

打音法で得られたスペクトログラムに基づく道路橋 RC 床版の内部欠陥の非破壊探査手法

富山県立大学 学生会員 ○青沼 拓朗, 正会員 内田 慎哉, 非会員 森本 亮
日本道路株式会社 非会員 長谷 啓司

1. はじめに

道路橋 RC 床版では、舗装の打換工事に伴い、ハンマの打撃音を点検者の耳で聞き分ける打音検査により、コンクリート表層の圧縮側鉄筋付近に発生している水平ひび割れを検出している。しかしながら、経験に基づく手法のため、点検者により得られる結果が異なる。そのため、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。

そこで本研究では、コンクリート内部に直径・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 体並べて設置した。

人工欠陥の配置状況の例を写真 2 に示す。水平ひび割れを模擬した人工欠陥は、厚さ 5mm の円形の発泡スチロールを用いて作製した。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 30, 50 および 80mm に設置した供試体を 3 体作製した。また、人工欠陥を埋設していない健全な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。なお、道路橋 RC 床版を模擬するため、引張鉄筋に加えて、圧縮鉄筋も設置した供試体も 2 体作製した。これら 2 体の供試体に埋設した人工欠陥の直径は前述のものと同一であり、埋設深さは 30 および 50mm の 2 種類に設定した。

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。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表面とした。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 離れた箇所に設定した。この位置関係は全ての人工欠陥に共通している。なお、健全部においては、代表的な 1 箇所において、同様に計測した。

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条件でデジタル化した後、打撃波形を記録した。

3. 実験結果および考察

3. 1 受信波形

マイクロフォンでは、打撃力の違いにより受信する打撃音の変動するため、受信波形をハンマで得られる打撃波形の最大振幅値で除すことで正規化した。

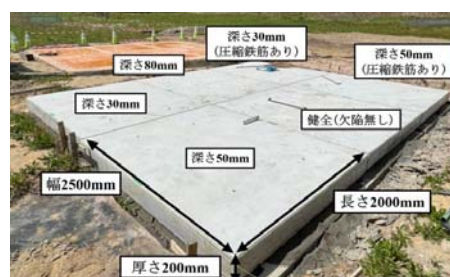


写真 1 RC 床版供試体の概要

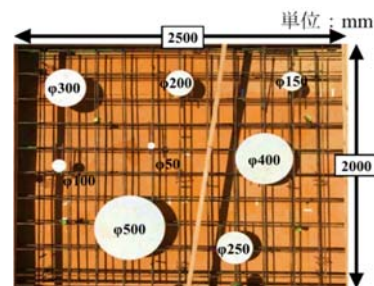


写真 2 人工欠陥の配置状況

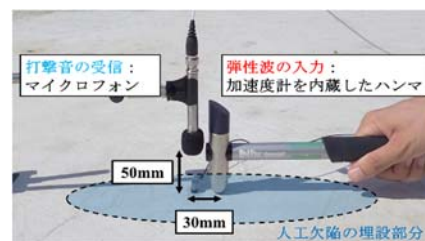


写真 3 打音法による計測状況

キーワード 道路橋 RC 床版, 水平ひび割れ, 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

連絡先 〒939-0398 富山県射水市黒河 5180 富山県立大学 工学部 環境・社会基盤工学科 TEL0766-56-7500

健全部および欠陥深さ 30mm, 欠陥直径 500mm の受信波形を図 1 に示す。健全部の波形は、振幅が小さく減衰の大きい波形になっている。ハンマによる打撃は、非常に短い時間であるため、幅広い周波数成分を含むインパルス応答になる。一方、欠陥深さ 30mm, 欠陥直径 500mm の波形は、周期的で減衰しにくく、振幅の最大値が大きい。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¹⁾。

3. 2 周波数スペクトル

図 1 の受信波形に対して、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を図 2 に示す。健全部の周波数スペクトルは、0~8kHz 程度の幅広い周波数成分を有している

ことがわかる。一方、欠陥部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。このピークは、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、JIS A 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。

$$f = \sqrt{\frac{E_D b t^3}{9.47 \times 10^{-4} L^3 T' m}} \quad (1)$$

ここで、 f : たわみ共振周波数 (Hz), E_D : 動弾性係数 (N/mm²), 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。計算により求めた理論上のたわみ共振周波数を、図 2 中に赤矢印で示した。図上のピークと若干異なるものの、理論値と概ね一致している。

3. 3 スペクトログラム

受信波形に対して連続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。次式に定義²⁾を示す。

$$W_\psi[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (2)$$

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, $x(t)$: 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。

本研究では、受信波形 (図 1 参照) に対して、時間軸上で畳込み演算を行った。ウェーブレット変換により得られたスペクトログラムを図 3 に示す。スペクトログラムでは、相関が最も高い領域を濃い赤、低い領域を濃い青として図中の凡例に示すとおり段階的に色分けしている。図中に示す健全部のスペクトログラムでは、短い時間で幅広い周波数を含み、相関の高い領域が縦に延びる現象 (インパルス応答) を確認した。一方、欠陥深さ 30mm, 欠陥直径 500mm のスペクトログラムでは、たわみ現象と考えられる同一周波数で相関の高い領域が時間軸方向に延びる現象を確認した。しかも、理論上のたわみ共振周波数と相関の高い領域は、概ね一致している。

4. まとめ

打撃応答特性をスペクトログラムにより可視化した結果、圧縮鉄筋の有無に問わず、コンクリート表層の人工欠陥を非破壊で評価できることがわかった。紙面の都合で割愛したが、検出可能な人工欠陥は、本研究の範囲内では、深さ 30~80mm, 直径 200~500mm である。

参考文献

- 1) 例えば、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, 土木学会論文集, No.704, V-55, pp.65-79, 2002.5
- 2) 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

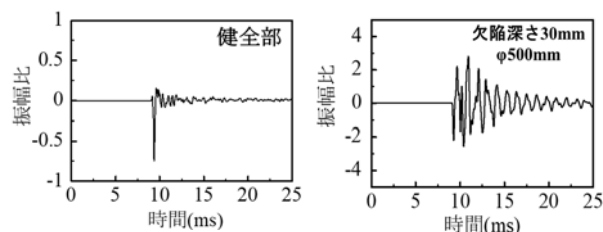


図 1 受信波形の例

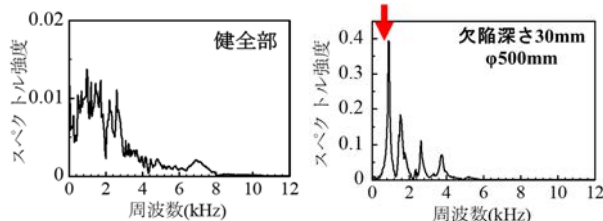


図 2 周波数スペクトルの例

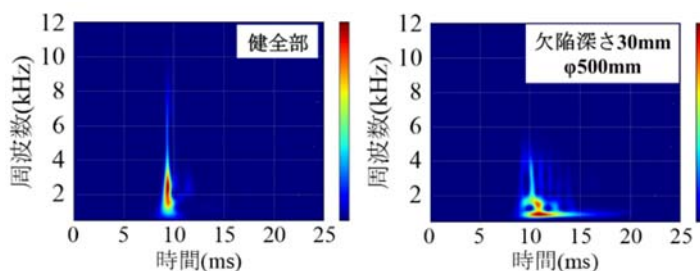


図 3 スペクトログラムの例