

横波振動法を用いた合成床版の非破壊検査法に関する検討

Study on Non-Destructive Inspection Method for Composite Slab with Shear Wave Resonating

中本啓介*, 山本将士**, 茨田 匠***, 橋 肇****, 大久保宣人**, 高瀬和男*****

Keisuke Nakamoto, Masashi Yamamoto, Takumi Ibata, Hajime Tachibana, Nobuhito Okubo, Kazuo Takase

* (株) 駒井ハルテック 技術研究室 (〒293-0011 千葉県富津市新富 33-10)

**片山ストラテック (株) 技術研究所 (〒551-0021 大阪市大正区南恩加島 6-2-21)

***三協エンジニアリング (株) 本社 (〒553-0003 大阪市福島区福島 7 丁目 13 番 7 号)

**** (株) 駒井ハルテック 橋梁設計部 (〒110-8547 東京都台東区上野 1-19-10)

***** (株) 駒井ハルテック 技術研究室 (〒552-0003 大阪市港区磯路 2-20-21)

The steel concrete composite slab for bridges has the characteristics of high load bearing capacity and fatigue durability. Because of its advantage which improves construction safety and shortens the time on site, it is adopted widely and its number is increasing remarkably. On the other hand, bottom steel plates cover the underside of the steel concrete composite slab, it is not possible to have the visual inspect for presence of cracking and other types of damage to the concrete slab. In this study, the authors focus on shear wave resonating in non-destructive inspection method and research the test from the underside of slab. As the result, we have established that it is possible to monitor air gap and water between concrete and steel plates. In this article, we show the method of inspection and test results.

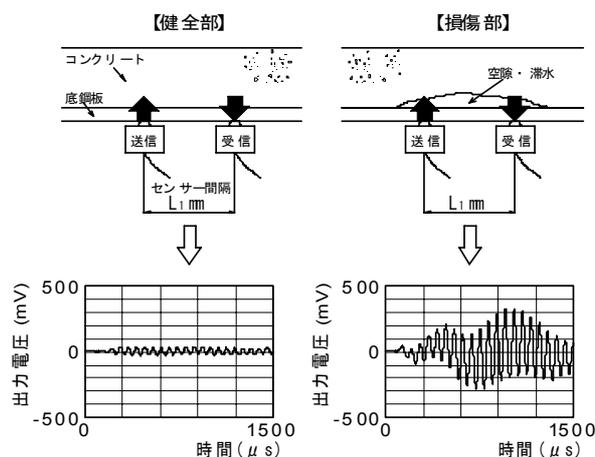
Key Words: non destructive test for composite slab, fast fourier transform, modal analysis, resonance

キーワード：合成床版の非破壊検査，高速フーリエ変換，モード解析，共振

1. はじめに

鋼コンクリート合成床版（以下，合成床版）は，コンクリート床版と同様に，床版表面のひび割れから水が侵入し，荷重の繰り返し载荷を受けることで，コンクリートのせん断耐荷力が急激に損なわれることが既往の研究により報告¹⁾されている．侵入した水が底鋼板とコンクリート間に滞水し，鋼部材の腐食による減厚が懸念される．簡易な点検法として床版下面側からの打音による充填確認は実施されているが，合理的に底鋼板上の滞水状態を検知する有効な検査技術は，現状では確立されていない状況である．そこで，著者らは非破壊検査技術であるトンネルや管路等のコンクリート構造物の劣化診断に用いられている横波超音波振動法²⁾（以下，横波振動法）に着目し，合成床版の床版下面側から実施する非破壊検査法の開発を行った．

本研究では，模擬損傷を設けた鋼板とコンクリートで構成する試験体を対象に実施した横波振動法を用いた合成床版の空隙状態および滞水状態を検知するための確認試験について示す．



図一 横波振動法による合成床版の検査概要

2. 横波振動法の概要

2.1 横波振動法による測定

非破壊検査法に用いる横波振動法は，鋼板部材表面から送信センサーを用いて低周波成分を含む広帯域な音波を点接触により横波を主成分とする音波（以下，横波振動）として伝搬させる．この鋼板部材に伝搬された横波振動を受信センサーで捉えることで対象とす



写真-1 測定機器

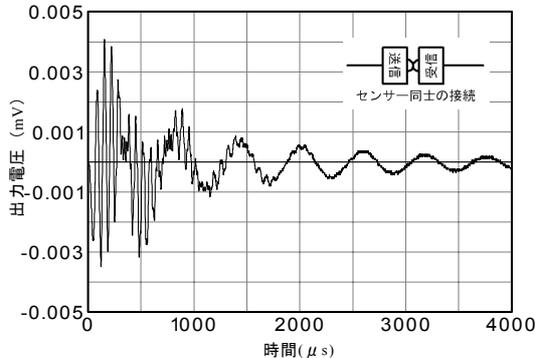


図-2 センサー同士を接続した場合の波形

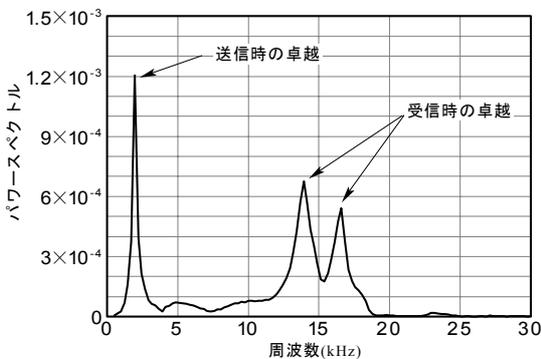


図-3 センサー同士を接続した場合の周波数特性

る鋼板裏面の空隙、滞水の有無を検出する手法である。

合成床版に横波振動法を用いた場合の検査概要を図-1に、測定装置を写真-1に示す。合成床版の場合、底鋼板とコンクリートが付着した状態（以下、健全部）では、コンクリートにより鋼板の振動は拘束される。超音波センサー設置間の底鋼板とコンクリート境界面に空隙や水が存在した状態（以下、損傷部）では底鋼板は拘束されない。伝搬波により共振現象が生じ、振動数、波形形状の変化が顕著となることに着目した検査手法である。横波振動法の特徴は、超音波センサーと底鋼板間に接触媒体を必要とせず、点接触で測定することができるため作業効率が良い点が挙げられる。

2.2 横波振動とセンサーの特性

伝搬波は、電圧 355V を印可電圧とし送信センサー内の金属板を振動させて探査対象に接触させることに

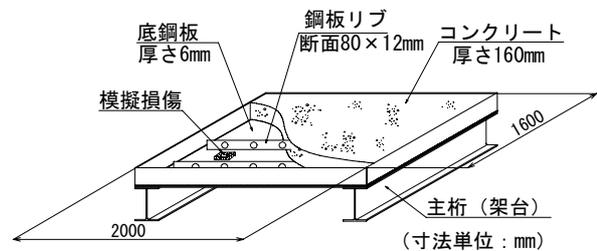
より横波振動として入力される。図-2, 3には送受信センサー同士を人力により直接接続した場合の測定波形と高速フーリエ変換による周波数解析（以下、FFT解析）により得られた周波数特性の一例を示す。測定波形は、測定開始から 250 μs で振幅のピークを迎え時間経過とともに減衰していく。図-3 に示した周波数特性の FFT 解析のパラメータは、サンプリング刻み 1.0 μsec, データ数 4096 個および周波数間隔 0.244 kHz としている。

図-3より周波数特性として 1kHz ~20kHz 帯の広範囲で周波数成分が存在しており、卓越周波数は、約 2kHz と 14~17kHz 間に確認できる。これは、送受信センサー自体の共振によるものと考えられる。この横波伝搬波、センサーの特性を踏まえて探傷試験を実施し損傷状態について確認する。

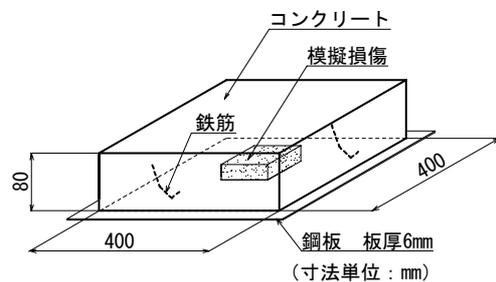
3. 模擬損傷を設けた試験体による探傷試験

3.1 試験概要

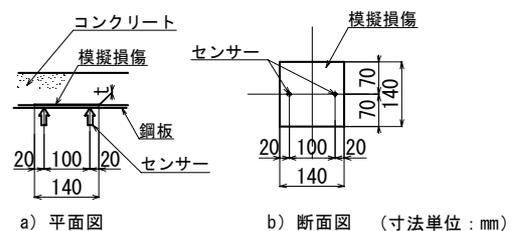
試験体概要とセンサー位置を図-4に示す。試験体は実構造をモデル化した実大試験体および測定対象部を部分的にモデル化したブロック型試験体を製作した。



(1) 実大試験体



(2) ブロック型試験体 (損傷再現タイプ)



(3) 測定時のセンサー位置 (損傷部)

図-4 試験体概要とセンサー位置

実大試験体は、底鋼板厚を 6mm とし、底鋼板上には型枠補強として鋼板リブを 400mm 間隔に配置した。また、コンクリートと底鋼板の合成に用いるずれ止めは孔明き鋼板ジベルとした。

ブロック型試験体は、作業スペース等の制約により試験体サイズは実大試験体のリブ間隔 400mm を考慮し設定した。鋼板とコンクリートの合成は、コンクリートと鋼板の境界部の状態に着目した試験であることを考慮し、簡易的にジベル用の鉄筋を鋼板上に溶接しコンクリートを打込み合成させた。

センサー位置は、模擬損傷範囲内となるように送受信センサー設置間隔を $L_1=100\text{mm}$ とした。これは、送受信センサー間隔は感度調整により任意に設定が可能であるが、人によるセンサー設置の作業性に配慮した。測定は、コンクリート材齢 1 ヶ月経過時に実施したものであり材齢 28 日におけるコンクリート強度は、現場養生で 30.5N/mm^2 であった。

3.2 実大試験体による探傷試験

(1) 試験条件

損傷の大きさは、センサー設置間隔を考慮し $140\text{mm} \times 140\text{mm}$ としリブ間中央に模擬損傷を配置した。模擬損傷は、写真-2 に示すようにコンクリート打込み前に、底鋼板に空隙厚さとサイズに相当するフィルムとモルタルブロックを底鋼板上に設置することにより再現した。損傷の深さは 0.1mm とし滞水状態は底鋼板に設けた孔より水を注入することで再現した。健全部については、測定波形に損傷部が及ぼす影響がないように模擬損傷端部から 200mm 程度離れた箇所のコンクリートと底鋼板が付着している箇所とした。測定は、測定者毎の波形差等を確認するため複数回実施しデータを収集した。測定状況を写真-3 に示す。

(2) 試験結果および考察

健全部と損傷部の測定結果より代表的な結果を抽出して示す。各状態の測定波形、ならびに FFT 解析による周波数分析の結果を図-5~7 に示す。なお、FFT 解析のバ

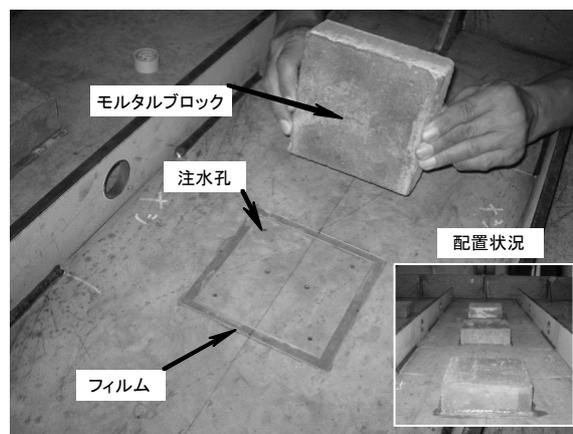


写真-2 模擬損傷の再現状況



写真-3 測定状況

ラメータは、2.2 節に示した条件と同じである。

まず、測定波形に着目する。図-5 に示す健全部ではコンクリートにより鋼板の振動が拘束されるため出力電圧の振幅が最大でも $\pm 80\text{mV}$ 程度と小さく、測定開始から $3,000\mu\text{s}$ 程度で $\pm 10\text{mV}$ に減衰していくことが確認できる。

図-6、7 に示す空隙部と滞水部では探傷部の鋼板が拘束されないため振幅は、最大で 500mV 程度と大きく、出力電圧の振幅は、非対称となっている。また、滞水の有無により出力電圧の減衰傾向は異なることが確認できる。

つぎに、周波数特性より卓越周波数の分析を行う。健全

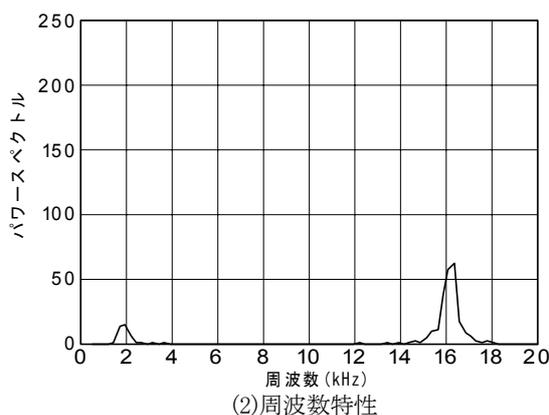
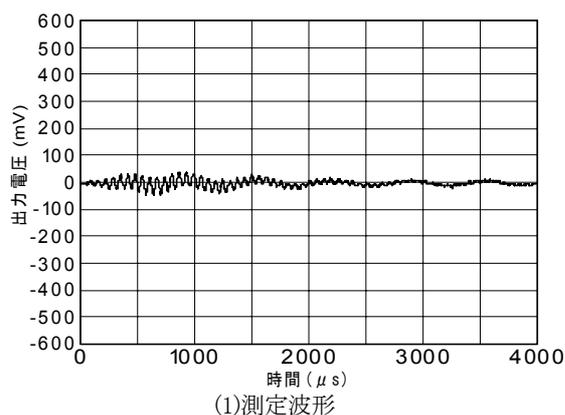


図-5 健全部における測定波形と周波数特性

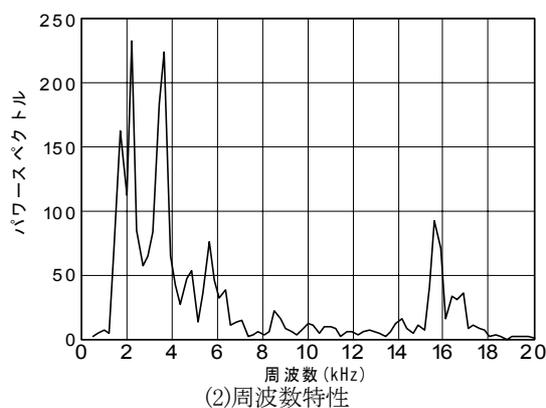
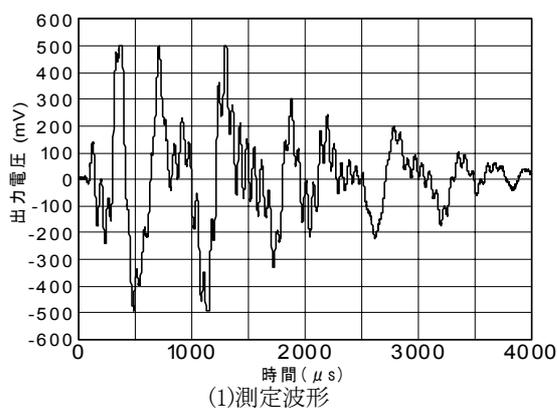


図-6 損傷部(損傷深さ0.1mm)における測定波形と周波数特性

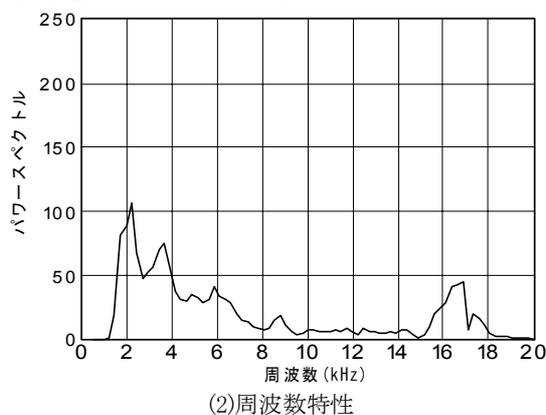
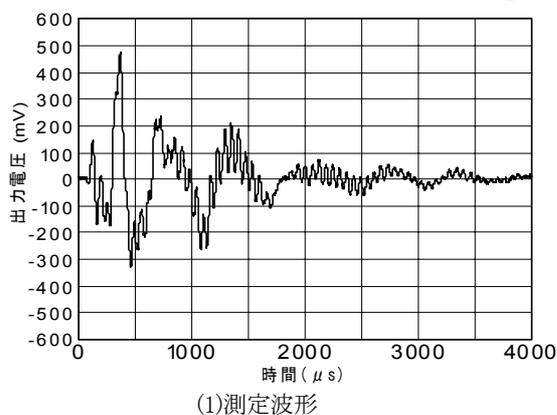


図-7 滞水部(損傷深さ0.1mm)における測定波形と周波数特性

部では、2kHz および 16kHz 前後に卓越振動数が存在する。これは、2 つの因子が関係していると考えられる。1 つは、測定範囲における鋼板面を伝搬する横波の反射による卓越³⁾と考えられる。反射により生じる共振周波数 f_p は、送受信センサー設置間隔 L_1 と横波の音波速度 V_s から式(1)で算出することができる。横波の音波速度を $V_s=3230 \times 10^3 \text{mm/sec}$ 、送受信センサー間の距離は $L_1=100\text{mm}$ とすると、面内に伝わる横波の共振周波数 f_p は 16.2kHz となり測定値(16.6kHz)と、ほぼ一致する。

$$f_p = \frac{1}{2L_1/V_s} \quad (1)$$

2 つめの因子は 2.2 節で示した横波振動入出力時におけるセンサー固有の卓越振動数に関係している。送受信センサー固有の共振特性により 2kHz と 16kHz に卓越周波数が生じたものと考えられる。

図-5 に示す健全部では、前述の因子に関する周波数を除く 3kHz~14kHz のパワースペクトルは、ほぼゼロであり、卓越振動数は存在しない。

一方、図-6 に示す空隙部では、送受信時センサー固有の卓越周波数以外にも 3kHz~14kHz の範囲で卓越周波数が複数存在している。図-7 の滞水部についても同様に複数存在しているが、注水したことにより卓越するパワースペクトルは低減されている。また、2kHz と 16kHz 前後の送受信センサー固有の卓越を示すパワースペクトルも

滞水部では空隙部の 40%程度となっており水を注入したことによる差が確認できる。これは、複数回測定しても送受信時の両方、あるいは片方のパワースペクトルが低減される結果であった。

以上より、横波振動やセンサーの固有の共振特性を把握することで、出力電圧の波形と FFT 解析による卓越周波数の分析で健全、空隙、滞水の各状態を区別することができる。

3.3 ブロック型試験体による探傷試験

(1) 試験条件

実大試験体より、各損傷状態を区別することができることを確認した。ここでは、ブロック型試験体を用いて、損傷部が、横波伝搬波の 0~20kHz 帯で複数の共振周波数が発生することを確認する。

試験体は、模擬損傷の有無で健全、損傷モデルの 2 体用意した。損傷を再現するモデルでは、鋼板とコンクリートの境界面の損傷深さは 0.5mm とした。模擬損傷の再現は、測定方法は 3.2 節の実大試験体と同じ手法で再現した。

(2) モード解析

測定値の振動特性、特に空隙部の共振周波数について確認するため、線形モード解析を実施した。解析モデル、材料諸元を図-8、表-1 に示す。モデルは、2

次元平面応力要素を用いた。損傷状態は、空隙をモデル形状で再現した。境界条件は、試験体のコンクリート面側を地面上に設置して行うことを考慮し、対応する設置面のコンクリート辺を全自由度拘束とした。

解析モデルの要素分割図と振動モードの代表例として健全、空隙モデルの各1～3次モード図を図-9に示す。健全モデルでは、3次以降でも鋼板とコンクリートが一体となって振動するモードが出現する。空隙モデルでは、損傷部の鋼板のみが振動するモードが1～2次で、3次以降のモードでは鋼板とコンクリートが合成するモードで出現することを確認した。

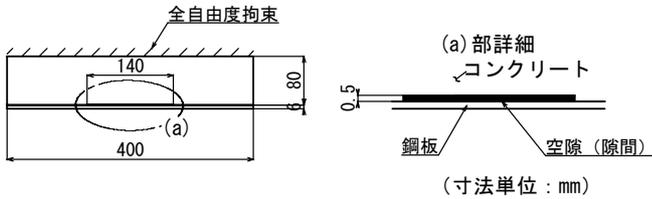


図-8 モード解析モデル（空隙モデル）

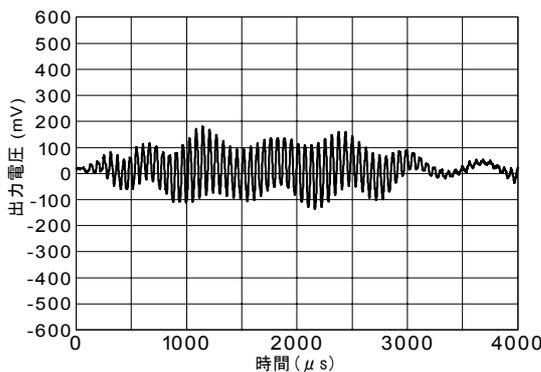
表-1 モード解析に用いた材料定数

	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比	密度 (kg/cm ³)
鋼部材	2.00E+05	0.30	7.85E-03
コンクリート部材	2.80E+04	0.17	2.40E-06

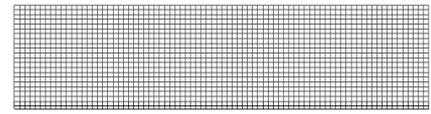
(3) 試験結果

各損傷状態の測定波形、ならびにFFT解析による周波数特性を図-10～12に示す。図-10～11に示す周波数特性には、モード解析による振動モード、周波数を併記している。

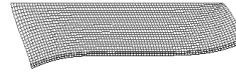
健全モデルの測定波形を実大試験体の結果と比較すると、最大出力電圧は異なることが確認できる。健全部の測定波形は、ブロック型試験体では最大190mVの出力電圧であり実大試験体の2倍以上の出力となっている。これは、試験体の大きさにより横波振動のエネルギー吸収に差が生じているためと考える。



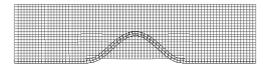
(1)測定波形



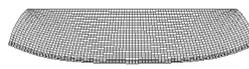
(1) 要素分割図（空隙モデル）



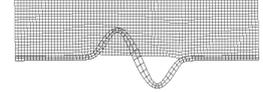
(2)健全モデル1次モード



(5)空隙モデル1次モード



(3)健全モデル2次モード



(6)空隙モデル2次モード



(4)健全モデル3次モード



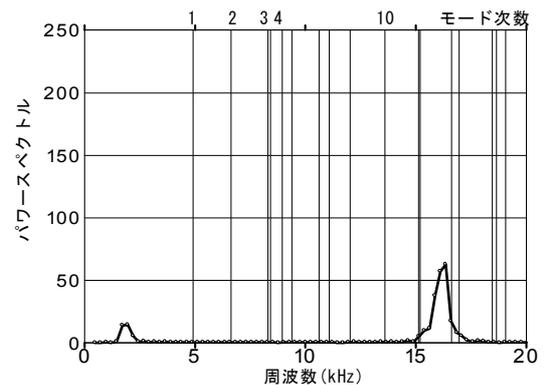
(7)空隙モデル3次モード

図-9 要素分割図とモード解析結果

空隙と空隙部に水を注入した場合（滞水）の結果は、実大試験体の波形より振幅周期が短く振幅している。これは、試験体の大きさと損傷深さが関係していると考えられる。

つぎに、周波数特性より卓越周波数について分析する。前節で示した因子による2kHzと16kHzで卓越周波数は各損傷状態で確認できる。

図-10に示す健全モデルは、実大試験体同様、3kHz～14kHzでパワースペクトルは、ほぼゼロとなっている。図-11に示す空隙モデルでは、実大試験体の結果と比べ明らかに空隙部の特性を示す卓越周波数が複数存在することがわかる。また、図-12に示す滞水状態についても、実大試験体の結果と比較すると16kHz付



(2)周波数特性

図-10 健全モデルにおける測定波形と周波数特性

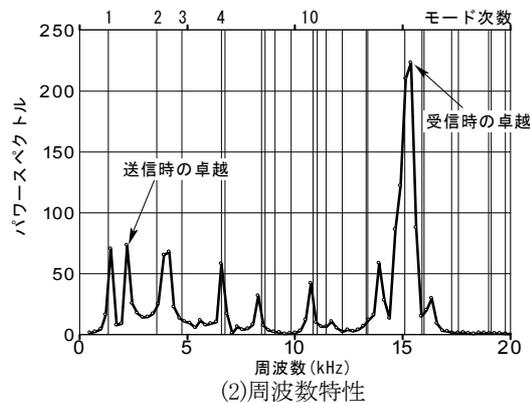
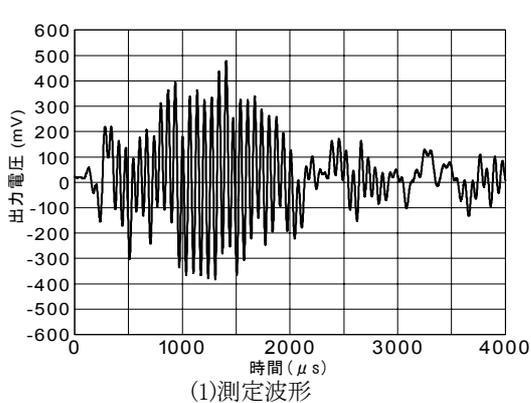


図-11 空隙モデル(空隙状態, 損傷深さ0.5mm)における測定波形と周波数特性

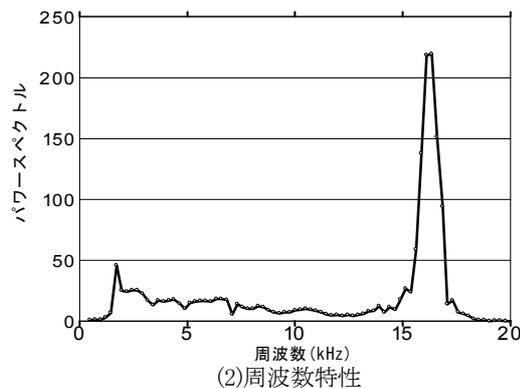
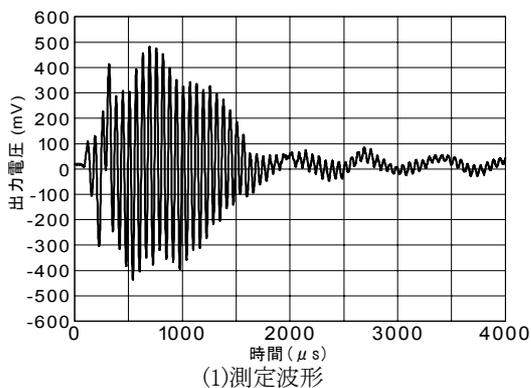


図-12 空隙モデル(滞水状態, 損傷深さ0.5mm)における測定波形と周波数特性

近の受信センサー固有の卓越を示すパワースペクトルは大きくなっているものの、滞水が周波数特性に及ぼす影響が確認できる。

つぎに、モード解析から求めた卓越周波数と測定値を比較する。図-10に示す健全モデルは、鋼板とコンクリートが一体化しているため、卓越周波数は測定されない。

図-11に示す空隙モデルについては、解析値と測定値は1次モードであれば両者とも卓越する周波数は、1.3kHz程度とほぼ一致する。しかし、2次以降の高次の周波数に着目すると、測定値は2次と3次の解析値間に存在している。5次以降では、解析値は卓越振動数同士が近接した結果となっており、測定値と対応する解析値の判断が困難であった。これらの原因については、簡易的に取り扱った解析モデルの境界条件も関係していると考えられる。測定値の再現性については、3次元立体解析を用いるなど今後の検討課題としたい。

測定結果より横波伝搬波の主成分となる0~20kHz帯で損傷部の特性を示す共振周波数が測定されていると考える。また、水の有無についても周波数特性より確認することができる。

4. まとめ

非破壊検査技術である横波振動法に着目し、合成床

版の非破壊検査について確認試験を行った。その結果、測定波形より健全部と損傷部の判断が可能であり、FFT解析による測定波形の周波数分析により、滞水の有無を検知することが可能であることがわかった。

本論文では示してはいないが、底鋼板厚および損傷深さをパラメータとした確認試験も実施しており、現在測定データの蓄積を行っている。今後は、測定機器の探傷感度の調整、各損傷状態の測定データの蓄積を行い損傷部の評価基準を確立していく。

参考文献

- 1)例えば、(社)日本橋梁建設協会：鋼・コンクリート合成床版 維持管理の計画資料, 2007.3
- 2)茨田 匠, 吉村 睦, 河端 俊典, 石黒 覚：横波超音波共振法による農業用水管路の探傷の有効性, 農業土木学会論文集, pp.123-128, 2005.6
- 3)例えば、(社)日本非破壊検査協会：コンクリート構造物の弾性波による試験方法—第1部超音波法, 2010.6