

叩けばわかる！道路橋鉄筋コンクリート床版の疲労による水平ひび割れの検出

大阪大学 鎌田 敏郎・内田 慎哉・大西 弘志
 (株)国際建設技術研究所 葛目 和宏・真鍋 英規・藤原 規雄
 国土交通省 玉越 隆史

▶ はじめに

コンクリートの損傷・劣化が問題となり、橋梁構造物としての耐荷力をはじめとする諸性能は必ずしも満足のいくものではないことが指摘されている。道路橋鉄筋コンクリート床版（以下RC床版と称す）に関しても、損傷・劣化を含めその維持管理が道路管理者にとって重要な課題の一つとなっている。近年では、劣化したRC床版の補強対策として上面増厚を行ったにもかかわらず、再劣化の事例が少なからず報告されている。上面増厚工法による補強後に生じるRC床版の再劣化は、RC床版内部の水平ひび割れあるいはRC床版と増厚コンクリートとの境界面に生じたはく離（第1図に示す）に起因しているとされているが、アスファルト表面や床版下面に劣化が顕在化するまでは、水平ひび割れやはく離の有無やその進展を目視観察で検

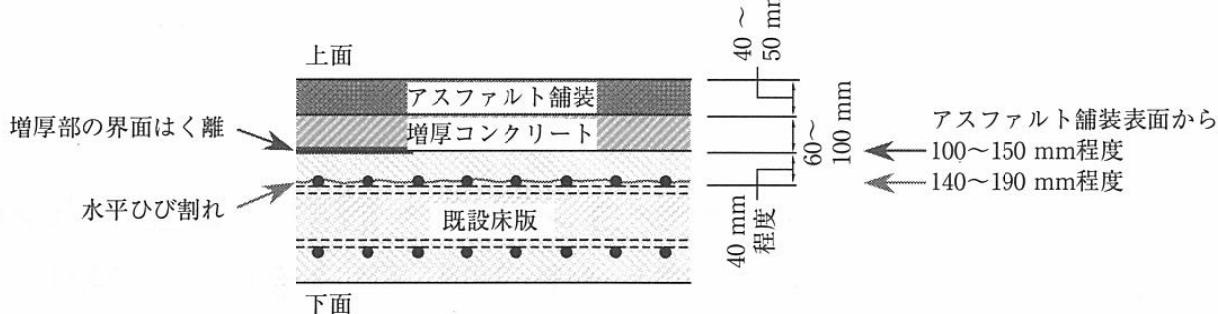
出することは極めて困難である。

そこで、本研究では、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を非破壊検査手法により検出することを目的とし、弾性波法の一つであるインパクトエコー法⁽¹⁾に着目し、その適用性に関する検討を行った。実験的検討として、水平ひび割れを人工的に模擬した欠陥（以下、人工欠陥と称す）を有する床版供試体を用いて、床版厚、水平ひび割れの大きさおよび深さを変化させることにより、インパクトエコー法のRC床版内部に生じる水平ひび割れの検出に対する評価を行った。

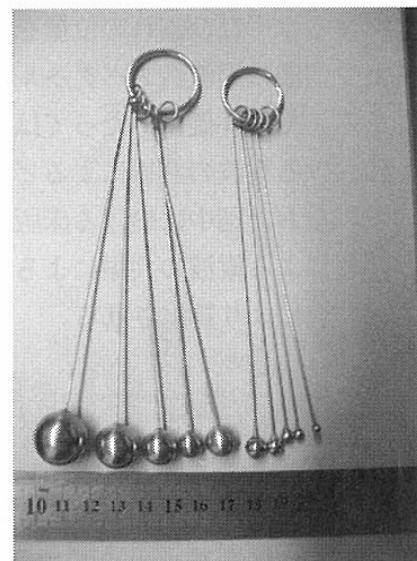
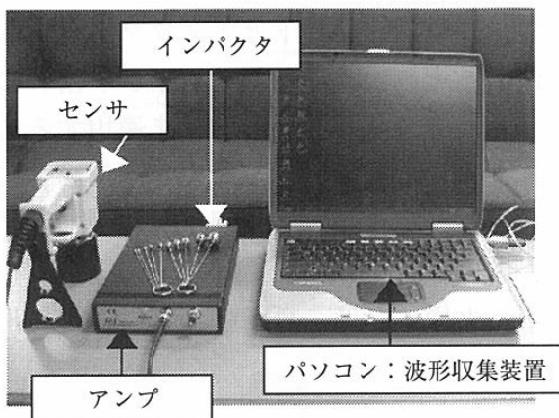
▶ インパクトエコー法

(1) 計測装置の概要

インパクトエコー法で用いるセンサ、インパクタ、アンプおよび波形収集装置を写真1に示



第1図 RC床版の水平ひび割れなどの発生位置（上面増厚補強床版）

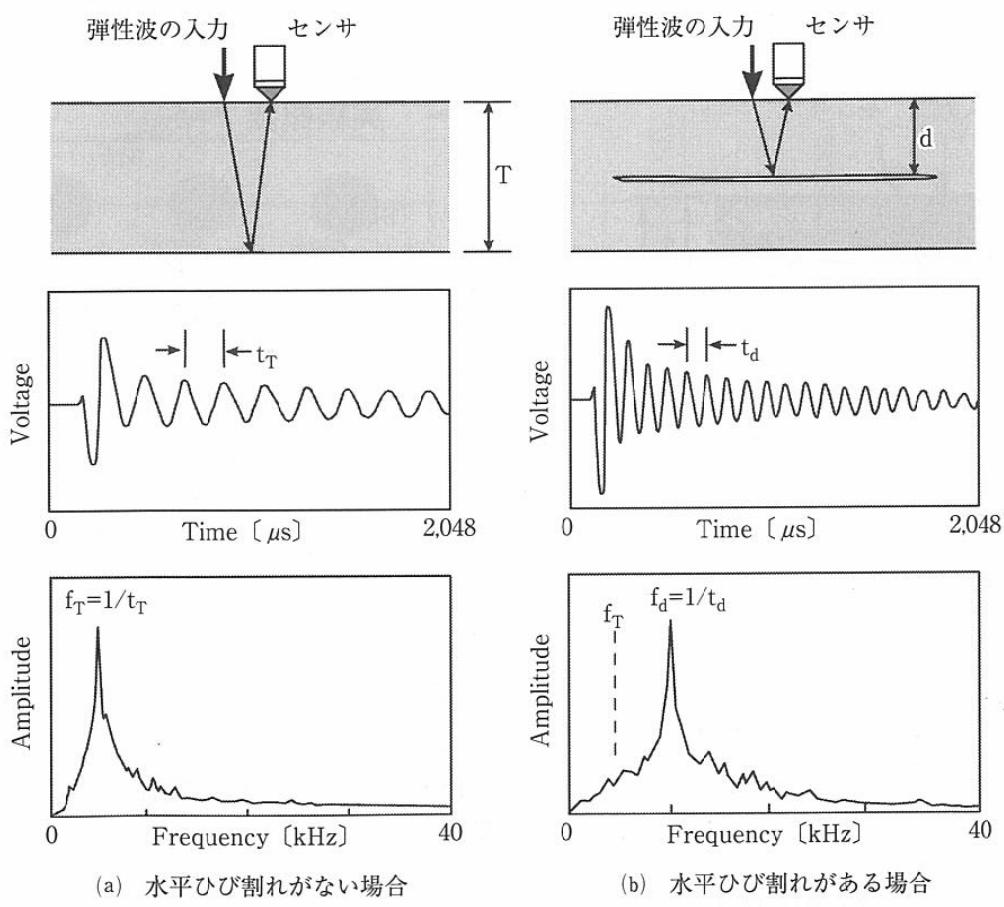


す。弾性波の入力には、鋼球直径の異なるインパクタ（写真2参照）を用い、弾性波の受信には、0~1 MHzの間でフラットな応答感度を有するコニカル型高感度変位センサを使用した。センサで受信された変位信号は、アンプを介して増幅処理を行い、波形収集装置において高速フーリエ変換（FFT）を施して周波数スペク

トルを算出するものである。

(2) RC床版内部の水平ひび割れの検出原理

インパクトエコー法によるRC床版内部の水平ひび割れの検出原理を第2図に示す。この手法は、



第2図 インパクトエコー法による水平ひび割れの検出原理の概念図

床版内部における水平ひび割れの位置を、打撃により得られた受信波の周波数スペクトルから評価するものである。その評価にあたっては、周波数スペクトルにおける縦波の共振によるピーク周波数を活用する。なお、図中における床版厚さおよび水平ひび割れによる縦波の共振によるピーク周波数は、以下の式により算出される。

$$f_{\text{厚さ}} = C_p / 2T \quad \cdots(1)$$

$$f_{\text{ひび割れ}} = C_p / 2d \quad \cdots(2)$$

ここで、

$f_{\text{厚さ}}$: 床版厚さによるピーク周波数

$f_{\text{ひび割れ}}$: 水平ひび割れによるピーク周波数

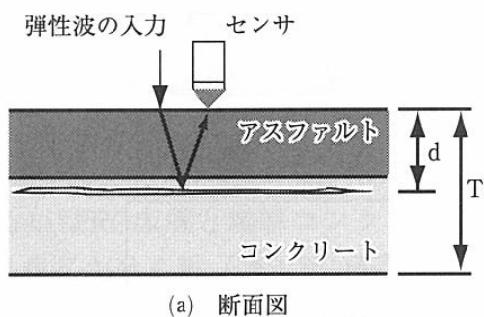
C_p : 縦波の伝播速度

T : 床版厚さ

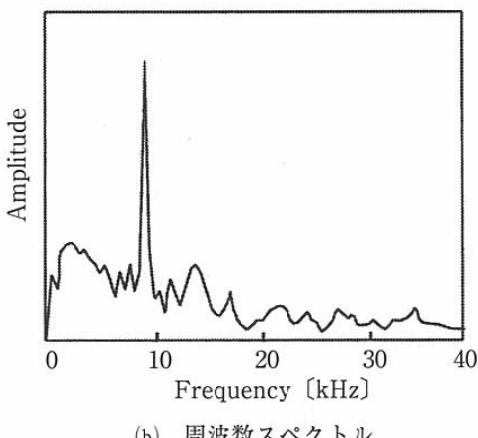
d : 水平ひび割れまでの深さ

である。したがって、コンクリートの速度と周波数スペクトル上のピーク周波数を特定することにより、水平ひび割れまでの深さを推定することができる。

RC床版の上部にアスファルト舗装がある場



(a) 断面図



(b) 周波数スペクトル

第3図 アスファルト舗装がある場合の水平ひび割れの検出原理の概念図

合では、コンクリートとアスファルトの伝播速度がそれぞれ異なるため、水平ひび割れの検出にあたっては、式(2)をそのまま適用することはできない。アスファルト舗装がある場合における水平ひび割れの検出原理を第3図に示す。また、図中の水平ひび割れによる縦波の共振に伴うピーク周波数は、以下の式(3)により算出される。

$$f_{\text{ひび割れ}} = \frac{1}{\frac{2T_1}{C_{p1}} + \frac{2(d-T_1)}{C_{p2}}} \quad \cdots(3)$$

ここで、

$f_{\text{ひび割れ}}$: 水平ひび割れによるピーク周波数

C_{p1} : アスファルト舗装部の縦波の伝播速度

C_{p2} : コンクリート部分の縦波の伝播速度

T_1 : アスファルト舗装部の厚さ

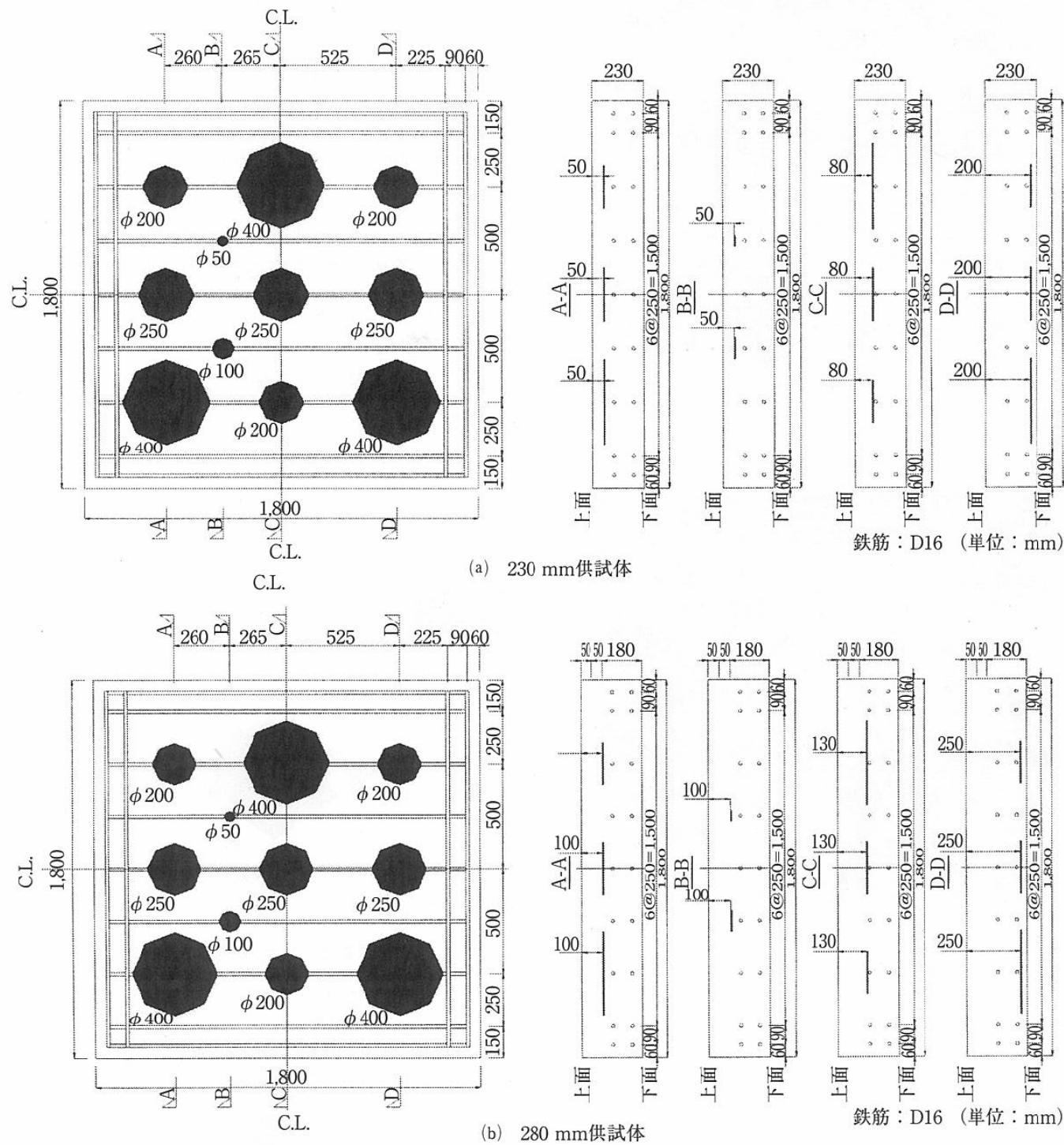
d : 水平ひび割れまでの深さ

である。

実験概要

(1) 供試体

供試体の概要を第4図に示す。供試体は、インパクタにより入力した弾性波が側面において反射することを極力避けるため、長さおよび幅をそれぞれ1,800 mmと大きくした。また、床版の厚さは道路橋RC床版で一般的に適用されている範囲のものを選定し、床版厚さ230 mmとなるRC供試体（「230 mm供試体」）と、床版厚さ280 mmとなるRC供試体（「280 mm供試体」）をそれぞれ1体ずつ製作した。供試体内部には、水平ひび割れを模擬するために、厚さ6 mmかつ直徑が50、100、200、250および400 mmの5種類の円形の発砲スチロールを人工欠陥として設置した。人工欠陥の設置位置は、230 mm供試体では床版上面より50、80および200 mm（床版下面からはそれぞれ180、150お



第4図 供試体概要

より30 mm) とし、280 mm供試体については床版上面より100、130および250 mm (床版下面よりそれぞれ180、150および30 mm) とした。人工欠陥の配置状況の例を写真3に示す。また、供試体を鉛直方向に設置することにより(写真4参照)、床版上面および下面の両面から

の計測が可能となり、人工欠陥までの深さの段階が多く設定できる。第1表に230 mm供試体および280 mm供試体における人工欠陥までの深さと直径との関係を示す。

供用中の道路橋RC床版では、RC床版上面にアスファルト舗装されていることが一般的であ

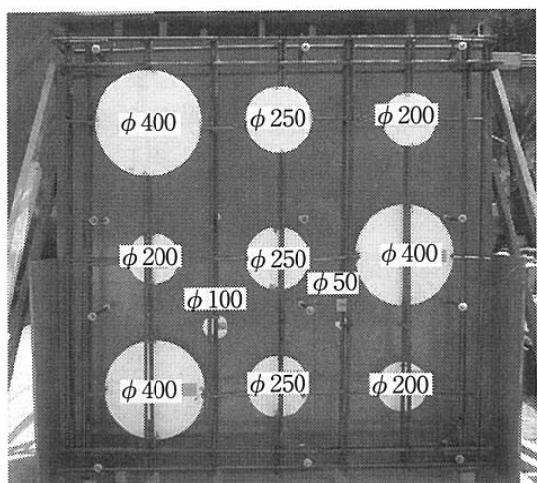


写真3 人工欠陥の配置状況の一例



写真4 供試体設置状況

第1表 230および280 mm供試体における欠陥深さと直径との関係

深さ [mm]	直径 [mm]				
	50	100	200	250	400
30	-	-	●	●	●
50	●	●	●	●	●
80	-	-	●	●	●
100	●	●	●	●	●
130	-	-	●	●	●
150	-	-	●	●	●
180	●	●	●	●	●
200	-	-	●	●	●
250	-	-	●	●	●

- : 欠陥未設置 ● : 欠陥設置

る。本研究では、アスファルト舗装面からのインパクトエコー法による水平ひび割れの検出を視野に入れ、「アスファルト供試体」も併せて製作し、評価を行った。この供試体は、まず長さ1,800×幅1,800×厚さ180 mmのRC床版を製作し、その後RC床版に対し上面増厚として厚さ50 mmの鋼纖維補強コンクリートを打設し、さらに、その上面に厚さ50 mmのアスファルト舗装したものである（供試体の全厚は280 mmとなる）。なお、RC床版と鋼纖維補強コンクリートとの界面の一部には、長さ200×幅200×厚さ1.8 mmの防水シートを設けた（写真5参照）。

(2) 計測概要

インパクトエコー法の計測状況を写真6に示

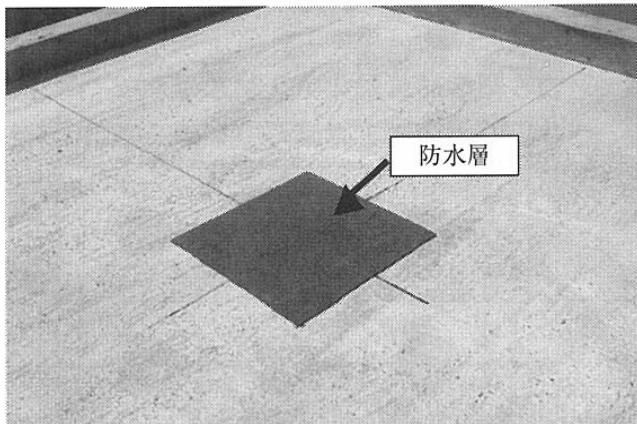


写真5 防水層の設置状況

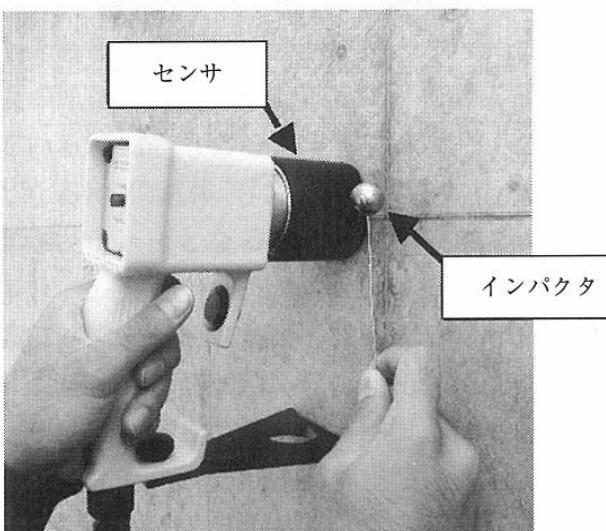


写真6 インパクトエコー法の計測状況

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、人工欠陥の直上のコンクリート表面で行った。弾性波の入力では、既往の研究成果⁽²⁾を踏まえて、評価対象である水平ひび割れの深さや直径（第1表参照）を考慮して、直径3.2 mmの鋼球を用いた。一方、弾性波の受信には、0~1 MHzの間でフラットな応答感度を有するコニカル型高感度変位センサを使用した。センサにて受信した信号は、サンプリング時間1 μs、サンプリング数5,000個の時刻歴応答波形として記録し、その後、高速フーリエ変換（FFT）を施して周波数スペクトルを瞬時に算出した。なお、230 mm供試体および280 mm供試体におけるコンクリートの伝播速度の計測は、人工欠陥の直上を避けて複数の位置において実施した。伝播速度は、周波数スペクトル上で確認されたピーク周波数と各供試体の厚さ（230および280 mm）から算出した。複数箇所での計測結果を平均して、230 mm供試体におけるコンクリートの伝播速度は3,836 m/s、280 mm供試体では3,857 m/sとなった。なお、アスファルト供試体におけるコンクリートおよび鋼纖維補強コンクリートの伝播速度は、230および280 mm供試体における伝播速度を参考に3,800 m/sとし、アスファルト舗装部の速度は、便宜上2,700 m/sとした。

► 実験結果および考察

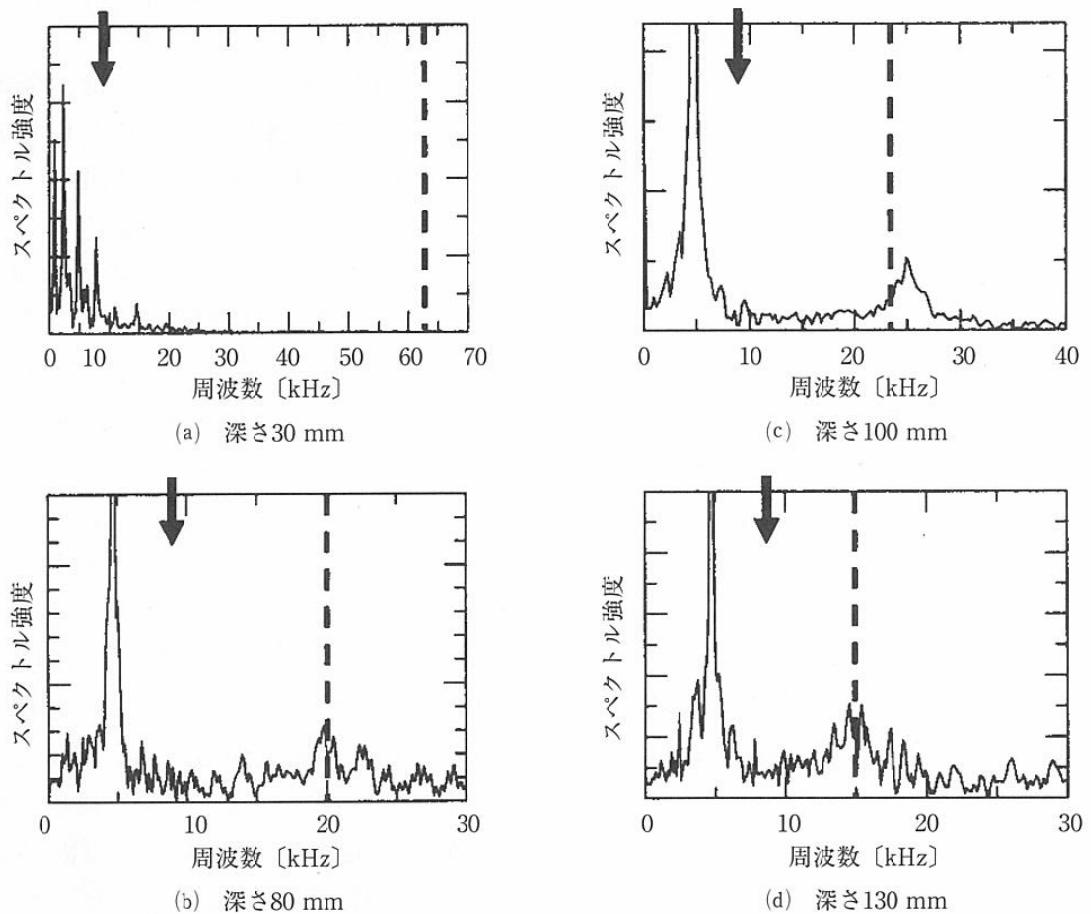
(1) 周波数スペクトル

230 mm供試体および280 mm供試体において得られた周波数スペクトルの一例として、人工欠陥の直径200 mmにおける深さ30、80、100および130 mmの周波数スペクトルを第5図にそれぞれ示す。図中の矢印（↓）は供試体厚さに応じた理論上の縦波共振周波数（ $f_{\text{厚さ}}$ ）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（ $f_{\text{ひび割れ}}$ ）を示している。第5図に表されている周波数スペクトルの特性から、深さ

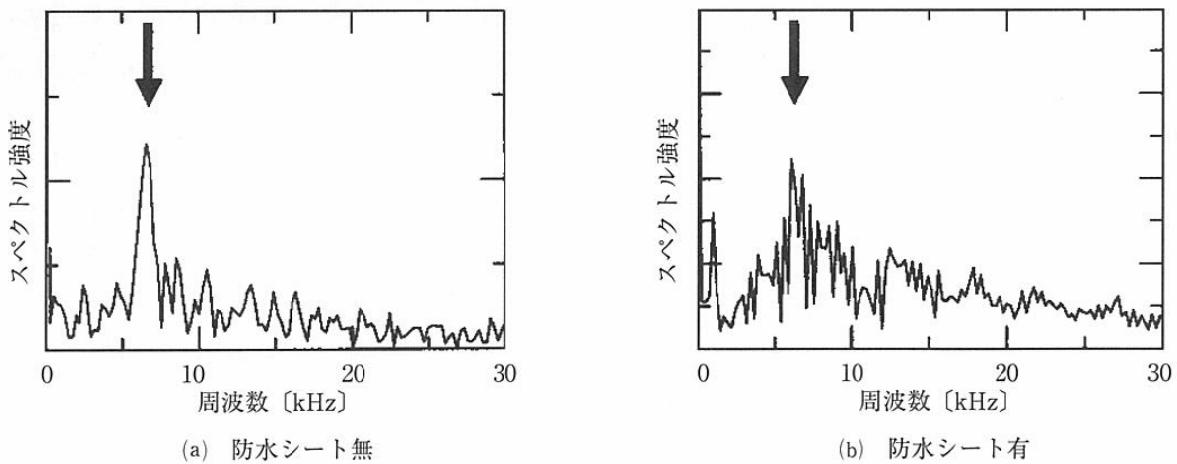
30 mmの場合と、80、100および130 mmの場合とに大別することができる。

前者の深さ30 mmの場合では、矢印で示した $f_{\text{厚さ}}$ よりも低い周波数帯域においてのみ、ピークを明瞭に示す周波数が複数卓越して存在することがわかる。通常、欠陥深さが浅く直径が大きい場合は、コンクリート中の弾性波の多重反射による縦波共振現象よりも、欠陥上部のコンクリートのたわみ振動（膜振動）のほうが卓越し、周波数スペクトル上にこの特徴が現れることになる。したがって、深さ30 mmにおいて確認できたピーク周波数は、膜振動に伴うたわみ共振周波数であると考えられ、人工欠陥を検出することはできないと言える。一方、後者の深さ80、100および130 mmの場合では、 $f_{\text{厚さ}}$ の位置近傍に加えて、 $f_{\text{ひび割れ}}$ にもピークが見られる。以上の結果から、本研究におけるインパクトエコー法での人工欠陥の評価基準としては、欠陥に起因する理論上の縦波共振周波数（ $f_{\text{ひび割れ}}$ ）の位置近傍におけるピークの有無とした。なお、ピーク周波数が $f_{\text{厚さ}}$ よりも低い周波数位置で卓越している理由としては、弾性波の伝播経路上に人工欠陥が存在するため、人工欠陥が無い場合と比較して、弾性波の伝播距離が長くなったものと考えられる。

アスファルト供試体の防水シート直上において算出した周波数スペクトルと防水シートを設置していない箇所での周波数スペクトルと併せて第6図に示す。図中の矢印（↓）は供試体厚さに応じた理論上の縦波共振周波数（ $f_{\text{厚さ}}$ ）を示している。理論上の $f_{\text{厚さ}}$ を算出するにあたり、コンクリートとアスファルトの伝播速度はそれぞれ異なるため、前述の式(3)により算出した。第6図から、防水シートの有無にかかわらず、周波数全域にわたって広く成分の分布が見られるものの、供試体厚さ（280 mm）に相当する縦波共振周波数（ $f_{\text{厚さ}}$ ）の位置近傍において、ピーク周波数を確認することができる。したがって、インパクトエコー法により入力した弾性



第5図 周波数スペクトル

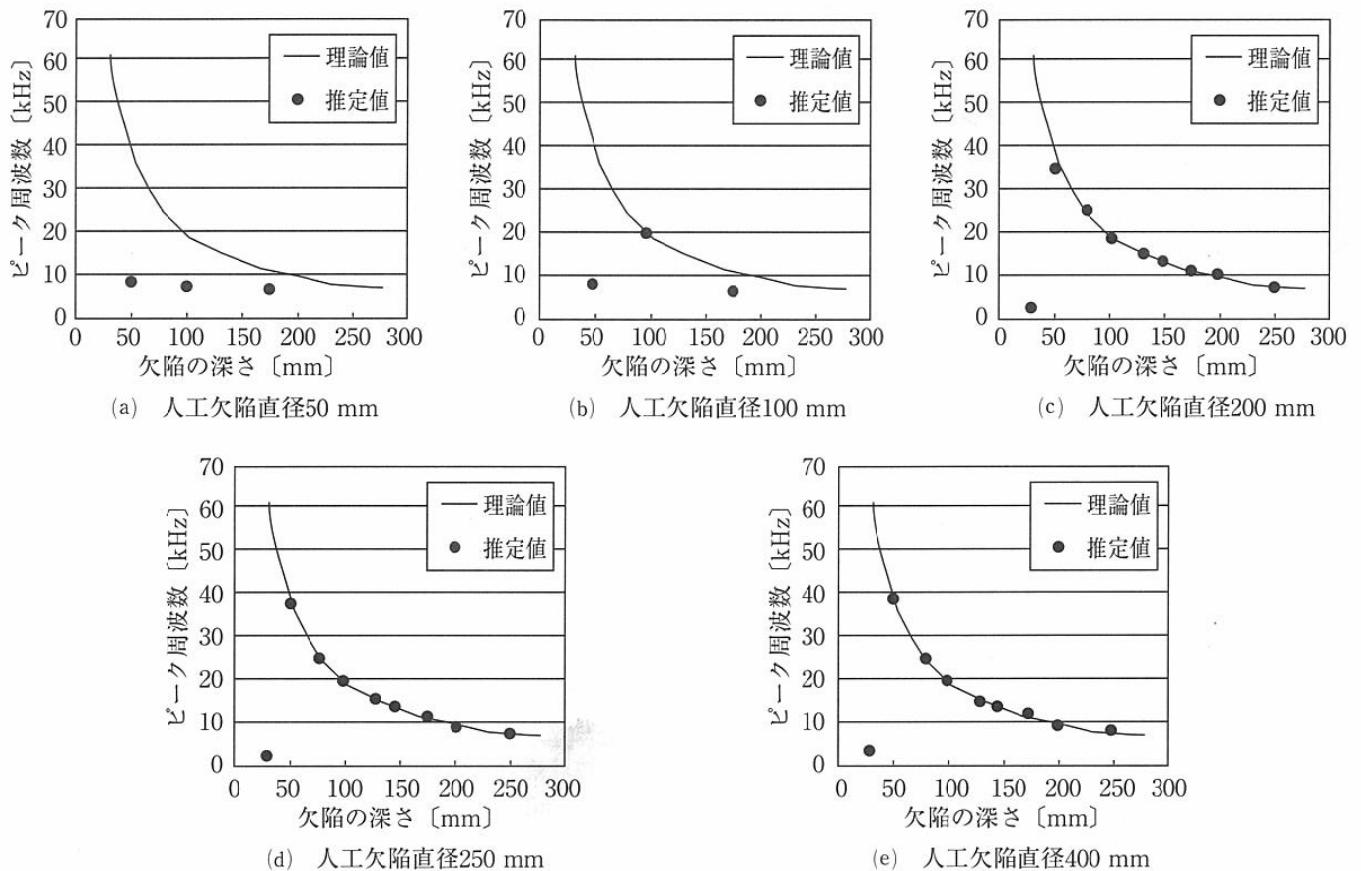


第6図 周波数スペクトル（アスファルト供試体）

波は、防水シートやアスファルト舗装によって減衰が生じにくく、水平ひび割れを検出できる可能性が高いと考えられる。

- (2) 検出可能な人工欠陥までの深さと直径
第7図に、人工欠陥直径ごとに、人工欠陥深

さと測定した結果から得られたピーク周波数（推定値）との関係を、理論上の人工欠陥に起因する縦波共振周波数 ($f_{\text{ひび割れ}}$) と併せて示す。図中の実線は、 $f_{\text{ひび割れ}}$ の理論値を示している。いずれの人工欠陥の直径においても、深さ 30



第7図 縦波共振周波数（理論値）とピーク周波数（測定結果からの推定値）との関係

mmの場合では、測定結果からのピーク周波数が理論値である $f_{ひび割れ}$ よりも小さくなってしまっており、人工欠陥を検出することができなかった。これは、人工欠陥の深さが浅い場合には、前述のとおりたわみ共振が卓越したためであると考察できる。これに対して、人工欠陥の深さが50 mmの場合では、人工欠陥の直径50および100 mmの場合において、理論値である $f_{ひび割れ}$ と測定結果からのピーク周波数とが異なる傾向を示している。このような人工欠陥の直径50および100 mmでの傾向は、人工欠陥の直径100かつ深さ100 mmを除く全てのケースにおいて、測定結果からのピーク周波数と理論値である $f_{ひび割れ}$ とが異なっている。これは、人工欠陥の直径が小さいため、弾性波が十分に反射できなかつたと考えられる。なお、それ以外の人工欠陥の直径および深さについては、理論値であると $f_{ひび割れ}$ 測定結果からのピーク周波数とがほぼ同じ値を

示しており、インパクトエコー法による欠陥の検出が可能であることを示している。第2表にインパクトエコー法による検出可能な人工欠陥までの深さおよび直径との関係を示す。

第2表 インパクトエコー法による検出可能な人工欠陥深さと直径との関係

深さ [mm]	直径 [mm]				
	50	100	200	250	400
30	-	-	△	△	△
50	×	×	○	○	○
80	-	-	○	○	○
100	×	○	○	○	○
130	-	-	○	○	○
150	-	-	○	○	○
180	×	×	○	○	○
200	-	-	○	○	○
250	-	-	○	○	○

- : 欠陥未設置 ○ : 検出可能

△ : たわみ共振現象を利用すれば評価可能

× : 現状では困難

実際の道路橋床版における欠陥（鉄筋位置での水平ひび割れ、増厚断面のはく離）は、第1図に示すとおり、上面増厚補強した床版においては100～190 mm程度の範囲で発生すると考えられる。これは、230 mm供試体および280 mm供試体の測定結果（第2表）から、人工欠陥の直径50および100 mm以外は実際に生じている欠陥が検出できる深さの範囲となる。

► おわりに

以下に本研究で得られた結論を示す。

- ① 一般的な道路橋RC床版の厚さを想定した場合、床版内部に発生した水平ひび割れは、インパクトエコー法により概ね検出できる。
- ② インパクトエコー法では、水平ひび割れを模擬した人工欠陥の直径が200 mm以上の場合検出が可能であるが、直径が100 mm以下になると検出が困難となる場合がある。
- ③ インパクトエコー法では、水平ひび割れを模擬した人工欠陥の深さが50～250 mmの範囲では概ね検出が可能であるが、30 mmの場合は検出が困難となる。
- ④ アスファルト舗装面からの水平ひび割れの検出を想定した場合、インパクトエコー法はその可能性を十分有していることが明らかとなった。

<参考文献>

- (1) Sansalone, M・Streett, W.B.: Impact Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., pp.29-254 (1997)
- (2) 中根基之・鎌田敏郎・内田慎哉・古本吉倫：インパクトエコー法によるコンクリート内部空隙の評価に与える弾性波の入力周波数の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.29、No.2、pp.643-648 (2007)

【筆者紹介】

鎌田敏郎

大阪大学 大学院 工学研究科
地球総合工学専攻 社会基盤工学部門 教授
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1
工学部S1棟626
TEL : 06-6879-7619 FAX : 06-6879-7619
E-mail : kamada@civil.eng.osaka-u.ac.jp

内田慎哉

大阪大学 大学院 工学研究科
地球総合工学専攻 社会基盤工学部門
日本学術振興会 特別研究員
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1
工学部S1棟626
TEL : 06-6879-7619 FAX : 06-6879-7619
E-mail : uchida@civil.eng.osaka-u.ac.jp

大西弘志

大阪大学 大学院 工学研究科
地球総合工学専攻 社会基盤工学部門 助教
E-mail : ohnishi@civil.eng.osaka-u.ac.jp
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1
工学部S1棟626
TEL : 06-6879-7619 FAX : 06-6879-7619

葛目和宏

株国際建設技術研究所 代表取締役社長
〒550-0005 大阪市西区西本町1-7-7
高砂堂ニッセイビル9F
TEL : 06-6539-7641

真鍋英規

株国際建設技術研究所 構造設計部 部長
〒550-0005 大阪市西区西本町1-7-7
高砂堂ニッセイビル9F
TEL : 06-6539-7641

藤原規雄

株国際建設技術研究所 技術部 次長
〒550-0005 大阪市西区西本町1-7-7
高砂堂ニッセイビル9F
TEL : 06-6539-7641

玉越隆史

国土交通省 国土技術政策総合研究所
道路研究部 道路構造物管理研究室 室長
〒305-0031 茨城県つくば市旭1
TEL : 029-864-4919