

リモートセンシングを用いた非破壊探傷法の研究 (その2)

A STUDY ON NON-DESTRUCTIVE INSPECTION BY REMOTE SENSING (PART2)

橋 肇*

中本 啓介*

Hajime Tachibana Keisuke Nakamoto

劣化した道路橋のコンクリート床版の補強方法として鋼板接着工法が幅広く採用されてきた。鋼板接着工法の検査は、ハンマーによる打音検査が一般的に行われているが、具体的な損傷の判別が非常に困難であり、また足場の設置や高所作業車等を用いた高所作業に替って、より安全で合理的な検査方法の開発が望まれている。そこで、レーザー差動干渉法を用いて、損傷部位を遠隔で高速に検査できるレーザー探傷法を開発している。前号には、適用性確認のために実施した計測実験について報告した。本稿では、空隙部の探傷法についての原理を解析的に検証した結果を報告する。

キーワード：鋼板接着床版、遠隔検査、レーザー差動干渉法、周波数応答解析

1. まえがき

劣化した道路橋の床版の補修や示方書改定に伴う補強方法として、床版下面に鋼板を接着して耐荷力の機能を改善する「鋼板接着工法」が多く採用されてきた。しかし、この工法が採用され始めてから30年以上が経過し、設計時より走行する車両台数および輪荷重も増加したため、床版が再劣化した事例が報告¹⁾されており、今後さらに増加することが予想される。

一方、鋼板接着工法の床版下面側からの点検方法としては、足場や高所作業車を用いて直接床版を目視、打音検査する方法が一般的に採用されている。ただし、打音検査では、判定結果が点検技術者の経験や技量に大きく依存するとともに、打音検査時の音の変化だけでは、付着の剥れ、コンクリート内の滞水などの具体的な損傷の判別は非常に困難である。また、この方法では足場設置撤去などの費用や作業の安全性に加え、点検時間も長くなるなどの課題があり、より効率的な検査技術の開発が望まれている。前号にて、鋼板接着床版を非接触で検査するために、レーザーを用いた非破壊検査システムを考案し、模擬損傷試験体を用いた室内計測および実橋梁に対する計測について報告を行った。本稿では、考案した非破壊検査システムについて適用性を数値解析により照査した結果を報告する。

2. 実験概要

損傷状態を検証するため鋼板接着工法の損傷部をモデル化した模擬損傷試験体を作成し、レーザー計測およびハンマーによる打音法計測を行い解析値と比較した。

2.1 模擬損傷試験体

鋼板接着工法により補強された床版をモデル化した試験体概要を図-1に示す。試験体は、これまでの施工実績など²⁾から、鋼板厚4.5mm、エポキシ樹脂厚5mmとし100mm厚のコンクリートに接着させた。模擬損傷は、樹脂充填不良を想定し、損傷領域のサイズが200×200×5mm³とする空隙とした。空隙部の再現は、1cm幅のスポンジシール材で空隙部周辺を被覆し、エポキシ樹脂が充填されないようにした。

2.2 レーザー差動干渉法による計測^{3),4)}

高架橋の下側から計測することを想定して、写真-1に示すように室内試験では、試験体から約8m離れた位置に加振用レーザーを模擬損傷試験体に照射した。加振用レーザーを鋼板や塗装面に照射すると(鋼板や塗装面の)材料が瞬間的且つ局所的な熱膨張を起し、表面に垂直方向の表面張力が生まれることにより鋼板部分は振動を始める。この振動は欠陥の有無により振動モードが異なるため、モードを検出用レーザーで計測する。変位検出用レーザーは、加振用レーザーを中心として検出用の2

* 橋梁営業本部 橋梁技術研究室

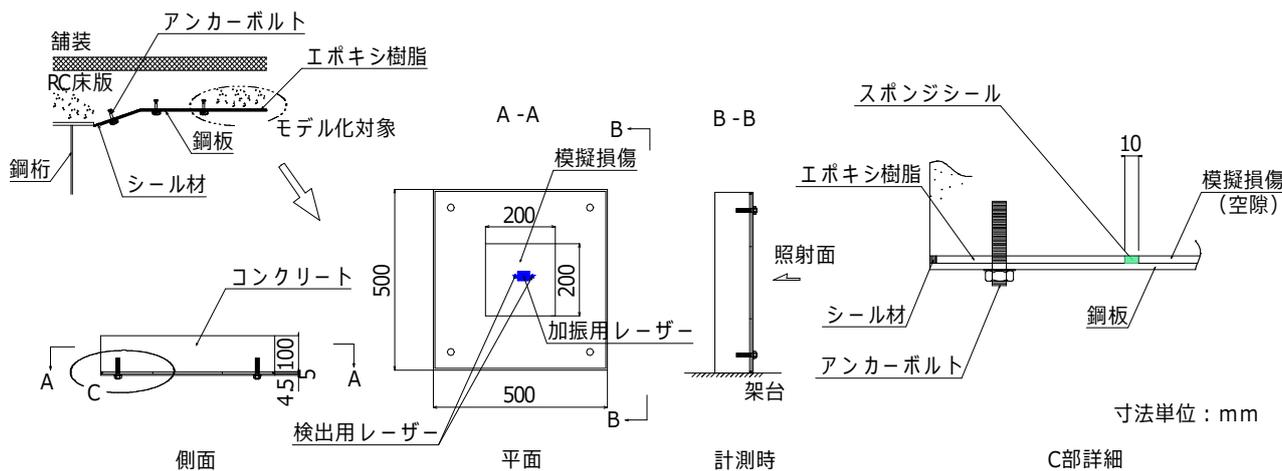


図-1 鋼板接着コンクリート床版をモデル化した模擬損傷試験体

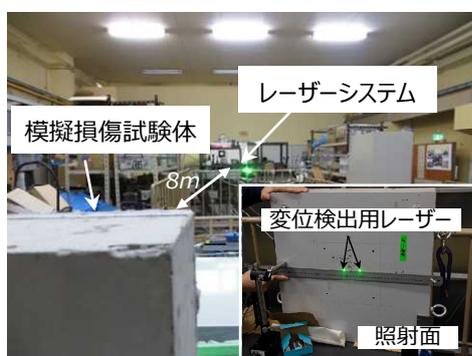


写真-1 レーザーシステム(写真奥)より 8m 離れた試験体と試験体表面に 2 本の検出用レーザーを照射した状況

本のレーザーの間隔を 5cm とし模擬損傷領域内で照射位置をパラメータとして計測を行った。

2.3 ハンマーによる打音計測

ハンマーによる打音計測は、レーザー計測との比較検証のために実施した。模擬損傷試験体の設置はレーザーと計測と同様とし、加振用レーザーをハンマーによる打撃、変位検出用レーザーは 2 つの加速度計に置き換えて波形を計測した。

3. 解析概要

3.1 板の自由振動の理論解

測定値の振動特性、空隙部における鋼板の周波数について確認するため、長方形板の自由振動について理論解⁵⁾を求めた。空隙部の鋼板を長方形板と仮定し理論解を算出する場合、支持条件が明確でないため、4 辺単純支持と 4 辺固定の 2 ケースとした。

3.2 周波数応答解析

汎用有限要素解析コード ABAQUS 6.11-2 を用いた 3 次元数値解析(以下、3D-FEM 解析)によって、固有値解析及び周波数応答解析を行った。解析モデル、材料諸元を図-2、表-1 に示す。モデル化には、ソリッド要素で曲

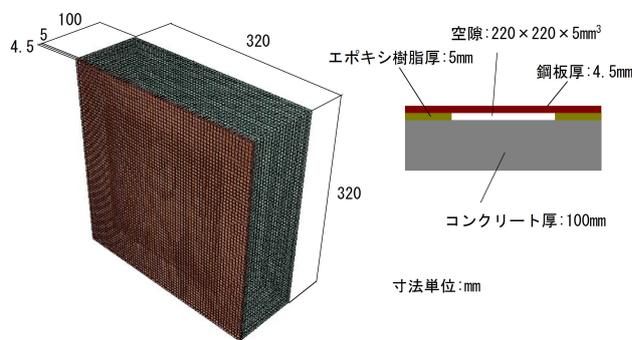


図-2 3D-FEM モデル

表-1 解析に用いた材料諸元

	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比	密度 (kN/m ³)
鋼部材	2.00E+05	0.30	7.70E+01
コンクリート部材	2.55E+04	0.17	2.40E+01
エポキシ樹脂	1.82E+03	0.34	1.13E+01

げの問題に適した 1 次の非適合要素⁶⁾を使用した。周波数応答解析において、レーザー計測を想定した場合は、レーザー照射範囲に該当する節点に単位荷重を、ハンマーによる打音計測を想定した場合は、 $2 \times 2 \text{mm}^2$ の領域に定常的な表面力を与えて、鋼板面に対して垂直方向の応答変位を求めた。境界条件は、鋼板面とは逆の裏面コンクリート面側の 4 辺の変位を全自由度固定とした。模擬損傷試験体を忠実に再現するように空隙部範囲については、空隙周辺に用いたスポンジシールを考慮し、収束性や計算容量を考慮してモデル化範囲を設定した。

4. 解析および計測結果

4.1 解析結果

3D-FEM と 2 種類の境界条件を用いた理論解を用いて空隙部における鋼板の支持状態について確認する。模

擬損傷試験体の空隙部の鋼板を抽出し境界条件を4辺固定、単純支持とした長方形板の振動数の理論解と3D-FEMによる固有値解析の比較を表-2に示す。振動モード図を図-3に示す。解析値の周波数は、4辺単純支持と4辺固定の理論解の間にあり、空隙部の鋼板は、振動数に関しては4辺弾性支持された状態に近いことがわかる。また、図-3(a)では1次モード、図-3(b), (c)が2次モード、図-3(d)が3次モードと空隙部鋼板の低次振動モードが確認できる。

4.2 計測結果

レーザー計測およびハンマーによる打音計測ケースは、照射位置を模擬損傷部中心から樹脂が充填された範囲まで水平方向に変化させた。レーザー計測は図-4の左側に示す4ケース、ハンマーによる打音計測は図-5の左側に示す2ケースとした。加振用レーザーの加振力は一定とし、検出用レーザーの測定のサンプリング間隔は1μs、データ記録数は2¹⁷個としている。

レーザー差動干渉法およびハンマーによる打音法によって得られた200×200×5mm³空隙部の各計測位置での信号波形履歴とその周波数特性をそれぞれ図-4, 図-5の右側に示す。図-4, 図-5中央図の信号波形履歴は横軸が計測時間、縦軸が振幅とし、5cm間隔の2点で検出された変位の差分を表した波形であり、右図はその波形をFFT変換したものと3D-FEM解析による周波数スペクトル(赤字)を示す。横軸が周波数、左縦軸がフーリエ振

幅スペクトル、右縦軸に応答変位を表している。また、図-6に加振位置における周波数応答解析結果のモード図を示す。図-4(a)は、レーザー加振の中心位置が座標(x,y)=(10,10)[単位はmm]の場合で、図-4(b)から図-4(d)は、それぞれ(x,y)=(75,10), (125,10), (200,10)の場合に対応している。(x,y)=(10,10)と(x,y)=(75,10)ときには、レーザーの送受信点はすべて空隙部の鋼板面上にあるが、(x,y)=(10,10)は空隙部のほぼ中心位置にあり、(x,y)=(75,10)は接着部に近づいた位置にある。(x,y)=(125,10)のとき、左受信点は空隙部と接着部の境界上にあるが、加振点と右受信点は接着部にある。(x,y)=(200,10)の場合にはすべての送受信点が接着部にある。(x,y)=(75,10)に着目すると、図-4中央図の信号波形履歴の振幅では、(x,y)=(10,10)より接着部に近いことから、振幅は0.2程度とあまり変わらないが、継続時間が短くなっていることがわかる。図-4右図の周波数特性では、1kHz~5kHzにおける卓越したスペクトルピークの出現し、3D-FEM解析による周波数スペクトルとほぼ一致した。計測波形において1次モ

表-2 理論解と固有値解析の周波数比較

モード(m, n)	4辺単純支持	4辺固定支持	固有値解析
(1, 1)	0.54	0.99	0.80
(1, 2), (2, 1)	1.35	2.01	1.62
(2, 2)	2.17	2.97	2.37

単位:kHz

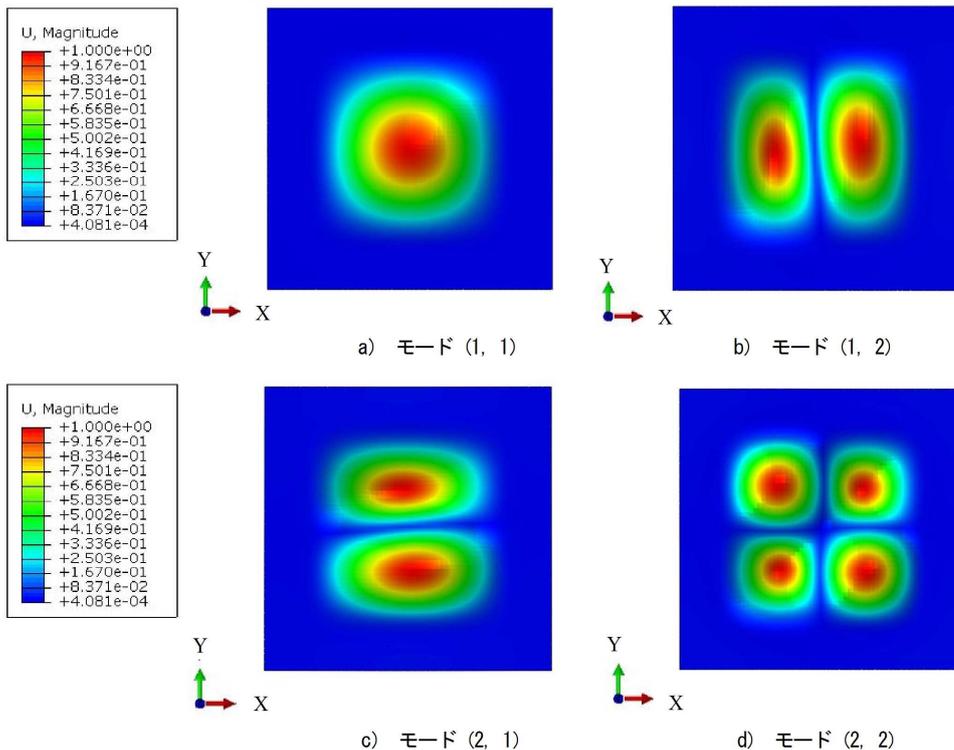


図-3 固有値解析結果によるモード図

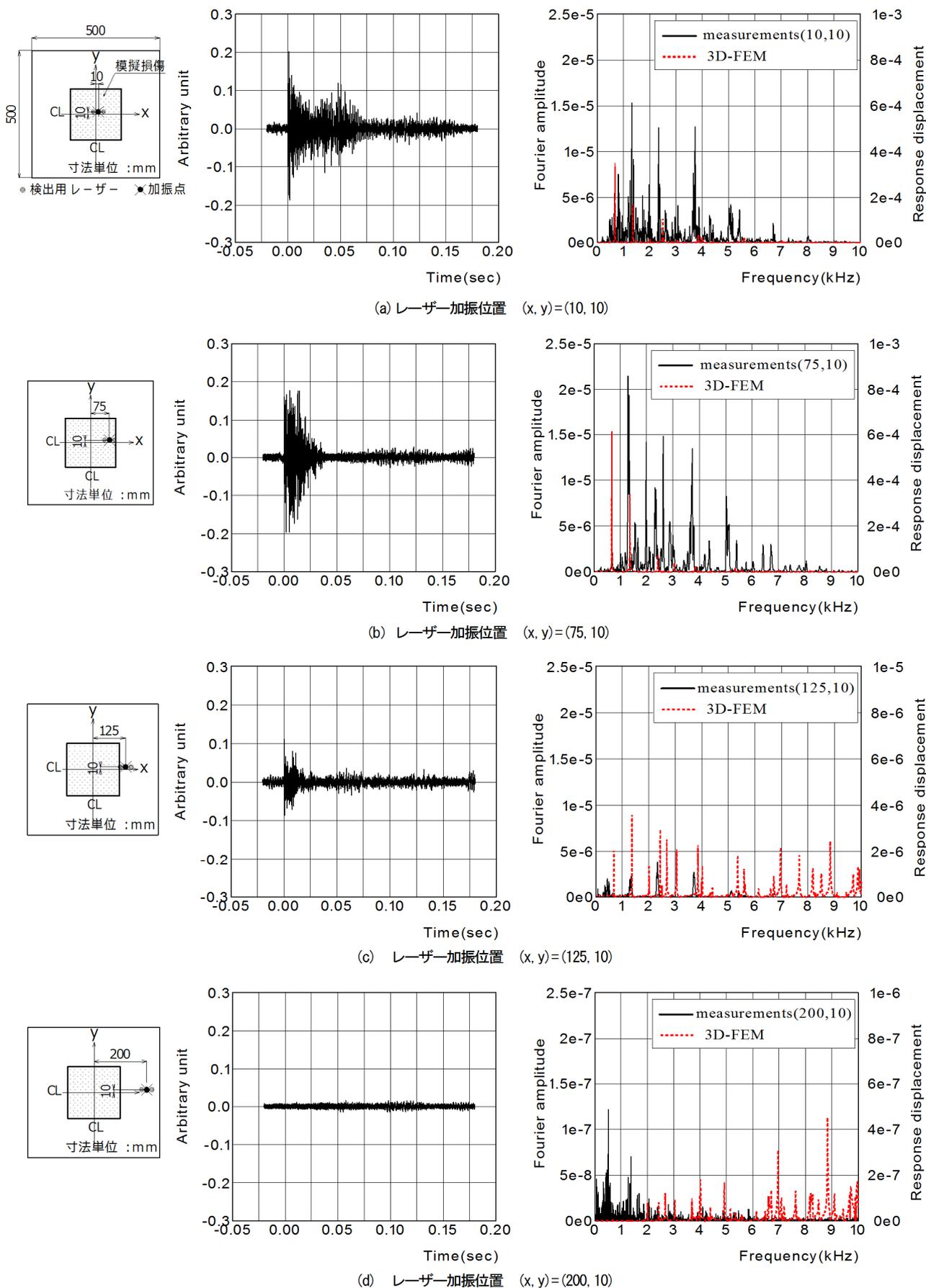


図-4 レーザー差動干渉法によって得られた空隙部の各計測位置（左）での信号波形履歴（中）その周波数特性（右）

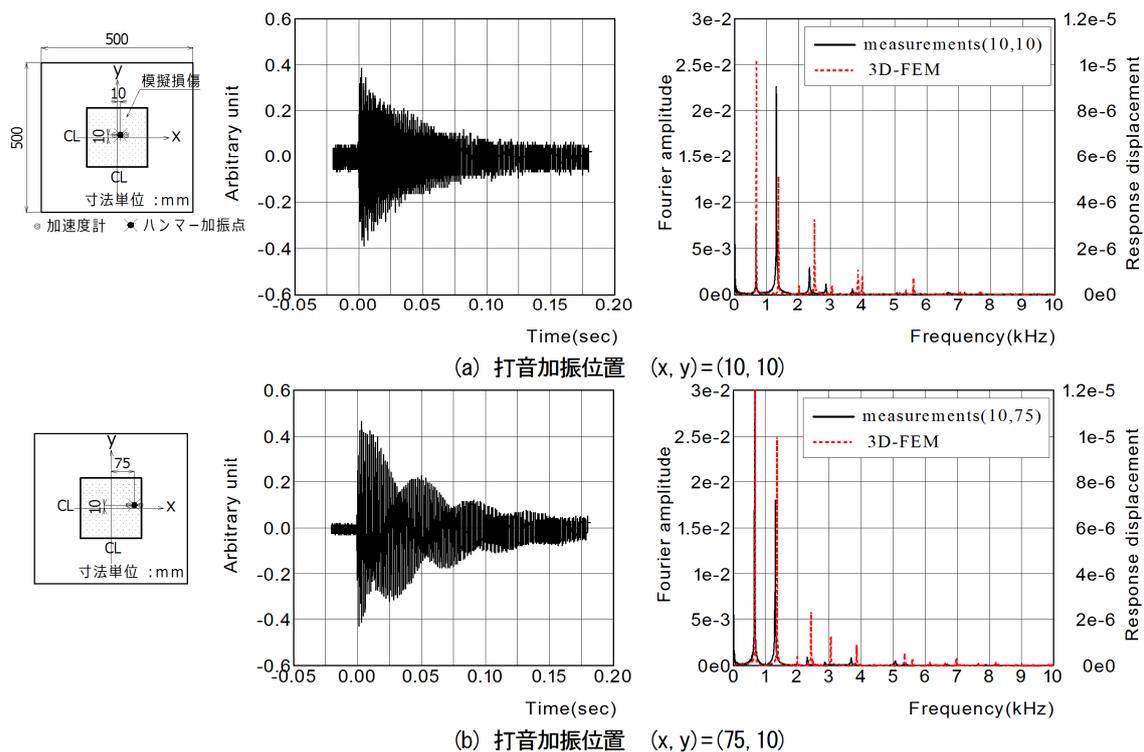


図-5 打音法によって得られた空隙部の各計測位置（左）での信号波形履歴(中)その周波数特性(右)

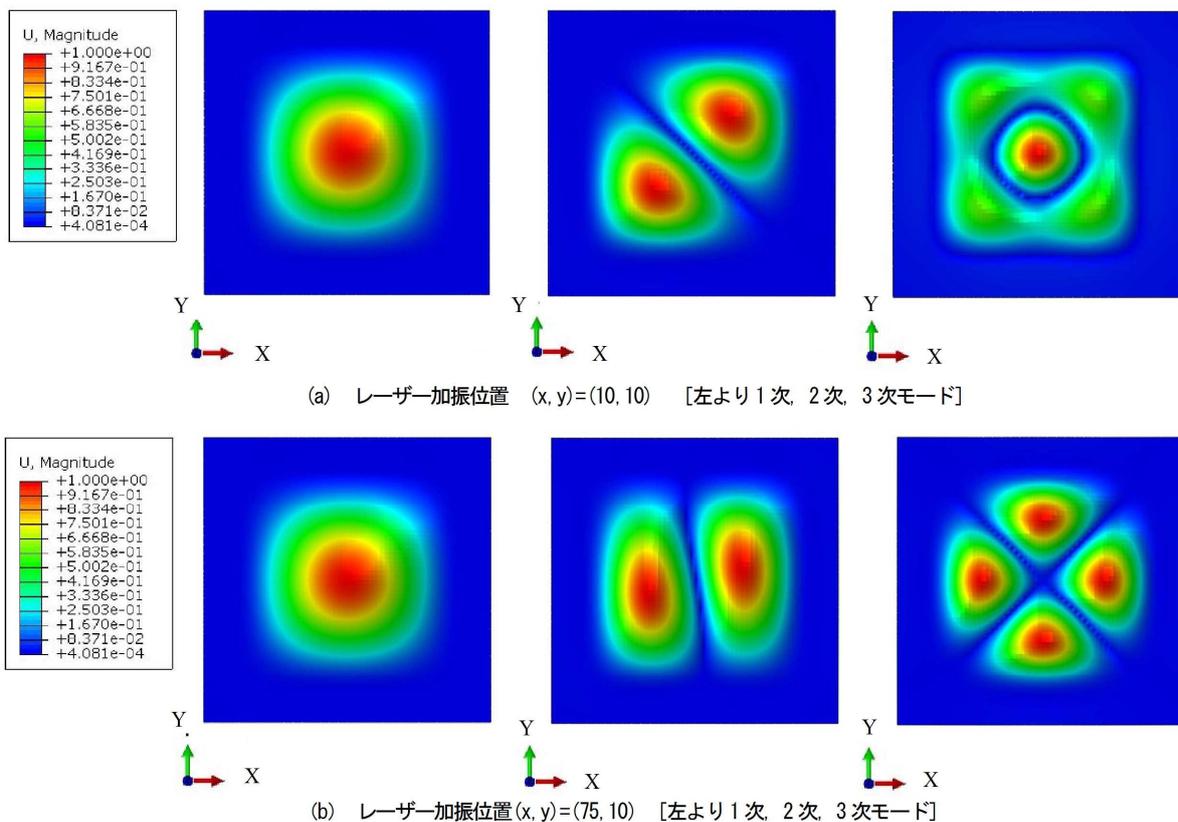


図-6 加振位置における周波数応答解析結果のモード図

一の振幅が2次モードに比べて小さいのは、空隙幅の1/4付近にあり、接着部に近いことが考えられる。また、 $(x,y)=(200,10)$ のように2つの受信点が接着部にある場合は、2点の波形の差はほとんどなくなり、得られる波形はノイズレベルになっている。スペクトルについても1kHz以下の低周波数にピークがみられるものの、1kHz～5kHzにおいてスペクトルのピークはほとんど見られなくなる。

図-5(a) および図-5(b)は、ハンマーを用いた加振の中心位置が座標 $(x,y)=(10, 10)$ [単位は mm]、 $(x,y)=(75, 10)$ の場合に対応している。それぞれをレーザー計測結果の図-4(a) 図-4(b)の場合と比較した場合、ハンマーとレーザーでは加振される入力波の特性は大きく異なるにも関わらず、スペクトルのピークがほぼ同じ周波数において出現していることがわかった。

つぎに、図-6に示す振動モードについて確認する。図-6(a)は、レーザー加振の中心位置が座標 $(x,y)=(10, 10)$ [単位は mm]の場合で、図-6(b)は、 $(x,y)=(75, 10)$ の場合に対応しており、レーザー加振する位置によって、1次の振動モードは一致するが2次以降の振動モードが異なることがわかる。

以上の計測結果から、レーザーの送受信点を試験体の中心付近の空隙部から右方の接着部に移動させていくと波形の振幅が小さくなり、継続時間も短くなっていることがわかる。この特性に着目することにより、鋼板とコンクリートの接着部と空隙部の境界部の識別が可能であると考える。

5. おわりに

本研究では、レーザー差動干渉を用いた非破壊検査システムを考案し、道路橋の鋼板接着床版を模擬した試験体を対象とした数値解析により、その適用性について確認を行った。以下、本研究で得られた知見をまとめる。

- 1)理論解と3D-FEMを用いた固有値解析により空隙部における鋼板の振動モードを確認した。
- 2)レーザー差動干渉法によって、約8m離れた位置の試験体の空隙部、接着部および境界部には波形や周波数に明確な違いがあることがわかった。
- 3)計測結果より得られた周波数特性では、1kHz～5kHzにおける卓越したスペクトルピークが出現し、3D-FEM解析による周波数スペクトルとほぼ一致することがわかった。また、レーザー差動干渉法の計測結果とハンマーを用いた打音計測結果と比較しても周波数スペクトルとほぼ一致していることがわかった。
- 4)周波数応答解析結果の振動モード図からレーザー加振

する位置によって、1次の振動モードは一致するが2次以降の振動モードが異なることがわかった。

なお、供用中の橋梁床版においてレーザー差動干渉法を用いた計測実験を実施し、探傷が可能であることを把握⁷⁾している。ただし、滞水などの損傷部への適用性や現場計測の適用性などの解決すべき課題は残されているため今後は、各損傷状態の計測データの蓄積、計測精度の向上、および装置のコンパクト化などを進めてゆく予定である。

謝辞

本研究は、科学技術振興機構の研究成果最適展開支援プログラム(A-STEP)の補助を受けて実施した。また、共同研究者の東京工業大学の廣瀬先生、(公財)レーザー技術総合研究所の島田氏、オレグ氏には掲載にあたって多大な協力を頂きました。ここに記して謝辞といたします。

参考文献

- 1) 前川敬彦, 久利良夫, 佐々木一則, 飛ヶ谷明人, 青木康素: 鋼板接着補強RC床版の維持管理に関する検討, 第7回床版シンポジウム論文報告集, 土木学会, pp.13-18, 2012.6
- 2) 阪神高速道路公団: 道路構造物の補修要領, 2005.4
- 3) H. Tachibana, K. Nakamoto, Yamaguchi & S. Hirose: Quantitative non-destructive evaluation of damages in a steel plate bonding method, the 7th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2014), pp.622-627, 2014.7
- 4) Y. Shimada, O. Kotyaev, S. Hirose, H. Tachibana, K. Nakamoto, N. Misakiand, H. Takinami: Actual Laser-based Methods for Remote Inspection of Shinkansen Tunnels and Highway Bridges, Proc. the Fifth US-Japan NDT Symposium - Emerging NDE Capabilities for a Safer World, The American Society for Nondestructive Testing, pp.212-218.2014.6
- 5) 土木学会: 構造力学公式集, 土木学会, pp.371-374, 1988.3
- 6) 山田貴博: 計算力学レクチャーシリーズ 9 高機能有限要素法, 丸善, p.57, 2007.1
- 7) 橋肇, 中本啓介, 島田義則, 廣瀬壮一, 八ツ元仁: 鋼板接着コンクリート床版の劣化に対する非破壊検査法の研究開発, 第八回床版シンポジウム論文報告集, 土木学会, pp.225-228, 2014.10