

平板の動的応答に着目した RC 床版の内部水平ひび割れ検出法の実地検証

Experimental verification of the detecting the internal horizontal crack of RC slab
based on dynamical properties of a plate

中山昭二[†], 谷口朋代*, 小野祐輔**, 佐藤彰紀***, 堀岡良則****
Shoji Nakayama, Tomoyo Taniguchi, Yusuke Ono, Akinori Sato, Yoshinori Horioka

[†]一般社団法人インフラ新技術推進センター (〒673-0014 明石市川崎町 2-13-144)

*博 (工), 鳥取大学教授, 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒680-8550 鳥取市湖山南 4-101)

**博 (工), 鳥取大学准教授, 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒680-8550 鳥取市湖山南 4-101)

***阪神高速道路株式会社, 大阪管理局 (〒552-0006 大阪市港区石田 3-1-25)

****阪神高速道路株式会社, 神戸管理部 (〒650-0041 神戸市中央区新港町 16-1)

To detect internal horizontal cracks in RC slabs of bridge structures, this paper proposes stimulating and measuring vibration of a plate consisting of concrete on the upper part of the internal horizontal crack of the RC slab. Giving enforced sweeping vibration from the RC surface and/or the asphalt pavement surface, both natural frequencies and mode shapes about the crack part are measured and compared with the corresponding theoretical ones. Their agreement implies applicability of the proposed method to detect the internal horizontal crack in RC slabs as one of the feasible non-destructive inspections in fields.

Key Words: RC slab, internal horizontal crack, sweeping vibration, non destructive test, maintenance

キーワード: RC 床版, 内部水平ひび割れ, 掃引加振, 非破壊試験, 維持管理

1. はじめに

供用期間を終え撤去回収した既設橋梁の RC 床版において、内部に水平ひび割れが進行している事例が近年多く確認されている (写真-1 参照)。

これらは、ひび割れ端がコンクリート表面に達していないため、目視等外観調査による発見には無理があり、打音検査を用いてもこれらのやや深部にあるひび割れの発見は難しいのが現状である。

RC 床版の内部ひび割れに関する維持管理手法については、これまでさまざまな調査手法や非破壊試験法が提案され実施されている (表-1 参照)。

鋼橋 RC 床版の内部水平ひび割れに着目した場合、これまでの研究では、FWD 試験機を用いた計測法¹⁾、衝撃弾性波法を用いた手法²⁾、サーモグラフィー法³⁾、超音波トモグラフィー法⁴⁾、AE 法⁵⁾、強制加振試験に基づく手法⁶⁾等がある。この内、AE 法を用いると詳細な情報は得



写真-1 RC 床版の内部水平ひび割れの事例

られるが、仮設備が必要になるほか、計測に要する時間を考えると、例えば、阪神高速で管理する鋼橋 RC 床版約 15 万パネルすべてへの点検の適用は現実的ではない。強制加振試験に基づく手法は本手法と類似しているが、RC 床版の厚み方向への縦波の伝播に着目しており、ひび割れ面の拡がりを捉えるには至っていない。この様に、様々な着目点に応じた調査手法が研究開発されているが、計測精度、計測時間 (路面規制の短縮)、経済的合理性がバランスよく適合する手法が十分に確立されているとはいえない状況である。

[†] 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: nakayama@bridge-scenario.or.jp

表－1 ひび割れ深さに関する各種試験法の特徴

新旧	計測手法	比較項目	コンクリート 表面	表面すぐ下	鉄筋位置 10-20cm程度	鉄筋位置より 深部	摘要
従来技術	目視	精度、難易度	◎	—	—	—	※表面部の劣化は基本目視による
		迅速性、簡便さ、作業性	◎	—	—	—	
		経済性	◎	—	—	—	
		環境特性	◎	—	—	—	
	点検員による打診	精度、難易度	—	◎	—	—	※貫通ひび割れは把握しやすい
		迅速性、簡便さ、作業性	—	◎	—	—	
		経済性	—	◎	—	—	
		環境特性	—	◎	—	—	
	赤外線	精度、難易度	—	◎	△-×	×	※温度差が生じ易い箇所限定
		迅速性、簡便さ、作業性	—	◎	△	×	
		経済性	—	◎	△	×	
		環境特性	—	日陰は×	日陰は×	日陰は×	※日照時間が確保される場合のみ (日陰部分、北斜面は困難)
	超音波	精度、難易度	—	○	△	×	※精度はやや劣る
		迅速性、簡便さ、作業性	—	○	△	×	※作業性にやや劣る
		経済性	—	○	△	×	※対象が特定されている場合に 詳細調査で用いることがある
		環境特性	—	○	△	×	
	X線	精度、難易度	—	◎深さ特定難	○深さ特定難	△深さ特定難	※感光部に全劣化が一様に写る
		迅速性、簡便さ、作業性	—	×	×	×	※時間がかかる
		経済性	—	×	×	×	
		環境特性	—	×	×	×	※線量管理が課題
新技術 (本技術)	加振励起	精度、難易度	—	◎	◎	△	※面的な水平方向劣化を検知する
		迅速性、簡便さ、作業性	—	◎	◎	○	
		経済性	—	◎	◎	○	
		環境特性	—	◎	◎	◎	

凡例) ◎：適用性大，○：適用性がある，△：状況により適用できる，×：適用は困難，—：適用対象外

また、床版コンクリートの土砂化や空洞等の劣化を検出対象に含まず、舗装上面から内部水平ひび割れだけをより簡易にかつ迅速に検出することが重要であり、さらなる技術革新、新技術・新調査法の確立が急務である。

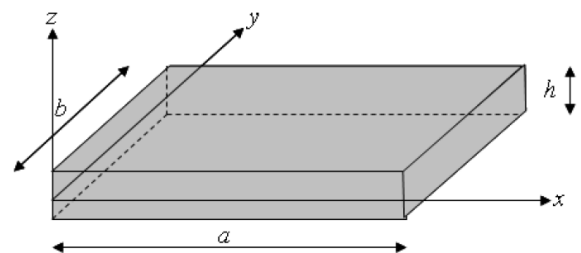
本稿で述べる検出法は、高速掃引加振に伴う平板の共振現象を利用したもので、内部水平ひび割れが存在する場合、計測現場でのFFT解析の結果から水平ひび割れの存在およびその拡がりか推定できる特長を持つ。計測点網にしたがって計測する場合、各点ごとの計測時間は4～5秒で終わられ、計測の簡易性、計測時間の短縮にも優れており利活用が期待されている。

筆者らは本検出法すなわち、水平ひび割れ面とその上側のコンクリートで形成される平板の動的応答に着目してコンクリート内部の水平ひび割れの検出に関する研究⁷⁾⁸⁾⁹⁾を進めてきた。本稿では実物大の模型を用いて、RC床版上面およびアスファルト舗装面から検出する実験的な検討を経た後、実橋での実地検証を行うものである。

2. 平板の動的特性

2.1 固有振動数の算出

平板の固有振動数は平板の自由振動から求められる。図－1に示す座標系における平板の運動方程式は以下のように表される¹⁰⁾。



図－1 平板の座標系

$$D \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

ここで、 w ：平板のたわみ、 μ ：平板の単位面積当たり質量、 D ：平板の曲げ剛性、 h ：板厚、 E ：ヤング率、 ν ：ポアソン比、である。

一般に、式(1)から固有振動数を求めることは困難であるが、平板の周辺支持条件、形状等により求まる場合がある。等厚の矩形板において、周辺単純支持および周辺固定支持の場合、式(3)、式(4)に示すように平板の1次モードの固有振動数を算出することが可能である。

それぞれの境界条件に対応する平板の1次モード固有振動数の理論式を以下に示す。

(1) 周辺単純支持の場合

境界条件が周辺単純支持の場合の1次モードの固有振動数 f_s は以下のように表される。

$$f_s = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{D}{\mu} \left[\left(\frac{1}{a} \right)^2 + \left(\frac{1}{b} \right)^2 \right]} \quad (3)$$

(2) 周辺固定支持の場合

境界条件が周辺固定支持、かつ $a/b=1$ (正方形) の場合の1次モードの固有振動数 f_f は以下のように表される。

$$f_f \cong \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\lambda^2}{a^2} \sqrt{\frac{D}{\mu}} \quad (4)$$

固有値 $\lambda^2=35.99$ (正方形の場合)

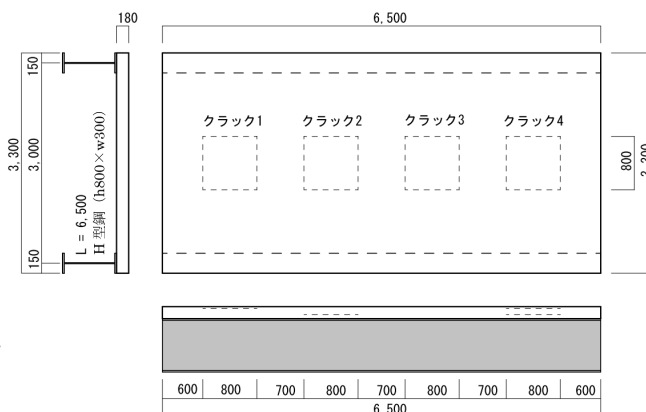


図-2 供試体の概要図 (単位: mm)

3. コンクリート面からのひび割れの検出

内部水平ひび割れを模擬したビニル片を RC 床版内に配置した供試体を作製し RC 床版表面を掃引加振して、水平ひび割れ面から RC 表面までを厚みとみなした平板の動的応答を励起させる実験を行った。

3.1 供試体の概要

図-2 に示す供試体を作製した。供試体では表面からのひび割れ面の配置深さが異なる以下の4種類の模擬ひび割れを作製した (表-2 参照)。

供試体コンクリートのヤング率 E_c は、 $E_c=3.1 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ (コアの一軸圧縮試験から算出) とした。また、鉄筋は計測対象とした実橋群の配筋に合わせ、主筋 D16 @100 を配置した。

本稿では、表-2 に示す4計測ケースのうち、クラック1を取り上げ、以下に計測結果を詳述するものである。

3.2 供試体の動的特性の確認

(1) 固有振動数の算出

対象とする水平ひび割れ面上の側部分、表面からのひび割れ深さまでを厚みとみなしたコンクリート平板の、境界条件に応じた1次モードの固有振動数はそれぞれ式(3)式、(4)で与えられる。表-2では、供試体諸元および模擬ひび割れ面の位置を示した。表-3では、クラック1 (上層鉄筋位置付近) およびクラック2 (下層鉄筋位置付近) を対象に算出した1次モードの固有振動数を表-3に示した。

(2) 加振機のパフォーマンスと仕様

供試体の表面を掃引加振して、コンクリート平板の応答加速度の検出を行う。今回用いた加振機は、加振力; 200N, 周波数範囲; DC~5,000Hz (無負荷時), 最大加速度; 285 m/s^2 (正弦波入力, 無負荷時), 重量; 15kg, である。加速度計は汎用型一軸加速度計を用いた。掃引振動数の範囲; 0~1000Hz

表-2 供試体の諸元表

計測ケース	供試体寸法(m) 床版支間W× 床版厚t×桁長L	表面からの深さ h(m)	模擬ひび割れ の寸法 a×b(m)	模擬ひび割れ の材料・仕様
クラック1	W=3.0 × t=0.18 × L=6.5	0.03	0.8×0.8	市販のA4判クリアホルダーを用いて80cm角に継ぎ足し接着加工したポリプロピレン製厚さt=0.02mm
クラック2		0.118	0.8×0.8	
クラック3		無し	無し	
クラック4		0.03 および0.118	0.8×0.8 を2層配置	

表-3 固有振動数の理論解

	振動対象の板厚 h (m)	振動対象の板の寸法 a×b (m)	薄板理論における理論解(計算値)	
			周辺単純支持 f_s (Hz)	周辺固定支持 f_f (Hz)
上層鉄筋面付近 (クラック1) (クラック4の上)	0.03	0.8×0.8	153	279
下層鉄筋面付近 (クラック2) (クラック4の下)	0.118	0.8×0.8	601	1,096

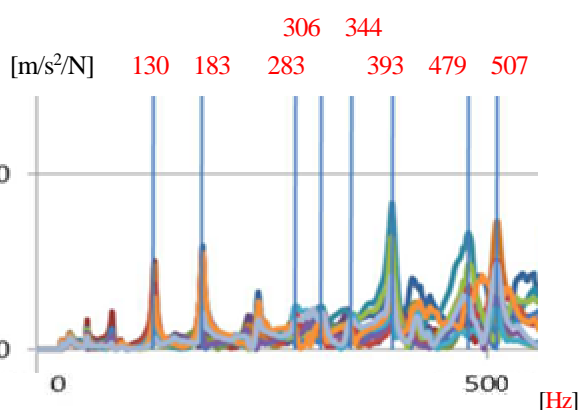


図-3 FFT 解析図 (クラック1)

(3) 振動モードの確認

クラック1の周波数応答解析 (FFT 解析) の計測結果を図-3に示す。

クラック1について、模擬ひび割れ面上の側部分を対象と

するコンクリート平板の振動モードを明らかにするために、ひび割れ面よりも1回り大きい25cm 間隔の7×7 点の格子状グリッドをコンクリート上面に設け、格子点で加振して動的応答値を求めた（図-3 参照）。

FFT 解析結果には8 つの振動数のピークが見られたので、それらの振動数も図-3 に記載した。しかし、検出した8 ピーク値には、高次モードの振動数や他の部材の振動数を計測している場合がある。そこで、計測時の位相変化や実稼動図に照らして、意図する振動状態に該当すると考えられる固有周波数およびその実稼動図を仕分け、抽出した。以下にいくつかの例を示す。

図-4 では、床版全体の振動系のうち非対称2 次モードに近い性状を示しているものと考えられる。図-5 では、高次モードの性状を示しており、求めるひび割れの1 次モードとは考えにくい。図-6 では、検出対象とする平板の1 次モードが励起されていることがわかる。

上述したように計測結果では、一般に水平ひび割れに起因するもの以外の固有振動も同時に計測することになる。したがって、掃引加振によるFFT 解析結果から得られる振幅、位相とともに、上述の実稼動図を作成、吟味し、求める解であることを確認する、さらに該当する振動数からひび割れ面の拡がりを推定することができる。このように、ひび割れ面の有無だけでなく、ひび割れ面の拡がり寸法を推定できることが、本検出法の特長である。なお、本試験範囲では、FFT 解析結果から得られた振動数は周辺単純支持条件に近い応答を示している。これは板厚-辺長比から見て、振動する平板の剛性比から、概ね周辺単純支持に近い変形挙動を示しているものと考えられる。

4. アスファルト舗装面からのひび割れの検出

前章3.で使用した供試体にアスファルト舗装を敷設して、その上面から計測を行った。

4.1 舗装の概要

図-2 の供試体上面に、橋梁 RC 床版に対し一般的に用いられるアスファルト舗装を敷設した（表-4 参照）。

アスファルト混合物のヤング率 E_{as} は、温度条件によって大きく異なるが、一般に、 $E_{as}=5.9 \times 10^2 \sim 9.8 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ とされており¹⁾、コンクリートのヤング率 E_c とはオーダーが異なる。また若材齢でもあり、アスファルト舗装部分は RC 床版と一体化せず重ね梁状の挙動をしていると想定されるため、本稿での周波数算出においては、その質量は考慮するが剛性は考慮していない。

4.2 供試体の動的特性の確認

(1) 固有振動数の算出

アスファルト舗装厚を加えた、表面からの深さ h の平板の1 次モードの固有振動数を表-5 に示す。

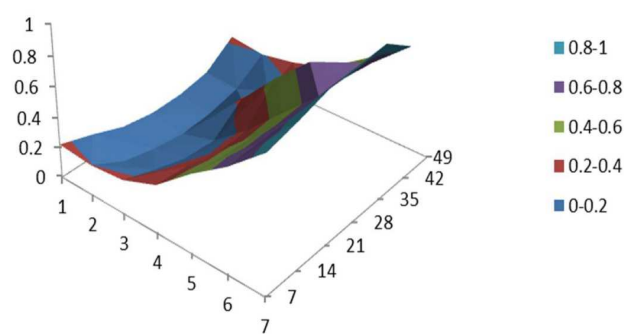


図-4 実稼動図（ $f=130\text{Hz}$ ；参考図）

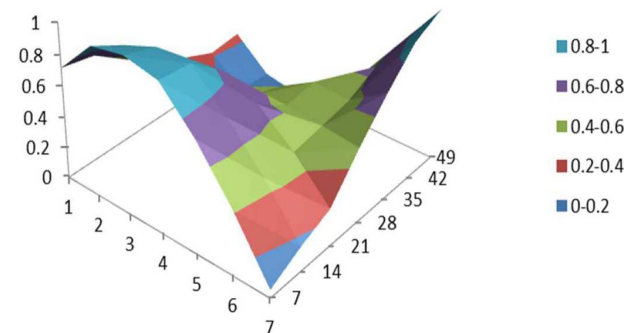


図-5 実稼動図（ $f=283\text{Hz}$ ；参考図）

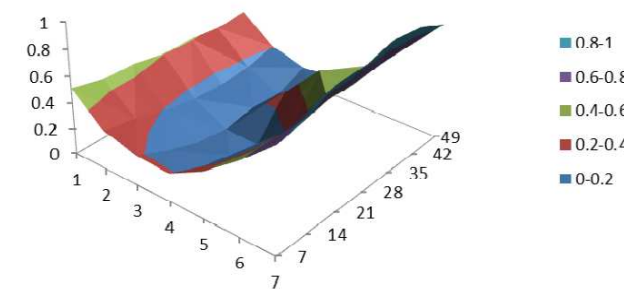


図-6 実稼動図（ $f=183\text{Hz}$ ；クラック1）

表-4 アスファルトの諸元表

	種別	層厚	総厚
表層	排水性 アスファルト舗装	40mm	75mm
基層 (レベリング層)	密粒 アスファルト舗装	35mm	

表-5 固有振動数の理論解

	振動対象の板厚 h (m)	振動対象の拡がり $a \times b$ (m)	薄板理論における理論解(計算値)	
			周辺単純支持 f_s (Hz)	周辺固定支持 f_f (Hz)
上層鉄筋面付近 (クラック1) (クラック4の上)	$0.03+0.075=$ 0.105	0.8×0.8	558	1,016
下層鉄筋面付近 (クラック2) (クラック4の下)	$0.118+0.075=$ 0.193	0.8×0.8	1,025	1,868



写真-2 計測図（アスファルト舗装面）

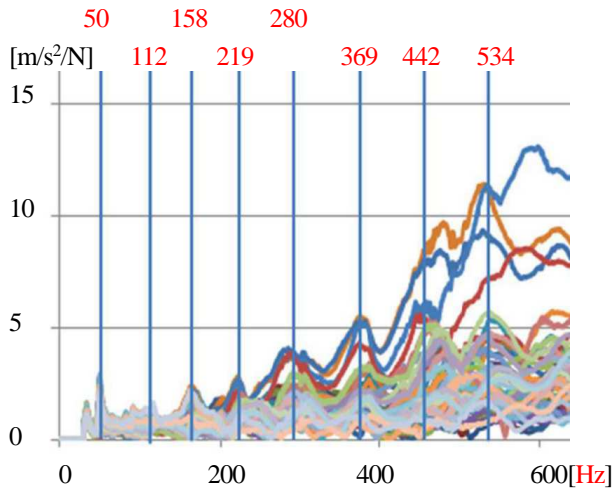


図-7 FFT 解析図（クラック 1；舗装面上）

4.3 加振機を用いた固有振動数の計測

計測は、前章 3.と同様の計測点グリッドを用い、前章 3.と同様の計測を行った（写真-2 参照）。

前章 3.2 (3)と同様に FFT 解析図に求めた固有振動数 (Hz)から適切なものを抽出するべく、吟味を行い該当するものを求めた（図-7、図-8 参照）。

図-7 では、8 つの振動数のピークを検出したが、実稼動図等から該当するものを求めた。該当しないものの一例を図-12 に示した。図-8 に示す実稼動図では、例えば図-6 に示すような滑らかな面が形成されていないが、以下に示す実稼動アニメーション図（図-9、10、11 参照）の全体的な応答から 1 次モードと考えられる。

アスファルト舗装面上からの計測に際しては、一般に加振力がやや逸散して伝達される傾向にあり、また排水性舗装であるので、各計測点において骨材間の結合状態等が計測に微妙に影響する可能性もあると推定される。

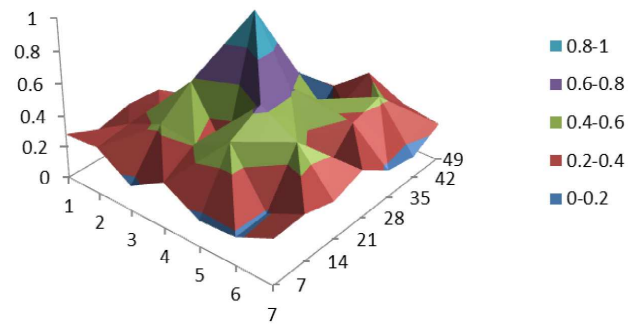


図-8 実稼動図（ $f=534\text{Hz}$ ・クラック 1；舗装面上）

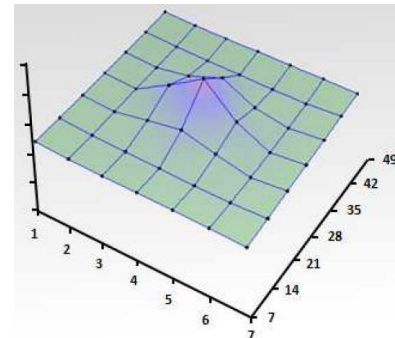


図-9 実稼動アニメーションのカット図（その 1）

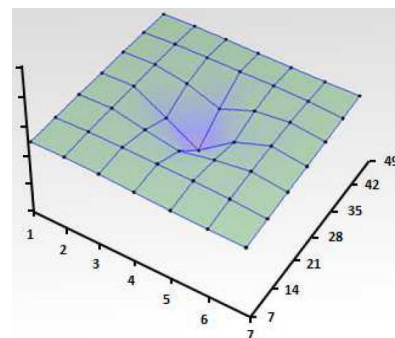


図-10 実稼動アニメーションのカット図（その 2）

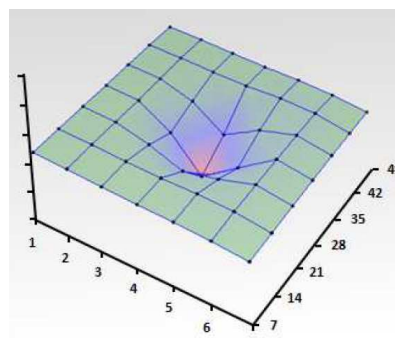


図-11 実稼動アニメーションのカット図（その 3）

なお、舗装工事においてコンクリート床版の上面にアスファルト乳剤が塗布されており、その面で縁切れしたような舗装版のみが振動する応答も確認している（図-12 参照）。これは、舗装工事から計測実験までの材齢が若いゆえのものと考えられる。

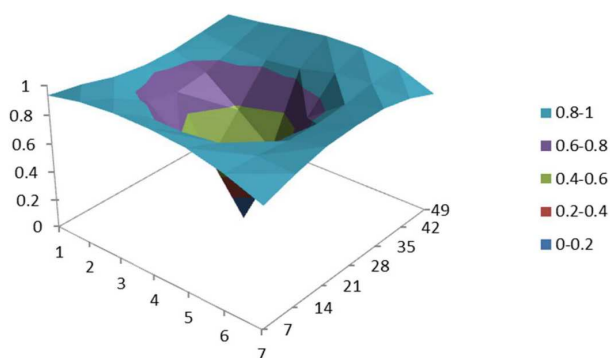


図-12 実稼動図 ($f=369\text{Hz}$; 参考図)

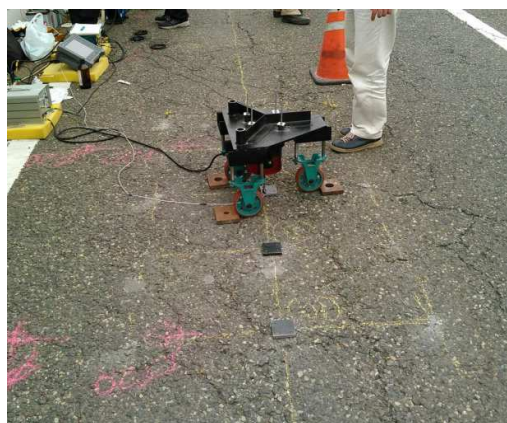


写真-3 供用中の橋梁における計測実験

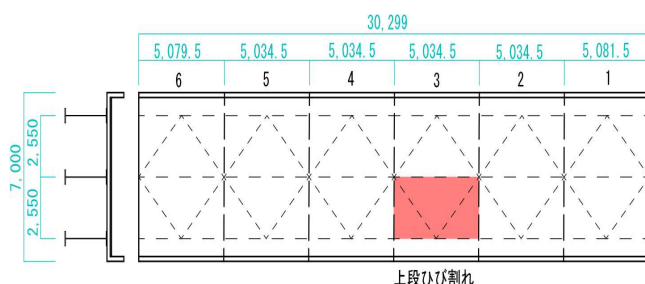


図-13 対象橋梁の諸元, 概略図 (単位: mm)

表-6 固有振動数と実験値

ひび割れ位置	振動対象の板厚 h (m)	振動対象の拡がり $a \times b$ (m)	薄板理論における理論解(計算値)		実験計測値
			周辺単純支持 f_s (Hz)	周辺固定支持 f_f (Hz)	
上層鉄筋面付近	$0.03+0.075=0.105$	0.5×0.5	1,427	2,602
		0.6×0.6	991	1,807
		0.7×0.7	728	1,328	687.2
		0.8×0.8	558	1,016	549.7
		0.9×0.9	440	803	428.4
		1.0×1.0	357	651

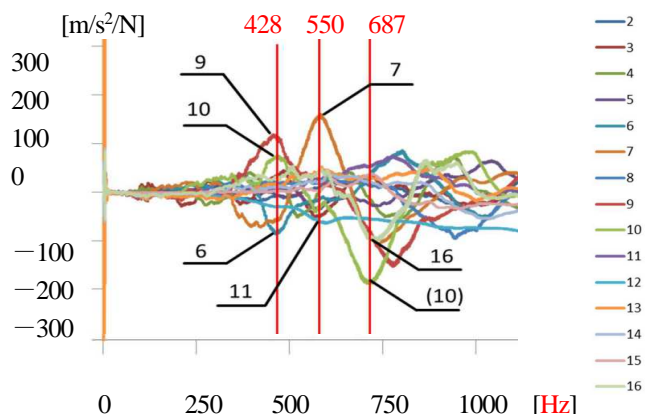


図-14 FFT 解析図

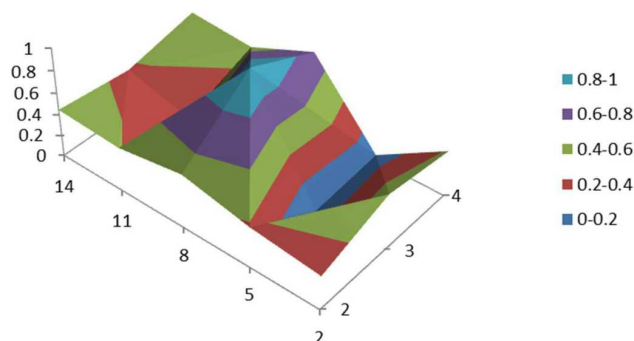


図-15 実稼動図 ($f=428\text{Hz}$ の例)

5. 供用中の橋梁路面からのひび割れの検出

5.1 橋梁構造の概要

供用中の鋼橋 RC 床版を対象に提案手法を適用した。計測対象は、図-13 に示す昭和 53 年 7 月竣工の鋼非合成 I 桁橋である。床版支間 $L=2550\text{mm}$ 、床版厚 $t=190\text{mm}$ 、アスファルト舗装 $t=75\text{mm}$ である。図-13 中の赤色着色部分、床版パネル 3 について計測を行った。

5.2 対象橋梁の動的特性の確認

(1) 固有振動数の算出と比較

式(3)、式(4)から関連する固有振動数を算出した。また、実験により獲得した計測値を表-6 の右欄に示した。

5.3 加振機を用いた固有振動数の計測

図-16 に示すように 50cm 間隔の計測グリッド 2~16 を橋面上に設置し、加振を行い計測した(写真-3 参照)。

今回の計測では、計測後対象床版部分 ($w=1500 \times L=4000\text{mm}$) を切り出すため、該当する床版パネル内の計測に限定した。なお、4 箇所の細径コアボーリングによる概略の状況把握を行い、上層鉄筋位置付近に内部水平ひび割れが発生していることを事前確認している。

(1) 振動モードの確認

床版パネルの計測結果を図-14、図-15 に示す。

図-14 中における数字 2~16 は計測点番号を示す。計測点 6, 9, 10 では 428Hz を、計測点 7, 11 では 550Hz を、計測点 10, 16 では 687Hz を検出したことを示す。図-15 は計測点 6, 9, 10 がピークを示す実稼動図である。

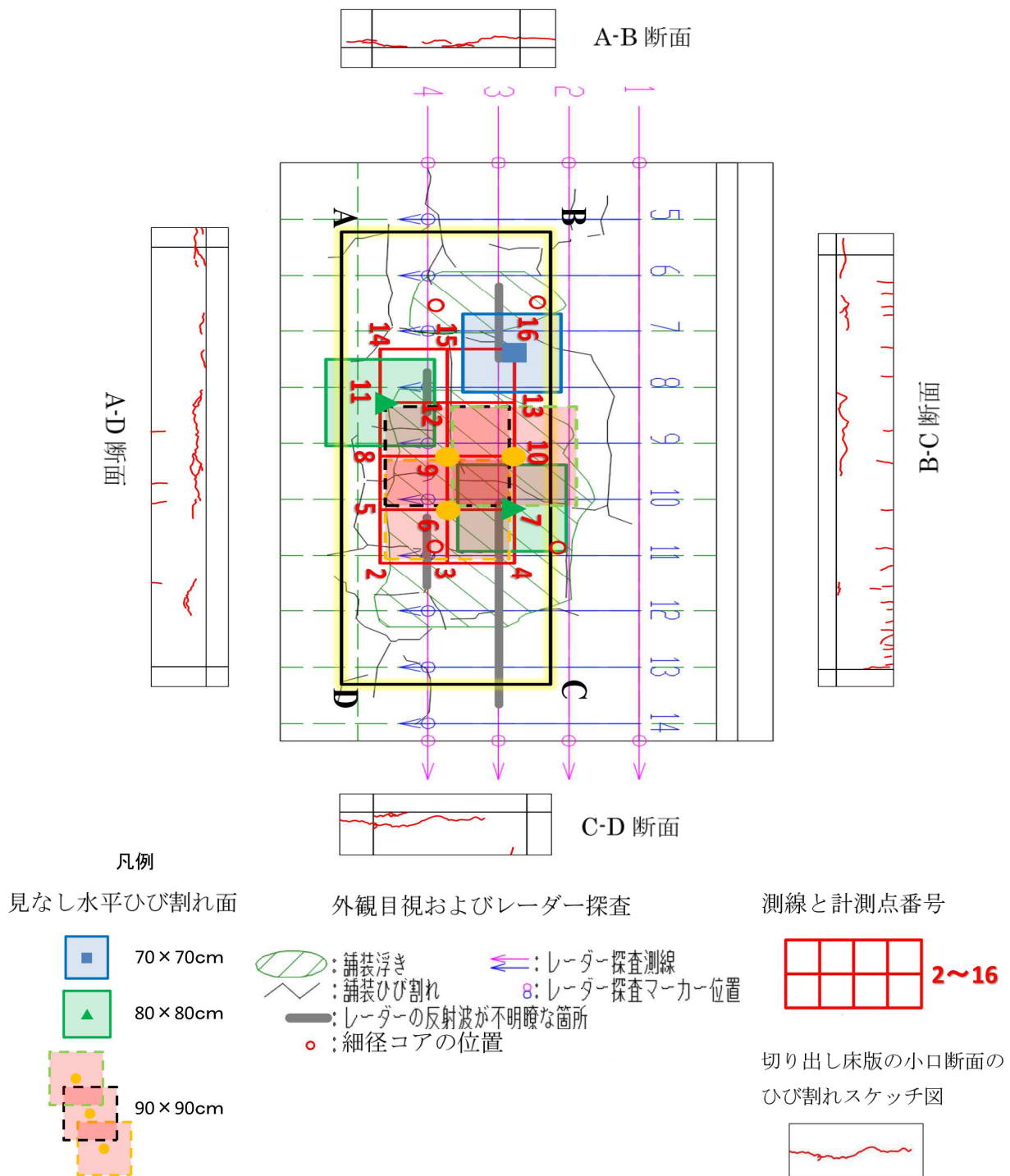


図-16 調査結果の重ね合わせ図

表-6 から、計測された固有振動数 (Hz) に対し推定される、正方形形状換算の見なし水平ひび割れ面積がそれぞれ求められる。

(2) 水平ひび割れ面位置の推定

上記結果をまとめると、図-16 に示すようなひび割れ位置および見なし水平ひび割れ面がそれぞれ推定される。すなわち、床版上の計測点網 2～16 に対し、計測 Hz 数に見合うひび割れ面（正方形換算の見なし面積）が推定される。なお、ABCD は後日、床版を切り出した時の形状およびその相対位置を示している。中央の平面図中、

右側は壁高欄である。計測点 6, 7, 9, 10, 11, 16 における取得 Hz 数から、その点において推定される見なし水平ひび割れ面を図示した。

5.4 他の計測手法による推定ひび割れとの比較

本計測と平行して、他の調査・計測手法によるひび割れ位置の推定を行っている。外観目視、レーダー探査、細径コアボーリング、および切り取った床版 ABCD の小口面のひび割れ観察を実施した。

他の調査等の結果を重ね合わせて、図-16 に示した。

図の凡例を同図下欄に示した。図中、4ヶ所の赤丸は細径コアボーリングによるコア採取位置を示した。これにより事前に水平ひび割れの存在を確認している。切り出し床版の小口断面図における各面（A-B断面、B-C断面、C-D断面、およびA-D断面）の向きについては、中央平面図寄りがアスファルト舗装部分をあらわしている。赤線はひび割れスケッチである。

加振計測実験による計測範囲が限定されていることから、必ずしも十分なレーダー探査結果等との比較はできないが、図-16から以下のことがいえる。

図中、レーダー探査における「レーダーの反射波が不明瞭な箇所」が、いわゆる、ひび割れの可能性が懸念されると推定した箇所に該当する。図-16におけるレーダー探査の測線4と8の交点付近、同じく4と11、3と7、および3と10-11辺りについては本計測手法による結果と一致している。

測線4と9の交点付近、および3と9では一致していない。他方、切り出し床版の小口面A-DおよびB-Cでは水平ひび割れが多数確認されており、測点10、11の計測結果と合致している。それら以外の部分にもひび割れ面が確認できるが、計測実施環境の制約により計測が行えず、詳細な突合せ、比較は果たせていない。

このように、加振計測実験から水平ひび割れの存在が推定される計測点6点の内4点がレーダー探査の結果と一致していた。ただし、レーダー探査による水平ひび割れの検出精度が十分であることが示されていないため、あくまで参考値である。切り出し床版をひび割れ面に沿って解体することができない事情から、このような定性的な推定に留めざるを得ない。

一方、小径コアボーリングの該当箇所では、測点6、7、16がほぼ捉えていると考えられる。ただ、削孔後はモルタル充填されていることを考えると、逆にひび割れ面への拘束効果を発揮していることも考え得ることから、一致の結果は慎重に考える方がよい。

切り出し床版の小口断面のひび割れスケッチと加振実験結果は比較的一致していると考えられる。なお、正方形の見なし水平ひび割れ面を想定したが、これが適当であるかどうかについては、今後のさらなる吟味が必要である。また、床版貫通方向のひび割れによる影響も含めさらなる検討が必要であると考えられる。

6. 結論

本稿で行った検討より、次のことがいえる。

- 1) コンクリート平板の固有振動数から、コンクリート内部の水平ひび割れによる劣化の有無を非破壊で検出できる可能性があることがわかった。
- 2) RC床版上にアスファルト舗装がある場合でも、ひび割れを検出できる可能性があることがわかった。
- 3) 現在供用中の実橋梁においても水平ひび割れを検出

できる可能性があることがわかった。

- 4) 提案する手法では、水平ひび割れに起因するものの以外の固有振動も同時に検出することになり、実稼動図を作成するなどして、床版等構造物各部の振動モードと区別することが重要である。
- 5) 計測された固有振動数は、周辺単純支持の場合の理論値に近いと推定される。
- 6) ひび割れ面の推定に際し、正方形近似を考え見なし水平ひび割れ面を想定したが、今後さらにいろいろな場面での計測結果等から考察を積み重ねるとともに、吟味が必要であると考えられる。

謝辞

本論文の作成に当たり、鳥取大学大学院工学研究科博士前期課程に在学する杉本和俊君、呉啓帆君に協力をいただいた。ここに記して感謝します。

参考文献

- 1) 三東豪士、大西弘志、岩崎正二、出戸秀明、宮村正樹：小型FWD試験機を用いた道路橋床版健全度評価の試み、道路橋床版シンポジウム論文報告集、土木学会、道路橋床版の複合劣化に関する調査研究小委員会、pp.235-238、2014.10
- 2) 鎌田敏郎：道路政策の質の向上に資する技術研究開発成果報告レポート、No.19-3、新道路技術会議、2010.6
- 3) 金光寿一、柳内睦人、三星智典：舗装熱を利用したサーモグラフィ法によるRC床版内部の欠陥検出に関する研究、土木学会論文集、No.732、V-59、pp.95-108、2003.5
- 4) 渡邊晋也、岡田慎哉、佐竹紳也、藤原貴央：コンクリート床版内部に発生した水平ひび割れの探査方法に関する実験的研究、土木学会年次学術講演会、I-024、pp.47-48、2014.9
- 5) 佐藤京介、大津政康：AE法によるコンクリートの破壊過程予測に関する考察、日本材料学会、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、第15集、pp.229-234、2015.10
- 6) 内藤英樹、齊木祐介、鈴木基行、岩城一郎、子田康弘、加藤潔：小型起振機を用いた強制加振試験に基づくコンクリート床版の非破壊試験法、土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造）、vol.67、No.4、pp.522-534、2011.10
- 7) 中山昭二、谷口朋代、小野祐輔：平板の動的応答に着目したコンクリートの内部水平ひび割れ検出に関する基礎的研究、日本材料学会、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、第15集、pp.235-240、2015.10
- 8) 中山昭二、谷口朋代、小野祐輔：RC床版の内部水平ひび割れ部を平板と見なした場合の動的応答の特

徴，日本材料学会，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，第 16 集，pp.347-352，
2016.10

- 9) 中山昭二，谷口朋代，小野祐輔，佐藤彰紀，堀岡良
則：道路橋 RC 床版における内部水平ひび割れ検出
法に関する提案，土木学会年次学術講演会，I-334，
pp.667-668，2017.9

- 10) Arthur W. Leissa : Vibration of plates, NASA
SP-160, pp.41-159, 1969

- 11) 社団法人日本道路協会，アスファルト舗装要綱 5 版，
pp.305，1993.11

(2017 年 9 月 25 日受付)

(2018 年 2 月 1 日受理)