

論文 コンクリート建造物のデジタル打音検査の判断指標に関する検討

戸田 一郎*1・前田 良文*2・小濱 健吾*3・松永 嵩*4

要旨: コンクリート建造物の維持管理にあたっては、変状の検出精度を有しつつも簡便な調査手法として、打音点検が一般的に広く実施されている。しかしながら、従来の打音点検は官能検査であり、経験や技量に依存する他、技術伝承の課題がある。そこで、本研究においては、従来の打音点検の判断に関連するデジタル打音検査の特徴量として、固有振動周波数、振動持続時間、半値幅を選定・評価して、従来の打音点検結果と比較した。これらの特徴量は概ね従来の打音点検結果と整合し、各特徴量を統合して判断することにより、従来の打音点検結果と同等の判断が可能になる見通しを得た。

キーワード: 打音法, デジタル化, コンクリート, 浮き, 剥離

1. はじめに

我が国が保有する社会インフラの大部分を占めるコンクリート建造物を将来にわたって適切に維持管理していくためには、第三者被害の未然の防止の観点から劣化や欠陥を早期に発見する調査手法を適用する必要がある。また、維持管理対象は年々増加しており、限られた予算の中でメンテナンスサイクルを効率的かつ効果的にまわしていくために、打音点検が重要な点検手法の一つになっている。

打音点検の課題としては、点検者の経験、技量に依存することや、打音点検の技能継承が適切に行われていないことが指摘されている¹⁾。そのため、衝撃弾性波法によってデジタル化された特徴量からコンクリートの変状を評価する手法が開発されているが²⁾、コンクリート建造物の点検の大半は未だ打音点検が継続的に行われている。デジタル打音点検技術を広く現場に普及させるためには、現場の様々な状態において、コンクリート建造物のうき剥離等の変状を適切に評価可能な判断基準の設定が重要であり、デジタル打音点検を現場で実施し、現場状況が判断指標に及ぼす影響を整理することが肝要である。

そこで、本研究においては、従来の打音点検で実施していた精度で誰でも実施可能なデジタル打音検査の開発を目的とし、変状に感度を有する特徴量と打音点検結果を比較し、現場状況が判断指標に及ぼす影響を整理し、コンクリート建造物のうき剥離等の変状に対するデジタル打音検査の判断基準の設定について検討した結果について取りまとめた。

2. デジタル打音検査における特徴量

コンクリート内部の変状に伴う振動特性変化は、非破壊検査協会の規格である NDIS2426-2 で示されているように、かぶりコンクリートの共振、空洞・ひび割れ等の脆弱部が存在する場合の板厚共振周波数の低下、剥離部のたわみ振動などがある³⁾。板厚の共振周波数の固有振動については、連続体の縦振動の固有振動数の式(1)で示され⁴⁾、弾性係数 E 及び密度 ρ の平方根の項を弾性波速度 V に置き換えると、NDIS2426-2 に示される板厚の共振周波数(1次モードの場合)となる。また、剥離部でみられるたわみ振動の固有振動としては、例えば、単純支持された長方形板の1次の固有振動数の式(2)で示される⁴⁾。

これらの式より測定対象に変状が無く、厚みが一定の箇所であれば、式(1)に従う板厚の共振周波数が得られ、浮き・剥離等の変状によってたわみ振動が励起されれば、式(2)のように剥離面積及び深さに応じた周波数が生じることがわかる。また、式(1)、(2)からもわかるように、場合によっては、2, 3次等の高次モードの周波数が得られる場合もある。

$$f = \frac{n}{2D} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{nV}{2D} \quad (1)$$

f :固有周波数[Hz] E :弾性係数[Pa]

ρ :密度[kg/m³] V :弾性波速度[m/s] D :厚み[m]

n :振動モードの次数

*1 西日本高速道路エンジニアリング中国(株) 道路技術部 課長代理 準学士(正会員)

*2 西日本高速道路エンジニアリング中国(株) 道路技術部 部長 学士(正会員)

*3 大阪大学大学院 工学研究科 特任准教授 博士(工学)

*4 原子燃料工業(株) エンジニアリングサービス部 技師 工修

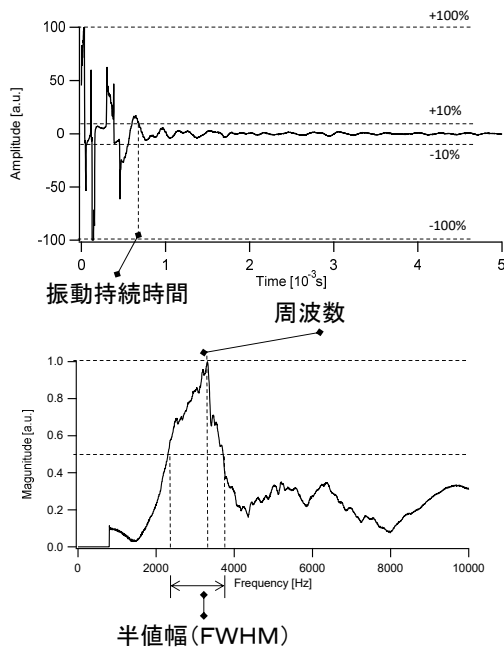


図-1 各特徴量の定義

$$f = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho(1-\nu^2)}} \left[\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 \right] \quad (2)$$

f :固有周波数[Hz] E :弾性係数[Pa]
 ρ :密度[kg/m³] a, b :長方形板の寸法[m]
 h :剥離領域の厚み[m] ν :ポアソン比
 m, n :振動モードの次数

周波数以外の特徴量としては、浮き・剥離が生じることによって引き起こされるたわみ振動は、振動が長く続くことが示されており⁵⁾、振動波形に一定のしきい値を設け、それを下回るまでの時間（振動持続時間）として定量化した。また、周波数ピークの広がり具合を表す半値幅は、ある共振モードの減衰比を求めるときに利用されていることから⁶⁾、たわみ振動のような一般的に減衰しにくい振動モードを検出するのに有効であると考えた。

上述のように、従来の打音点検においては、周波数や響き方、周波数分布の形状の差異を敏感に感じ取り、良否を判定していると考え、本論文では打音点検結果と上述の「周波数」「振動持続時間」「半値幅」の3つの特徴量がどのような関係性にあるのかを定量的に把握することで、従来の打音点検の判断基準の定量的な評価を試みた。

各特徴量の定義を図-1に示した。周波数については、0～10000 Hzで最も振幅が大きい周波数ピークの「周波数」を採用し、そのピークの半分の高さの位置における幅を「半値幅」とした。振動持続時間は、振動波形が最大強度の10%を下回るまでの時間とした。なお、振動測



図-2 AE 打音検査装置の外観



図-3 AE センサを用いた打音検査状況

定及び周波数解析手法については、サンプリング時間間隔4μsで0.1秒間の振動データに対し、高速フーリエ変換を用いて周波数分布を得た。

3. 実橋における試験概要

3.1. 測定装置

本研究で用いた測定装置は、AE センサ、計測ボックス、タブレット PC により構成されている（図-2）。本装置は、AE センサを測定対象に押し当てて、ハンマーで打撃することで、測定対象の振動信号を取得する（図-3）。なお、AE センサについては、着目する周波数帯域でフラットな振動特性を有する広帯域 AE センサを使用した。

3.2. 現場試験対象の選定

現場試験対象は、板厚がそれぞれ異なる橋梁の橋脚、箱桁下床版、桁側面の3箇所とし、点検員が判定した健全領域及び剥離領域に対して、打撃振動を取得した。図-4～図-6に各調査箇所の外観と測定位置及び剥離領域の範囲を示す。板厚については、橋脚部が1500mm、箱桁下床版が200mm、桁側面が600mmである。

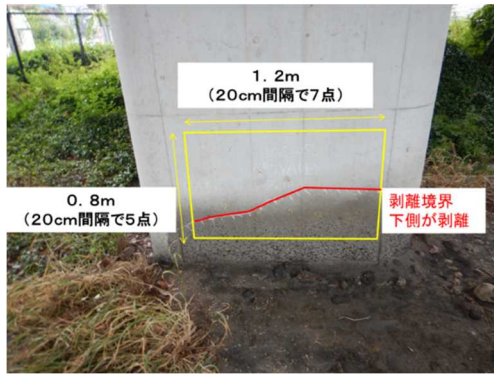


図-4 橋脚部の調査箇所

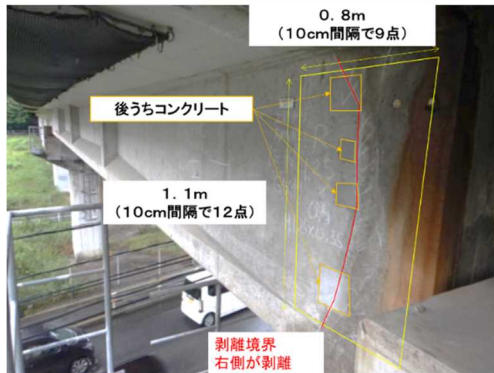


図-5 桁側面部の調査箇所



図-6 箱桁下床版の調査箇所

振動測定方法は、測定点上に AE センサを押し当て、打撃物でその近傍を打撃した。打撃物については、打撃部の質量が 113 g 打撃面の直径が 1.2 cm の点検ハンマーを用いた。また、点検員は、点検歴 20 年の者である。

4. 打音点検とデジタル打音検査の比較

4.1. 橋脚部の評価結果（板厚 1500 mm）

橋脚部の測定データより周波数、振動持続時間、半振幅を抽出した結果のコンター図及び剥離領域と健全領域のヒストグラムを図-7 に示す。図中の黒枠部は点検員が判定した健全領域であり、赤枠部は剥離領域である。また、枠内の黒プロットがデジタル打音検査における評価点である。

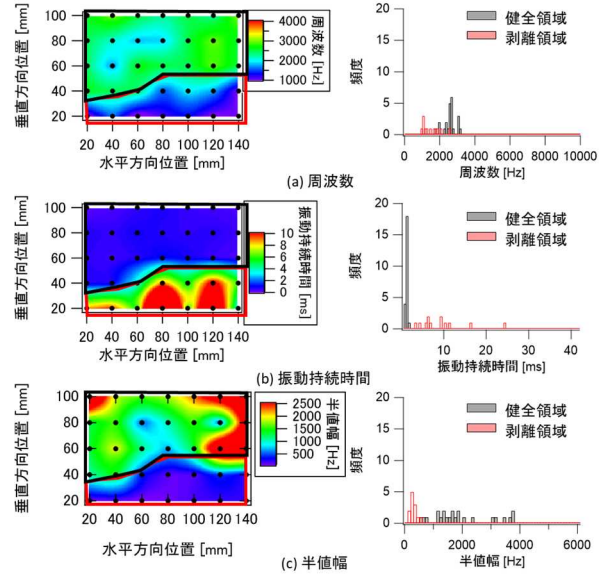


図-7 橋脚部の調査結果

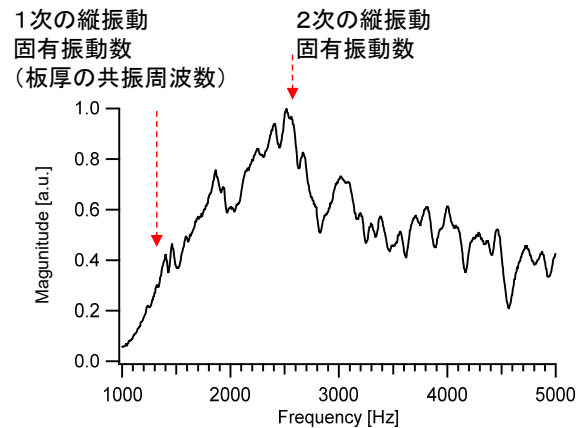


図-8 橋脚部の健全部より得られた周波数分布例

周波数については、健全領域では 2600 Hz 近傍の値が得られている。橋脚の板厚は 1500 mm、コンクリートの弾性波速度を 4000 m/s と仮定すると、板厚の共振周波数は約 1300 Hz であるため、ちょうどこの 2 倍の値であり、板厚の縦振動の 2 次モードを評価していると考えられる（図-8）。この値に対して、点検員が剥離と判定した領域では、周波数は概ね 2000 Hz 以下と低い値が得られている。

振動持続時間については、剥離領域は健全領域よりも振動持続時間が長い。これは、剥離領域では剥離している部分から周囲へ振動が伝播しにくいことに伴う拡散減衰の低下が要因として考えられる。

半振幅については、剥離領域は健全領域よりも値が小さい。これは、減衰の小さいたわみ振動の固有振動モードの特徴をとらえていると考えられる。

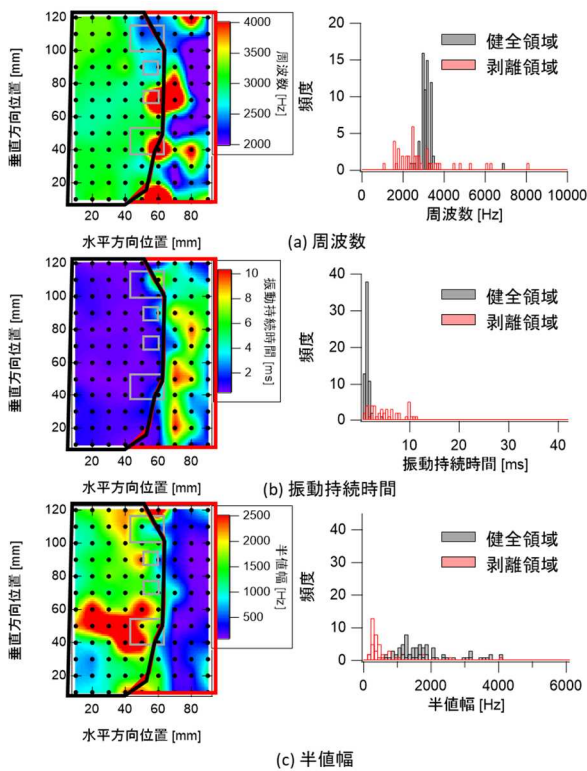


図-9 桁側面の調査結果

以上のように、点検員が剥離と判断した箇所は、健全と比べて周波数が低く、振動持続時間が長く、鋭い形状の周波数ピークが得られ、各特徴量は点検員の判定結果と相関があることが認められた。

4.2. 桁側面の評価結果（板厚 600 mm）

桁側面の測定データより周波数、振動持続時間、半値幅を抽出した結果のコンター図及び剥離領域と健全領域のヒストグラムを図-9に示す。図中の灰色枠部は、後打ちコンクリート部を示す。

周波数については、健全領域の周波数は 3000Hz 近傍であり、板厚 600 mm、コンクリートの弾性波速度 4000 m/s と仮定すると、板厚の共振周波数は約 3300 Hz であるため、概ね同等の値が得られている。この値に対して、点検員が剥離と判定した領域では、周波数は概ね 3000Hz 以下と低い値が得られている。

また、特異的に周波数が高い箇所が認められたが、当該箇所は後打ちコンクリートの跡や、図-10 のように、コンクリート表面にき裂が複数入っている箇所であった。後打ちコンクリートや断面補修等については、母材と完全に融合されていない箇所であるため、板厚の共振周波数が得られず、き裂が複数入っている箇所については、式（2）よりたわみ振動はたわみ部の面積が大きいほど低い周波数となるがき裂により境界面が複雑になることで、周波数にばらつきが生じたと推測される。得られる周波数は対象の形状や変状に対して敏感に変化するもの

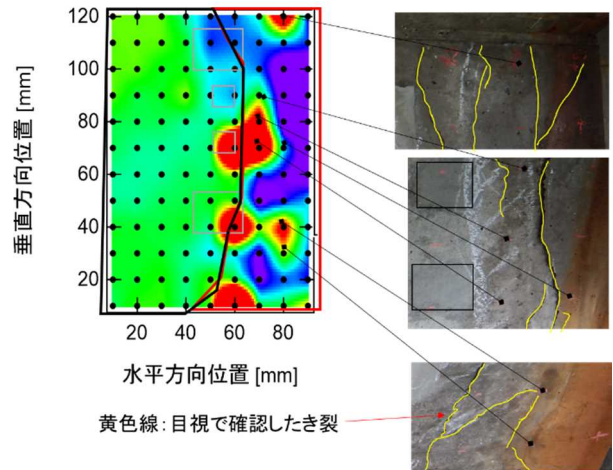


図-10 剥離領域内部で周波数値が高い箇所の外観

の、当該箇所のように後打ちコンクリートや複数のき裂がある箇所では単純に低周波側の値が得られない場合もあることがわかった。

振動持続時間及び半値幅については、おおむね橋脚部と同様の傾向が得られた。

4.3. 箱桁下床版の評価結果（板厚 200 mm）

箱桁下床版の測定データより周波数、振動持続時間、半値幅を抽出した結果のコンター図及び剥離領域と健全領域のヒストグラムを図-11に示す。

周波数については、健全領域の周波数は 9000 Hz 近傍であり、板厚 200 mm、コンクリートの弾性波速度 4000 m/s と仮定すると、板厚の共振周波数は約 10000 Hz であるため、概ね同等の値が得られている。この値に対して、点検員が剥離と判定した領域では、周波数は概ね 3000Hz 以下と低い値が得られている。

また、健全部において、水平方向に周波数が低い箇所が認められたが、同一箇所の振動持続時間や半値幅は、剥離領域でみられるような値ではないため、剥離以外の要因で周波数が低下していると考えられる。当該箇所の現場観察結果より、施工目地による影響の可能性は低く、表面仕上げ程度によるものと考えられる。

振動持続時間については、おおむね橋脚部と同様の傾向が得られたが、健全部における半値幅が小さくなっている。これは、板厚が小さい対象においては、振動の拡散が起きにくく、縦振動の共振モードが減衰しにくくなっているためと推測される。

5. コンクリート浮き・剥離の判断基準の設定方針

周波数、振動持続時間、半値幅のそれぞれの評価指標と従来の打音点検結果については、表-1 のような傾向が認められた。

健全領域で得られる周波数は、板厚の共振周波数近傍

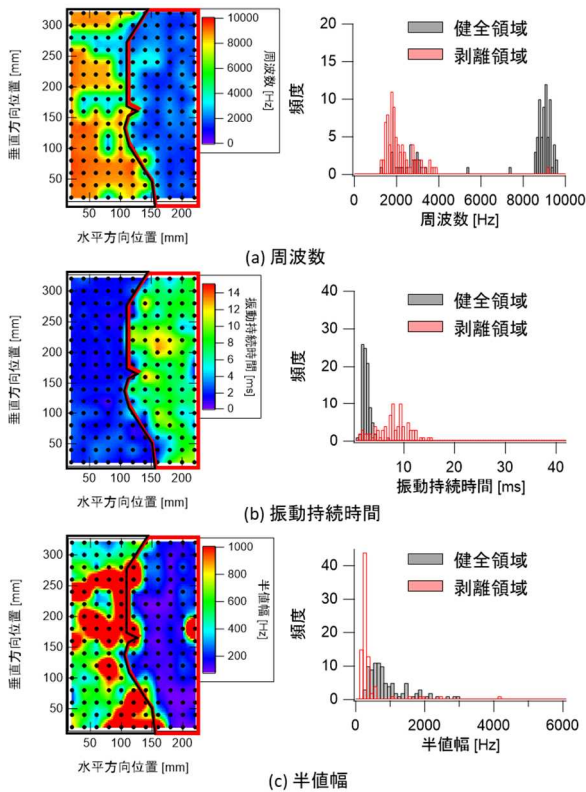


図-11 箱桁下床版の調査結果

に集中して得られるが、剥離領域で得られる周波数は3現場変わらず 1000~2000Hz の低周波側に分布が集中している傾向が認められる。これは、剥離に伴うたわみ振動が得られているためであり、基本的には健全部より周波数が一定の割合で低下した場合においては浮き・剥離の可能性があると判断することが可能となる。但し、たわみ振動については、式(2)で示したように、剥離面積及び剥離厚さに応じて周波数に変化するため、従来の打音点検で剥離と判断した領域においても、2000~4000Hz 程度の高い周波数を抽出する場合があります。この点については振動持続時間もしくは半値幅も考慮して判断する必要があります。特に板厚が厚くなるにつれて、板厚の共振周波数が低くなり、たわみ振動で得られやすい周波数帯と重なった場合は注意が必要である。

また、半値幅については、板厚が小さい対象においては、振動の拡散が起きにくく、縦振動の共振モードが減衰しにくくなっているためと推測され、特に板厚が小さくなるにつれて、健全部においても半値幅が減少することにも注意が必要である。

ここで、3つの特徴量を統合的に利用することで、板厚の変化によらず一定の判定が可能となると考え、表-2のような判断基準方針を例に挙げ、本実験における運用方法を検討した。

表-1 板厚の異なる3現場で得られた知見

場所	特徴量の変化
橋脚部 板厚 1500 mm	周波数： ・健全領域では2次の縦振動固有振動周波数である2600 Hz程度
桁側面 板厚 600 mm	周波数： ・健全領域では1次の縦振動固有振動周波数(板厚の共振周波数)である3000 Hz程度。 ・ひび割れや後打ちコンクリートの影響で周波数が高くなる場合があります。
箱桁下床版 板厚 200 mm	周波数： ・健全領域では1次の縦振動固有振動周波数(板厚の共振周波数)である9000 Hz程度 ・表面仕上げ程度によっては周波数が低くなる場合あり。
共通の傾向	周波数： 剥離領域で得られる周波数は1000~2000Hzの低周波側に分布が集中 振動持続時間： 健全領域は5ms以下、剥離領域はばらつきが大きい長くなる傾向。 半値幅： 健全領域では概ね500 Hz以上で、剥離領域では500 Hzより小さい傾向。

表-2 判断基準方針の一例

周波数	健全領域の平均値 ±2σの範囲内		健全領域の平均値 ±2σの範囲外	
	t<5ms& w>500	それ以外	t<5ms& w>500	それ以外
振動持続時間：t 半値幅：w	○	△	△	×
判定	○	△	△	×

○：健全

△：浮き・剥離等の可能性あり

×：浮き・剥離の可能性が高い

STEP1:

周波数については、板厚によって変化するため、変状の無い箇所において、複数点の振動データを採取し、健全状態における周波数を取得。

STEP2

調査対象箇所において、上記の健全状態の箇所と板厚、物性(弾性係数、密度等)が大幅に変化していないことを前提に、周波数を比較する。周波数の定量的な判断基準としては、平均値±2σとしたが、重要度、第三者被害の影響度を考慮して適宜安全側の判断基準とする。

STEP3

周波数が健全状態の値と同等か差異ありかを分類し、振動持続時間及び半値幅の傾向を含めて判断する。振動持続時間及び半値幅の定量的な判断基準としては、現場試験結果より、振動持続時間が 5 ms 以下、かつ半値幅が 500 Hz 以上を目安として判定した。

この値については、ばらつきが大きいため、改良の余地があると考えており、今後データを拡充しつつ整理する計画である。

上記の判断基準設定方針を今回の 3 現場に適用した結果を表-3 に示す。デジタル打音検査を行った評価点(全 319 点)について、点検員の判定した領域を正として評価した。

点検員が健全と判定した領域においては、デジタル打音検査では 66%で○、34%で△及び×と判定している。一方、点検員が剥離と判定した領域については、97%が△及び×に分類され剥離の可能性を示唆しており、剥離の検出率は点検員とほぼ同等の性能を有することが分かった。また、3%の箇所では○判定の結果が得られおり、そのすべてが剥離境界近傍の点であることも分かった。この点については、点検員の判定を正としているが、点検員は振動特性の 3 指標以外の特徴量(例えば、打感や剥離面の連続性等の視覚情報)を考慮した判定を実施している可能性もあるが、逆にデジタル打音検査のほうが打音点検より精密に判定している可能性もあるため、今後大規模更新による経年劣化した構造物の撤去のタイミングで、部材厚さごとに整備・検証し種々の条件を最適化することで、打音点検技術の代替技術として確立していきたい。

表-3 打音点検に対するデジタル打音検査結果

点検員の判定	デジタル打音検査の判定			
	測定点数	判定	数量	比率
健全	180	○	118	66%
		△	59	33%
		×	3	2%
剥離	139	○	4	3%
		△	24	17%
		×	111	80%

6. まとめ

本研究においては、従来の打音点検で実施していた精度で誰でも実施可能なデジタル打音検査の開発を目的

とし、打音点検の判断に関連する指標として、固有振動周波数、振動持続時間、半値幅を選定、評価して、実際に打音点検結果と比較し、以下の知見が得られた。

- (1) 剥離領域で取得した振動データは、健全領域と比較し、周波数は低く、振動時間は長く、かつ周波数ピークの幅(半値幅)が大きい傾向にある。
- (2) これらの特徴量は、従来の打音点検の点検員の判定結果と良い相関がある。
- (3) 現場においては、後打ちコンクリートや断面補修等により母材と完全に融合されていない箇所がある場合、板厚の共振周波数が得られないことがあり、周辺の外観情報も考慮することが重要である。
- (4) 板厚が小さい場合は、板厚の共振周波数と剥離によるたわみ振動周波数の識別が容易であるが、板厚が大きい場合は、板厚の共振周波数と同等のたわみ振動周波数が得られ、識別が困難になることがある。
- (5) 浮き・剥離の判断指標については、周波数を基本として、振動持続時間、半値幅を補完的に用いることで、点検員とほぼ同等の検出性能を得られる可能性があると考えられる。

参考文献

- 1) 舟波尚哉, 村上祐貴, 外山茂浩, 小海元暉: 熟達点検者の打音点検動作の形式知化に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1871-1876, 2019.7
- 2) 鎌田敏郎, 浅野雅則, 国枝稔, 六郷恵哲: コンクリート表層部欠陥の定量的非破壊検査への打音法の適用, 土木学会論文, No.704, V-55, pp.65-79, 2002.5
- 3) 峯岸秀治: NDIS 2426-2 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, p.70, 2014
- 4) 日本機械学会: 振動学, 一般社団法人日本機械学会, p.70-78, 2005
- 5) 岩野聡史, 内田明, 多田大史, 岡田慎哉: 衝撃弾性波を用いた接着工法における接合面の剥離判定方法への一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1747-1752, 2013.7
- 6) 荒井政大, 板垣大輔, 西村正臣, 島村佳伸, 小林和幸: 均質化法による CFRP 積層はりの減衰振動特性評価, 計算数理工学論文, Vol. 14, 論文 No. 11-141206, 2014. 12