

論文 Article

衝撃弾性波法によるコンクリート床版の内部劣化検出に関する研究

原稿受付 2023年7月26日

ものづくり大学紀要 第13号 (2023) 31~38

末光功治^{*1}, 岩野聡史^{*2}, 相澤雅俊^{*3}, 森濱和正^{*4}, 澤本武博^{*4}, 睦好宏史^{*5}^{*1} 株式会社ネクスコ東日本エンジニアリング 長野道路事務所 長野施工管理課^{*2} リック株式会社 技術研究所^{*3} 株式会社シーテック^{*4} ものづくり大学 技能工芸学部 建設学科^{*5} 埼玉大学 レジリエント社会研究センター

概要 本研究では、高速道路橋の鉄筋コンクリート床版と同じ配筋、床版厚の試験体上面に、水平ひび割れ及び土砂化を模擬した内部欠陥を作製し、床版試験体の下面側から衝撃弾性波法により測定し検証した。その結果、床版試験体の内部欠陥の中心付近の異常値の検出率は高いが、内部欠陥の端部付近では検出率は低くなった。また、水平ひび割れでは異常値が部材厚さよりも小さく測定されたが、土砂化では部材厚さより小さくなる異常値と、大きくなる異常値が混在した。

キーワード : 衝撃弾性波, コンクリート床版, 水平ひび割れ, 土砂化

A Study on Detection of Internal Deterioration of Concrete Slabs Using Impact Elastic Wave Method

Koji SUEMITSU^{*1}, Satoshi IWANO^{*2}, Masatoshi AIZAWA^{*3}, Kazumasa Morihama^{*4}, Takehiro SAWAMOTO^{*4} and Hiroshi MUTUYOSHI^{*5}^{*1} NEXCO-East Engineering Co. Ltd.^{*2} RIC Co. Ltd.^{*3} CTECH Co. Ltd.^{*4} Dept. of Building Technologists, Institute of Technologists^{*5} International Institute for Resilient Society Saitama University**Abstract**

In this study, internal defects simulating horizontal crack and gravel layer in slab were create on the upper surfaces of a test specimen with the same bar arrangement and slab thickness as the reinforced concrete slab of an expressway bridge. It was verified by the impact elastic wave method from the bottom side of the test specimen. Resulting in, the detection rate of abnormal values near the center of the internal defect of slab specimen was high, but the detection rate was low near the edge of the internal defect. In addition, for horizontal cracks, abnormal values were smaller than the member thickness, but for gravel layer in slab, some abnormal values were smaller than the member thickness, while others are larger than the member thickness.

Key Words : Impact Elastic Wave, Concrete Slab, Horizontal Clack, Gravel Layer In Slab

1. はじめに

東日本における高速道路橋（首都高速道路を除く）は、供用30年以上の橋梁が約6割を占め、供用50年を経過した橋梁もある。経過年数の増加に伴う老朽化の進展、並びに大型車交通による疲労の影響、塩害の影響など厳しい使用環境により著しい変状が発生している。

特に鉄筋コンクリート床版(以下、床版という。)については、床版上面コンクリートの土砂化、鉄筋の腐食、床版下面コンクリートの剥離などの変状が顕在化している。床版上面コンクリートの土砂化は、アスファルトコンクリート舗装のひび割れから侵入した水が要因となって進展するが、ポットホールが発生するなどの舗装の変状が発生するまで床版上面の変状が把握できない。床版上面の変状が発覚した時にはすでに床版の耐力が低下していることもある。床版上面コンクリートの劣

化メカニズムを Fig.1 に示す。

床版上面コンクリートの調査は、舗装開削を実施したのちに床版の劣化程度を詳細に調査する方法や、床版下面から衝撃弾性波法により変状発生箇所を推定し、小径コアによる内部観察調査を行うことで床版上面の劣化程度を調査している。

舗装開削による調査は、開削箇所の詳細なデータは得られるが、車線規制が必要になり調整に多くの時間を要してしまう。下面からの調査は、制約は少なく調査効率は上がるが、衝撃弾性波法は実物大の試験体での実証例や実構造物での適用事例が少なく、的確な変状発生箇所の推定が難しいことが現状での課題になっている。

本研究では、高速道路橋の床版と同じ配筋、床版厚の床版試験体の床版上面側に水平ひび割れ及び土砂化を模擬した内部欠陥を作製し、床版試験体の下面側から衝撃弾性波法により内部欠陥を検出できるか検証した。

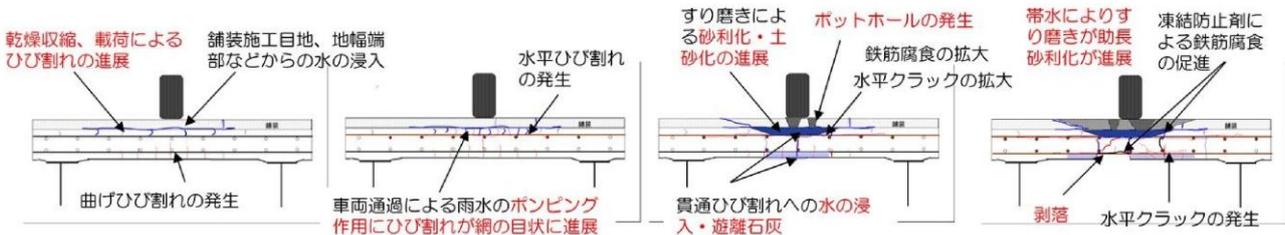
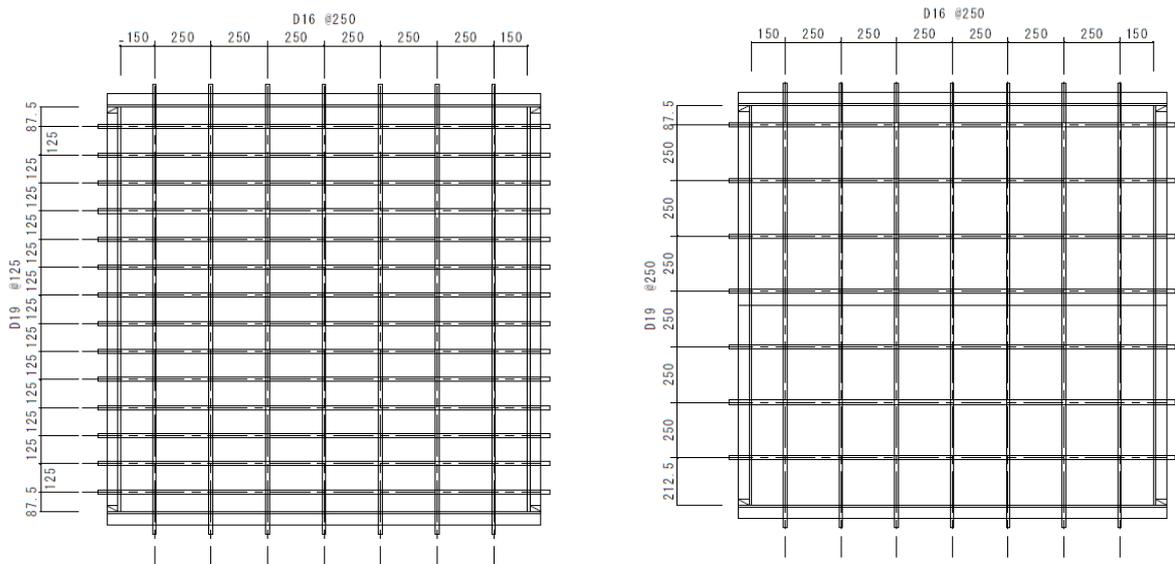


Fig.1 Mechanism of deterioration progressing from the upper surface of concrete slab



(a) Bottom reinforcement

(b) Top reinforcement

Fig.2 Dimensions and arrangement of reinforcing bars of slab specimen

2. 実験概要

2.1 床版試験体の作製

2.1.1 床版試験体の配筋・寸法および配合

床版試験体の寸法および配筋を、Fig.2 に示す。床版試験体は、実際の高速道路の床版を再現し、床版の厚さを 250mm、橋軸方向には上端筋、下端筋ともに D16 を 250mm ピッチ、橋軸直角方向の下端筋には D19 を 125mm ピッチ、上端筋を 250mm ピッチで配筋し、1800×1800mm の平面を切り出したものとした。実際の床版は、コンクリート上に防水シートを施し、アスファルト舗装を行うが、床版下面からの衝撃弾性波法では、防水シートおよびアスファルト舗装の影響は受けなため、今回の実験では鉄筋コンクリート部分のみとした。

コンクリートの配合を Table1 に示す。コンクリートの呼び強度は 24 とし、スランプは 8.5cm でト

ックアジテーターから直接シュートで打ち込み内部振動機で締め固めた。

2.1.2 床版の内部欠陥

(a) 床版上面の水平ひび割れ

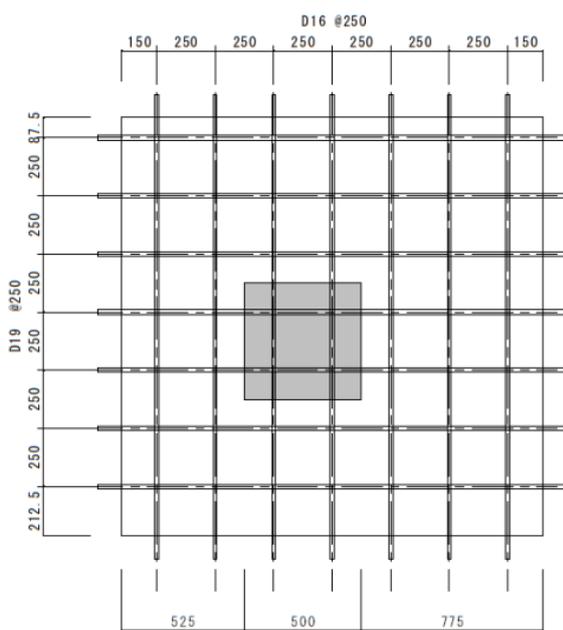
床版の水平ひび割れは、床版上面コンクリートの劣化初期に発生することが多く、上端筋の上部に発生するケースが多く見られる。水平ひび割れ幅は、劣化の進展とともに大きくなり、亀甲状ひび割れ、土砂化へと進展していく。水平ひび割れを模擬した平面 500×500mm、厚さ 0.5mm (ひび L) および平面 250×250mm、厚さ 0.5mm (ひび S) のアクリル板を上面から 20mm (底面から 230mm の位置) の位置に配置した。水平ひび割れの配置を Fig.3 および Fig.4 に示す。

(b) 床版上面の土砂化

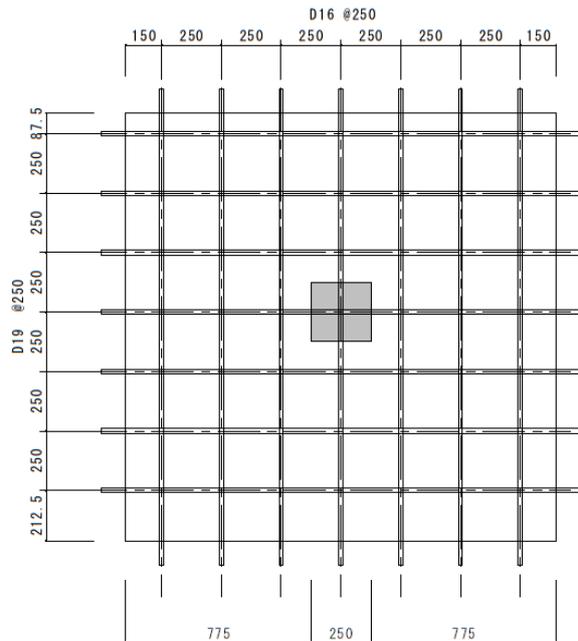
床版の土砂化は、床版上面コンクリートの劣化の最終形態として発生する変状であり、上端筋の

Table 1 Mix proportions of concrete

セメントの種類	呼び強度	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m ³)					フレッシュコンクリートの試験結果			材齢28日の標準水中養生強度 (N/mm ²)
					W	C	S	G	Ad	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	
N	24	20	55.5	47.0	168	303	848	966	3.636	8.5	5.4	25.7	35.7



(a) Defective area of 500mm square



(b) Defective area of 250mm square

Fig.3 Horizontal position of defective area

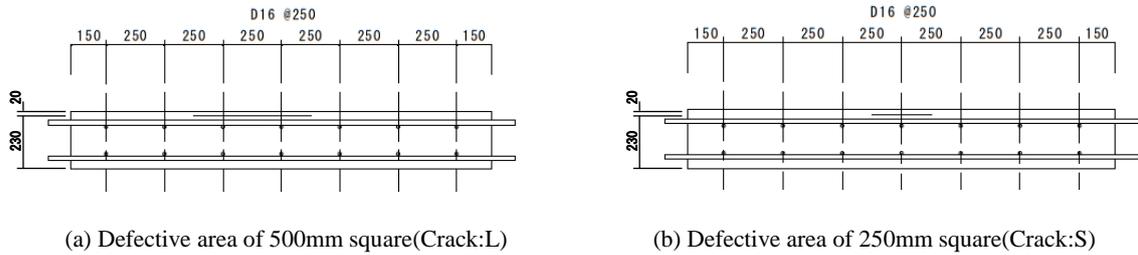


Fig.4 Vertical position of horizontal crack of slab specimens

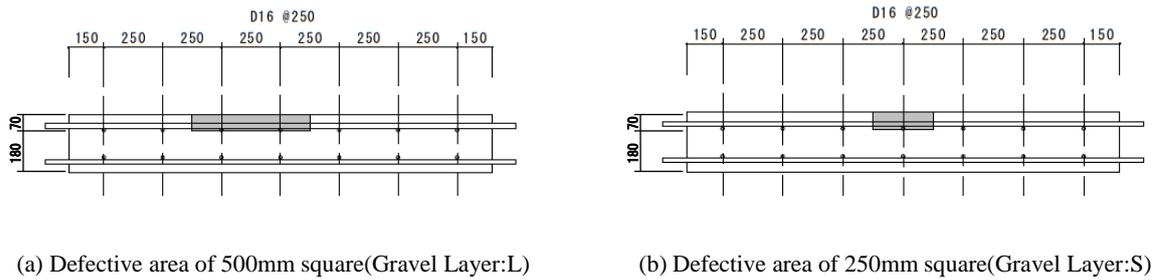


Fig.5 Vertical position of gravel layer in slab of slab specimens

上側もしくは上端筋を取込む形で発生するケースが多く見られる。平面 500×500mm (土砂 L) および 250×250mm (土砂 S) , 上面から深さ 70mm の部分 (底面からは 180mm の位置) に、砂利、砂、土および水を混合し、土砂化を模擬した。土砂化の配置を Fig.3 および Fig.5 に示す。

この方法で受信センサにより測定される振動 (以下、測定波形という) の例を Fig.8 に示す。Fig.8 は横軸に時間、縦軸に振幅を示す波形であるが、反射波が到達する度に測定波形では波形が生成され、測定波形は一定の周期で振幅が大きくなる波

2.2 衝撃弾性波法による測定

2.2.1 測定原理

衝撃弾性波法の測定状況の例を Fig.6 に示す。衝撃弾性波法は、Fig.7 の模式図に示すとおり床版下面を鋼球などで打撃し、衝撃により発生した弾性波を床版下面に受信センサとして設置した加速度計により受信して、コンクリートの内部などの状態を推定する試験法である。

鋼球打撃によりコンクリート中に様々な弾性波が発生するが、発生する弾性波の一つにコンクリートの内部に伝搬し、コンクリートと音響インピーダンスが異なる材料 (Fig.7 の空気) との境界面 (Fig.7 の床版上面) で反射して、床版下面に到達する弾性波 (以下、反射波という) がある。床版下面に到達した反射波は、さらに床版下面で反射して、再び内部に伝搬し、反射を繰り返す性質がある。衝撃弾性波法による試験方法の一つに、この反射波を測定対象とした多重反射法がある¹⁾。



Fig.6 Measurement situation of Impact Elastic Wave Method

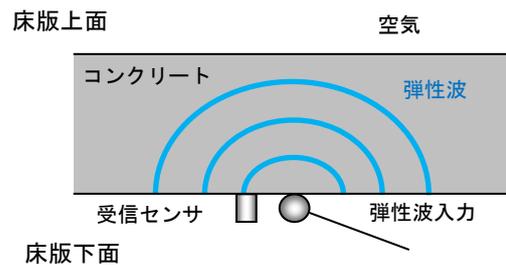


Fig.7 Propagation simulation of the Elastic Wave

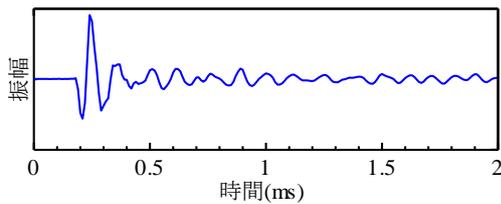


Fig.8 Example of the Measurement Wave on the Multiple Reflection Method

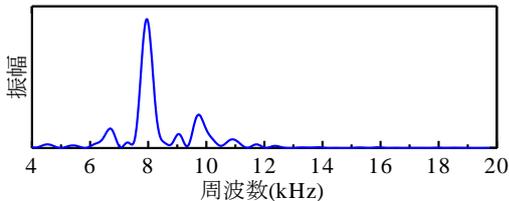


Fig.9 Example of the frequency spectrum on the Multiple Reflection Method

形となる。つまり、測定波形で生成されている波形の個数が、反射波が往復した回数となる。多重反射法ではこの性質を利用し、測定波形に対して Fig.9 に示す周波数解析を行い、振幅が極大となった周波数（以下、卓越周波数という）から反射波の単位時間あたりの往復回数を判断し、さらに、卓越周波数の逆数から反射波の往復時間を判断している。

ここで、コンクリート内部での変状の有無により変化する反射波の伝搬状況を Fig.10 に示す²⁾。コンクリート内部に変状が存在せずに健全な場合は、Fig.10(a)に示すように反射波は床版上面で反射し、正常な伝搬速度で往復する。卓越周波数は、反射波が床版上面までの往復時間の逆数となる。なお、このときの周波数を基本周波数という。これに対して、コンクリート内部に反射波の進行方向と直角方向の断面積が大きい空隙による変状が存在する場合は、Fig.10(b)に示すように反射波はこの空隙の表面で反射する。反射波の往復時間は健全な場合と比較して小さくなることから、卓越周波数は健全部での卓越周波数よりも高くなる。また、コンクリート内部に豆板や断面積の小さい空隙による変状が存在する場合は、Fig.10(c)に示すように反射波はこの変状を透過して、床版上面で反射する。ただし、変状部付近の弾性係数は健全なコンクリートよりも小さくなることから、反射波の往復時間は健全な場合と比較して大きくなる。これにより、卓越周波数は健全部での卓越周

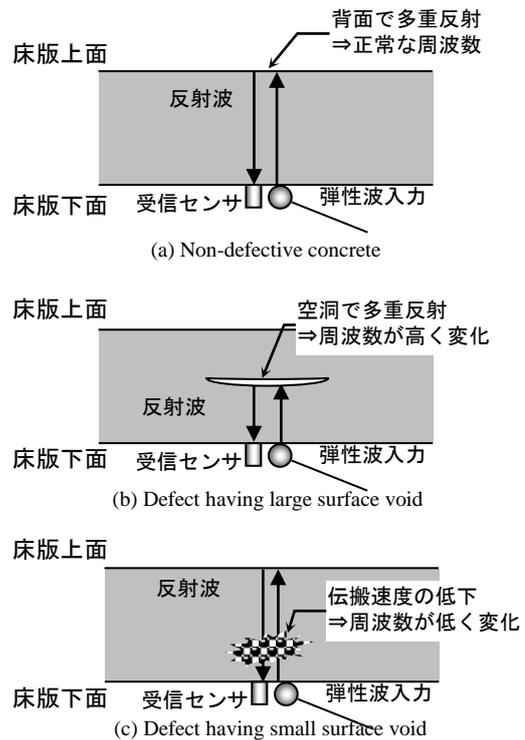


Fig.10 Propagation simulation of the Elastic Wave under various conditions of concrete

波数よりも低くなる。

多重反射法で測定される卓越周波数は、以上のとおりコンクリートの内部の状況によって変化する。本実験ではこの性質を利用し、各点で測定された卓越周波数を比較することにより、床版試験体の内部欠陥（水平ひび割れ、土砂化）の位置を検出できるのかを検証した。

2.2.2 測定方法

今回の実験は、床版下面からの測定を想定して各床版試験体で測定した。測定点は試験体の床版下面で、橋軸方向と橋軸直角方向の格子状に設定した。測定点を設定した範囲及び設定間隔は、橋軸方向が端部から 100mm～1700mm の範囲に 100mm 間隔で 17 測定点、橋軸直角方向が端部から 200mm～1600mm の範囲に 100mm 間隔で 15 測定点である。なお、橋軸方向と橋軸直角方向で端部からの測定開始点が異なるのは、試験体設置後の架台等の障害物の影響である。

弾性波は直径 15mm の鋼球で測定点を打撃して入力した。受信センサは測定点の近傍（概ね 3cm 以内）に圧電型加速度計（周波数範囲 0.3Hz～12kHz）を手で押さえ付けて設置した。サンプリ

ング時間間隔は $2\mu\text{s}$ 、計測時間長さは 2ms である。

2.2.3 各点での評価値の決定方法

Fig.11 に各点で得られた周波数解析結果とこの結果から各点の周波数（以下、測定周波数という） f_0 を決定した例を示す。なお、Fig.11 の横軸は周波数、縦軸は相対振幅値であり、各点での周波数解析結果の振幅の最大値が 1 になるように正規化した振幅値である。

コンクリート内部に欠陥が存在しない健全なコンクリートで測定される基本周波数 f_D は式(1)で示される。

$$f_D = V_P / (2D) \quad \text{式(1)}$$

ここで、 f_D は基本周波数(Hz)、 V_P は弾性波伝搬速度つまり反射波の速度(m/s)、 D はコンクリートの部材厚さ（床版の厚さ）(m)となる。今回の各床版試験体の V_P は内部欠陥が含まれていない点での測定結果から 3968m/s であることを確認した。また D は 250mm であり、 f_D は 7.963kHz となる。

今回の実験では、各点で得られた周波数解析結果において、Fig.11(a)及び(b)のように、 $f_D \pm 5\%$ の範囲内に相対振幅値 0.5 以上となる卓越周波数が確認された測定点は、コンクリート内部に欠陥が存在していない健全な測定点であると判断し、この卓越周波数を測定周波数 f_0 とした。一方、Fig.11(c)及び(d)のように、 $f_D \pm 5\%$ の範囲内に相対振幅値 0.5 以上となる卓越周波数が確認されない測定点は、コンクリート内部に欠陥が存在する測定点であると判断し、振幅が最大となった卓越周波数を測定周波数 f_0 とした。以上のように得た測定周波数 f_0 から、各点での反射波の反射深さを式(2)により算出し、これを評価値とした。

$$D_0 = V_P / (2f_0) = 3968 / (2f_0) \quad \text{式(2)}$$

ここで、 D_0 は反射深さ(m)、 V_P は弾性波伝搬速度(m/s)、 f_0 は測定周波数(Hz)である。

なお、基本周波数 f_D から $\pm 5\%$ の範囲内と $\pm 5\%$ を基準値に設定したのは、既往の研究³⁾で確認されている本法の測定精度 $\pm 5\%$ を考慮したものである。また、Fig.11(b)のように、振幅が最大とな

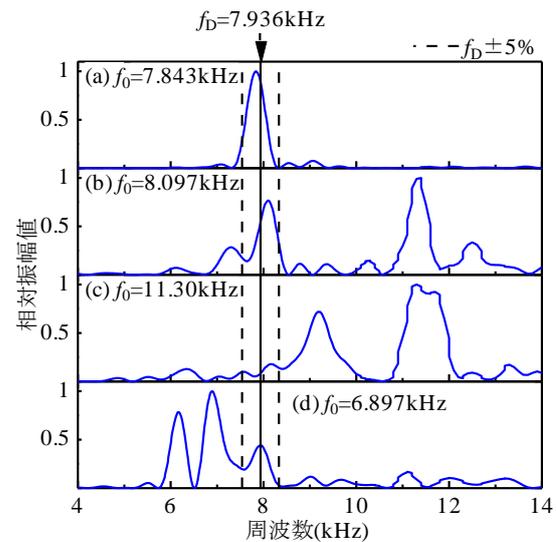


Fig.11 Example to decide the Evaluation value

る卓越周波数が $f_D \pm 5\%$ の範囲外であっても $f_D \pm 5\%$ の範囲内に相対振幅値 0.5 以上となる卓越周波数が確認された場合を健全であると判断したのは、測定点の直上に内部欠陥が存在すれば、Fig.11(b)の波形に $f_D \pm 5\%$ の範囲内の周波数となる反射波は存在しないこと、及び、本法では測定点の直上が健全であっても他点の変状の影響等により複数の周波数が卓越する可能性があること、これらを考慮したものである。

3. 実験結果および考察

各点での評価値をコンター表示で示した結果を Fig.12 に示す。評価値が実際の床版の部材厚さである $250\text{mm} \pm 5\%$ の範囲内 ($237.5\text{mm} \sim 262.5\text{mm}$) であれば健全な点であると判断され、この範囲外であれば異常値となる点であると判断される。なお、Fig.12 には実際に内部欠陥が存在する位置を赤枠で図示した。Fig.12(a)～(d)において試験体の端部付近に内部欠陥は存在していないが、多くの点で評価値が実際の床版の部材厚さとの差が大きくなり、異常値となる点であると判断された。この結果から、端部付近では正確な測定ができないものと判断される。これは床版試験体の床版上面ではなく、供試体の側壁で反射した反射波を受信しているためと考えられる。そこで、端部付近 100mm を除いた測定位置（橋軸方向： $200\text{mm} \sim$

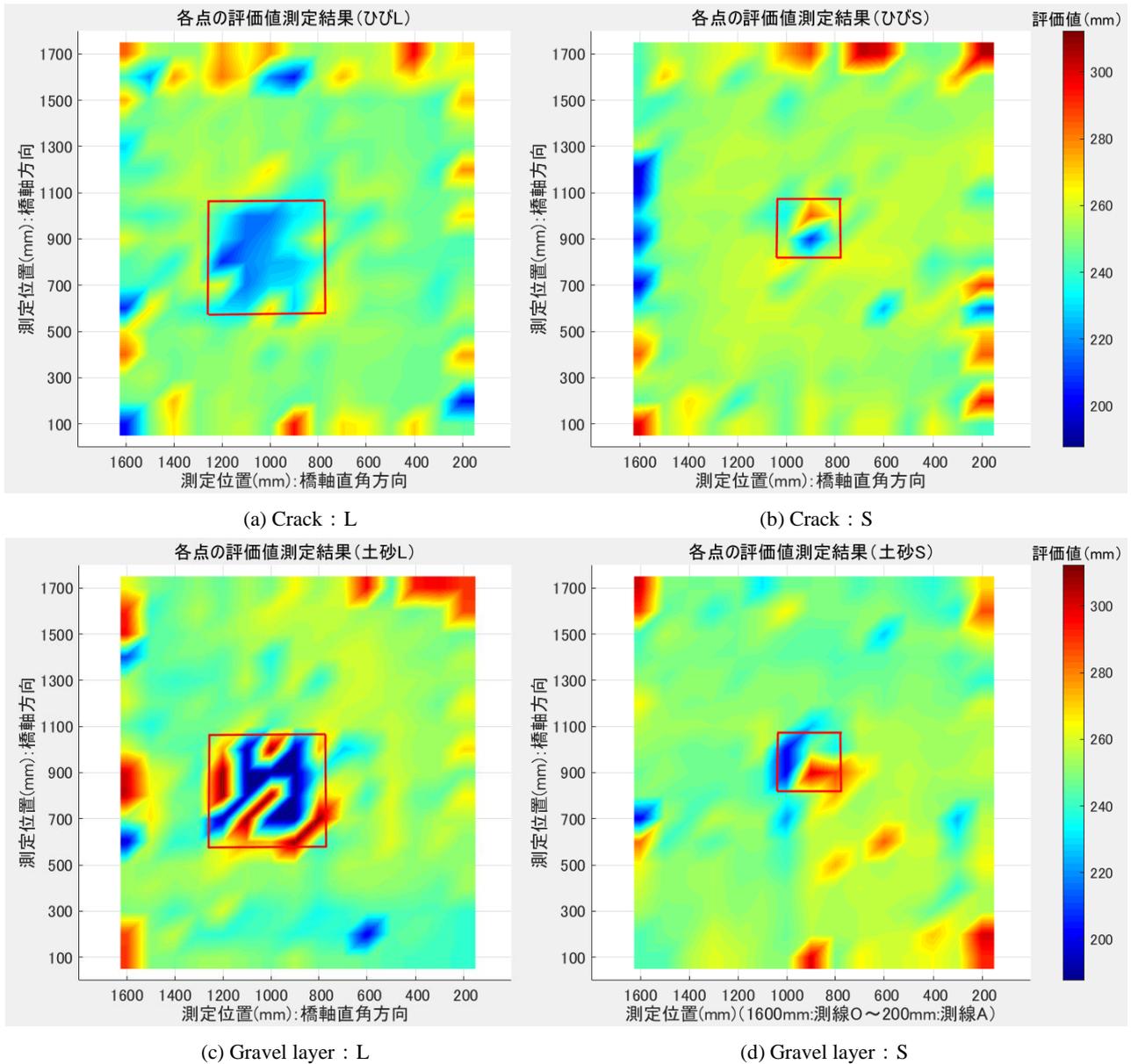


Fig.12 Evaluation value of each measurement point (□ : the defect position)

1600mm 及び橋軸直角方向 : 300mm~1500mm) 範囲での評価値に着目し, コンクリート内部に欠陥が存在していない健全な測定点を健全な点であると判断できた率, 及び, コンクリート内部に欠陥が存在している測定点において異常値となる点であると判断できた率, これらの検出率を求めた. その結果を Table 2 に示す.

Table 2 より, 健全な測定点に対しては 90%以上の率で健全な点であると判断できた. 一方, コンクリート内部に欠陥が存在している測定点に対しては, 水平ひび割れ (ひび L, ひび S) よりも土砂化 (土砂 L, 土砂 S) の方が検出率は大きくな

った. この原因は, 測定点を設定した試験体の底面から内部欠陥までの深さは土砂化が 180mm であるのに対して, 水平ひび割れは 230mm であり, 水平ひび割れは内部欠陥までの深さと部材厚さとの差が小さかったことであると考えられる. 水平ひび割れでは, 健全な点での測定結果との差が生

Table 2 Counting of the accuracy

試験体	ひびL	ひびS	土砂L	土砂S
健全な点の検出率	91.4%	97.7%	98.6%	95.4%
変状が存在する点の検出率	70.0%	50.0%	73.3%	83.3%

じにくかった可能性が考えられる。また、 $250 \times 250\text{mm}$ のひび割れ（ひび S）での検出率は 50% 程度と小さくなった。さらに、Fig.12 の赤枠内の内部欠陥が存在する範囲での検出結果に着目すると、内部欠陥の中央付近は異常値となる率が高いが、赤枠付近に示す内部欠陥の端部付近では健全な点と異常値となる点が混在し、異常値の検出率が低くなる。

以上の結果より、床版上面付近に存在する、内部欠陥の平面形状が小さい、及び、内部欠陥の端部である、これらの条件が重なると本法での内部欠陥の検出の精度は低下する可能性が示された。

また、内部欠陥の種類（土砂化及び水平ひび割れ）による異常値のなり方に着目すると、Fig12(a) 及び(b)の赤枠内の水平ひび割れでの異常値は、ひび S での 1 点を除いて、評価値が実際の部材厚さよりも小さくなる異常値であった。このことから、直上に水平ひび割れが存在する点で弾性波を入力すると反射波は水平ひび割れで反射し、これにより測定値は異常値になると考えられる。これに対して、Fig12(c)及び(d)の赤枠内の土砂化では評価値が実際の部材厚さよりも小さくなる異常値と大きくなる異常値とが混在していた。このことから、直上に土砂化による変状が存在する点で弾性波を入力すると、土砂化底面で反射する反射波と土砂化した部分を迂回、又は、その部分を透過して床版上面で反射する反射波とが混在し、これにより測定値は異常値になると考えられる。

4. まとめ

本研究では、高速道路橋の RC 床版と同じ配筋、床版厚の試験体上面に、水平ひび割れ及び土砂化を模擬した内部欠陥を作製し、床版試験体の下面側から衝撃弾性波法により測定し検証した結果、以下の(1)～(5)が明らかになった。

- (1) 健全部の検出率が高いものの、試験体端部付近では正確な測定ができない。
- (2) 内部欠陥の中央付近の異常値の検出率が高いが、内部欠陥の端部付近では検出率は低下する。
- (3) 平面 $250 \times 250\text{mm}$ の比較的小さな内部欠陥の

場合、土砂化に比べて水平ひび割れの検出率は低下する。

- (4) 水平ひび割れが存在する点で弾性波を入力すると、反射波は水平ひび割れで反射すると考えられ、異常値が部材厚さよりも小さく判断される。
- (5) 土砂化が存在する点で弾性波を入力すると、土砂化底面で反射する反射波と土砂化した部分を迂回、又は、その部分を透過して床版上面で反射する反射波とが混在すると考えられ、部材厚さより小さくなる異常値と大きくなる異常値とが混在する。

実物大床版試験体の上面側に作製した水平ひび割れ及び土砂化を、衝撃弾性波法で検出できることを明らかにした。今後は、内部欠陥の端部付近や水平ひび割れと土砂化の検出率などを詳細に検討し、内部欠陥の範囲や種類の特定について検証していく。

謝辞

本研究は、（株）ネクスコ東日本エンジニアリング、リック（株）、（株）シーテック、ものづくり大学の共同研究の一環として行われたものであります。床版供試体の作製及び衝撃弾性波の測定には、ものづくり大学教務職員、非常勤講師、ならびに澤本研究室の学生に多大なる協力を得ました。ここに深謝いたします。

文 献

- 1) NDIS 2426-2 : 2014 : コンクリートの非破壊試験—弾性波法—第 2 部 : 衝撃弾性波法, 一般社団法人日本非破壊検査協会, pp.9-12, 2014.9.
- 2) 岩野聡史, 極檀邦夫, 境友昭 : 衝撃弾性波法によるコンクリート内部欠陥探査, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1521-1526, 2002.6.
- 3) 岩野聡史ほか : 非破壊・微破壊試験によるコンクリート構造物の品質検査(5)非破壊試験によるコンクリート構造物の部材厚さの測定および変状の検出, 非破壊検査第 58 巻 4 号 (2009), pp152-157, 2009.4