

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究状況報告書（1年目の研究対象）】

① 研究代表者	氏名 (ふりがな)		所属		役職	
	すずき もとゆき 鈴木 基行		東北大学		教授	
② 研究 テーマ	名称	繊維シートや鋼板によって補強されたRC部材の再劣化に対する健全度評価法の開発				
	政策 領域	[主領域] ⑧道路資産の保全 [副領域]	公募 タイプ	II		
③ 研究経費 (単位:万円)	平成26年度	平成27年度	平成28年度	総合計		
	1,394	2,000	1,600	4,994		
※H26は受託金額、H27以降は計画額を記入。端数切り捨て。						
④ 研究者氏名 (研究代表者以外の主な研究者の氏名、所属・役職を記入。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)						
氏名		所属・役職				
内藤 英樹		東北大学・准教授				
松崎 裕		東北大学・助教				
⑤ 研究の目的・目標 (提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入。)						
<p>補修・補強後のコンクリート構造物は再劣化に留意して経過観察する必要があるが、繊維シートや鋼板補強によって表面が覆われた主桁や床版などは、内部の変状を目視によって確認できない。本研究では、このような目視困難箇所の点検を想定して、<u>簡便かつ高精度の振動試験方法を提示する</u>。そして、繊維シートや鋼板によって補強されたRCはり供試体を作製し、3つの耐久性劣化要因（塩害、凍害、疲労）とこれらの複合劣化を想定した劣化促進試験を行い、<u>損傷レベルと振動特性および構造性能の関係を整理する</u>。また、非破壊検査法の精度、劣化部材の構造性能評価や荷重のばらつきなどを考慮して、<u>構造物の使用性や安全性を限界状態超過確率で表せる信頼性評価に応用する</u>。そして、<u>実道路橋の現場試験を行い、早期実用化に向けた課題の整理と解決を図る</u>。</p>						

⑥これまでの研究経過（続き）

本研究は、図に示すように、小型加振器を用いて局所的な縦振動を励起し、振動が及ぶ範囲の共振周波数を測定する。さらに、ひび割れなどの劣化・損傷によって剛性（共振周波数）が低下することに着目し、鋼板や繊維シートなどに覆われた目視困難箇所の再劣化の検知を試みる。

本研究の主要な検討項目は以下の A～C の 3 つに大別される。

- A. 非破壊検査法の高度化
- B. 健全度評価法の高度化
- C. 道路橋の現場試験

平成 26 年度の検討項目 (1.～6.) を表に示す。表中の括弧書きは、昨年度の FS 研究で示された課題である。現時点で検討が完了した項目 1.～5.について、次頁以降に概要を報告する。

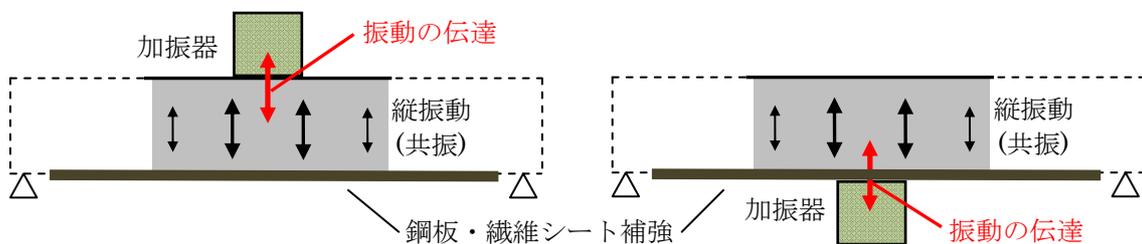


図 加振器による強制加振試験の概略図 (左；上面加振，右；下面加振)

表 平成 26 年度の検討項目

	平成 26 年度の検討内容	関連項目	進捗状況
1.	ランダム加振による非破壊検査法の高度化 (作業性の向上と測定時間の短縮)	A. 非破壊検査法の高度化 C. 道路橋の現場試験	完了
2.	鋼板および繊維シート補強した RC 床版の内部 空隙の探査 (広範な諸元と補強方法に対する検討)	A. 非破壊検査法の高度化	完了
3.	繊維シート巻立て補強した RC はりの載荷試験 (広範な諸元と補強方法に対する検討)	A. 非破壊検査法の高度化	完了
4.	再劣化を模擬した RC はりの電食試験 (多様な劣化性状に対する検討)	A. 非破壊検査法の高度化 B. 健全度評価法の高度化	実験は概ね 完了し、解 析を検討中
5.	道路橋の現場試験 (作業性の向上と測定時間の短縮)	C. 道路橋の現場試験	完了
6.	凍害と疲労の複合劣化を受けた RC はりのせん 断耐力評価 (多様な劣化性状に対する検討) (FEM モデルの高度化)	A. 非破壊検査法の高度化 B. 健全度評価法の高度化	実験は完了 し、解析を 検討中

⑥これまでの研究経過 (続き)

1. ランダム加振による非破壊検査法の高度化

これまでの研究では、**図-1.1**に示すように、正弦波の周波数を漸増させながら構造物の応答を測定する加振方法(スイープ加振)を用いていた。スイープ加振は精緻な振動試験方法であり、平成25年度のFS研究において、コンクリート内部のひび割れによる剛性低下を捉えられることを報告した。しかし、この試験方法は周波数を徐々に漸増させるため、1測点あたりに測定時間を要する。現場試験に応用するためには、試験方法の見直しによる測定時間の短縮が大きな課題であった。

そこで**図-1.2**に示すように、同じ強度を持ち、周波数が異なる正弦波を足し合わせたホワイトノイズ(波形合成では位相をランダムに与える)を加振することによって、スイープ加振と同様の測定結果が即時に得られると考えた。木片とコンクリート供試体に対して、2つの加振方法による測定結果を**図-1.3**と**図-1.4**に示す。これらの図より、ランダム加振でもスイープ加振と同様の精緻な振動試験が可能であることが示された。なお、従来のスイープ加振では1測点あたり60~100秒程度の時間を要したが、ランダム加振では1測点あたり15秒程度でデータファイルの保存まで可能であり、大幅な時間短縮が実現できた。

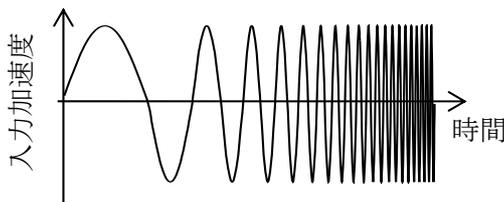


図-1.1 スイープ波形

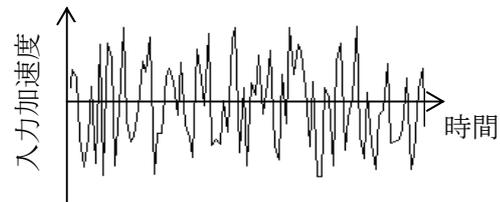


図-1.2 ランダム波形(ホワイトノイズ)

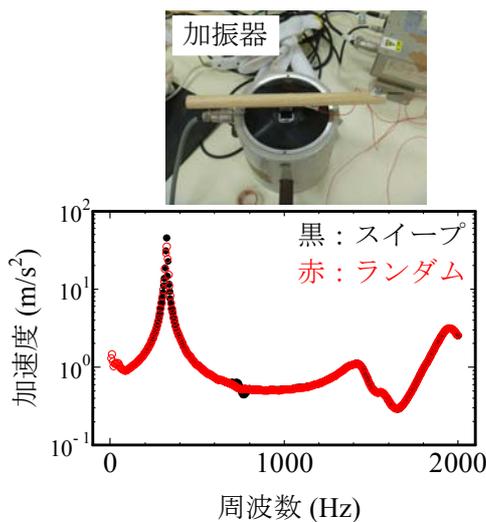


図-1.3 木片の振動試験

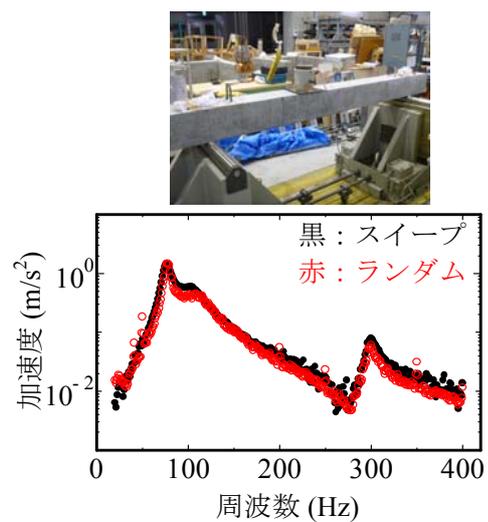


図-1.4 RCはり供試体の振動試験

⑥これまでの研究経過（続き）

2. 鋼板および繊維シート補強した RC 床版の内部空隙の探査

図-2.1 に示す RC 床版供試体を作製し、床版内部に厚さ 10 mm の発泡スチロール板を埋め込んだ。本検討では、表-2.1 に示すように、供試体下面を厚さ 4.5 mm の鋼板あるいは 2 層の繊維シートで補強し、床版上下面からそれぞれ加振することによって床版内部の空隙探査を試みた。

実験結果を図-2.2～図-2.4 に示す。横軸は床版中央から測定位置までの距離、縦軸は共振周波数である。これらの図より、空隙箇所において共振周波数の低下が示された。特に、鋼板、繊維シート、アスファルト舗装の有無に依らず、床版上下面のいずれからでも床版内部の空隙を検知することができた。このことから、鋼板や繊維シートが再劣化によって剥離した場合でも、上面から加振することによってコンクリート内部の劣化・損傷を点検することができる。

表-2.1 実験パラメータ

供試体名	空隙 (mm ²)	アスファルト舗装	補強材
シート 200	200 × 200	なし	繊維シート
鋼板 300	300 × 300	あり	鋼板
鋼板 500	500 × 500	なし	鋼板

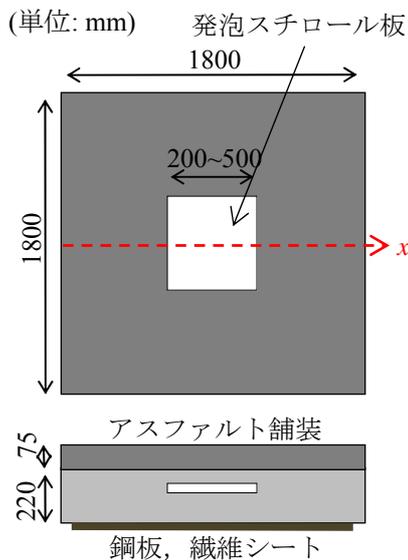


図-2.1 供試体概略図

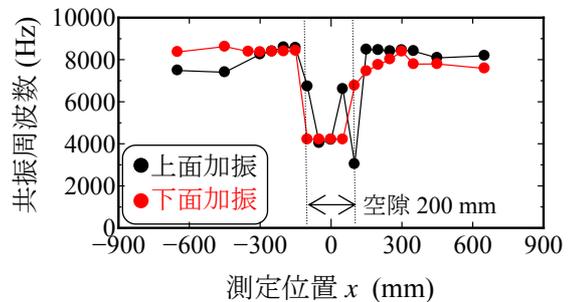


図-2.2 測定結果 (シート 200, 舗装なし)

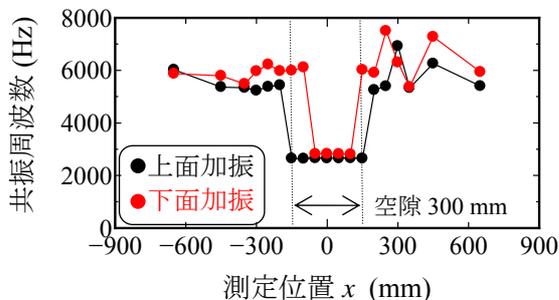


図-2.3 測定結果 (鋼板 300, 舗装あり)

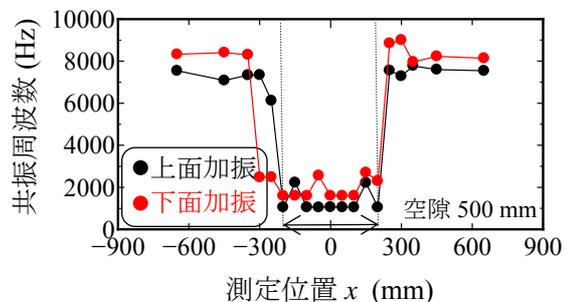


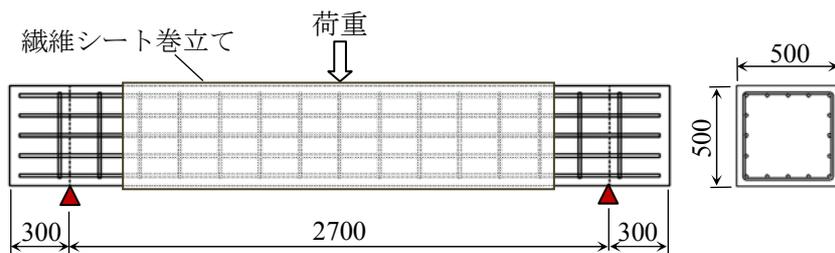
図-2.4 測定結果 (鋼板 500, 舗装なし)

⑥これまでの研究経過

3. 繊維シート巻立て補強した RC はりの荷重試験

図-3.1 に示す RC はり供試体の周囲を繊維シート巻立て補強した。巻立て補強は、曲げ耐力とせん断耐力を向上させるため、軸方向と直角方向の2層貼りとした。図-3.1 と図-3.2 に示す曲げ荷重試験を行い、供試体に曲げひび割れを生じさせた。降伏変位 δ_y を基準として、 $1\delta_y$ 、 $2\delta_y$ 、 $3\delta_y$ 、 $6\delta_y$ まで変位制御で荷重し、各荷重ステップで供試体を上下反転して交番荷重を加えた。各荷重ステップの除荷時に供試体上面から振動試験を行い、ひび割れ評価を試みた。

荷重-変位関係を図-3.3、振動試験結果を図-3.4 に示す。繊維シート巻立て補強した供試体は、 $3\delta_y$ の荷重時に繊維シートが広範囲にわたって剥離したが、 $2\delta_y$ までは付着が保たれており測定が可能であった。図-3.4 の共振周波数の分布より、 $2\delta_y$ の荷重終了時にはスパン中央より右側に損傷が局所化していたものと推察された。この研究成果は、阪神大震災以後に耐震補強されたコンクリート構造物に対して、経年劣化や地震後の点検・調査に有用と考えている。次年度は、鋼板や繊維シートが剥離した場合でも、補強材の上から劣化・損傷を点検できる手法に発展させる。



- ・軸方向鉄筋：D16×16本
 - ・スターラップ：D13@200
 - ・繊維シート巻立て区間：2000mm
 - ・繊維シートの層数：2層（軸・直貼り）
- (単位：mm)



図-3.1 供試体概略図

図-3.2 荷重実験の状況

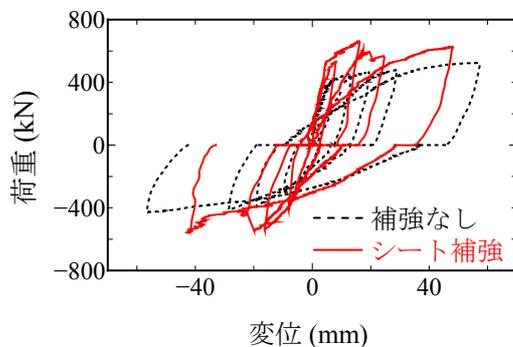


図-3.3 荷重-変位関係

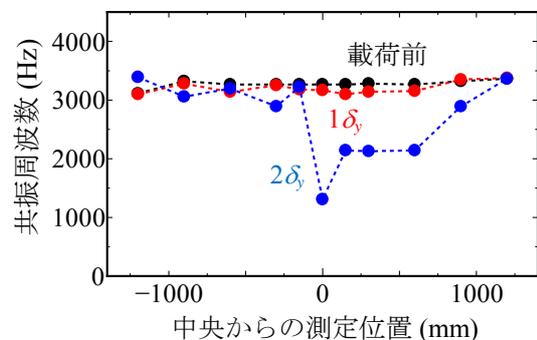


図-3.4 共振周波数の分布（シート補強）

⑥これまでの研究経過

4. 再劣化を模擬したRCはりの電食試験

図-4.1 に示す RC はり 供試体に対して，表-4.1 に示すように，電食試験によってコンクリート内部の鉄筋腐食を促進させる．腐食区間は，スパン中央の 350mm (1D 区間) の引張鉄筋とし，腐食区間における鉄筋の平均質量減少率 (腐食率) の目標値を 10% および 20% とした．さらに，RC10+10 供試体は，はじめに電食試験によって腐食率 10% まで鋼材腐食を促進した後に，引張鉄筋周辺のコンクリートを除去し，無収縮モルタルで断面補修をした．このとき，金ブラシで引張鉄筋表面の錆を除去したが，鉄筋断面は欠損した状態でモルタルで埋め戻した．

電食試験は，図-4.2 に示すよう引張鉄筋の周辺部にポンプで塩水を循環供給しながら直流電気を継続的に流した．鉄筋腐食率は積算電流量によって管理し，表-4.1 の目標値に達するまで段階的にスパン中央の供試体上面および側面から振動試験を行い，鉄筋腐食率と共振周波数との関係を整理した．なお，上面からの加振については，昨年度の FS 研究でも実験結果を報告した．この検討結果を踏まえて，今年度は鉄筋腐食をより早期に発見することを目標として，供試体側面からの振動試験も新たに実施した．

表-4.1 の目標腐食率に達した段階で電食試験を終了し，図-4.1 に示すように 3 点曲げ载荷試験によって腐食率と耐荷力との関係を整理した．

表-4.1 実験パラメータ (補修の有無と腐食パターン)

供試体名	1 回目電食 (劣化)	2 回目電食 (再劣化)	Total 腐食率 (%)	モルタル補修
RC0	なし	なし	健全	なし
RC10	10 %	なし	10 %	なし
RC20	20 %	なし	20 %	なし
RC10+10	10 %	10 %	10 % + 10 %	あり

※この他にも，繊維シート補強した 3 体の供試体実験を 3 月まで継続している．

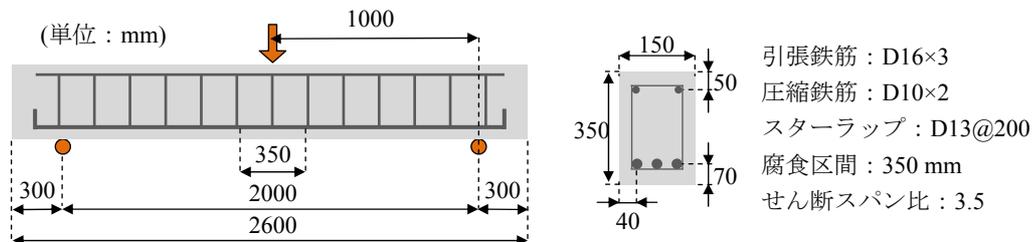


図-4.1 供試体概略図

⑥これまでの研究経過

供試体上面および側面から振動試験を行った結果を、それぞれ図-4.3 および図-4.4 に示す。上面から加振した場合には、腐食率 10～15 % において共振周波数が 90 % 程度まで低下する傾向が示された。さらに側面から加振した場合には、5～10 % において共振周波数が 80～90 % 程度まで低下することから、上面加振よりも早期に鉄筋腐食を検知できる可能性が示唆された。側面加振は上面加振よりも縦振動の波長が短いため、腐食ひび割れの影響が大きく表れたものと考えられる。なお、図-4.3 と図-4.4 の補修後に再劣化した RC10+10 供試体を参照すると、補修の際にわずかに共振周波数が回復するが、健全時よりも低い値を示しており、断面補修が完全に一体化していないことが示された。さらに、再劣化を模擬して電食試験を継続した結果は、補修をしない RC20 供試体と同様の挙動となった。すなわち、断面補修後に再劣化した場合には、補修効果がほとんど発揮されないことが示唆された。

電食試験後に得られた各供試体の荷重－変位関係を図-4.5 に示す。腐食率 10 % 程度であれば、降伏荷重や耐荷力の低下は小さい。すなわち、図-4.4 に示した側方加振によって、耐荷力が大きく低下する腐食率 10 % よりも前段階に鉄筋腐食を発見できると考えている。



図-4.2 電食試験の状況

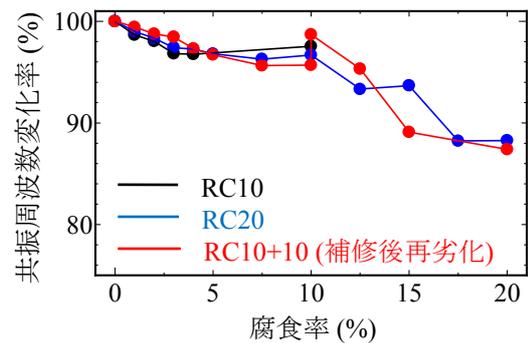


図-4.3 上面加振の結果

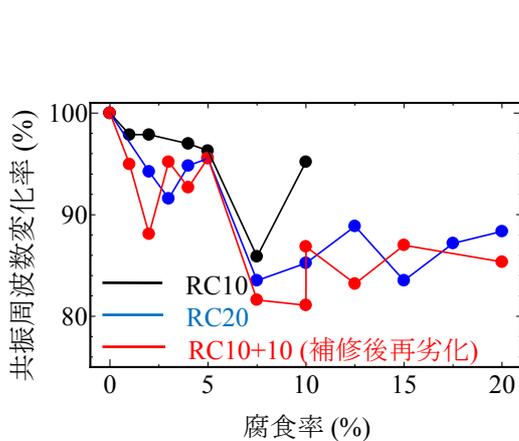


図-4.4 側面の加振の結果

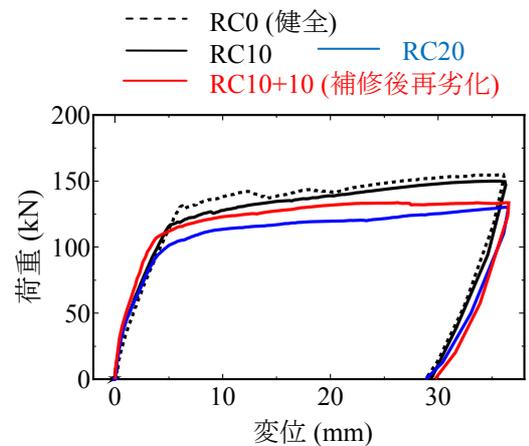


図-4.5 荷重－変位関係

⑥これまでの研究経過

5. 道路橋の現場試験

対象とする道路橋は、1934年に竣工された橋長218.0m、道路幅員6.0mの15径間単純RCT桁橋であり、3本の主桁のうち、両外側のG1とG3桁の下面に厚さ8mmの鋼板が接着補強されている。目視と叩き点検では、鋼板補強したG1とG3桁に著しい鋼板腐食が見られ、広い範囲で鋼板が剥離していた。劣化要因は、融雪剤による塩害と凍害の複合劣化と考えられる。なお、中桁(G2・無補強)については劣化や変状は見られなかった。

本実験では、図-5.1(b),(c)に示すように、第1径間(スパン12.6m)に対して主桁下面および側面から振動試験を行った。2つの加振方向による共振周波数の分布を図-5.2に示す。図は健全箇所を基準とする周波数変化率を示した。図中に示す鋼板の剥落箇所は叩き点検によって判定しており、共振周波数も低い値を示した。一方、側方加振では鋼板が剥離した箇所でも共振周波数は低下していない。これらの測定結果を踏まえると、本橋は広範囲に鋼板が剥離し、主桁側面には凍害劣化が見られたが、主桁内部まで劣化が及んでいないと考えられる。なお、本橋では20tonfの大型車両を載荷した主桁のたわみ計測も行ったが、健全時の構造解析(FEM)との差異はなかった。



図-5.1 鋼板補強した道路橋 RC 主桁の現場試験

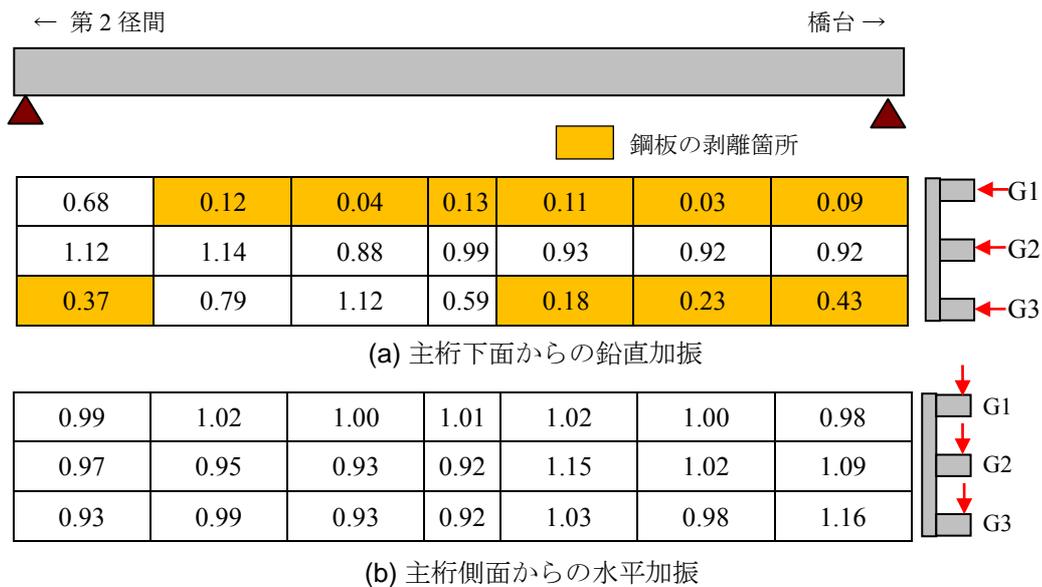


図-5.2 共振周波数(周波数変化率)の分布

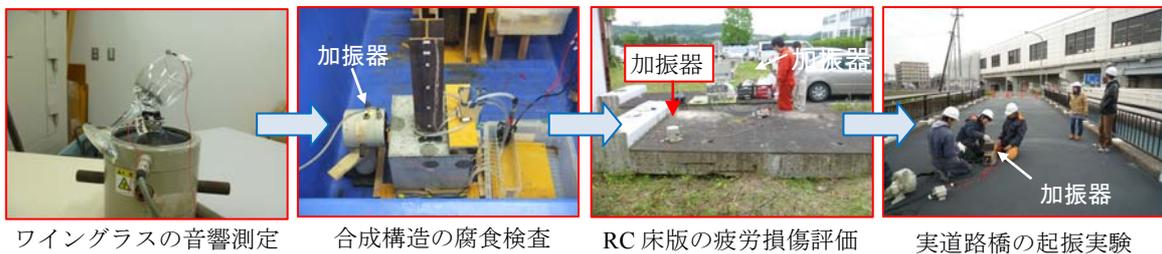
⑦特記事項

研究で得られた知見と成果

- 加振器を用いた振動試験方法を提示した。共振周波数の低下によって、コンクリート内部のひび割れを検知できることから、塩害、凍害、疲労などの損傷評価に有用であった。
- 提案技術は、部材の上下面や側面のいずれからでも点検できる。すなわち、鋼板や繊維シートの上から、あるいは道路舗装上からでもコンクリート内部のひび割れを検知できる。
- 道路橋の現場試験を行い、交通振動の影響下でも点検が可能であることが示された。

研究としての新規性、アピールポイント

- 本研究は加振器を用いた新たな非破壊試験法を提示するものであり、新規性が認められる。
- 提案技術は、超音波法などの従来手法よりも構造物を大きく振動させており、これまで発見が難しかったコンクリート深部の損傷や、鋼板あるいは繊維シートなどで覆われた場合でも再劣化を検知できるなど、目視困難箇所の点検への活用が期待される。
- 共振周波数の実測値に基づいて構造物の剛性分布が得られる点も大きな強みである。これによって、劣化の空間分布を考慮した構造解析 (FEM) による性能照査が可能となる。
- 提案する振動試験方法は、ワイングラスの音響測定から道路橋の起振実験まで精緻な振動試験を可能とする。橋梁以外の社会インフラや機械設備などの点検にも活用できる。



研究の見通しや進捗についての自己評価

A. 非破壊検査法の高度化

本研究の根幹をなす技術提案であり、昨年度 (FS 研究) と今年度の検討によって上記に示すような抜群の成果が得られた。次年度以降も様々な劣化性状を模擬した実験データを収集し、提案技術によって検知可能な損傷レベルを明らかにする。

B. 健全性評価法の高度化

次年度以降は、構造解析モデルの高度化に重点を置く。劣化を考慮した FEM モデルの構築と併せて、提案技術の試験精度と橋梁の性能保証の観点から健全性評価手法を検討する。

C. 道路橋の現場試験

道路橋の現場試験を実施し、実用化に向けた課題の整理と解決を図ることができた。特に、昨年度使用した重さ 10 kg の加振器を 1.8 kg まで小型化し、測定時間も 1/5 程度まで短縮するなど、項目 A.と同様に達成度は高い。次年度以降は、様々な道路橋を対象とした現場試験を実施し、橋梁諸元と加振条件および測定精度の関係を整理する。