

コンクリート床版の打音検査における 数値化（見える化）に関する研究

札幌開発建設部 千歳道路事務所
札幌開発建設部 千歳道路事務所
株式会社砂子組

○新保 貴広
坂 憲浩
佐藤 昌志

橋梁点検等において多用される検査法に、打音と加速度計による方法があるが、打音の定量化された研究は少ない一方で、加速度計での検査は重装備になり易く、点検作業に適しているとは必ずしも言い難い面がある。これらの事から、表面打撃音をマイクロフォンで単純に収録し、周波数分析を行う事により、打音検査の数値化（見える化）および客観化を試みた。

キーワード：打音検査，定量化，見える化，点検，維持管理

1. はじめに

橋梁等の実構造物の点検方法で打音試験法は、非破壊検査方法の中で最も簡便であることから広く利用され、橋梁等の事前点検では主要な検査方法となっている。

しかし従来の打音検査は、健全部と劣化部の打撃音の違いを検査者の聴覚（主観）によって判断するもので、検査者の経験や熟練度によって検査結果が異なるため、データ蓄積および評価に継続性を持たせる事が困難で、過去に実施された点検結果との不整合が頻繁に起こり得るのが現状である。

打音試験法に関する研究は、およそ 60 年前に研究論文が発表された¹⁾。その後、打撃音特性やコンクリート性状に関する研究^{2), 3), 5)}、打撃用ハンマーを改良する研究⁴⁾等が続くが、その後の研究のほとんどは、加速度測定を基本としており、点検用ハンマーの打撃音のみで損傷を評価する試みは、先に述べた¹⁾以外にはほとんど見当たらないのが現状である。

このような背景から、本研究は、道路橋の鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版と記す。）を対象に、打音試験により発生した打撃音を分析することで、RC 床版の健全性、浮きや剥離等の欠陥の有無を定量的・客観的に判断でき、将来に向けての点検データの蓄積も可能な方法を検討した。

また昨今のパーソナルコンピュータ（PC）性能の向上により、従来はサンプリングレートが大きく PC での収録・分析が難しかった打音そのものの解析は、容易に行えるようになってきており、今後、更に進展するものと期待される。

2. 検討方法

本研究では、打音試験法の簡便さを損なうことなく検査者の経験や熟練度に影響されない試験方法を目指していることから、打音試験による打撃音をマイクロフォンで収録し、FFT (Fast Fourier Transform) 解析により周波数特性を分析することで定量化（見える化）が可能かを検証した。以下に検討の流れを示す。

- i) 実橋(写真-1)の床版上面で健全部と劣化部の打音試験を実施し、打撃音により周波数特性を分析するデータ整理方法の比較検討、および健全部と劣化部の打音試験による定量化の可能性を検討
- ii) RC 床版を模した健全な供試体、押抜き試験を行った後の押抜かれた供試体を劣化供試体として、i) で比較選定したデータ整理方法で周波数特性を分析し、実橋との定量的な比較を検討
- iii) 打音試験の打撃音を FFT 解析した周波数特性の詳細な分析



写真-1 実橋全景

3. 実橋による試験結果

対象とした橋梁は、1984年に架橋された橋長160m、アーチ支間128mの3径間中路式ローゼ橋であり、床版に浮き等の損傷が著しかったことから、床版上面を全面的に打ち換える対策工を実施するに至った。

打音試験箇所を図-1に示す。

打音試験は、対策工実施の際に舗装を除去した段階で実施し(写真-2)、健全であると判断された健全部1点と床版に浮き等が確認された劣化部10点で実施し、各点で5回程度の打撃音をマイクロフォンで収録し(写真-3)、FFT解析により周波数特性を分析した。

データ整理方法として、ここでは次の2通りの整理方法を比較し、実用に適すると判断した方を後述する供試体の試験で検証した。

- i) 5回程度の打撃音の最大値をFFT解析による周波数特性を分析(ピークホールド値)
- ii) 5回程度の打撃音の平均値をFFT解析による周波数特性を分析(平均値)



写真-2 打音試験状況

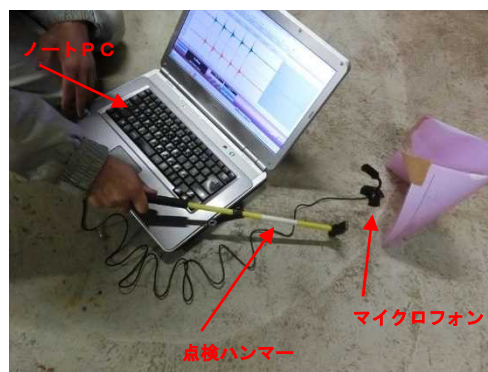


写真-3 マイクロフォンによる収録状況

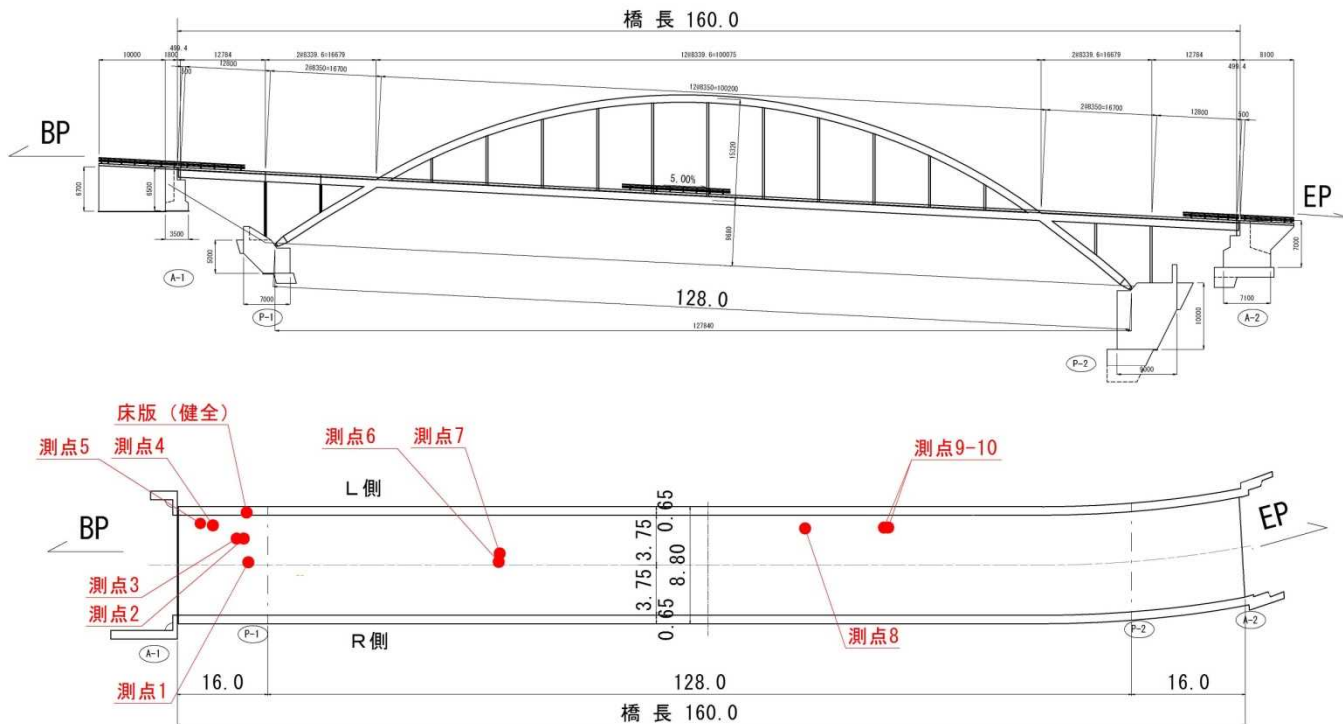
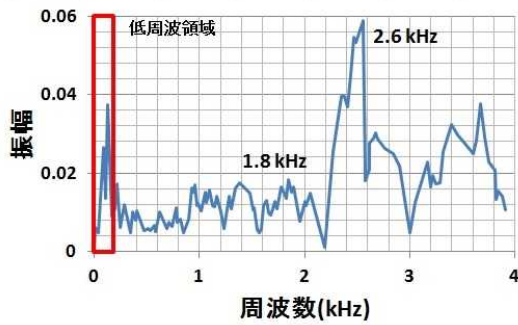
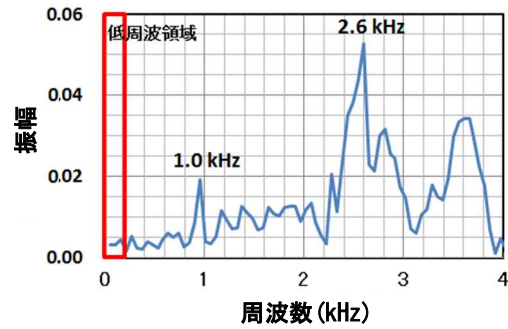


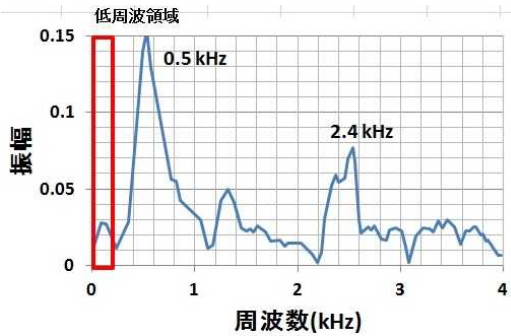
図-1 打音試験箇所



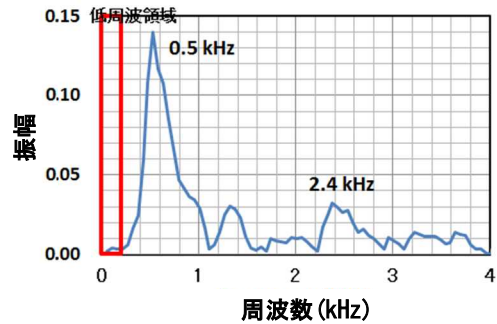
a) 健全部の周波数分析結果と状況（ピークホールド値）



b) 健全部の周波数分析結果と状況（平均値）



c) 劣化部の周波数分析結果と状況（ピークホールド値）



d) 劣化部の周波数分析結果と状況（平均値）

図-2 主要箇所 の打音試験結果

図-2 に健全部と劣化部測点 8 の分析結果を示す。なお、打音試験は野外で実施しており、風による音も収録されていたが、他の研究で風音は 0.2kHz 以下の低い周波数領域に存在することが確かめられている⁹⁾ことから、0.2kHz 以下の低周波数領域は検討の対象から除外した。

- ①解析方法でピークホールド値と平均値を比較すると、劣化部ではほぼ同様の周波数形が得られたが、健全部では 1.0kHz 前後で差異が見られた。
- ②全ての箇所 で 2.5kHz 前後で卓越した周波数が確認されたが、劣化部においては 0.5kHz でも卓越した周波数が確認された。
- ③健全部では 2.6kHz の周波数が最大となり、劣化部では 0.5kHz 前後の周波数が最大となった。

なお、劣化部測点 8 以外の分析結果についても、同様の結果を得ている。

以上より、健全部における周波数 1.0kHz 前後の卓越した周波数が明確に確認できること及び、打音検査は今回のように屋外で実施するのが通常であることを考慮すると、背景ノイズを除去するという目的も含めて、打撃音の平均値を周波数解析する方がより精度が高いと考える。

今回の結果では、定量的な健全部、劣化部の判断としては、全てのケースに 2.5kHz 前後の卓越周波数が存在する事から、この付近の打撃音が、コンクリート物性などに起因するものと考えられる。

また、1.0kHz 前後からそれ以下が損傷などに起因する卓越周波数と評価できる。

平均値を用いた周波数解析結果の状況は、以下のとおりである。

- ・健全な場合は 2~3kHz が明確に卓越し、最大ピークは 2.6kHz にある。
- ・劣化の場合は、1.0kHz 以下が明確に卓越し、最大ピークは 0.5kHz にある。

これらから、FFT 解析により周波数特性を分析し、損傷などに起因すると考えられる 0~1.0kHz の低い周波数帯域に着目することにより、より効率的な床版の損傷判定を行える可能性があると考えられる。

4. 供試体による試験結果

供試体全景を写真-4 に示す。供試体は実橋の支間長及び床版厚を再現した、2800mm×2800mm×180mm で、図-3 に示す 6 箇所の測点で打音試験を実施した。なお、図-3 は劣化供試体を示しているが、健全供試体でも同様の位置で実施した。打音試験は、実橋による試験結果から各測点で 5 回程度の打撃音をマイクロフォンで収録したものを、その平均値を当該測点の打撃音として FFT 解析により周波数特性を分析した。また、0.2kHz 以下の低周波数領域は風音の影響とし検討の対象から除外している。

図-4 に測点②の分析結果と測点の状況を示す。

- ① 全ての箇所で 2.0kHz 前後と 1.0kHz 前後で卓越した周波数が確認された。
- ② 健全部では 2.0kHz 前後の周波数が最大となり、劣化部では 0.9kHz 前後の周波数となった。

これらの結果は、健全部、劣化部の定量的な判断として 2.5kHz 前後の卓越周波数がコンクリート物性などに起因し、0~1.0kHz の卓越周波数が損傷などに起因する打撃音とした実橋の結果と定性的に一致する。

実橋と供試体での定量的な違いは、コンクリート物性などに起因すると考えられる周波数が、実橋では 2.5kHz 前後であったが、供試体では 2.0kHz 前後にある点である。

これについては、ハンマーによる衝撃周波数は 1.5~2.0kHz であり、打撃音はこれによって発生した板の曲げ振動によるという報告⁵⁾があり、供試体でも 2.0kHz 前後の卓越周波数は、健全部および劣化部ともに見られたことから、実橋と供試体の違いは、ハンマーの打撃状況やコンクリート形状等の差異によるものと考えれば、定量的にも実橋と供試体の結果は一致したとみなす事は可能である。

以上より、0~1.0kHz の低い周波数帯域に着目することにより、より効率的な床版の損傷判定を行える可能性は強いと思われる。



写真 - 4 供試体全景 (左: 健全部 右: 劣化部)

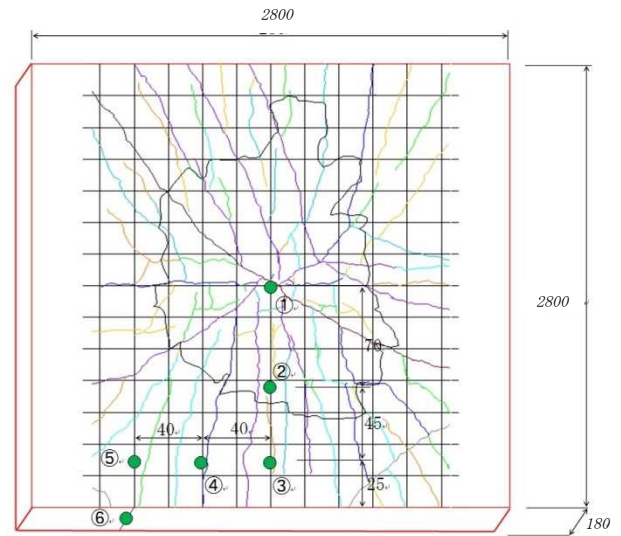
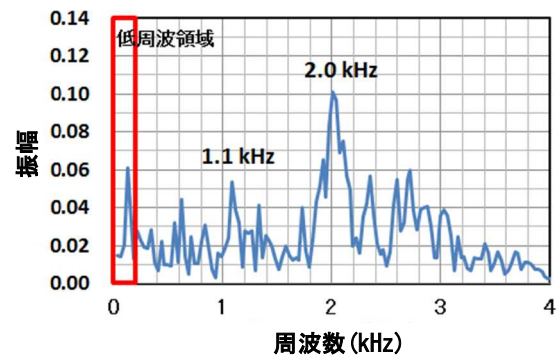
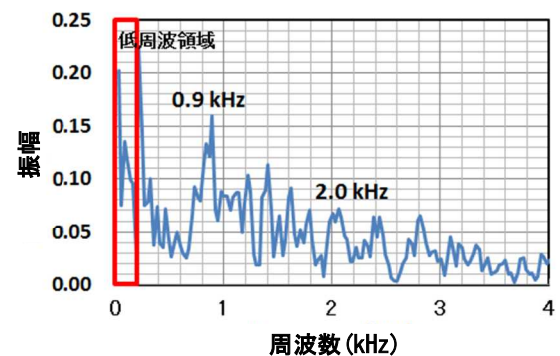


図 - 3 打音試験実施位置図



a) 健全供試体 測点②の周波数分析結果と状況



b) 劣化供試体 測点②の周波数分析結果と状況

図 - 4 主要な測点の打音試験結果と測点の状況

5. ケース・スタディ（打撃音の詳細解析）

マイクロフォンで打音試験の打撃音を収録し、FFT解析により周波数特性を分析した結果から、実橋および供試体いずれにおいても、特徴的な周波数帯域が見られた。ここでは追加検証として、実橋における打音検査の打撃音の一波を取り出し、より詳細な波形解析を行う。

図-5 は、実橋での健全部と劣化部の打音の一波を FFT 解析した結果であるが、健全部と劣化部ともに、周波数帯域はノイズを含めて 4 つに大別できる。

主要部①：0～2.0kHz,

主要部②：2.0～3.0kHz,

主要部③：3.0～4.0kHz,

なお、4.0kHz 以上はノイズと判断した。

これら主要な周波数帯①，②，③を逆変換し、音波に戻すと、図-6 になる。

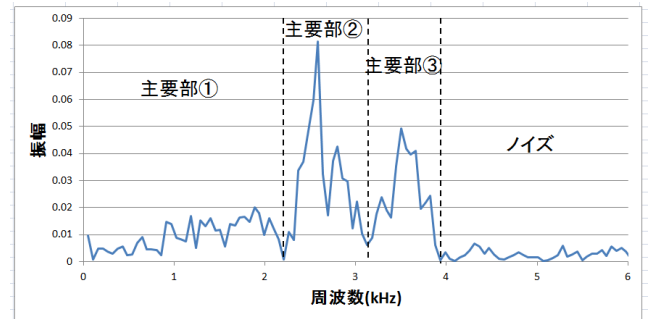
図-6 で主要部②，③の逆変換結果は、健全部でも劣化部でも非常に良く似た綺麗な波形を示し、これらの音波を再生したものを直接聞いた結果では、同じ音と判断できた。

一方、①の逆変換は、明確に相違の見られる乱れた波形となり、再生した結果は劣化部で低く、健全部では相対的に高い音であった。

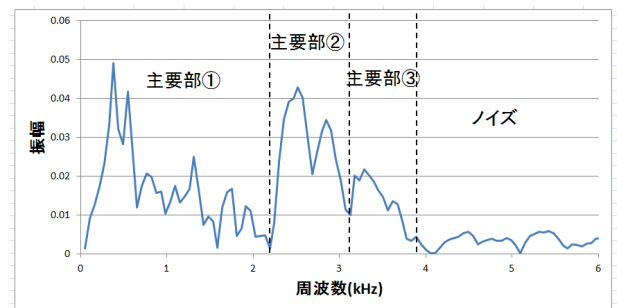
また、①の部分は叩いた直後に立ち上がるが、②と③は打撃直後は小さく、唸りに似た形で増幅および減衰する。

ここから推測できる事は、②と③はコンクリート物性などに起因すると考えられる音であり、健全部、劣化部の両方に含まれるもので、①の部分にコンクリートの劣化情報が含まれている可能性である。

以上の結果は、実橋および供試体に関する前述の結論を支持するものである。

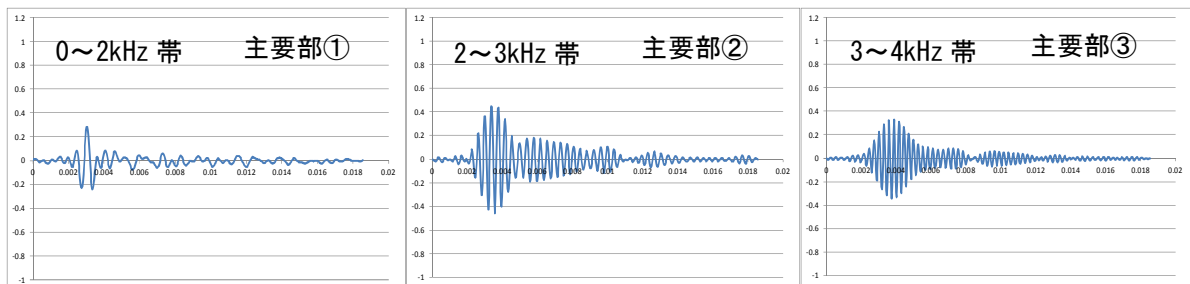


a) 実橋の健全部

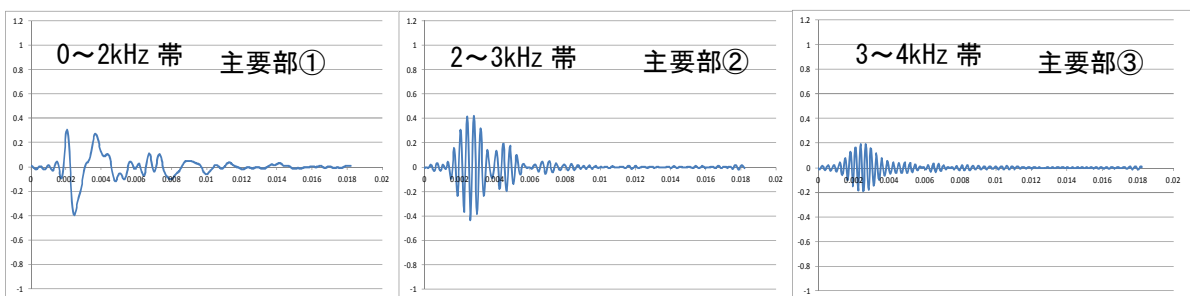


b) 実橋の劣化部

図 - 5 各打音波の FFT 解析結果



a) 実橋の健全部



b) 実橋の劣化部

図 - 6 各周波数帯の音波変換

6. まとめ

本研究では、橋梁のRC床版を対象に、打音試験法の簡便さを損なうことなく検査者の経験や熟練度に影響されない試験方法を目指して、打音試験による打撃音をマイクロフォンで収録しFFT解析により周波数特性を分析することで劣化部の評価が可能(見える化)かを検討した。

- 1) 打音試験は屋外で実施されることが多く、その場合、異常値を除去するという目的も含めて、打撃音の平均値をFFT解析により周波数分析の方がより精度が高い。
- 2) コンクリート形状や物性などに起因すると考えられる打撃音の卓越周波数は、実橋では2.5kHz前後、供試体では2.0kHz前後であった。コンクリートの損傷に影響を受けていると考えられる卓越周波数は、0~1.0kHz付近である。
- 3) 打音試験による打撃音を収録し、FFT解析により1.0kHz付近以下の低い周波数領域の特性を分析することにより、より効率的・客観的に損傷を判断できる可能性がある。

本研究によれば、今後の橋梁点検においては、打音検査の定量化とデータの蓄積、および損傷判断の継続性を確保できる可能性は高いと思われる。

熟練の技術、検査者の主観等に依存せざるを得ない打音検査において、「打音」そのものを数値化(見える化)できる可能性があることは、データ蓄積やその評価を行うに当たり大変意義のあることと考えている。

今後は、コンクリート形状や物性などに起因する固有周波数を明確にし、劣化部分における周波数特性を更に分析することとしたい。特に、以下について検討を行う。

- ・健全部でのキャリブレーション及びこの固有周波数の特定。
- ・打撃ハンマーの統一
- ・部材形状の把握等を行う。

謝辞：本論文の作成にあたり各種試験計測、データ解析等多くのご支援を賜りました、株式会社砂子組に心より感謝致します。

参考文献

- 1) 吉田宏彦，川上秀男：コンクリートの打音と強度との関係について，福井大学工学部研究報告，第6巻 第1・2号，1958
- 2) 浅野雅則，鎌田敏郎，六郷恵哲，遠藤友紀雄：コンクリート打撃音の周波数特性とその欠陥評価への適用，コンクリート工学年次論文集，Vol.24 No.1，2002
- 3) 一富哲也，玉井宏樹，園田佳巨：コンクリートの強度が打音特性と表面振動に与える影響に関する基礎的研究，土木学会西部支部研究発表会論文集，I-008，2010
- 4) 大曲正紘，園田佳巨，宗本理：劣化したコンクリート橋の回転式打音検査に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31No.1，2009
- 5) 歌川紀之，伴亨，北川真也：打音法における欠陥検知に関する一考察，土木学会第58回年次講演会講演集，2003
- 6) 土佐龍司，茂木良平：視覚障害者のための風音除去の方法の検討，秋田高等専門学校研究紀要，第46号，2010