

報告 打音法で得られたスペクトログラムによる道路橋 RC 床版内部の欠陥検出方法に関する基礎的検討

森本 亮*1・内田 慎哉*2・青沼 拓朗*3・長谷 啓司*4

要旨: 本研究では、コンクリートの内部に直径・深さの異なる複数の人工欠陥を埋設した RC 床版供試体を対象に、打音法による計測を行い、得られた波形をウェーブレット変換することでスペクトログラムを算出し、打撃応答特性の可視化により欠陥を非破壊で評価することを試みた。その結果、スペクトログラム上に出現するたわみ共振現象およびインパルス応答の違いから、コンクリート表層部にある直径 200mm 以上の欠陥を、非破壊で検出できることを明らかにした。

キーワード: 道路橋 RC 床版, 内部欠陥, 非破壊試験, 打音法, ウェーブレット変換, スペクトログラム

1. はじめに

高速道路の RC 床版では、舗装の打換工事の際、点検ハンマの打撃を人の耳で聴く打音検査により、コンクリート表層の引張鉄筋付近の水平ひび割れの有無を点検している。しかしながら、舗装の打換工事区間は極めて長く、打音検査による点検範囲も広大となり、多くの人手や時間が必要になる。加えて、打音検査は、検査員の経験に基づく定性的な点検手法のため、得られる結果も検査員により異なる。このような背景から、簡便かつ効率的な点検手法で、かつ誰が点検しても同じ結果になる手法の確立が喫緊の課題である。

このような背景に対して、鎌田ら¹⁾は、ハンマで打撃した際の打撃音をマイクロフォンで収集する打音法に着目し、コンクリート表層の欠陥を検出するには、打撃音の振幅や周波数特性に着目することが有効であることを示している。また、浅野ら²⁾は、打音法では欠陥上部のコンクリートの振動速度がある程度大きい場合に欠陥検出が可能となり、その場合の主たる振動はたわみ共振であることを、ウェーブレット解析により明らかにしている。さらに、橋本ら³⁾は、打撃音をウェーブレット変換して求めた画像（二値化画像）に対してパターン認識を適用し、打音検査では評価困難な深い位置にある欠陥の検出を試みている。

以上の研究成果を踏まえて、我々の研究グループは、簡便で定量的な評価が可能な打音法に着目し、ウェーブレット変換で得られる画像（スペクトログラム：時間一周波数のカラー画像）により、周波数スペクトルなどの信号処理に明るくない検査員でも、欠陥評価が可能なユーザーフレンドリーな点検手法の確立、さらに社会実装を想定してこれら技術を搭載した点検ロボットの開発を

目指している。

その最初のステップとして、本研究では、コンクリートの内部に直径・深さの異なる複数の人工欠陥を埋設した RC 床版供試体を対象に、打音法による計測を行い、得られた波形をウェーブレット変換することでスペクトログラムを算出し、打撃応答特性の可視化により欠陥を非破壊で評価することを試みた。

2. 実験概要

2.1 RC 床版供試体

写真-1 に 6 体の RC 床版供試体を示す。RC 床版供試体 1 体当たりの寸法は幅 2500mm×長さ 2000mm×厚さ 200mm で、これを 6 体並べて設置している。

コンクリートは、生コン工場で製造した呼び強度：27 を使用した。コンクリートの使用材料は、セメント：普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm³）、水：地下水、細骨材：庄川水系砂（表乾密度：2.59g/cm³、粗粒率：2.65）、粗骨材：庄川水系砂利（表乾密度：2.61g/cm³、実積率：64%）、混和剤：AE 減水剤標準型I種である。表-1 にコンクリートの配（調）合を示す。なお、フレッシュコンクリートの性状は、スランプ 15.0cm、空気量 4.5%であった。強度試験用の円柱供試体は、現場封緘養生を行い、材齢 28 日に JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」に基づき圧縮強度試験を実施した。その結果、圧縮強度は 39.0N/mm²であった。

人工欠陥の配置状況の例を写真-2 に示す。道路橋 RC 床版内部の水平ひび割れを模擬するため、厚さ 5mm の円形の発泡スチロールを用いた。人工欠陥の直径は、500, 400, 300, 250, 200, 150, 100 および 50mm の 8 種類とした。これらの人工欠陥を、コンクリート表面から 30mm、

*1 富山県立大学 工学部環境・社会基盤工学科（学生会員）

*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）

*3 富山県立大学大学院 工学研究科環境・社会基盤工学専攻（学生会員）

*4 日本道路株式会社 生産技術本部技術部

50mm および 80mm に設置して、RC 床版供試体を 3 体作製した。また、人工欠陥を埋設していない健全供試体も併せて作製した。これら 4 体の供試体には引張側のみ鉄筋を配置している。また、道路橋 RC 床版を模擬するため、引張側鉄筋に加えて、圧縮側に鉄筋を設けた供試体も 2 体作製した。これら供試体に埋設した人工欠陥の直径は前述のものと同じ 8 種類であり、埋設深さは 30mm および 50mm の 2 種類とした。

2.2 打音法による計測

打音法による計測状況を写真-3 に示す。弾性波の入力には加速度計を内蔵したハンマを用い、打撃音の受信にはマイクロフォンを使用した。図-1 に、打音法による計測と人工欠陥との位置関係の一例を示す。ハンマの打撃位置は、埋設された人工欠陥の中心の直上に相当するコンクリートの表面（打設面）である。一方、受信位置は、入力位置から半径方向に 30mm、その位置から垂直方向に 50mm 離れた箇所とした。このハンマ-マイクロフォンの位置関係は、全ての人工欠陥に共通しており、また健全部においても同様に計測した。

打撃により入力される弾性波の上限周波数は、工学的な観点から、以下の式⁴⁾で算出することができる。

$$f_{\max} = \frac{291}{D} \quad (1)$$

ここで、 f_{\max} ：入力される弾性波の上限周波数 (Hz)、 D ：鋼球直径 (m) である。実験で使用したハンマの打撃部の直径は 24.6mm のため、上限周波数は約 11.8kHz となる。

弾性波の受信には、0.007~20kHz の間でフラットな応答感度を有するマイクロフォンを使用した。受信した信号は、サンプリング時間間隔 1 μ s、サンプリング数 25000 個（計測時間長さ 25ms）でデジタル化した後、波形収集装置に電圧波形として記録した。また、入力で使用したハンマも波形収集装置に接続し、マイクロフォンと同じサンプリング時間間隔およびサンプリング数でデジタル化し、打撃波形（電圧）を記録した。

3. 実験結果および考察

3.1 受信波形

図-2 (a)に、健全部を対象に、加速度計を内蔵したハンマで打撃した際の打撃波形の例を示す。打撃そのものは非常に短い時間での衝撃であるため、打撃はインパルス入力となる。一方、マイクロフォンで受信した波形は、打撃力の違いにより打撃音、特に音圧が変動するため、打撃波形で正規化することにした。すなわち、マイクロフォンで収集した受信波形を打撃波形の最大振幅値（図-2 (a)参照）で除すことにより受信波形を正規化（正規化した受信波形）することにした。健全部における正規化した受信波形の例を図-2 (b)に示す。

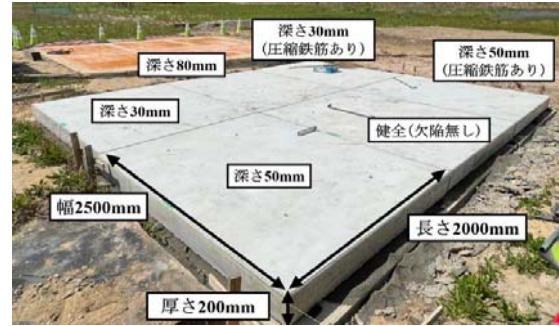


写真-1 RC床版供試体の概要

表-1 コンクリートの配(調)合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	A
54.0	45.1	162	300	816	1000	3.00

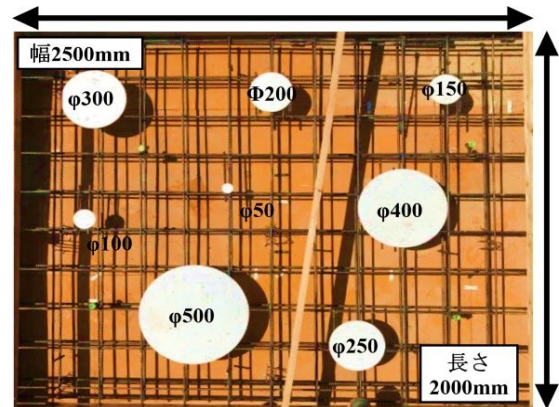


写真-2 人工欠陥の配置状況

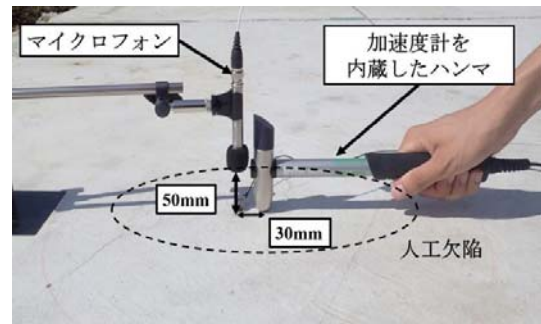


写真-3 打音法による計測状況

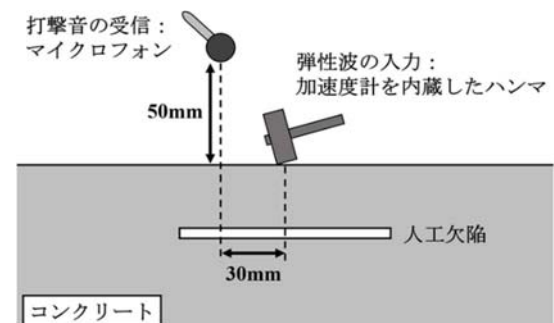


図-1 打音法による計測と人工欠陥との位置関係

図-3に、欠陥深さ 30 および 50mm で、欠陥直径 500, 250 および 50mm において正規化した受信波形を示す。図に示す欠陥直径 500 および 250mm で、欠陥深さ 30 および 50mm の波形はいずれも、周期的な波形になっていることが確認できる。これは、欠陥上部のコンクリートが打撃によりたわみ振動しているためである²⁾。続いて、波形の振幅に着目すると、欠陥深さが浅いほど、また直径が大きいほど、振幅の最大値が大きくなっていることがわかる。このような傾向は既往の研究¹⁾においても指摘されている。欠陥深さが浅くまた直径が大きくなると、欠陥上部のコンクリート部分のたわみ振動自体も大きくなる。その結果、欠陥表面とマイクロフォンとの間の空気層をより振動させることになり、マイクロフォンで受信した波形の振幅が大きくなったと考えられる。さらに、波形の減衰について考察する。たわみ振動が支配的になっている欠陥直径 500 および 250mm、欠陥深さ 30 および 50mm では、振幅と同様、欠陥深さが浅いほど、また欠陥直径が大きいほど、波形が減衰しにくくなっていることも確認できる。一方、図-3 に示す欠陥直径 50mm の波形は、図-2 (b)に示す健全部での波形と概ね同じ形状であった。これは、たわみ現象のような卓越した振動を収録したわけではなく、ハンマとコンクリートの打撃音を収録しているにすぎず、したがって振幅も小さく、減衰も極めて大きい波形になったと考えられる。

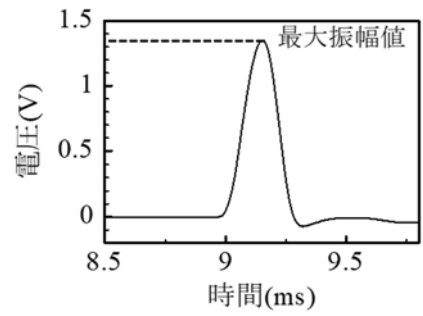
なお、紙面の都合で割愛したが、圧縮鉄筋がある場合の正規化した受信波形は、引張鉄筋のみがある場合のそれらと概ね同じ形状であった。

3.2 周波数スペクトル

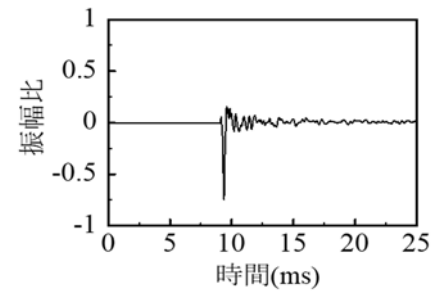
図-4 に健全部における周波数スペクトル、図-5 に欠陥部における周波数スペクトルの例をそれぞれ示す。いずれも、正規化した受信波形に対して、高速フーリエ変換 (FFT) することにより求めた周波数スペクトルである。図-4 より、打撃音には、主に 0~8kHz 程度の幅広い周波数成分を有しており、かつ成分は少ないものの 11kHz 程度までの周波数成分 (インパルス入力への応答) が含まれていることがわかった。これは、2.2 で示した入力される弾性波の上限周波数 (約 11.8kHz) と概ね一致している。

図-5 に示す欠陥直径 500 および 250mm で、欠陥深さ 30 および 50mm の周波数スペクトルでは、概ね単一の鋭いピークが出現している。これらのピークはいずれも、たわみ現象により生じた共振と考えられる。たわみ共振周波数の理論値は、JISA 1127「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法」を参考にすれば、次式から算出できる。

$$f = \sqrt{\frac{E_D b t^3}{9.47 \times 10^{-4} L^3 T m}} \quad (2)$$



(a) 打撃波形の例 (健全部)



(b) 正規化した受信波形の例 (健全部)

図-2 健全部における打撃波形および正規化した受信波形の例

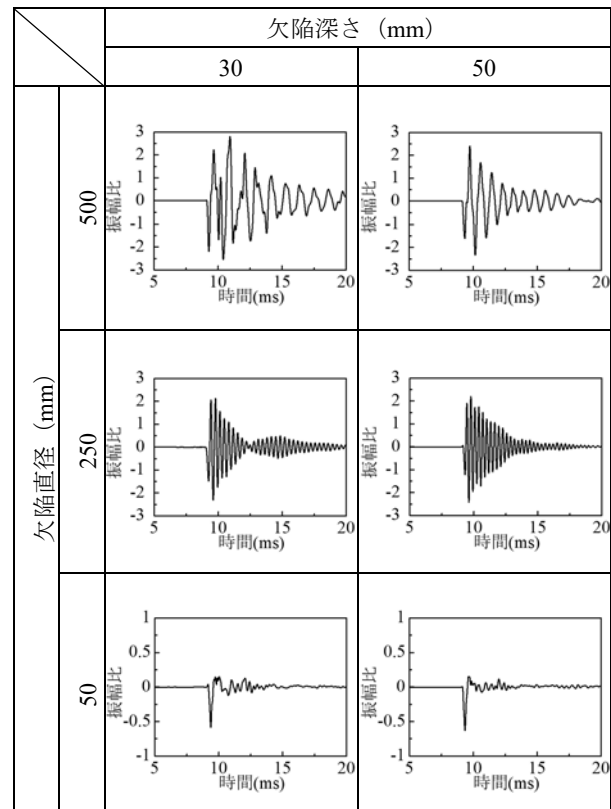


図-3 正規化した受信波形の例 (欠陥部)

ここで、 f : たわみ共振周波数 (Hz), E_D : 動弾性係数 (N/mm^2), b : 欠陥上部のコンクリートの直径 (欠陥直径) (mm), t : 欠陥上部のコンクリートの厚さ (mm), L : 欠陥上部のコンクリートの直径 ($=b$: 欠陥直径) (mm),

T : 修正係数, m : 供試体の質量 (kg) である。なお, 動弾性係数は, 弾性波伝搬速度, 密度およびポアソン比をそれぞれ 4000m/s, 2300kg/m³ および 0.2 と仮定して, 36.8GPa を得た。一方, 修正係数 T は, JISA 1127 を参考に, 回転半径 ($K=t/3.464$), L および動ポアソン比 ($\nu_D=0.2$) を用いて計算した。計算した理論上のたわみ共振周波数を, 図-5 中に赤矢印で示した。若干異なるものの理論値と実際のピーク周波数は概ね一致している。一方, 欠陥直径が 50mm の場合, 理論上のたわみ共振周波数は, 欠陥深さ 30mm で 27.8kHz, 深さ 50mm で 33.4kHz となる。欠陥直径が小さい場合, たわみ現象で生じる振動そのものが小さくなるため, 欠陥上部の空気を振動 (音響放出) させるのが極めて困難である。また, 入力される弾性波の周波数の上限値は工学上約 11.8kHz であり, 加えてマイクロフォンの感度 (0.007~20kHz) を考慮すると, たわみ共振を検出できる周波数の上限値は, 約 11.8kHz となる。したがって, 本実験で使用したハンマとマイクロフォンでは, 直径 50mm の欠陥を検出することは, 原理上, 不可能である。これより, 得られた周波数スペクトルの主な成分は, 健全部同様, たわみ現象ではなく, インパルス入力の応答 (インパルス応答) と考えられる。

なお, 圧縮鉄筋がある場合の周波数スペクトルは, 引張鉄筋のみがある場合のそれらと同様の傾向であった。

3.3 スペクトログラム

正規化した受信波形に対してウェーブレット変換することによりスペクトログラムを算出した。得られたスペクトログラムの特徴から, RC 床版内部の欠陥評価を試みた。ウェーブレット変換には, 連続ウェーブレット変換と離散ウェーブレット変換があるが, 本研究では連続ウェーブレット変換を用いた。式(3)に, 連続ウェーブレット変換⁵⁾を示す。

$$W_{\psi}[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (3)$$

ここで, $W_{\psi}[\]$: ウェーブレット ψ に基づくウェーブレット変換, $x(t)$: 正規化した受信波形, a : 伸長パラメータ (周期, 周波数に対応), b : 位置パラメータ (時間のシフト量に相当), $\psi_{a,b}$: マザーウェーブレット, $*$: 複素共役である。連続ウェーブレット変換では, 伸長および位置パラメータによりマザーウェーブレット $\psi_{a,b}^*(t)$ をスケールリング/シフトし, 正規化した受信波形 $x(t)$ と畳込み演算することで, この受信波形において任意の周波数がどの程度含まれているかを把握することができる。ハンマとマイクロフォンの特性から決定される周波数範囲内で伸長・位置パラメータを用いてスケールリング/シフトし, 繰り返して, 畳込み演算することで, 時間-周波数のカラー画像を求めた。なお, 本研究では, 時間軸上で畳

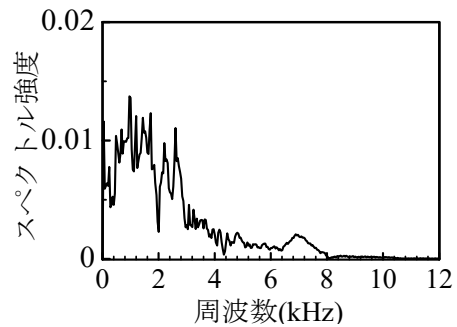


図-4 周波数スペクトルの例 (健全部)

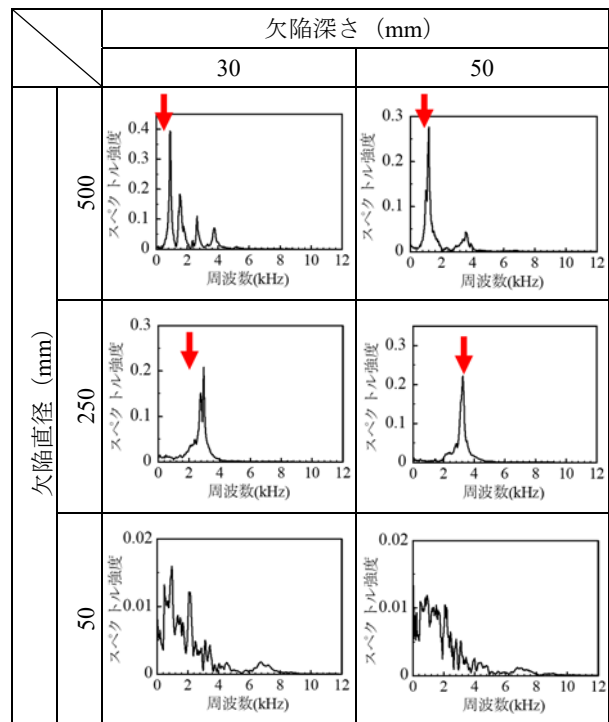


図-5 周波数スペクトルの例 (欠陥部)

込み演算をしているため, 得られた画像をスペクトログラムと呼ぶことにした。本研究で利用したマザーウェーブレットは, 次式に示す複素ウェーブレットである Morlet ウェーブレット⁵⁾を用いた。

$$\psi^*(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} e^{i\omega t} \quad (4)$$

ここで, σ : 包絡線の幅 (=1), ω : 複素サインの角周波数 (=6) である。

図-6 に, 健全部の正規化した受信波形 (図-2 (b)参照) に対してウェーブレット変換により求めたスペクトログラムを示す。スペクトログラムでは, 相関が最も高い領域を濃い赤で, 相関が最も低い領域を濃い青として, その間を図中の凡例に示すとおり段階的に色分けして示している。図より, スペクトログラム上では, 短い時間に周波数範囲の広い (1kHz~10kHz) 現象 (打撃音) であるインパルス応答を確認した。

図-7に、欠陥部の正規化した受信波形(図-3参照)に対してウェーブレット変換により求めたスペクトログラムを示す。図より、直径500および250mmで、欠陥深さ30および50mmのケースにおいて、たわみ現象と考えられる同一周波数で継続時間の長い現象(相関の高い領域が時間軸方向に伸びている現象)を確認した。しかも、概ね理論上のたわみ共振周波数と一致する領域で相関が高くなっていることもわかる。しかしながら、欠陥直径が250mmのケースでは、時間軸方向に伸びる現象をスペクトログラム上で明瞭に表現できていない。この理由については不明であるが、おそらく窓関数に使用した母関数であるMorletウェーブレットが一つの要因と考えられる。そのため、今後は、母関数の違いが結果に与える影響についても検討する予定である。一方、欠陥直径が50mmの場合、図-6に示す健全部のスペクトログラムと同様のインパルス応答を確認した。

図-8に、欠陥直径500mm、欠陥深さ30mmで、圧縮鉄筋がある場合のスペクトログラムを示す。このスペクトログラムと図-7に示す直径500mm、深さ30mmのそれを比較すると、画像としては大差のないことがわかる。このことから、圧縮鉄筋の有無にかかわらず、スペクトログラムによりコンクリート内部の欠陥を評価できることが明らかとなった。

3.4 検出可能な欠陥直径と深さとの関係

表-2に、検出可能な欠陥直径と深さとの関係を示す。ここでは、全ての人工欠陥に対して、3.2~3.3に示した欠陥検出方法に照らして判断した結果を示す。すなわち、表中の○印は、周波数スペクトルでたわみ共振現象によるピークが確認(例えば、図-5に示す欠陥直径500および250mmで、欠陥深さ30および50mmの周波数スペクトル)でき、かつスペクトログラムにおいてもその現象(相関の高い領域が時間軸方向に伸びている現象)を画像上で確認(例えば、図-8参照)できた人工欠陥である。一方、△印は、スペクトログラムでは健全部と同様にインパルス応答の画像(例えば、図-6参照)になったものの、周波数スペクトル上ではたわみ共振現象によるピークが出現したケースであり、周波数スペクトルを参考にすれば欠陥検出が可能である。これらに対して、一印は、理論上のたわみ共振周波数が、ハンマとマイクロフォンの特性から決定される周波数範囲外にあるケースで、本実験で使用したハンマとマイクロフォンでは、原理上、欠陥検出は不可能である。

以上より、スペクトログラムによる欠陥検出は、通常の打音法で利用されている周波数スペクトルよりも、検出性能は若干低下することが明らかとなった。しかしながら、使用するハンマの直径を小さくすることで、マイクロフォンの感度である20kHz程度までは検出可能な周

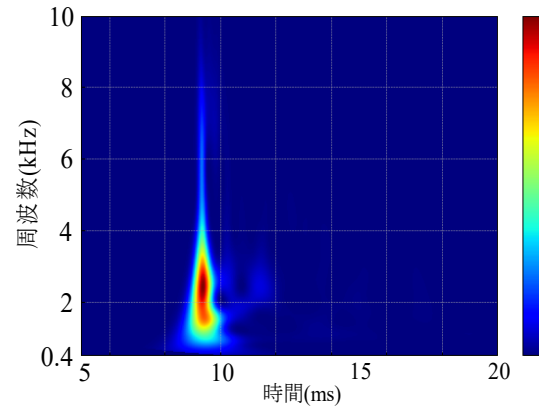


図-6 ウェーブレット変換により得られたスペクトログラム(健全部)

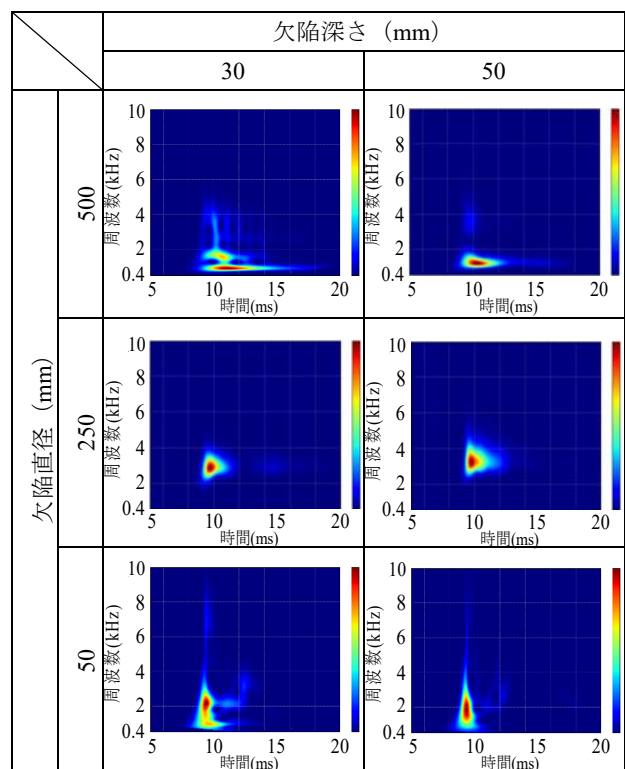


図-7 ウェーブレット変換により得られたスペクトログラム(欠陥部)

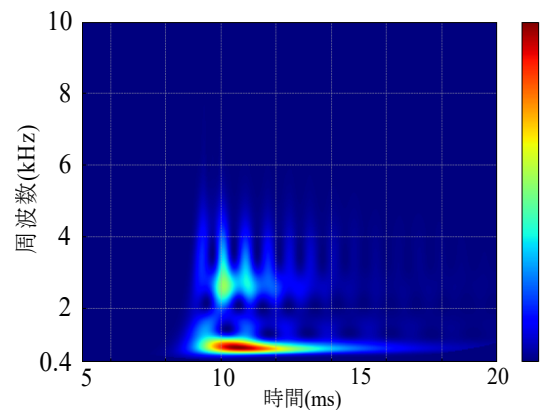


図-8 スペクトログラム(欠陥直径500mm, 深さ30mm, 圧縮鉄筋あり)

波数範囲を拡大することができ、かつ母関数の検討も併せて実施することで、直径 150mm の人工欠陥を、スペクトログラムで検出できると考えている。

表-2 検出可能な欠陥直径と深さとの関係

直径 (mm)	深さ (mm)				
	30	50	80	30 圧縮鉄筋あり	50 圧縮鉄筋あり
500	○	○	○	○	○
400	○	○	○	○	○
300	○	○	○	○	○
250	○	○	○	○	○
200	○	○	○	○	○
150	△	△	△	△	△
100	△	—	—	—	—
50	—	—	—	—	—

○：周波数スペクトル・スペクトログラムの両者で検出可能

△：周波数スペクトルのみで検出可能

—：ハンマとマイクロフォンの仕様から検出不可能

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) コンクリート内部欠陥上部の板状コンクリート部分のたわみ共振現象が、受信波形および周波数スペクトルに現れるケースがあった。理論上のたわみ共振周波数が、ハンマとマイクロフォンの特性から決定される周波数範囲内にある場合のみ、この共振現象を把握することができる。
- (2) たわみ共振現象を受信波形および周波数スペクトルで把握できた内部欠陥のうち、直径が 500, 400, 300, 250, 200mm で、深さが 30, 50, 80mm のケースのみ、

圧縮鉄筋の有無に関わらず、スペクトログラム上において、単一周波数で継続時間の長いたわみ共振現象が現れるのを確認した。

- (3) 直径 150mm 以下の全ての欠陥および欠陥が無い健全部の場合、打撃音の特性と考えられるインパルス応答(短い時間に周波数範囲の広い音)がスペクトログラム上に出現することがわかった。
- (4) 上記(2)および(3)より、打撃応答特性をスペクトログラムにより可視化することで、コンクリート表層部にある直径 200mm 以上の欠陥を非破壊で評価できることを明らかにした。

今後は、打撃ハンマによる打撃位置を欠陥の中心以外にも設定し、打撃位置の違いがスペクトログラムに与える影響について検討する予定である。また、本研究では、ユーザーフレンドリーな手法を目指すため、スペクトログラムの画像に対して畳み込みニューラルネットワークを適用し、欠陥と健全箇所自動分類を行うシステムの構築を目指している。

参考文献

- 1) 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撃法の適用, 土木学会論文集, No.704, V-55, pp.65-79, 2002.5
- 2) 浅野雅則, 鎌田敏郎, 国枝稔, 六郷恵哲: 打撃によるコンクリート部材の共振現象と打撃音の周波数特性, 土木学会論文集, No.760, V-63, pp.213-222, 2004.5
- 3) 橋本勝文, 塩谷智基, 川瀬良司, 佐光正和: ウェーブレット変換による打撃音スペクトル画像のパターン認識による欠陥評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1873-1878, 2017
- 4) Sansalone, M. and Streert, W. B.: *Impact Echo*, Bullbrier Press, Ithaca, N. Y., pp.159-166, 1997
- 5) 例えば, P. S. Addison, 新誠一, 中野和司監訳: 図説ウェーブレット変換ハンドブック, 朝倉書店, 2005