

論文 衝撃弾性波法による道路橋 RC 床版の水平ひび割れの評価手法に関する基礎的研究

中山 和也*1・鎌田 敏郎*2・内田 慎哉*3・大西 弘志*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 床版供試体を作製し、舗装面から衝撃弾性波法による水平ひび割れの評価を行い、弾性波の入力方法ならびに評価における手法の適用性に関する検討を行った。その結果、一般的な道路橋 RC 床版の厚さや水平ひび割れの発生位置（深さ）を想定した供試体においてアスファルト舗装面から衝撃弾性波法を実施し、人工欠陥が十分に検出可能であることが明らかとなった。また、道路橋 RC 床版における水平ひび割れの評価に限定すれば、衝撃弾性波法で使用する最適な鋼球直径を一義的に決定することが可能であることもわかった。

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, 周波数スペクトル

1. はじめに

近年、道路橋 RC 床版において、図-1 に示す上面増厚コンクリート界面および既設コンクリート内部の鉄筋位置において、水平状のひび割れが発生する損傷事例が顕在化している¹⁾。このような水平ひび割れの発生や進展は、床版の外観目視からは判断することが極めて困難である。そのため、非破壊により水平ひび割れを評価する手法の確立が望まれている。

このような背景から、著者らは、表面からは確認できない床版の内部に発生する水平ひび割れ（図-1 参照）を人工的に模擬した供試体を作製し、衝撃弾性波法、超音波法および Electro Magnetic Hammer Method の3つの異なる弾性波法による水平ひび割れの評価を行い、評価における各手法の適用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いる。その結果、水平ひび割れを検出できる守備範囲が最も大きい手法は、衝撃弾性波法であることを明らかにしている。さらに、アスファルト舗装や防水層を設けた供試体を作製し、これらの存在が衝撃弾性波法による床版厚さの推定に与える影響についての検討も併せて行っている。実験の結果、厚さ推定における防水層やアスファルト舗装の影響は極めて小さいことを明らかにした²⁾。しかしながら、アスファルト舗装がある場合における、水平ひび割れの評価に対する衝撃弾性波法の適用性については未だ十分に把握できていなかった。供用中の道路橋 RC 床版、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、アスファルト舗装面から水平ひび割れを評価する方法を確立することは極めて有意義と考えられる。

そこで、本研究では、アスファルト舗装および内部に

増厚界面の水平ひび割れ

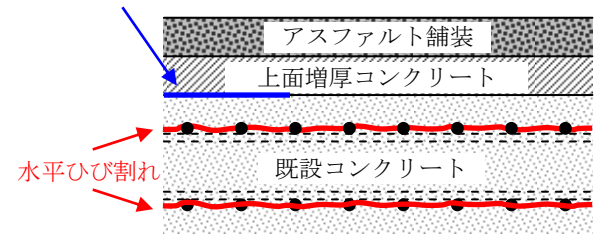


図-1 道路橋 RC 床版の水平ひび割れ発生位置

水平ひび割れを人工的に模擬した RC 床版供試体を作製し、舗装面から衝撃弾性波法による水平ひび割れの評価を行い、弾性波の入力方法ならびに評価における手法の適用性に関する検討を行った。

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評価原理を図-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。

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）。アスファルトの弾性波伝播

*1 大阪大学 工学部地球総合工学科 (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 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻助教 博士 (工学) (正会員)

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³⁾により算出することができる。

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

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

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

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⁴⁾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

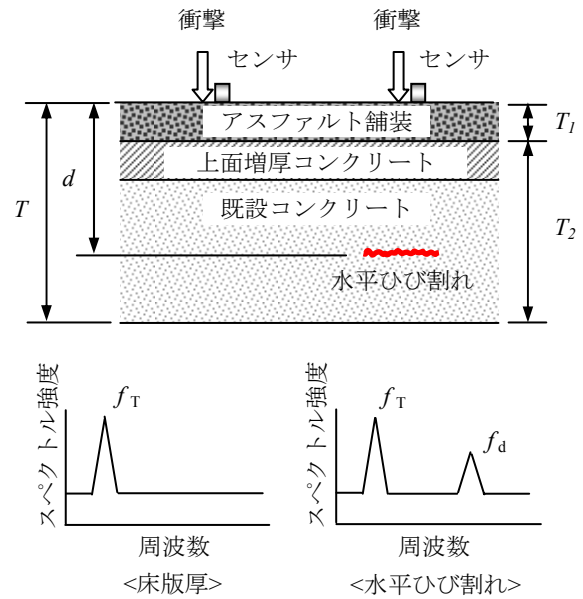


図-2 衝撃弾性波法による水平ひび割れの評価原理

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、厚さに対して長さ (1800mm) と幅 (1800mm) を十分に大きくした。図-3 および写真-1 に供試体概要を示す。

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 50, 100, 200, 250 および 400mm の 5 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、深さ

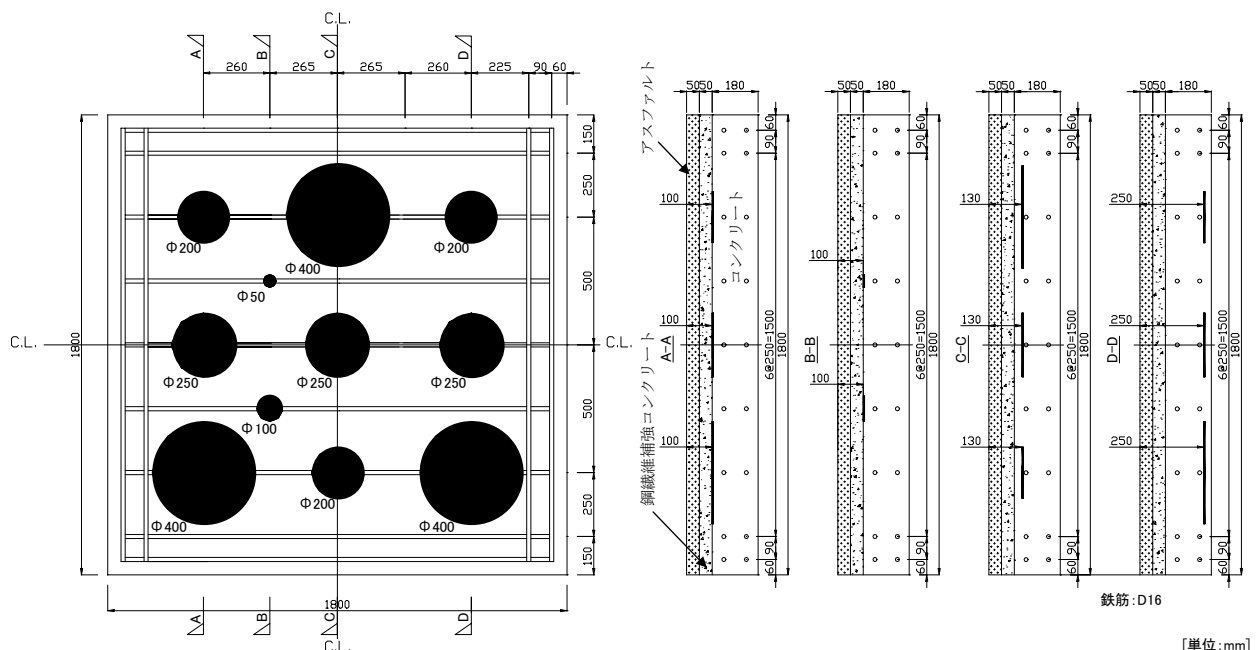


図-3 供試体概要

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 および写真-2 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。

3.2 衝撃弾性波法による計測

写真-3 に衝撃弾性波法による計測状況を示す。弾性波の入力および受信位置は、人工欠陥上のアスファルト表面で行った。弾性波の入力位置と受信位置との距離は50mmである。

入力する弾性波の周波数の違いが、人工欠陥の検出に与える影響について検討するため、直径の異なる5種類の鋼球(4.0, 6.4, 11.0, 15.7 および 30.2mm)を使用した。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 個の時刻歴応答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瞬時に算出し、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)。普通コンクリートと鋼繊維補強コンクリートを一つの媒質として考えた場合の伝播速度は、複数箇所での計測から算出した値を平均して、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³⁾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. 実験結果および考察

4.1 鋼球直径の選定

供用中の道路橋 RC 床版におけるアスファルト舗装面から衝撃弾性波法により水平ひび割れを効率的に評価することを視野に入れた場合、弾性波の入力に使用する鋼球直径の種類は、極力少ない方が好ましい。道路橋 RC



写真-1 供試体概要

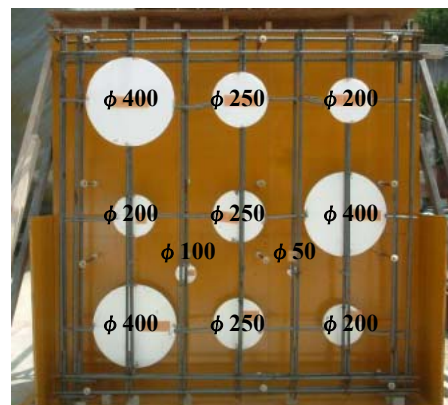


写真-2 人工欠陥の配置状況

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-3 衝撃弾性波法の計測状況

床版の場合、一般的な床版の厚さはマニュアル⁴⁾などで決まっている場合がほとんどである。さらに、床版内部で発生する水平ひび割れの位置も、供用中の RC 床版の切断結果¹⁾より明らかとなっている。(図-1 参照)。そこで、ここでの検討では、まず、縦波共振周波数が最も

小さくなる場合を想定して、欠陥が無い場合の供試体厚さ推定を対象とした。続いて、縦波共振周波数が最も大きくなると考えられる欠陥深さ 100mm の場合での測定を行った。この両者を評価することが可能な鋼球を選定することができれば、深さが 130 および 250mm の欠陥（これらの縦波共振周波数は深さ 100mm のそれよりも小さい）に対しても十分適用が可能であると考えられる。

図-4 に、得られた周波数スペクトルを、鋼球直径ごとにそれぞれ示す。図中の矢印は供試体の厚さに相当する理論上の縦波共振周波数 ($f_T = 6.5\text{kHz}$) であり、破線は人工欠陥に相当する理論上の縦波共振周波数 ($f_d = 16.1\text{kHz}$) をそれぞれ示している。人工欠陥が無い場合の周波数スペクトル (図-4 a) に着目すると、鋼球直径が 4.0mm を除く全ての鋼球直径の場合において、 f_T とほぼ同じ位置に明瞭なピークが確認できる。したがって、鋼球直径 6.4, 11.0, 15.7 および 30.2mm を使用した場合は、供試体厚さを推定できることがわかった。

これに対して欠陥直径が 200mm, 深さ 100mm の場合 (図-4 b) では、いずれの鋼球直径においても、 f_T よりも低い周波数においてピークが見られる。しかもこのピーク (約 4.6kHz) は、鋼球直径が大きくなるにつれて、徐々に卓越する傾向を示している。弾性波の伝播経路上に人工欠陥が存在する場合、欠陥を迂回して波が伝播するため、人工欠陥が無い場合 (図-4 a) と比較して、弾性波の伝播距離 (打撃点から供試体の底面までの最短距離) が長くなる (図-5 参照)。そのため、供試体厚さに相当する縦波共振周波数: f_T が、低周波数側へシフトすることは Sansalone の既往の研究から明らかになっている³⁾。アスファルトの伝播速度: 2730m/s, 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: 3902m/s とし、アスファルト部分の弾性波の伝播距離を波線理論に基づいて幾何学的に 70.7mm, 同じくコンクリートおよび鋼繊維補強コンクリートの伝播距離を 277.4mm (6mm の人工欠陥の厚さを含む) として求めた上で、打撃点から供試体底面までの最短距離 (348.1mm) に相当する縦波共振周波数を式 (1) により算出すると、約 5.2kHz となる。この縦波共振周波数は、図上で判読したピーク (約 4.6kHz) に近い値となっている。したがって、本研究においても Sansalone の既往の研究と同様に、欠陥が存在する場合は、供試体厚さに相当する縦波共振周波数: f_T が低周波数側へシフトすることを確認した。

続いて、人工欠陥に相当する縦波共振周波数: f_d 近傍の周波数帯域に着目すると、鋼球直径 4.0 および 6.4mm では、周波数スペクトル上のピークと f_d がよく一致していることがわかる。これに対して、鋼球直径が 11.0, 15.7 および 30.2mm の場合は、鋼球直径が大きくなるにつれて、周波数スペクトル上における f_d の成分が小さくなっ

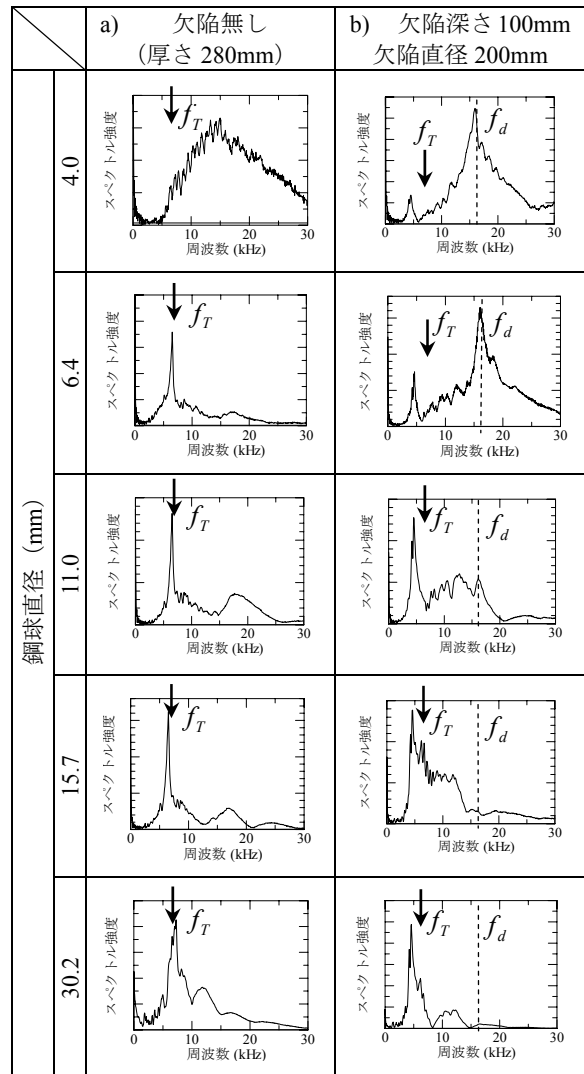


図-4 鋼球直径ごとの周波数スペクトル

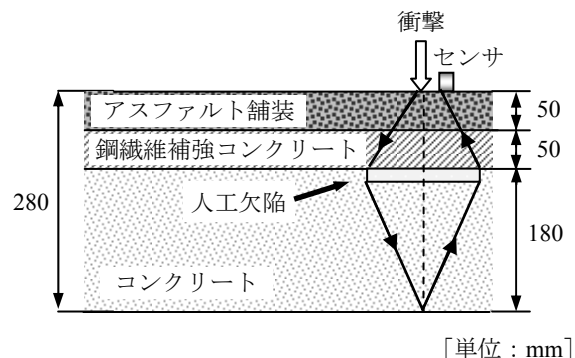


図-5 欠陥による弾性波の迂回

ている。したがって、これら3つの鋼球を使用した場合に人工欠陥を検出することは困難であると考えられる。

以上より、道路橋 RC 床版を模擬した供試体を対象に、厚さおよび人工欠陥の両者を評価する場合は、鋼球直径 6.4mm が適切であることが明らかとなった。この結果を踏まえると、一般的な道路橋 RC 床版の水平ひび割れの評価に対して今後舗装面から衝撃弾性波法を適用する場合は、まず、直径の異なる複数の鋼球を使用して、周

波数スペクトルを算出する。床版厚さに相当するピーク周波数が確認できる条件のうちで、直径が最小の鋼球を選定する。これにより、鋼球直径を一つに決定することが可能となり、効率良く、水平ひび割れを検出することができると考えられる。

4.2 計測された周波数スペクトルの特徴

弾性波の入力にあたっては、前節の結果を踏まえて、鋼球直径 6.4mm を使用することとした。図-6 に周波数スペクトルを示す。図-6 中には、図-4 と同様に、 f_T を矢印、 f_d を破線でそれぞれ示している。図より、 f_d の位置近傍におけるピーク周波数の有無を基準にすれば、人工欠陥までの深さが 100mm かつ直径 50 および 100mm とそれ以外の場合の 2 種類に区分することができる。前

者のケースでは、人工欠陥の直径が深さに対して同等（直径/深さ=1）あるいはそれ以下（直径/深さ=0.5）であるため、弾性波の反射源としては十分な大きさではなく、人工欠陥による多重反射が発生しにくい条件である。そのため、周波数スペクトル上において、人工欠陥に相当する単独のピークを確認することが困難であったと推測される。アスファルト舗装が無い場合における道路橋 RC 床版を模擬した供試体での著者らの研究成果²⁾によれば、人工欠陥の検出可能な欠陥深さに対する直径の比の最小値は、おおよそ 1.0 である。したがって、アスファルト舗装がある場合では、アスファルト合材による弾性波の減衰や散乱により舗装面で受信する時刻歴応答波形において多重反射成分が小さくなり、舗装が無い

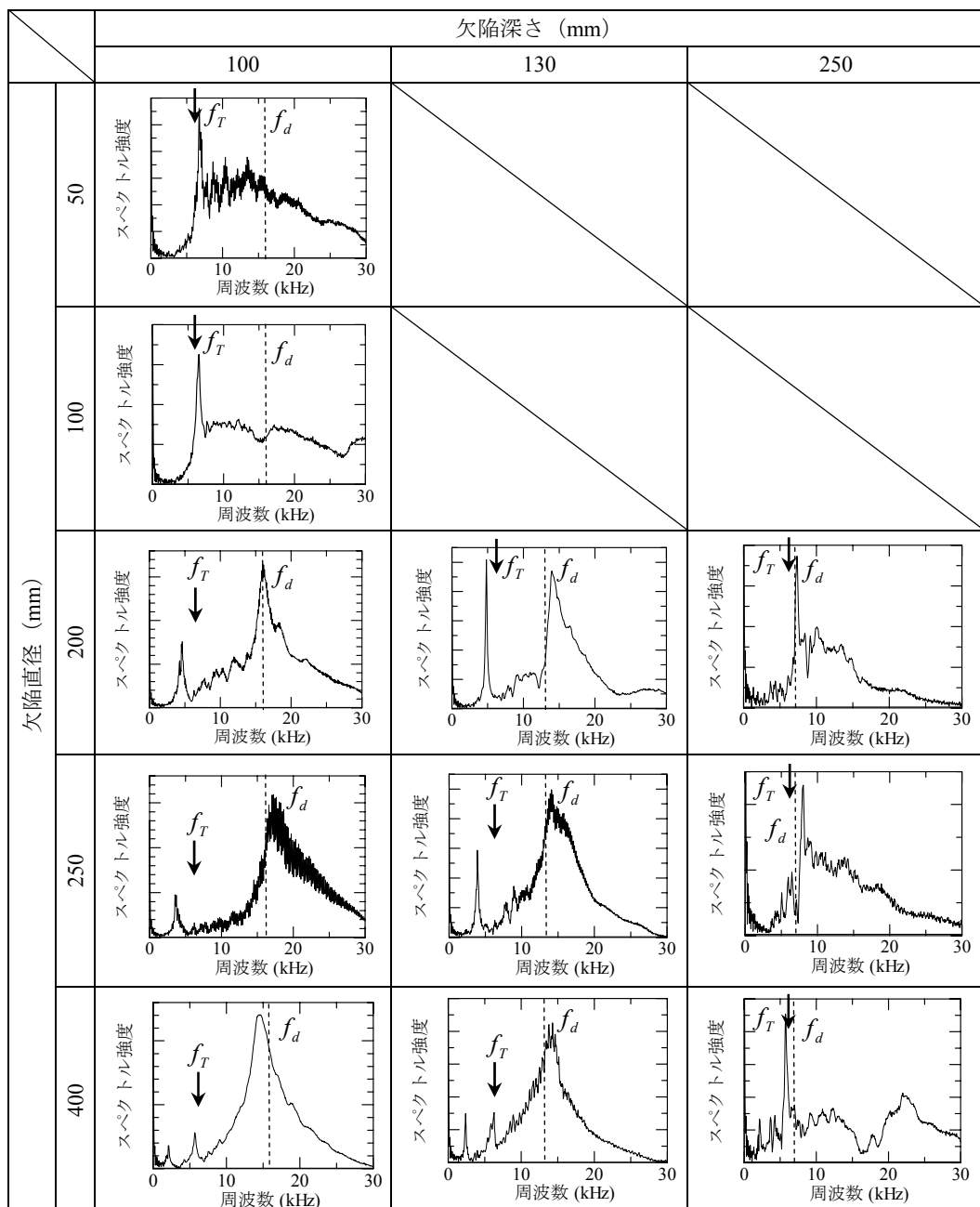


図-6 周波数スペクトル

表-2 検出可能な欠陥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, ○ : 検出可能
 △ : 検出可能 (健全との判別は困難)
 × : 現状では困難

場合と比較して、欠陥検出性能が低下したものと考えられる。

一方、後者のケースでは、いずれの場合についても、 f_d (図中の破線) と周波数スペクトル上におけるピークは、おおよそ一致していることがわかる。ここで、欠陥直径 200mm における深さ 100 および 130mm に着目すると、深さが大きくなると、 f_T が卓越し、 f_d が相対的に減衰している。しかも、このような傾向は、欠陥直径が 250 および 400mm の場合もほぼ同様であることがわかる。通常、鋼球打撃により入力された弾性波は、球面波として伝播する。欠陥深さが小さい場合、弾性波が反射する割合は、供試体底面よりも欠陥において大きくなる。そのため、周波数スペクトル上において、 f_d が f_T よりも卓越したものと考察できる。なお、欠陥深さが 250mm (直径 200, 250 および 400mm) の場合では、弾性波の反射限である欠陥の深さと供試体底面 (深さ 280mm) がほぼ同じ深さにあるため、周波数スペクトル上において、 f_T と f_d の両者を同時に確認することはできなかった。続いて、深さ 130mm かつ直径 200, 250 および 400mm の周波数スペクトルに焦点を当てると、欠陥直径が大きくなるにしたがって、 f_d が f_T よりも卓越している。これは、欠陥直径が大きくなることにより弾性波の反射限も大きくなったことに起因している。また、この傾向は、深さ 100mm の場合でも同じである。

4.3 検出可能な欠陥直径と深さの関係

衝撃弾性波法による検出可能な欠陥直径と深さとの関係を表-2 に示す。ここでは、前節の結果に基づき、周波数スペクトル上において、 f_d 位置近傍にピークが確認できたものを、欠陥検出可能 (○) とした。それ以外は、検出困難 (×) と表記した。ただし、図-6 に示す深さ 250mm のピーク周波数は、欠陥の深さと供試体底面 (深さ 280mm) がほぼ同じ深さにあるため、図-4 に

おける欠陥が無い場合 (鋼球直径 6.4mm) でのピーク周波数とほぼ同じ値である。そのため、欠陥無しとの判別は現状では困難であるものの、ピーク周波数の有無を判断基準にした場合は、評価可能 (△) とした。今後は、ピーク周波数のみに着目するのではなく、周波数スペクトルの形状や周波数解析手法に基づくひび割れ評価手法を構築し、手法の改善を目指す予定である。

5. 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 床版の厚さを想定した供試体において、アスファルト舗装面から衝撃弾性波法を実施した結果、供試体内部の水平ひび割れを模擬した人工欠陥を評価できることが明らかとなった。
- (2) 道路橋 RC 床版の場合、床版の全厚や、既設コンクリート、上面増厚コンクリート、およびアスファルト舗装の厚さについては既知である場合がほとんどである。しかも、これら床版の寸法より、水平ひび割れが発生する深さも予測することができる。このような特徴を有する道路橋 RC 床版の水平ひび割れの評価に限定すれば、衝撃弾性波法で使用する鋼球直径を一つに選定することが可能であると考えられる。

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前 裕史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, 三山 敬, 肥田研一, 六郷恵哲, : インパクトエコー法に基づく RC 床版内部の水平ひび割れの検出, 土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部門, pp.7-8, 2007
- 2) 内田慎哉, 鎌田敏郎, 藤原規雄, 玉越隆史 : 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
- 3) Sansalone, M. and Streett, W. B. : Impact Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., pp.159-166, 1997
- 4) 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, p.10, 1995.11