

論文 周波数スペクトルのパターン認識を援用した衝撃弾性波法による道路橋 RC 床版の水平ひび割れの検出方法の改善

前 裕史*1・鎌田 敏郎*2・内田 慎哉*3・中山 和也*4

要旨：本研究では、アスファルト舗装および内部に水平ひび割れを人工的に模擬した RC 供試体を作製し、舗装面から衝撃弾性波法による計測を行い、得られた周波数スペクトルおよびそのパターン認識を援用した水平ひび割れの評価手法についての検討を行った。その結果、周波数スペクトルのピークからは判別することが困難な供試体厚さに近い位置にある人工欠陥を、周波数スペクトルのパターン認識を行うことにより、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, アスファルト舗装, 水平ひび割れ, 衝撃弾性波法, パターン認識

1. はじめに

現在、著者らは、供用中の道路橋 RC 床版の表面からは確認できない床版内部に発生する水平ひび割れ（図-1 参照）を、アスファルト舗装面から衝撃弾性波法により現地で効率よく検知する方法に関する研究を行っている。これまでに、水平ひび割れを人工的に模擬した RC 供試体を作製し、衝撃弾性波法による水平ひび割れの評価を行い、評価可能な水平ひび割れの大きさや深さに関する検討を行ってきた。その結果、衝撃弾性波法により測定された周波数スペクトルのピークの有無を判定基準にすれば、人工欠陥をおおよそ検知できることを明らかにした¹⁾。

供用中の道路橋 RC 床版を想定した場合、特に、床版下面からの検査用足場の設置が困難な床版に対しては、床版上面から水平ひび割れを評価する必要がある。このような条件下においては、前述の著者らの研究¹⁾を参考にすれば、供試体厚さに近い位置にある人工欠陥と欠陥が無い場合との判別は難しいことが示唆されている。

そこで、本研究では、この問題点を改善するため、アスファルト舗装および内部に水平ひび割れを人工的に模擬した RC 供試体を作製し、舗装面から衝撃弾性波法による計測を行い、得られた周波数スペクトルおよびそのパターン認識を援用した水平ひび割れの評価手法についての検討を行った。

2. 衝撃弾性波法によるアスファルト舗装面からの水平ひび割れの評価原理

衝撃弾性波法による RC 床版の内部に発生する水平ひび割れの検出原理を図-2 に示す。この手法は、鋼球を用いて床版表面を打撃することにより床版内部に弾性波を伝播させ、床版表面と底面での多重反射、あるいは

増厚界面の水平ひび割れ

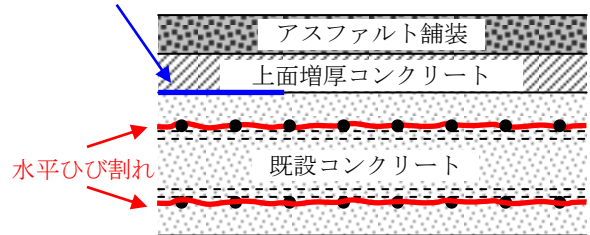


図-1 道路橋 RC 床版の水平ひび割れ発生位置

床版表面と水平ひび割れで多重反射する波を、表面に設置したセンサにより受信し、この受信波をスペクトル解析することにより得られるピーク周波数（図-2 中の f_T および f_d ）に基づき、供試体の厚さ： T や水平ひび割れまでの深さ： d を推定する手法である。そのため、この手法では、供試体の厚さやひび割れに起因するピーク周波数を如何にして卓越させ、またそれを如何にして抽出するかが問題となる。

本実験で使用した供試体は、図-1 に示すとおり、アスファルト舗装、上面増厚コンクリートおよび既設コンクリートから構成される道路橋 RC 床版を模擬したものである（詳細は、3.1 参照）。アスファルトの伝播速度は、コンクリートのそれよりも小さい。そのため、対象とした供試体は、速度の異なる 2 層材料として考える必要がある。この条件下における厚さあるいはひび割れに相当する理論上のピーク周波数（以降、縦波共振周波数と呼ぶ）は、次式²⁾により算出することができる。

$$f_T = \frac{1}{\frac{2T_1}{C_{p1}} + \frac{2T_2}{C_{p2}}} \quad (1)$$

*1 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (正会員)

*2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻教授 博士(工学) (正会員)

*3 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻(日本学術振興会 特別研究員 PD) 博士(工学) (正会員)

*4 大阪大学 工学部地球総合工学科 (正会員)

$$f_d = \frac{1}{\frac{2T_1}{C_{p1}} + \frac{2(d-T_1)}{C_{p2}}} \quad (2)$$

ここで、 f_T ：供試体厚さに相当する縦波共振周波数、 f_d ：水平ひび割れに相当する縦波共振周波数、 C_{p1} ：アスファルトの伝播速度、 C_{p2} ：上面増厚コンクリートおよび既設コンクリートの伝播速度（ここでは両者を同等とみなすこととした）、 T_1 ：アスファルト舗装の厚さ、 T_2 ：上面増厚と既設コンクリート部分の厚さ、 d ：水平ひび割れまでの深さである。

3. 実験概要

3.1 供試体

供試体概要を図-3に示す。本研究において対象とした道路橋 RC 床版は、図-1に示すとおり、既設コンクリートの上面に増厚補強を行い、その上にアスファルト舗装を施した床版である。この道路橋 RC 床版を模擬した供試体を作製するにあたっては、(財)高速道路調査会 上面増厚工法 設計施工マニュアル³⁾を参考にした。すなわち、まず、既設コンクリートの厚さは 180mm として、普通コンクリートを打設した。その後、打設面側のコンクリート表面をチップング処理し、厚さ 50mm で鋼繊維補強コンクリートによる上面増厚を行った。さらに、増厚上面にアスファルト舗装を 50mm で施工した。したがって、供試体の全厚は、280mm である。なお、供試体の長さおよび幅は、側面からの反射波の影響を極力小さくするため、長さを 1800mm、幅を 1800mm と十分に大きくした。

供試体の内部には、水平ひび割れを模擬するため、厚さ 6mm かつ直径が 200、250 および 400mm の 3 種類の円形の発泡スチロールを人工欠陥として設置した。人工欠陥の位置は、供用中の道路橋 RC 床版で発生する水平ひび割れの位置（図-1 参照）を考慮して、深さに 3 つのバリエーションを設けた。すなわち、上面増厚界面、既設床版内部の上縁側および下縁側の鉄筋に対応する位置に、人工欠陥をそれぞれ設置した。人工欠陥の配置状況を図-3に示す。また、人工欠陥の直径と深さの対応関係を表-1に示す。

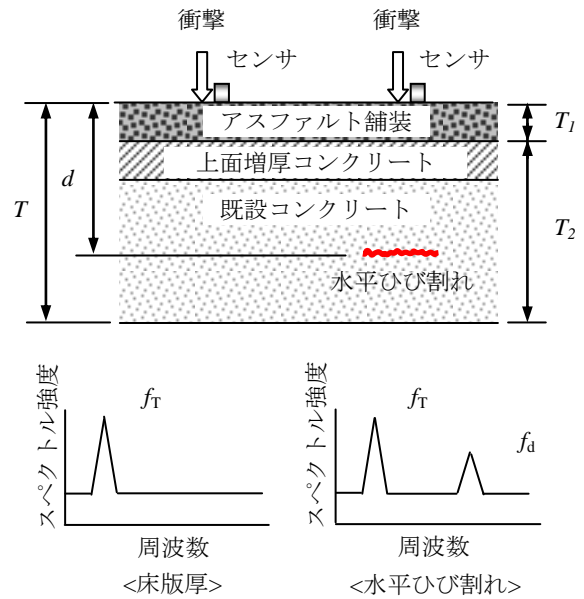


図-2 衝撃弾性波法による水平ひび割れの評価原理

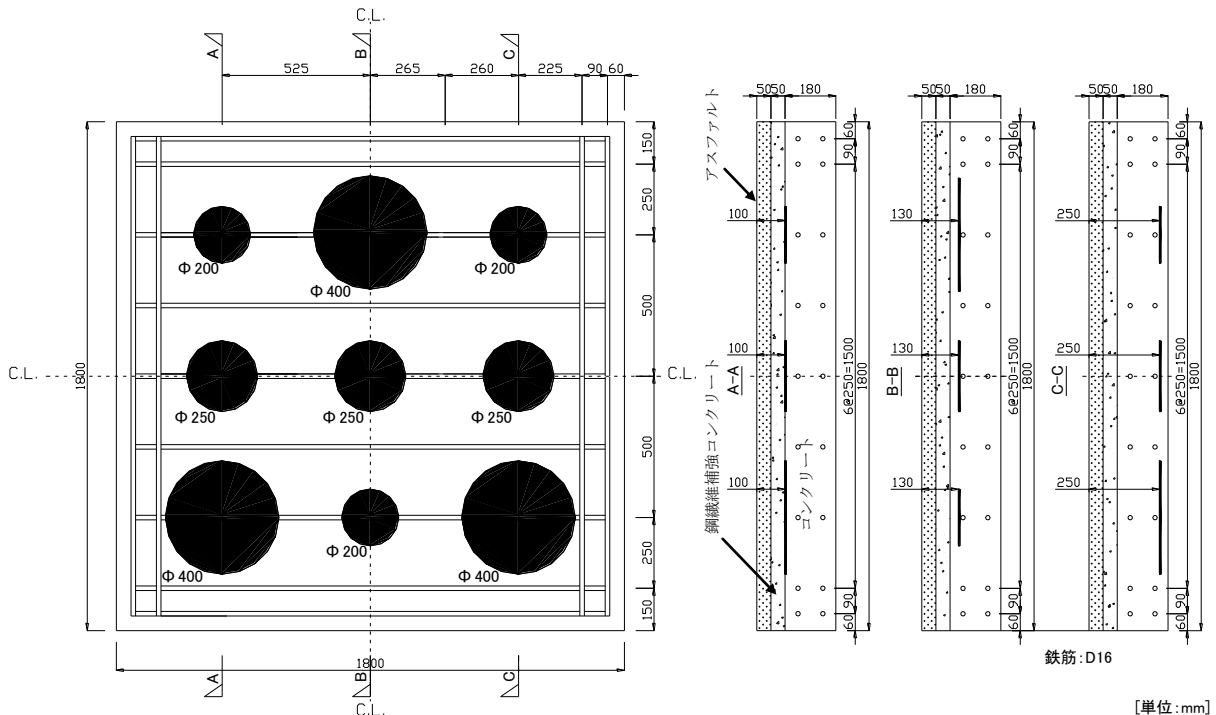


図-3 供試体概要

3.2 衝撃弾性波法による計測

衝撃弾性波法の計測状況を写真-1に示す。弾性波の入力および受信位置は、いずれの供試体においても、人工欠陥の上のアスファルト表面で行った。なお、弾性波の入力位置と受信位置との距離は50mmとした。弾性波の入力には直径6.4mmの鋼球を用いた。一方、弾性波の受信には、0.003~30kHzの間でフラットな応答感度を有する加速度センサを使用した。センサで受信した信号は、サンプリング時間1μs、サンプリング数10000個のデジタル波形として波形収集装置に記録した。記録した波形に対して、高速フーリエ変換(FFT)を行い、周波数スペクトルを求め、波形収集装置に波形とともに記録した。

普通コンクリートおよび鋼繊維補強コンクリートの伝播速度は、アスファルトを施工する前(鋼繊維補強コンクリートによる上面増厚を実施した段階)に、鋼繊維補強コンクリート表面において、前述の衝撃弾性波法による計測から求めることとした。周波数スペクトル上におけるピーク周波数と供試体の厚さが既知であれば、伝播速度は、次式から推定することが可能である。

$$C_p = 2 \cdot f' \cdot T' \quad (3)$$

ここで、 f' ：周波数スペクトル上のピーク周波数、 T' ：普通コンクリートと鋼繊維補強コンクリートの厚さ(230mm)。複数箇所での計測から得られた伝播速度を平均して、普通コンクリートおよび鋼繊維補強コンクリートの伝播速度は、3902m/sとした。一方、アスファルトの伝播速度は、アスファルト舗装の表面に探触子を2つ設置して、超音波法に基づき算出した。複数箇所での計測を行い、その平均値を求めた結果、2730m/sとなった。この値は、既往の研究成果²⁾で示されているアスファルトの伝播速度(2800m/s)とほぼ同じ値であったため、本研究におけるアスファルトの伝播速度は、測定結果である2730m/sを採用することとした。

4. 結果および考察

4.1 周波数スペクトルの特徴

図-4に人工欠陥が無い場合の周波数スペクトルを、図-5に欠陥ありの周波数スペクトルをそれぞれ示す。図-4に示す2つの周波数スペクトルは、異なる2箇所での測定したものである。なお、いずれの図中にも、供試体の厚さに相当する縦波共振周波数： f_T を矢印、人工欠陥に相当する縦波共振周波数： f_d を破線でそれぞれ示している。図-4の欠陥が無い場合の周波数スペクトルでは、 f_T とほぼ同じ位置に明瞭なピークが見られる。したがって、このピークは供試体表面と底面との間の多重反射によるものであることが確認された。一方、欠陥がある場合では、欠陥深さ100および130mmの周波数スペ

クトル上に、 f_T 位置の近傍にピークが確認できる。さらに、このピークに加えて、 f_d に近い位置においても、明瞭なピークが卓越している(図-5参照)。したがって、これらのケースでは、周波数スペクトル上におけるピーク周波数の有無およびその位置を判断基準とすれば、人工欠陥を評価することは可能である。なお、欠陥直径250mmの周波数スペクトル上のピークと理論上の縦波共振周波数： f_T が若干異なっている。両者の値が異なる理由としては、深さ方向における伝播速度のばらつき、人工欠陥の設置誤差など、複数の影響が考えられる。続いて、欠陥深さ250mmの周波数スペクトルでは、深さ100および130mmと同様に、 f_d に近い位置にピークが生成されている。しかしながら、これらの周波数スペクトルは、人工欠陥が無い場合の周波数スペクトル(図-4)と比較すると、ピークの位置はほとんど同じである。したがって、供試体の厚さに近い位置に欠陥が存在する場合は、ピークの値のみを頼りに欠陥を検出することは

表-1 人工欠陥の直径と深さとの関係

| 直径 (mm) | 深さ (mm) | | |
|------------|---------|-----|-----|
| | 100 | 130 | 250 |
| 50 | ● | — | — |
| 100 | ● | — | — |
| 200 | ● | ● | ● |
| 250 | ● | ● | ● |
| 400 | ● | ● | ● |

—：欠陥未設置、●：欠陥設置

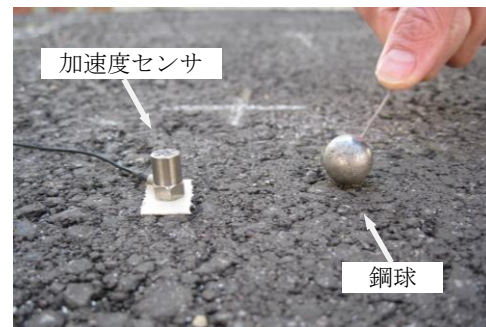


写真-1 衝撃弾性波法の計測状況

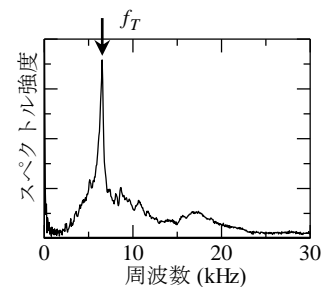


図-4 欠陥が無い位置で計測された周波数スペクトルの一例

困難であることが明らかとなった。

4.2 パターン認識による手法の改善

(1) パターン認識の原理

ここでは、前節の問題点を改善するため、周波数スペクトルのパターン認識⁴⁾により、深さが250mmに設置されている人工欠陥を評価することを試みた。以下にその手順を示す。人工欠陥が設置されていない個所での周波数スペクトルをベクトル X とする。一方、欠陥深さ250mmの周波数スペクトルをベクトル Y とする。図-6に示すように、要素数を N とした場合のベクトル X および Y の成分は、次式のとおりとなる。

$$X_N = \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_{n-2}, x_{n-1}\} \quad (4)$$

$$Y_N = \{y_0, y_1, y_2, \dots, y_{n-2}, y_{n-1}\} \quad (5)$$

なお、本研究では、加速度センサの応答感度を考慮し、周波数スペクトルにおける成分は、0~30kHzとし、要素数： N を8192とした。

本研究におけるパターン認識では、ユークリッド距離を活用することとした。ユークリッド距離は、2つの周波数スペクトルの類似性を数値として表現するための、2次元ユークリッド空間上での2点間距離である。その値が小さくなるに従い、周波数スペクトルどうしの類似性が高くなる。ユークリッド距離は、以下の式(6)より算出した。

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (6)$$

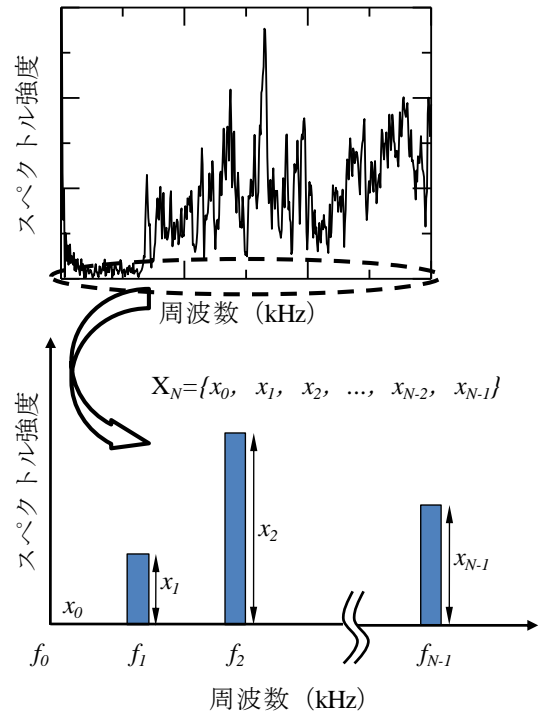


図-6 パターン認識の概要

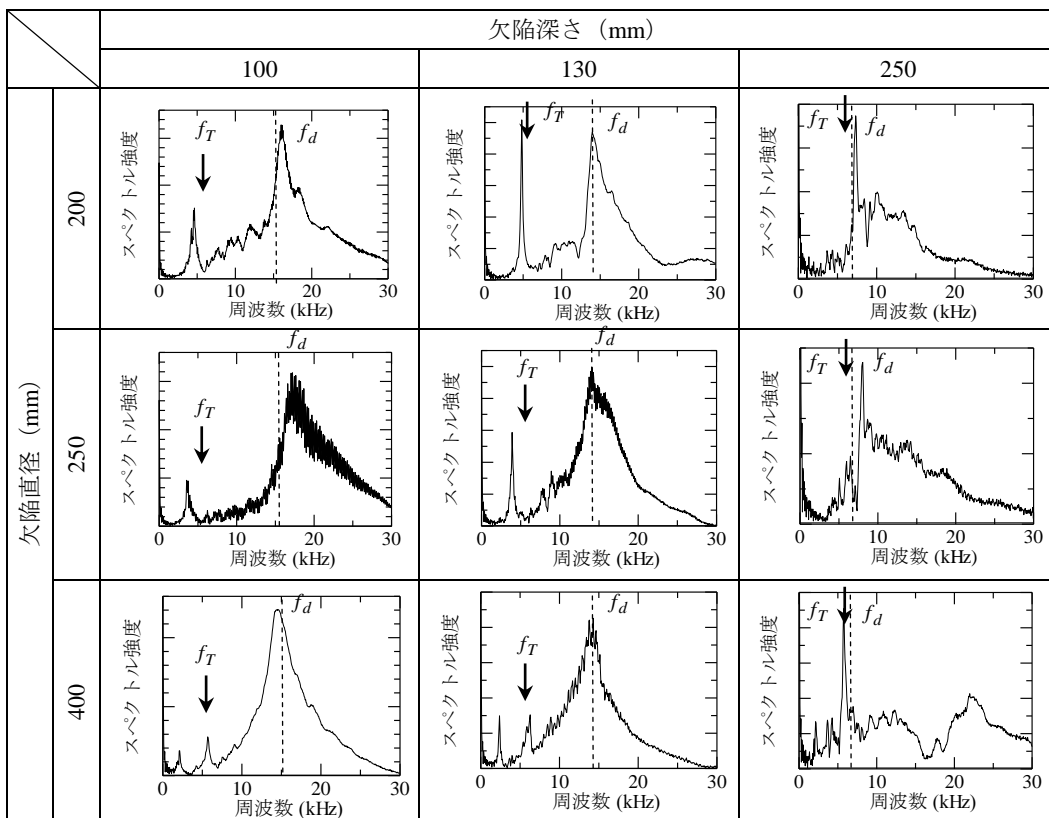


図-5 欠陥がある位置で計測された周波数スペクトル

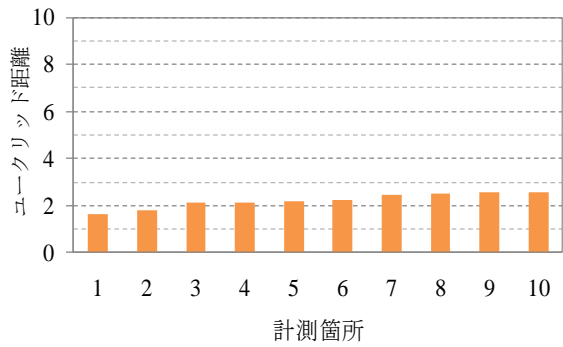


図-7 欠陥が無い位置で計測された周波数スペクトルのユークリッド距離

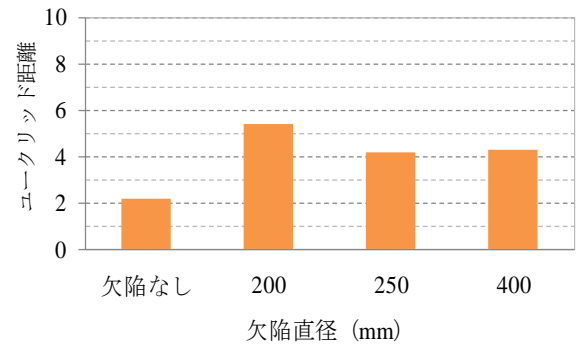


図-8 欠陥がある位置で計測された周波数スペクトルのユークリッド距離 (欠陥深さ 250mm)

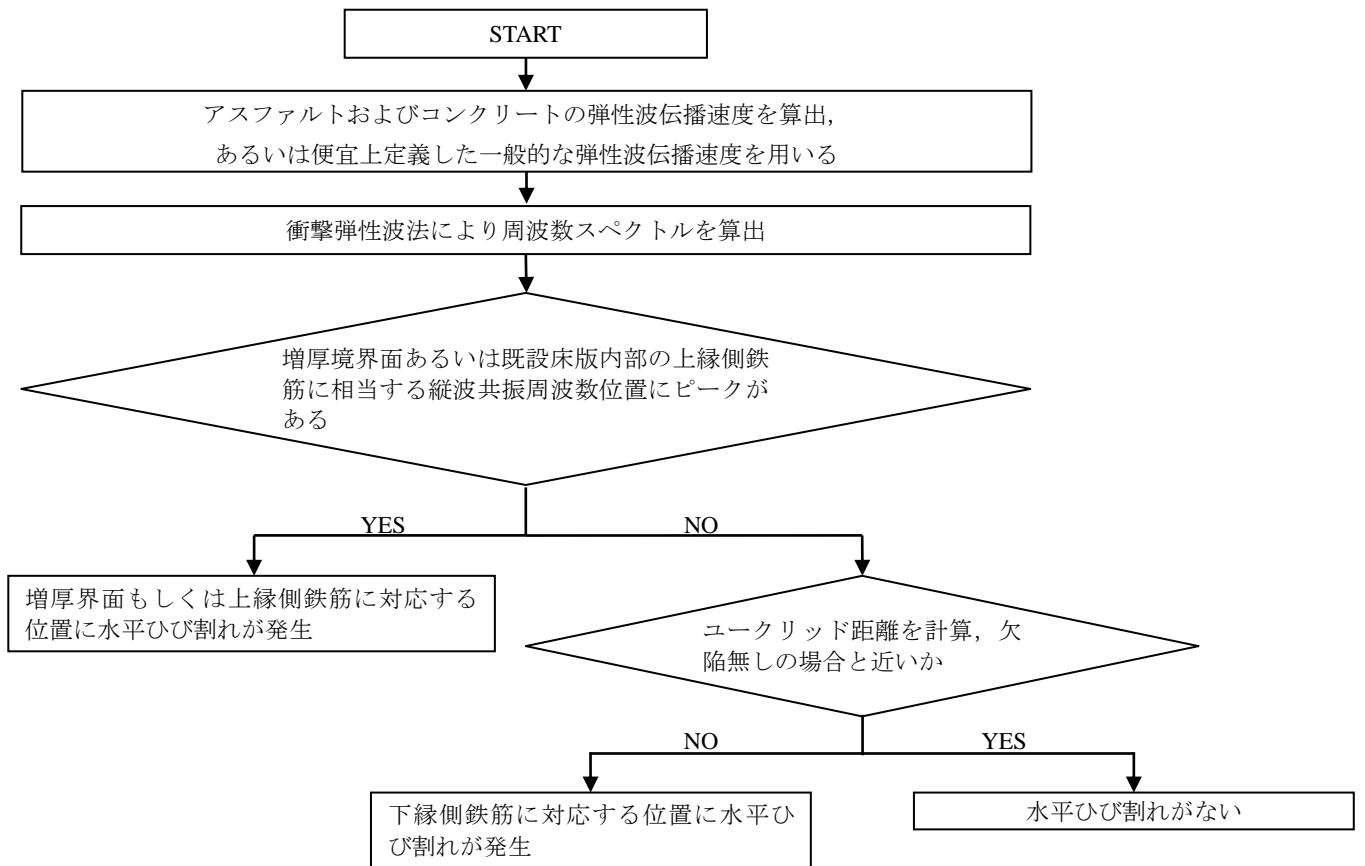


図-9 周波数スペクトルおよびそのパターン認識を援用した水平ひび割れの評価手法の提言

ここで、 D : ユークリッド距離, x_i および y_i : i 番目の周波数におけるスペクトル強度 ($i=1,2,3,\dots,N$) である。

(2) パターン認識による評価

人工欠陥が無い箇所で測定された周波数スペクトルの分布形状のばらつきを把握することを目的に、以下に示す手順に従って、衝撃弾性波法による測定を実施した。まず、欠陥が設置されていない任意の 11 箇所測定を行い、周波数スペクトルをそれぞれ算出した。なお、入力した弾性波の波長と鉄筋径の大小関係から、鉄筋の有無による影響は小さいと考えられる。一例を図-4 に示す。続いて、得られた周波数スペクトル

の中から、無作為に 1 つを選択し、これを欠陥が無い場合の「ユークリッド距離を求める基準に用いたスペクトル (参照スペクトル)」とした。その後、この周波数スペクトルとその他の 10 箇所測定された周波数スペクトルから、ユークリッド距離を算出した。図-7 に算出したユークリッド距離をそれぞれ示す。いずれの場合においても、ユークリッド距離は 1.65~2.55 に分布していることがわかる。さらに、欠陥が無い同士の周波数スペクトルのユークリッド距離の値はいずれも小さいことから、類似性は高いことがわかる。

図-8 に、人工欠陥が無い場合の周波数スペクトル (図

ー4) に対する欠陥深さ 250mm で欠陥直径 200, 250 および 400mm のユークリッド距離をそれぞれ示す。人工欠陥がある場合のユークリッド距離は、欠陥直径によらず、欠陥が無い場合のそれと比較して大きい。しかも、その差は、およそ2倍以上異なることも確認できる。このように、パターン認識を用いることにより、周波数スペクトル上のピークからは検知することが困難なケース、すなわち、供試体厚さに近い位置にある人工欠陥を評価することが可能である。ただし、周波数スペクトルのパターン認識では、同一深さにある欠陥直径の差違を識別することは困難である。

5. 周波数スペクトルおよびそのパターン認識を援用した水平ひび割れの評価手法の提言

前章までの検討結果を踏まえて、本研究では、周波数スペクトルおよびそのパターン認識を援用した衝撃弾性波法による道路橋 RC 床版の水平ひび割れの検出方法について提言する。そのフローチャートを図-9 に示す。ここでは、まず、対象となる検査範囲を衝撃弾性波法により測定する。得られた周波数スペクトル上に対して、水平ひび割れに相当する理論上の縦波共振周波数の位置におけるピークの有無を確認する。なお、水平ひび割れに相当する縦波共振周波数は、衝撃弾性波法による計測前に算出することが可能である（この際、コンクリートおよびアスファルトの弾性波伝播速度が既知であることが条件となる）。道路橋 RC 床版の場合、アスファルト、上面増厚コンクリートおよび既設コンクリートそれぞれの厚さが既知である場合がほとんどである。しかも、これらの床版を構成する各層の厚さから、水平ひび割れが発生する深さも、増厚界面あるいは既設コンクリート内の鉄筋周辺に限定することができる。したがって、周波数スペクトル上のピークから増厚界面および既設コンクリート内部の上縁側鉄筋に発生する水平ひび割れは検知することが可能である。続いて、欠陥検出が困難と判定した周波数スペクトルに対して、パターン認識を行う。その際は、例えば、解析により得られた水平ひび割れが無い場合の周波数スペクトル、または、水平ひび割れが発生していない床版での周波数スペクトルを使用して、ユークリッド距離を求める必要がある。これにより、下縁側鉄筋に発生する水平ひび割れを検知できる可能性

がある。ただし、水平ひび割れが発生していない周波数スペクトルを如何にして求めるかについては、今後の検討課題である。

6. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 一般的な道路橋 RC 床版における水平ひび割れの検出方法として、アスファルト舗装面から衝撃弾性波を適用し、得られた周波数スペクトルにおいて欠陥を含まない場合のスペクトルを比較の対象としたパターン認識を援用する新しい非破壊評価手法を提案した。
- (2) 本研究で提案する手法によれば、アスファルト舗装面から衝撃を入力する条件下では周波数スペクトルにおけるピークの出現状況の確認のみでは検出が困難であった既設コンクリートの下縁側鉄筋位置に発生する水平ひび割れについても、評価が可能であることが明らかとなった。

謝辞

本研究は、国土交通省委託研究事業 新道路技術会議 技術研究開発プロジェクト「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」の援助を受けて行ったものである。ここに記して謝意を表します。また、衝撃弾性波法の計測およびデータ整理にあたっては、大阪大学大学院 社会基盤設計学領域の山本健太君にご協力を頂きました。

参考文献

- 1) たとえば、内田慎哉、鎌田敏郎ほか：道路橋鉄筋コンクリート床版の水平ひび割れの検出における弾性波法の適用、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、Vol.8, pp.27-34, 2008
- 2) Sansalone, M. and Streett, W. B. : Impact Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., pp.29-254, 1997
- 3) 財団法人 高速道路調査会：上面増厚工法 設計施工マニュアル, pp.10, 1995.11
- 4) たとえば、安居院猛、長尾智晴：画像の処理と認識、昭晃堂, pp.99-114, 2000