structure by Impact Elastic Wave Method

○岩野 聡史 リック(株) 内田 明 前田工織(株)
Satoshi Iwano RIK Akira Uchida Maeda Kosen

概 要

コンクリート表層付近の剥離探査は、現状では、人の耳で判断する打音により実施されていることが多い。この探査は客観的な判定ができないことや、測定値が記録されないことから、経年変化を確認できないことなどの課題がある。これに対して、測定器による打音試験方法が多く検討されている。今回は、この方法について、剥離が存在する場合に発生する振動の特徴に着目し、精度向上や打撃強さによる影響を除去することを目的とした解析方法を検討した。その結果、発生する振動の周波数に着目した探査では判定を誤る可能性があるが、振動の減衰に着目した解析方法が有効であることが確認された。

キーワード：維持管理，施工管理，非破壊試験，弾性波，振幅加算値

1. まえがき

コンクリートの表層付近の剥離の有無や剥離の範囲を判断する試験（以下、剥離探査という）は、既設構造物の維持管理において経年劣化状況の判断や、断面修復工法、増厚工法およびコンクリート巻立工法などの補修、補強工事において、母材コンクリートと補修材料との付着状況の評価などにおいて有効な試験となる。現在、これらの試験方法としては、コンクリート表面をハンマー等で打撃し、発生する打音から人の耳で判定する試験方法が多く実施されている。しかしながら、この試験方法では、客観的な判定ができないことや、測定値が記録できないことから、経年変化を確認できないことなどの課題があると考えられる。これらの課題に対して、測定器による打音試験方法が多く検討されている¹⁾。今回は、この方法について、剥離が存在する場合に発生する振動の特徴に着目し、判定精度の向上や打撃強さによる影響を除去することを目的とした解析方法を供試体実験により検討したので報告する。

2. 測定原理

測定方法はコンクリート表面に加速度計を設置し、近傍の鋼球打撃により発生する振動を測定する方法である。コンクリート表層付近の剥離の有無によって変化する、鋼球打撃により発生する振動の模式図を図1に示す²⁾。表面付近に剥離が存在しない場合には、コンクリート内部を球面状に伝搬して、コンクリート表面と背面等の反射面で反射を繰り返す縦弾性波や、コンクリート表面を上下方向に楕円を描くように伝搬するレイリー波などが発生する。これに対して、表面付近に剥離が存在し、剥離までの深さに対して鋼球打撃による入力波長が長くなる場合には、剥離部分のたわみによる振動（以下、たわみ振動という）が発生する。

コンクリート表面と反射面で反射を繰り返す縦弾性波により生成される周波数は、式(1)に示す周波数 f_0 となる。また、剥離部の断面形状を

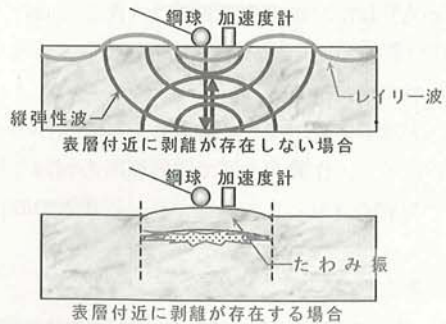


図1 発生する振動の模式図

円形とすれば、たわみ振動により生成される周波数は、式(2)に示す周波数 f_{mn} となる³⁾。

$$f_0 = \frac{V_p}{2D} = \frac{1}{2D} \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

$$f_{mn} = \frac{h}{2\pi \cdot a^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\nu^2)}} \cdot R_{mn} \quad (2)$$

ここで、 V_p は縦弾性波速度、 D は縦弾性波の反射面までの深さ、 E は弾性係数、 ρ は密度、 ν はポアソン比、 h は剥離部分までの深さ、 a は剥離部の半径、 R_{mn} はたわみ振動を形成する固有値である。

以上のとおり、コンクリート表層付近に剥離等の空隙が存在するか否かによって、測定される振動の種類や周波数は変化することとなる。これから、これらの変化に着目すれば、コンクリート表層付近の剥離探査が可能となる。



写真1 供試体の外観状況



写真2 PCM板と母材コンクリートの密着状況

3. 実験方法

実験は断面修復工法、増厚工法およびコンクリート巻立工法などの補修、補強工事において、母材コンクリートとポリマーセメントモルタル（以下、PCM という）との密着状況を評価することを想定して実施した。使用した供試体の外観状況を写真1に示す。長さ・幅が 300mm×300mm で厚さが 20mm, 52mm, 102mm と異なる PCM 板を供試体に用いた。PCM 板の中央位置を測定点として、直径 10mm, 15mm, 20mm の鋼球打撃により発生する振動を測定した。この測定を PCM 板がコンクリート供試体に密着していない状態と、写真2に示すとおり、超速硬性無機化合物を主成分とする止水材により密着している状態で実施した。コンクリート供試体は、形状が 870mm×900mm×厚さ 300mm, W/C=48.0%, 材齢 28 日時の圧縮強度は 36.2N/mm² である。また、止水材は硬化時間 15 分~35 分タイプを使用し、PCM 板をコンクリート供試体に接着させてから 2 時間後に測定した。使用した PCM は、ポリアクリル酸エステル共重合樹脂系特殊ポリマーセメントモルタルで、ポリマー/セメント比=12%, W/C=32%, 標準養生における材齢 28 日時の圧縮強度の規格値は 30.0N/mm² である。鋼球打撃による振動の測定に使用した加速度計は圧電型加速度計（感度 10mV/(m/s²), 周波数範囲 0.3Hz~12kHz) で、サンプリング間隔は 10 μ s である。

4. 測定結果および考察

(1) 周波数解析による検討

各条件での測定振動と周波数解析結果の一例を図2に、全周波数解析結果において、振幅が最大となった周波数 f_{max} を図3に示す。コンクリート表層付近に剥離が存在している状況と等しい密着前の測定結果に着目すると、周波数 f_{max} は鋼球直径に関係なく、厚さ 20mm の PCM 板では 4.7kHz, 厚さ 52mm では 5.0kHz, 厚さ 102mm では 6.4kHz となった。密着前の周波数 f_{max} は PCM 板の厚さが厚くなると高くなっている。これは、式(2)に示したたわみ振動による周波数は剥離部分までの深さ、つまり、PCM 板の厚さによって変化することと一致した結果である。これから、密着前の PCM 板では、厚さ 20mm, 52mm, 102mm とともに、鋼球直径 10mm, 15mm, 20mm に関係なく、たわみ振動が測定

されたものと考えられる。

次に、密着後の周波数 f_{\max} は鋼球直径に関係なく、厚さ 20mm, 52mm, 102mm ともに密着前と変化していることが分かる。これから、密着後にはたわみ振動以外の振動が測定されたものと考えられる。ただし、測定された周波数 f_{\max} は鋼球直径によって変化し、常に式(1)に示される多重反射による周波数が測定されているとは限らない。具体的には、PCM板とコンクリート供試体の両者での多重反射による周波数は、縦弾性波速度を 4000m/s とすれば、式(1)により、厚さ 20mm (合計厚さ 320mm) の PCM板では 6.3kHz, 52mm では 5.7kHz, 102mm では 5.0kHz となるが、この周波数が測定されたのは、厚さ 52mm と 102mm の PCM板を鋼球直径 20mm で測定した場合のみである。また、測定される周波数 f_{\max} が密着の前後でどの様に変わっていくのを見ると、厚さ 102mm, 鋼球直径 20mm だけが密着後の周波数が低くなった。密着による周波数 f_{\max} の変化内容は PCM板の厚さや測定する鋼球直径などの条件によって異なることが分かる。

これらの原因は、図 1 に示したとおり、鋼球打撃による測定ではレイリー波など複数の振動が発生することから、測定される周波数 f_{\max} は測定する鋼球の直径によって変化することによる。つまり、測定する鋼球の直径によって、入力される振動の周波数帯域は変化するが、測定される周波数 f_{\max} は、この入力される振動の周波数帯域と近似する振動の周波数となることによる⁴⁾。

以上の結果より、コンクリート表層付近に剥離が存在しない場合に測定される周波数 f_{\max} を予測することは困難である。また、剥離が存在する場合に測定されるたわみ振動の周波数は、剥離までの深さや剥離の断面寸法によって変化する。これらから、剥離の形状や位置、測定する鋼球の直径になどの条件によっては、剥離が存在しない場合に測定される周波数と剥離が存在する場合に測定されるたわみ振動の周波数とが一致する場合も考えられる。つまり、人の耳で変状の有無を判断する試験方法では、発生する振動の周波数の変化に着目した判定がされていると考えられるが、このような周波数のみによる比較ではコンクリート表層付近の剥離状況の判断を誤る場合があると考えられる。

(2) 測定振動の振幅値に着目した検討

図 2 に示した測定振動の時間経過による減衰に着目すると、密着前後で差があることが確認される。これは、たわみ振動は他の振動と比較して、振動の伝搬範囲が狭くエネルギー損失が小さくなることによるものと考えられる。そこで、各測定条件での振

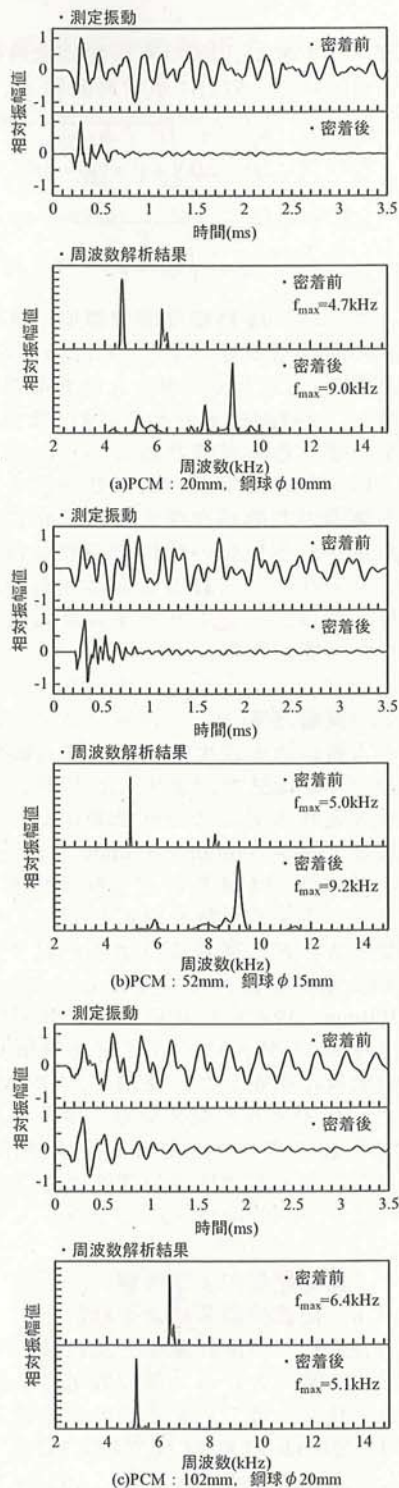


図2 測定波形と周波数解析結果

幅加算値 Y_s を式(3)により算出して比較した。

$$Y_s = \sum_{t=0}^{3.5ms} |y(t)| \quad (3)$$

ここで、 $y(t)$ は時間 t での測定波形の振幅値である。また、打撃強さによる影響を除去するため、測定時間内での最大値により標準化した相対振幅値である。各条件での振幅加算値の比較を図 4 に示す。厚さ 20mm, 52mm, 102mm とともに、鋼球直径 10mm, 15mm, 20mm に関係なく、PCM 板とコンクリート供試体とが密着することにより、たわみ振動は観察されず、振幅加算値が著しく小さくなるのが分かる。

(1) より、周波数解析による比較ではコンクリート表層付近の剥離状況の判定を誤る場合が考えられた。これに対して、振幅加算値は PCM 板の厚さや鋼球直径に関係なく、密着により著しく小さくなる変化を示した。これから、振幅加算値は剥離状況の評価に有効な測定値になると考えられる。

5. まとめ

コンクリート表層付近の剥離探査方法について、コンクリート表面の鋼球打撃により発生する振動を測定器に記録し、その振動の解析結果から判定する方法を供試体実験により検討した。その結果、剥離が存在する場合に測定される振動の周波数は、剥離までの深さや剥離の断面寸法によって変化することなどから、測定条件によっては、剥離が存在しない場合に測定される周波数と剥離が存在する場合に測定される周波数とが一致する場合も考えられる。これから、人の耳で変状の有無を判断する試験方法など、発生する振動の周波数に着目した探査ではコンクリート表層付近の剥離状況の判断を誤る場合があると考えられる。これに対して、測定振動の時間経過による減衰は、コンクリート表層付近の剥離の有無によって、大きな変化が生じることが確認された。これから、この変化に着目した解析方法がコンクリート表層付近の剥離探査に有効であると考えられる。

参考文献：

- 1) NDIS 2426-3：コンクリート構造物の弾性波による試験方法—第3部：打音法，社団法人日本非破壊検査協会，2009
- 2) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート構造物の非破壊評価技術の信頼性向上に関する研究小委員会 (JSCE339委員会) 成果報告書，コンクリート技術シリーズNo.88，pp.78，2009
- 3) NDIS 2426-2：コンクリート構造物の弾性波による試験方法—第2部：衝撃弾性波法，社団法人日本非破壊検査協会，pp.37，2009
- 4) 岩野聡史，森濱和正：コンクリート部材を打撃して得られた振動波形の周波数解析方法に関する検討，土木学会論文集E2 (材料・コンクリート構造)，Vol.67，No.2，pp.297-308，2011

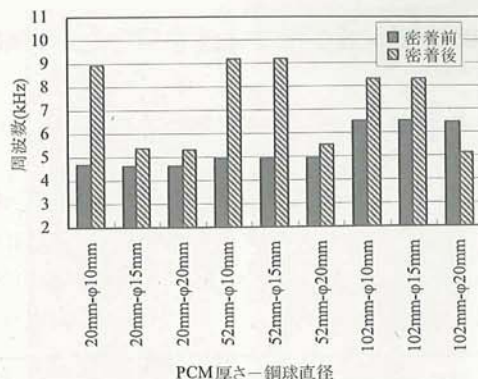


図3 各条件で振幅が最大となった周波数

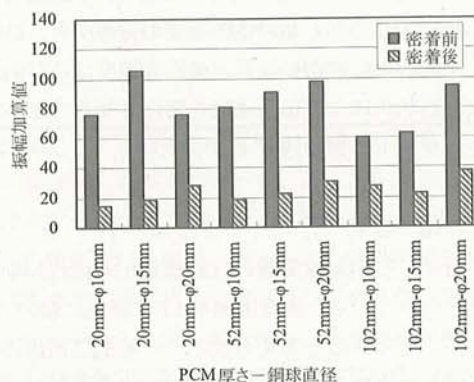


図4 各条件での振幅加算値