

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（2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	1,600	1,600	4,594		
※H26 は精算金額、H27 は受託金額、H28 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

提案技術は、図に示すように加振器を用いて RC 桁や床版などの局所的な共振を励起し、振動が及ぶ範囲の剛性評価 (共振周波数の測定) や、材料劣化・内部ひび割れなどの損傷同定を行う。特に、鋼板や繊維シートなどによって覆われた目視困難な RC 部材の再劣化について、点検技術の開発から安全性評価まで検討する。主な検討項目 A.~C. を以下に列挙する。

- 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

昨年度の中間評価で頂いた意見を踏まえて、平成 27 年度は表の検討項目 (1.~5.) を実施した。

<中間評価結果>

評価:A 再劣化箇所の健全度評価手法の開発に向けて、課題を解決しながら順調に研究が進捗していると評価する。

<参考意見>

劣化の有無と場所だけではなく、劣化の程度を正確に判定できる手法とすることを目指していただきたい。

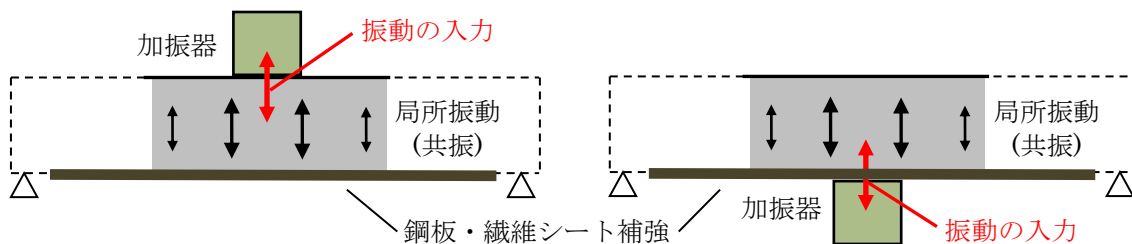


図 加振器を用いた局所振動試験の概略図 (左; 上面加振, 右; 下面加振)

表 平成 27 年度の検討項目

No.	検討内容	関連項目
1.	コンクリート内部の空隙面積と共振周波数の関係 (劣化程度の把握に向けた検討)	A. 非破壊検査法の高度化
2.	共振周波数による RC 部材のひび割れ性状の把握 (劣化程度の把握に向けた検討)	A. 非破壊検査法の高度化
3.	再劣化を模擬した RC はりの電食試験と載荷試験 (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
4.	凍害劣化した RC 構造物の破壊確率の試算 (劣化構造物の安全性評価)	B. 健全度評価法の高度化
5.	鋼板接着補強後に再劣化した道路橋床版の現場試験 (実用化に向けた取り組み)	C. 道路橋の現場試験

⑥これまでの研究経過（続き）

1. コンクリート内部の空隙面積と共振周波数の関係

共振周波数と劣化程度の関係を整理するため、円柱供試体を用いた基礎検討を行った。図-1.1の供試体寸法は直径 100 mm × 高さ 200 mm であり、高さ中央に厚さ 1 mm の円形に切り出したテフロンシートを模擬空隙として埋め込んだ。供試体断面に占める空隙面積の割合を実験パラメータとして、空隙率 0 (健全), 25, 50, 75 % に対して写真-1.1 の振動試験装置を用いて縦振動を測定した。また、図-1.2 に示すように、供試体中央を固定条件とした 1/2 モデルによるモード解析も実施した。解析では空隙箇所の節点を自由とした。

空隙率と共振周波数との関係を図-1.3 に示す。実験と解析結果は良好に対応しており、空隙率と共振周波数には線形関係が見出せた。これより、健全状態を基準にした共振周波数比を指標として、コンクリート内部のひび割れ面積を推定できる可能性が示唆された。後述するように、現場試験での振動試験精度は変動係数 6.8 % であり、共振周波数比の 95 % 信頼区間は 0.88 ~ 1.12 の範囲であった。提案技術では、加振器まわりに部材厚さと同程度の範囲 (1 波長) が検査範囲 (振動が及ぶ範囲) になると考えており、図-1.3 の結果より、この検査範囲に内在する空隙率 20 % 相当以上の劣化・損傷に対して、共振周波数比を指標として劣化の程度を把握できる。



図-1.1 供試体の外観

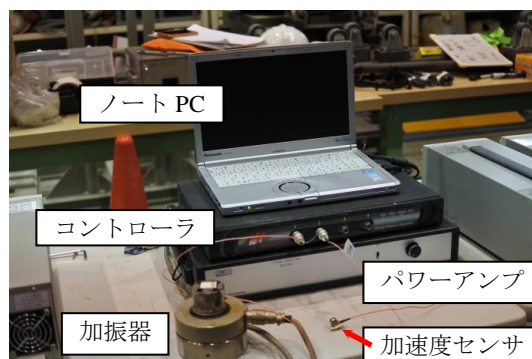


写真-1.1 振動試験装置

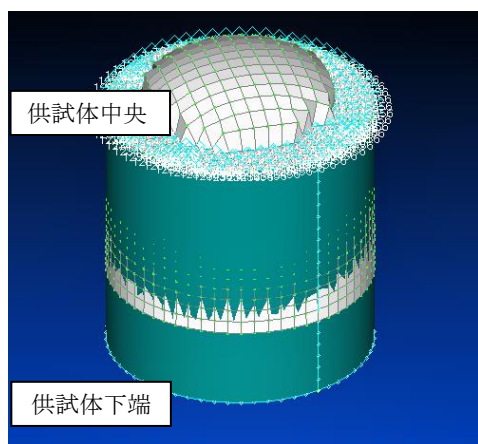


図-1.2 モード変形図 (空隙率 50 %)

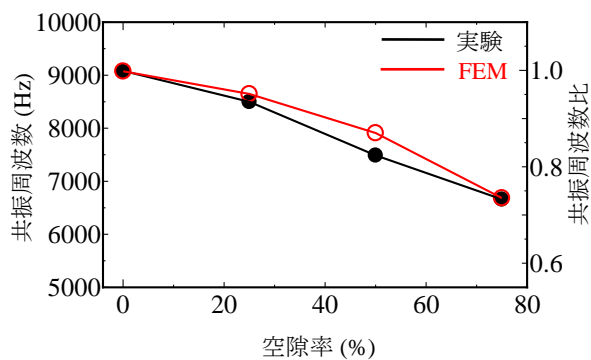


図-1.3 空隙面積と共振周波数の関係

⑥これまでの研究経過 (続き)

2. 共振周波数によるRC部材のひび割れ性状の把握

項目 1. の検討では、共振周波数比を指標として図-2.1 の検査範囲に含まれるひび割れ面積を推定できる可能性が示唆された。しかし、項目 1. の検討は連続した模擬空隙による基礎検討であり、RC 部材のひび割れは、骨材のかみ合わせによる不連続接触と鉄筋の拘束がある。

道路橋 RC 床版、ボックスカルバート、橋台、擁壁、水路などの壁・床構造では、背面や側面のひび割れ性状を目視観察できない。提案技術によって構造物の前面から内部の曲げひび割れやせん断ひび割れが判別できれば、構造物の安全性を大きく低下させるせん断破壊に対して、早期発見と対策に繋げることができる。図-2.1 に示すように、提案技術は、加振方向に直交するひび割れ面積が大きいせん断ひび割れに対して、損傷同定の感度が高いと考えられる。このようなひび割れの方向やひび割れ面の連続性による損傷同定の感度の違いから、RC 部材のひび割れ種別の判定が可能になると考えられる(図-2.8 参照)。

そこで、図-2.2 の2体の RC はり供試体を作製し、単純ばりのスパン中央に鉛直荷重を加えることによって、せん断ひび割れと曲げひび割れを生じさせた。荷重-変位関係とひび割れ図を図-2.3 と図-2.4 に示す。除荷後の荷重が零の状態にて、目視によるひび割れ観察と局所振動試験を実施した。载荷試験より、せん断破壊型 S 供試体ではスパン中央から右側でせん断破壊が生じて実験を終了し、曲げ破壊型 F 供試体は降伏変位の 6 倍の変位 ($6\delta_y$) まで载荷を継続した。

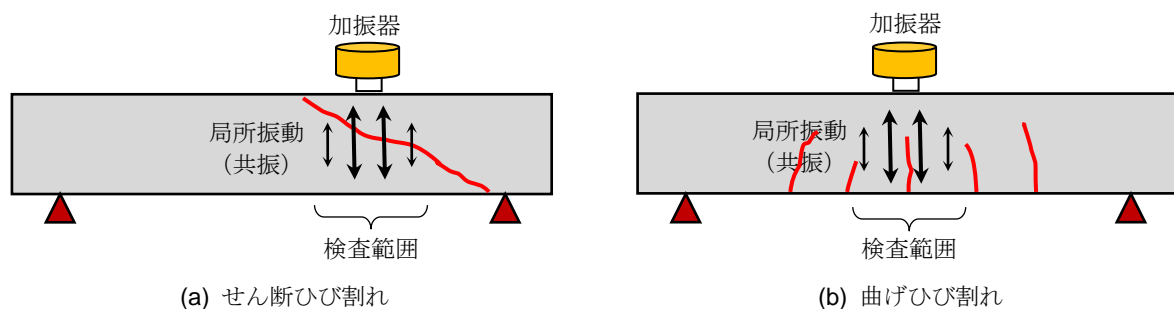


図-2.1 局所振動試験の概略図

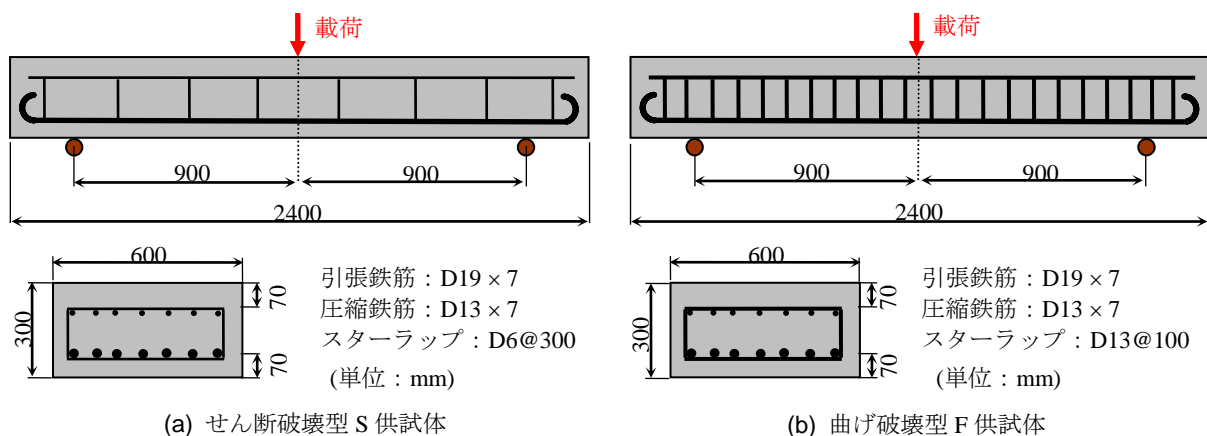


図-2.2 RC はり供試体の概略図

⑥これまでの研究経過 (続き)

写真-2.1 に示すように、供試体上面および下面から局所振動試験をそれぞれ行った。実験で得られた共振曲線の一例として、せん断破壊型 S 供試体の载荷前 (健全時) とせん断破壊後の比較を図-2.5 に示す。図-2.1 の局所振動試験では、振動の入力面と反射面を往復する重複反射波の定常応答 (縦振動) が卓越すると考え、鉄筋の影響などを無視した簡便な近似算定式として、次式に示す棒の縦振動の理論を参照した。

$$f = \frac{c}{2L} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E_d}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)}} \quad (2.1)$$

ここで、 f は 1 次の共振周波数、 c は音速、 L は部材厚さ (縦振動の波長)、 E_d は動弾性係数、 ρ は密度、 ν は動ポアソン比 (0.28) である。式 (2.1) による理論値 6805 Hz に対して、図-2.5 の健全時の実験結果は 6620 Hz であり、せん断破壊後には 1733 Hz まで共振周波数が低下した。

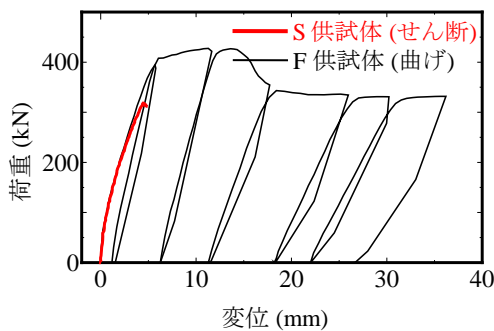


図-2.3 荷重-変位関係

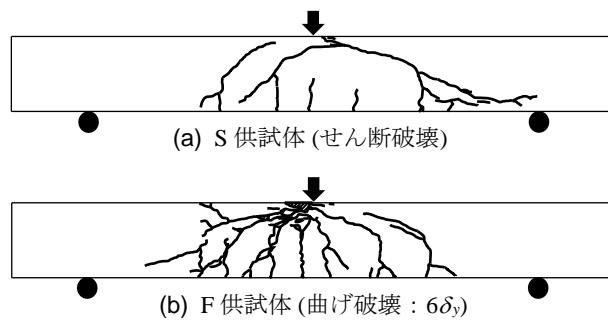


図-2.4 ひび割れ図

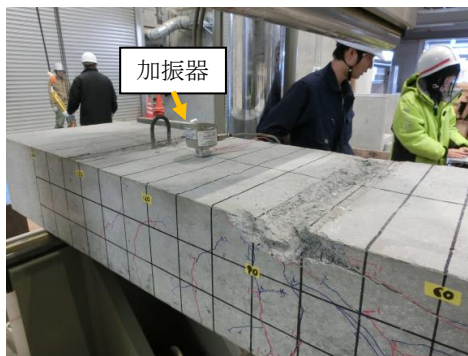


写真-2.1 局所振動試験の状況 (左：上面測定、右：下面測定)

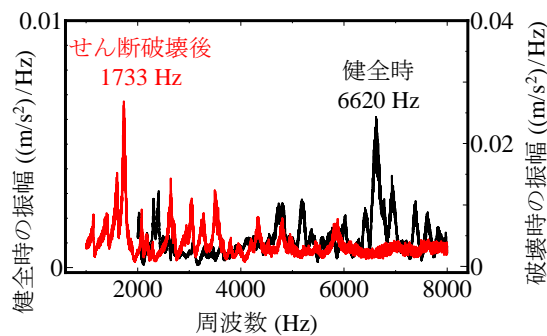


図-2.5 共振曲線 (S 供試体)

⑥これまでの研究経過 (続き)

供試体の軸方向に 100 mm 間隔で測定箇所を設け、上面および下面から写真-2.1 の局所振動試験を行った。せん断破壊型 S 供試体に対して、図-2.6 の共振周波数の分布(剛性分布)を得た。スパン中央から右側の箇所で共振周波数が大きく低下しており、せん断ひび割れを検知したものと考えられる。これに対して、スパン左側の損傷程度は目視でも軽微であり、共振周波数の低下もほとんどなかった。曲げ破壊型 F 供試体についても同様の測定を行い、図-2.7 の共振周波数の分布を得た。図より、両側支点から中央に向かって対称に剛性が低下する傾向が示されており、図-2.4 (b) のひび割れ図とも良好に対応した。

せん断破壊と曲げ破壊に対して、荷重点変位を降伏変位で除した塑性率(部材変形量)と共振周波数比との関係を図-2.8 に示す。現場試験での測定精度を考慮すると、提案技術は共振周波数比 0.88 以下の劣化・損傷を検知できる。せん断ひび割れに対しては、図-2.6 に示すように明確に損傷同定が可能であった。これは図-1.3 に示した模擬空隙を含む円柱供試体よりも共振周波数が大きく低下しており、連続したせん断ひび割れ面が検査範囲にわたって横断するためと考えられる。一方、曲げひび割れに対しては、鉄筋降伏後に残留ひび割れが生じる $2\delta_y$ 以降の損傷同定が可能と考えられる。提案技術は、構造物の安全性を低下させるせん断破壊に対して損傷同定の感度が高く、曲げ破壊では降伏後の大きな塑性変形に対して有用性が示唆された。特に、曲げひび割れでは、共振周波数比を指標として劣化の程度を評価できる可能性が示唆された。また、図-2.6 と図-2.7 より、提案技術は供試体上下面のいずれからでも同様の点検結果が得られた。

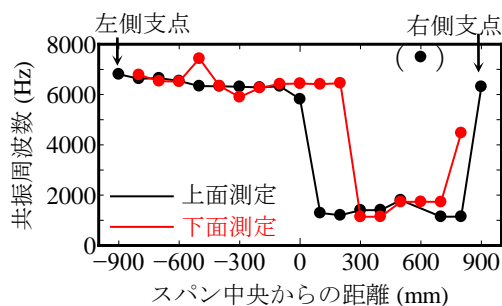


図-2.6 共振周波数の分布 (S 供試体)

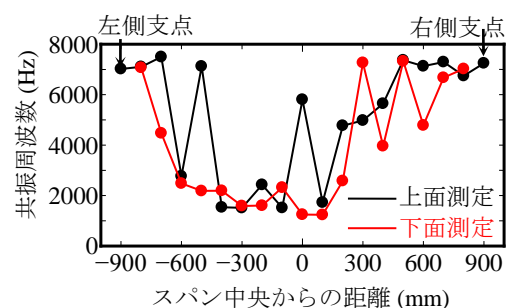


図-2.7 共振周波数の分布 (F 供試体, $6\delta_y$)

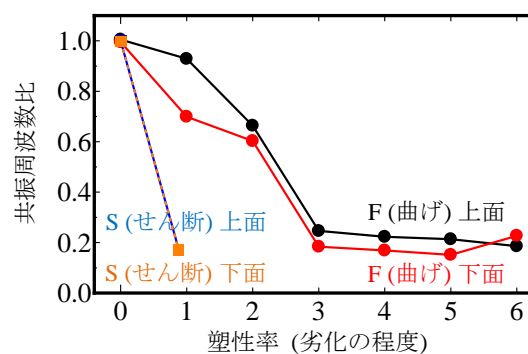


図-2.8 塑性率と共振周波数比の関係

⑥これまでの研究経過 (続き)

3. 再劣化を模擬したRCはりの電食試験と載荷試験

炭素繊維シートによる補強後に再劣化した場合を模擬して、表-3.1 に示すように、RC はり供試体(RC シリーズ)と炭素繊維シートで補強した供試体(SH シリーズ)を計 17 体作製した。RC 供試体の腐食区間は、i) スパン中央の 350mm, ii) スパン中央の 700mm, iii) スパン左側の 350mm の 3 ケースとして、いずれも引張鉄筋のみを電食試験によって腐食させた。腐食区間における鉄筋の平均質量減少率(腐食率)の目標値は 10% および 20% とした。RC シリーズの供試体概略図を図-3.1 に示す。

表-3.1 実験パラメータ

供試体名	繊維シートの有無	腐食区間 (mm)	実際の鉄筋腐食量 (mg/cm ²)	実際の鉄筋腐食率 (%) (引張材料欠損率)
RC_0	なし	なし	なし	なし
RC_C10		350 (中央)	202	6.8
RC_C20			561	18.9
RC_W10		700 (中央)	175	5.9
RC_W20			354	11.9
RC_L10		350 (左側)	229	7.7
RC_L20			435	14.6
SH_0		下面に 2 層貼り	なし	なし
SH_C10	350 (中央)		294	7.3
SH_C20			504	12.5
SH_W10	700 (中央)		255	6.0
SH_W20			482	14.1
SH_L10	350 (左側)		245	6.4
SH_L20			568	12.0
SH_CD	下面に 2 層貼り 一部で付着なし		350 (中央) [※]	---
SH_WD		700 (中央) [※]		
SH_LD		350 (左側) [※]		

※ SH_CD, SH_WD, SH_LD はこの区間で炭素繊維シートの付着を切った。

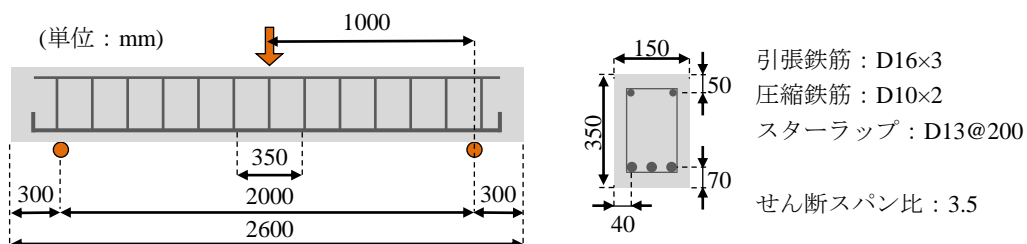


図-3.1 供試体概略図 (RC シリーズ)

⑥これまでの研究経過 (続き)

図-3.2 に示す SH 供試体では、RC 供試体の引張鉄筋を半分程度に低減した上で、RC 供試体と同程度の耐荷力まで性能が回復するように供試体下面に炭素繊維シートを 2 層貼りした。電食試験については RC シリーズと同様である。また、繊維シートの付着特性が耐荷性能に及ぼす影響を検討するため、表-3.1 に示す 3 体の SH 供試体では、炭素繊維シートの一部の区間において付着を切った。

電食試験と荷重試験の状況を写真-3.1 と写真-3.2 に示す。電食試験では所定の腐食段階にて局所振動試験を行い、腐食ひび割れと共振周波数の関係を整理した。電食試験後は、はり供試体をスパン 2000 mm に単純支持し、スパン中央に鋼製ピンを介して鉛直荷重を加えた。荷重試験は、降伏変位の 6 倍までの単調荷重とした。これらの電食試験、振動試験、荷重試験によって、鉄筋腐食に対する非破壊検査の適用性、および鉄筋腐食が RC 部材と繊維シート補強部材の耐荷特性に及ぼす影響を検討する。

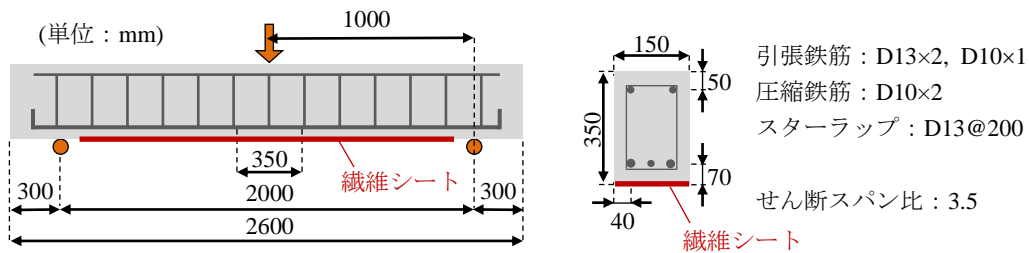


図-3.2 供試体概略図 (SH シリーズ)

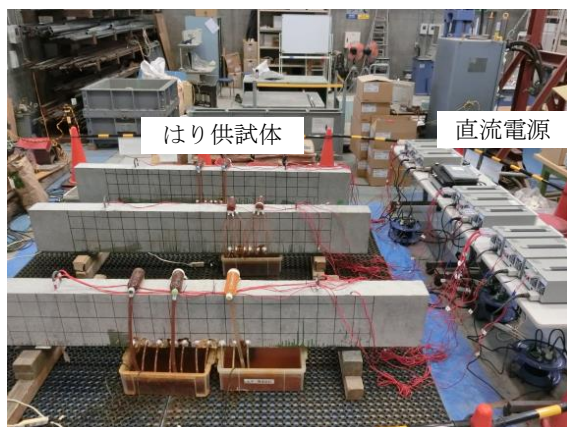


写真-3.1 電食試験の状況

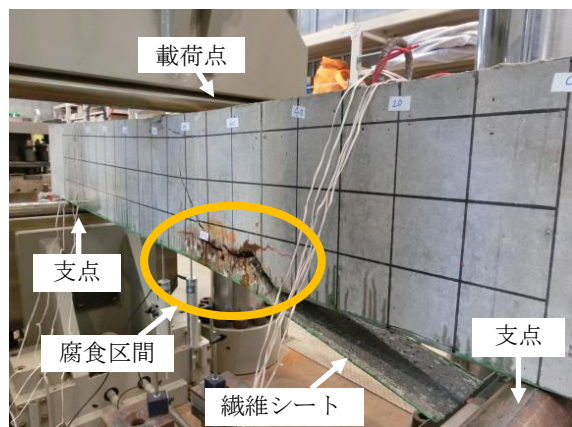


写真-3.2 荷重試験の状況

⑥これまでの研究経過 (続き)

局所振動試験の測定位置および加振方向を図-3.3に示す。提案技術は加振器を用いて構造物のローカルな共振を励起するものであり、供試体上下面および側面から測定を行った。上面および下面測定の検査範囲は350mm、側面測定では150mmであり、これらの検査範囲に含まれる腐食ひび割れや鉄筋-コンクリートの付着損失を剛性低下によって検知する。

実験結果を図-3.4~図-3.7に示す。提案技術の測定精度(変動係数6.8%)と比べて、上面および下面測定の共振周波数は低下が小さく、鉄筋腐食の検知は難しい。これに対して、側面加振ではRCおよびSH供試体のいずれについても、鉄筋腐食量の増加に伴って共振周波数比が0.8程度まで低下した。これは顕微鏡の原理と同様に、波長(部材厚さ)を小さくすることによって分解能を上げることに相当する。そして、腐食率10%程度の軽微な劣化程度でも部材厚さの小さい側面から局所振動試験を行うことによって、繊維シートで覆われて目視できないRC部材内部の腐食ひび割れの検知が可能と考えられる。

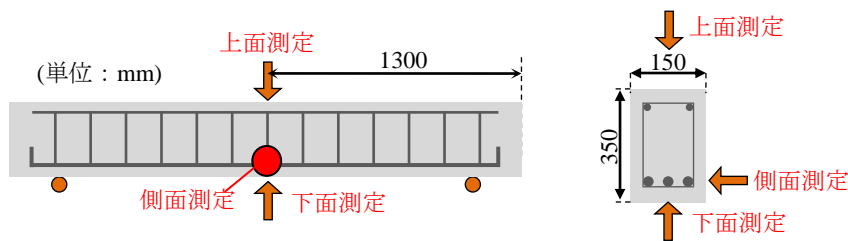


図-3.3 局所振動試験の測定位置

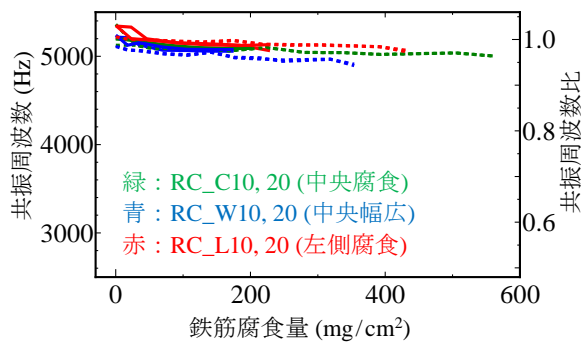


図-3.4 上面および下面測定 (RC 供試体)

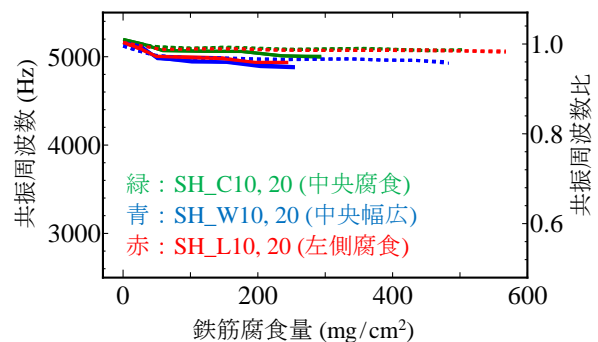


図-3.5 上面および下面測定 (SH 供試体)

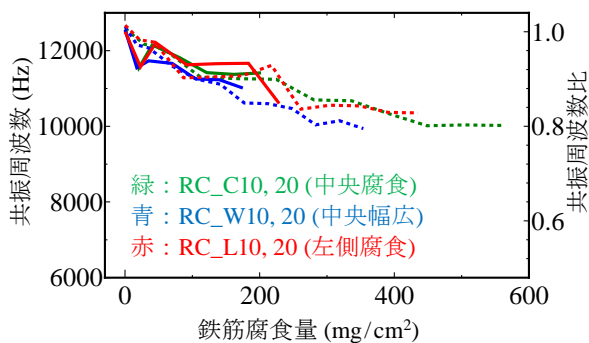


図-3.6 側面測定 (RC 供試体)

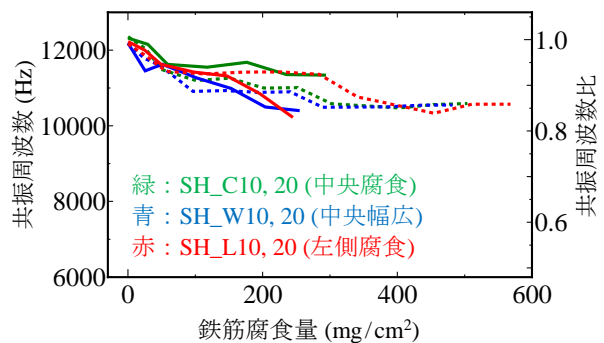


図-3.7 側面測定 (SH 供試体)

⑥これまでの研究経過 (続き)

電食後の荷重試験によって得られた荷重-変位関係を図-3.8～図-3.10 に示す。RC 供試体では鉄筋腐食率 20% の供試体で耐荷力の低下が大きく、健全供試体に対して 80% 程度の最大荷重となった。なお、この供試体では荷重中に鉄筋の破断も生じた。腐食率と荷重低下率との関係を図-3.11 に示す。結果的に、RC 供試体では腐食率と荷重低下率に線形関係が見出せた。

これに対して繊維シート補強した SH 供試体では、炭素繊維シートの剥離によって脆性的に耐力を失い、RC 供試体と比較すると鉄筋腐食に伴う荷重の低下が大きい。また、図-3.10 に示す繊維シートの付着を切った 3 体の供試体では、健全供試体と同程度の耐荷力を示した。写真-3.2 の SH 供試体の破壊性状を参照すると、繊維シートの剥離は供試体端部から生じており、鉄筋腐食が生じたかぶりコンクリートを横断して大きなひび割れが生じた。このことから、腐食ひび割れによるかぶりコンクリートの脆弱化が、はり供試体の耐荷力を大きく低下させる要因になることが示唆された。SH 供試体では、鉄筋腐食率が 7% 程度の軽微な劣化程度でも、健全供試体の 80% 程度まで耐荷力が低下することが示された。

このような腐食ひび割れによるかぶりコンクリートの脆弱化と、炭素繊維シートの剥離に関する検討は実験データが不足しているため、平成 28 年度も検討を継続する。なお、これまでに得られた知見として、腐食箇所における鉄筋の断面欠損を考慮し、かぶりコンクリートを無視した簡易な FEM モデルでも、炭素繊維シートの剥離や耐荷性能を安全側に評価できると考えている。

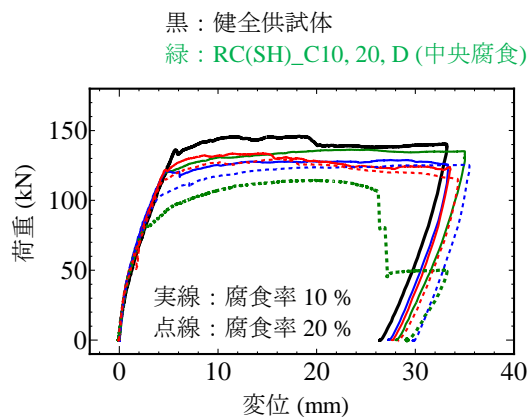


図-3.8 荷重-変位関係 (RC 供試体)

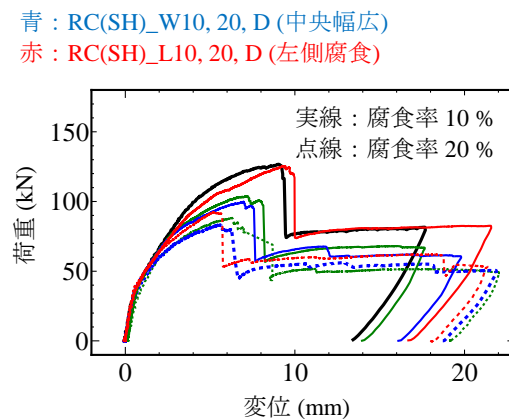


図-3.9 荷重-変位関係 (SH 供試体)

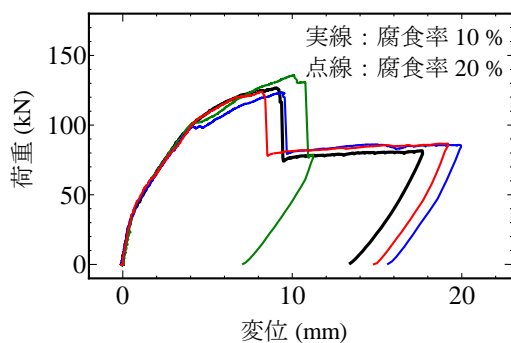


図-3.10 荷重-変位関係 (SH 剥離供試体)

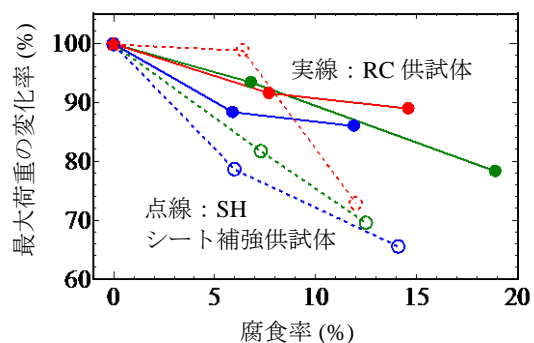


図-3.11 鉄筋腐食による耐荷力の低下

⑥これまでの研究経過 (続き)

4. 凍害劣化したRC構造物の破壊確率の試算

経年劣化が生じたRC構造物の安全性評価の体系化を目的として、凍害を受けたRCはりを対象として、点検と構造性能評価に係るばらつきを考慮した破壊確率を試算した。

提案技術による実構造物の現場試験のうち、健全箇所を対象とした107個の測定データを選定した。さらに式(2.1)を用いて共振周波数の理論値を求め、実測/理論の統計分析を行った。図-4.1と表-4.1に示すように、提案技術は部材厚さ150mm～6.7mまでの構造諸元に対して局所振動を励起でき、妥当な共振周波数が得られた。実測/理論の精度は変動係数6.8%であり、107個の実測データのうち、95%のデータは実測/理論が0.88～1.12の範囲に含まれた。このことから、後述する道路橋の現場試験では、共振周波数比0.85～1.2を健全箇所と判定している。

次に、これまで行った凍害を模擬したRCはり供試体の実験データを整理した。図-4.2より、全供試体41体のせん断耐力算定式のばらつきは、平均値1.04、変動係数17%である。なお、図中の相対動弾性係数は共振周波数比の二乗で与えられる。

表-4.1 局所振動試験の測定精度

	測定番号 (データ数)	床版厚さ 桁高さ 側壁高さ (mm)	音速の 評価 (m/s)	変動 係数 (%)
A 床版	1～8	150	4110	3.7
A 主桁	9～30	750	3560	3.0
B 床版	31～49	400	4390	7.8
B 主桁	50～63	2000	3660	7.7
C 側壁	64～71	2300	3918	2.4
D 側壁	72～107	3610～6700	4020	8.7
合計	1～107	150～6700	---	6.8

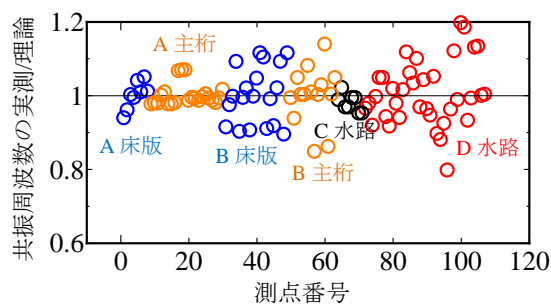
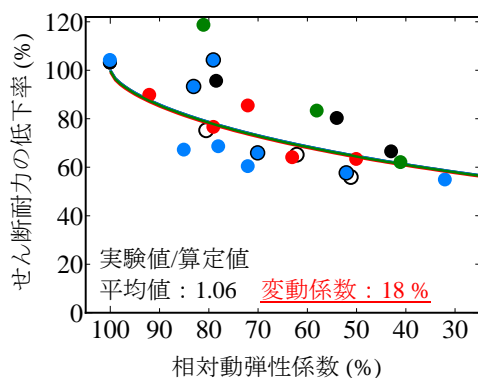
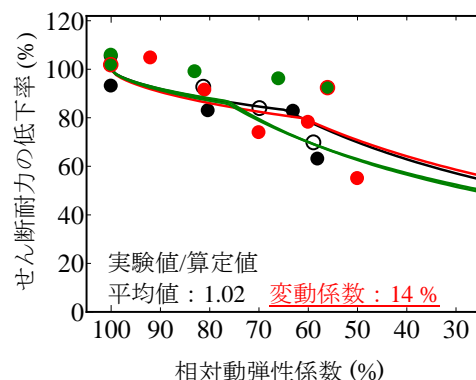


図-4.1 健全箇所の測定のばらつき



(a) 腹鉄筋のない供試体

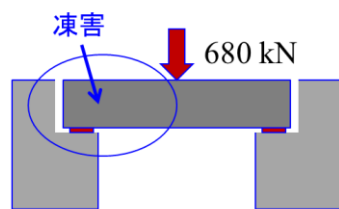


(b) 腹鉄筋のある供試体

図-4.2 相対動弾性係数とせん断耐力の関係 (せん断耐力算定式の精度検討)

⑥これまでの研究経過 (続き)

以降では、点検と評価に係るばらつきを考慮した構造物の安全性評価の体系化を目的として、信頼性評価フローと破壊確率の試算例を示す。ここでは、図-4.3 に示すような凍害を受けた RC 構造物を仮定した。スパン左側に著しい凍害を受けたものとし、局所振動試験による点検結果として、図-4.4 の共振周波数比が得られたと仮定する。局所振動試験とせん断耐力算定式の精度は表-4.2 に示されるため、図-4.5 の信頼性評価フローに従って、点検箇所ごとにせん断破壊に対する破壊確率を求めることができる。



スパン: 5 m
 有効高さ: 1000 mm
 せん断スパン比: 2.5
 断面幅: 300 mm
 引張鉄筋: 10-D25
 スターラップ: D13@200
 コンクリート圧縮強度: 30 N/mm²
 引張強度: 3 N/mm²
 鉄筋の降伏強度: 400 N/mm²

図-4.3 解析対象とした RC 桁の諸元と荷重条件

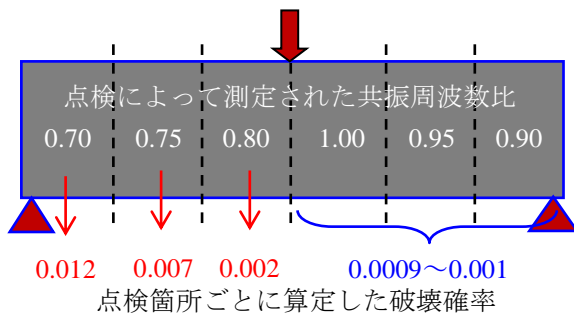


図-4.4 点検データに基づく破壊確率の試算例

表-4.2 点検と評価のばらつき

実験/理論の統計分析	共振周波数の測定精度 (点検)	せん断耐力算定式の精度 (評価)
データ数	107	41
平均値	1.00	1.04
変動係数	6.8 %	17 %

共振周波数比 = 0.70
 ↓ 点検のばらつき
 平均1.00, 変動係数7%の正規乱数を発生させて乗じる。
 ↓
 周波数比の二乗⇒相対動弾性係数
 ↓
 相対動弾性係数を示方書算定式に代入してせん断耐力を求める。
 ↓ 算定式のばらつき
 平均1.04, 変動係数17%の正規乱数を発生させてせん断耐力に乗じる。
 ↓
 これが作用せん断力 (340kN) を下回る数 N をカウントする。
 ↓

$$\text{破壊確率} = \frac{N}{\text{試行回数}}$$

図-4.5 信頼性評価フロー

⑥これまでの研究経過（続き）

図-4.5 の信頼性評価フローに従って、劣化程度（共振周波数比）と構造物の安全性（破壊確率）の関係を表-4.3 に整理した。このとき、モンテカルロシミュレーションの試行回数は 10^6 とした。この試算結果を参照する限りでは、共振周波数比 0.9~1.0 の範囲では破壊確率に大きな増加はなかった。図-4.1 の健全箇所を対象とした測定データより、実測 / 理論の 95 % 信頼区間は 0.88~1.12 の範囲であった。すなわち、提案技術によって共振周波数比が 0.88 と測定されても、その箇所は健全と判断される。これに対して表-4.3 の破壊確率の評価でも、この範囲 (0.88~1.0) の劣化程度では構造物の安全性は低下しないことが確認できた。

そして、共振周波数比 0.85 を下回る劣化箇所では、破壊確率が急激に増加することが示唆された。このように、点検と評価のばらつきを考慮した破壊確率の算定によって、劣化が生じた構造物の安全性を数値によって示すことができた。破壊確率は、構造物に作用する外力と構造性能のバランスによって得られる安全性の評価値であり、図-4.4 に示すように点検箇所ごとに破壊確率を示すことができる。構造物に許容できる破壊確率が決定されれば、現行の性能照査型設計と同じ手順に従って、既設構造物の安全性の照査も可能になる。

以上より、提案手法は、構造物の劣化程度と安全性を同時に把握でき、また、経過観察における構造物の性能低下の傾向を推し量ることができる。今後、既設構造物の維持管理への活用が大いに期待される。

表-4.3 構造物の劣化程度と破壊確率

共振周波数比	相対動弾性係数 (%)	平均せん断耐力 (kN)	破壊確率
1.00	100	786	7.7×10^{-4}
0.95	90	764	1.0×10^{-3}
0.90	81	741	1.1×10^{-3}
0.85	72	722	1.5×10^{-3}
0.80	64	706	1.9×10^{-3}
0.75	56	695	2.3×10^{-3}
0.70	49	684	2.7×10^{-3}

⑥これまでの研究経過 (続き)

5. 鋼板接着補強後に再劣化した道路橋床版の現場試験

対象橋梁は、写真-5.1の主要幹線道路の河川に架かる道路橋であり、1953年に竣工した単純鋼桁橋・3連で、橋長76.9m、全幅員8.0m、床版厚さ250mm、舗装厚さ50mmである。本橋は、上下線2車線で供用されており、床版下面は鋼板接着補強が行われている。実橋試験の事前に行った目視点検と叩き点検では、図-5.1に示すような橋面の舗装の異常や、補強鋼板の浮き・腐食、漏水・遊離石灰などが見られた。

第2径間(スパン25m)を対象として、桁下の足場から床版下面に対して上向きに写真-5.2の局所振動試験を行った。加振器は手で支持し、機械的な固定はしていない。加振は周波数帯域2000~8000Hzに一樣の強度をもつホワイトノイズを与える加振方法とした。測定は全252点に対して行った。なお、補強鋼板の浮きのある箇所では測定していない。

共振曲線の一例を図-5.2に示す。異なる2測点での測定値はいずれも明確な応答のピークが表れており、測点D(3089Hz)と測点N(6686Hz)が共振周波数として得られた。アスファルト舗装の厚さと音速を考慮した共振周波数の理論値は式(2.1)により6222Hzであり、測点N(6686Hz)は健全箇所と判断される。一方、測点D(3089Hz)は、理論値よりも低い共振周波数が測定されており、床版内部のひび割れなどによって共振周波数が低下したと考えられる。



写真-5.1 対象橋梁

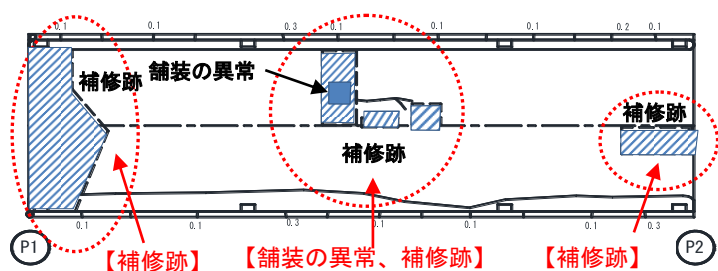


図-5.1 橋面の損傷図 (補修跡等)



写真-5.2 床版下面からの測定状況

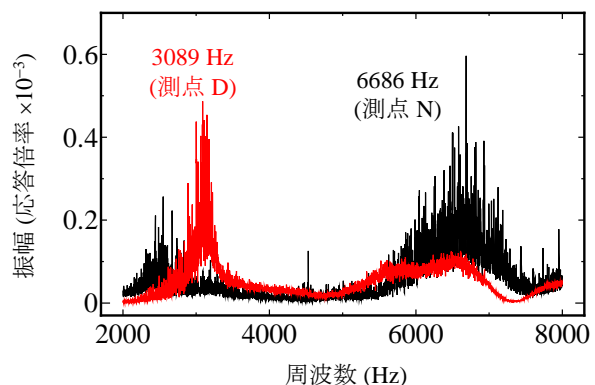


図-5.2 共振曲線の一例

⑥これまでの研究経過 (続き)

本実験で測定した 252 測点の共振周波数比の分布を図-5.3 に示す。全箇所への測定には 8 時間程度を要した。データ整理は、252 個の共振周波数比の平均から 20 % 以上離れたデータを破棄し、残りのデータの平均を基準値 f_m (6779 Hz) とした。図-5.3 は f_m を基準とする共振周波数比を色分け表示した。図-4.1 の測定精度を考慮して、共振周波数比 0.85~1.2 の範囲を健全と判断した。さらに、共振周波数比の二乗によって剛性低下率が求まるため、剛性低下率 25 % と 50 % に相当する共振周波数比として、0.5 (赤色) と 0.7 (黄色) に区分した。

以上より、図-5.3 は鋼板補強されて目視点検が困難な道路橋床版の剛性分布 (損傷マップ) を表している。図-5.1 に示した目視点検による橋面の損傷図と比較すると、舗装の異常や補修跡等は桁端部と支間中央付近に生じており、図-5.3 の剛性低下箇所と概ね対応した。

本実験では、軽量小型加振器の使用とホワイトノイズを用いた加振方法によって、作業性の向上と測定時間の短縮が図れることを確認した。 特に、車両走行の振動影響下でも測定精度を低下させることなく、桁下から床版の点検が可能であった。今後も道路橋の現場試験を実施することによって、現場作業性や測定時間などの改善を図り、提案技術の早期実用化に繋げていく。

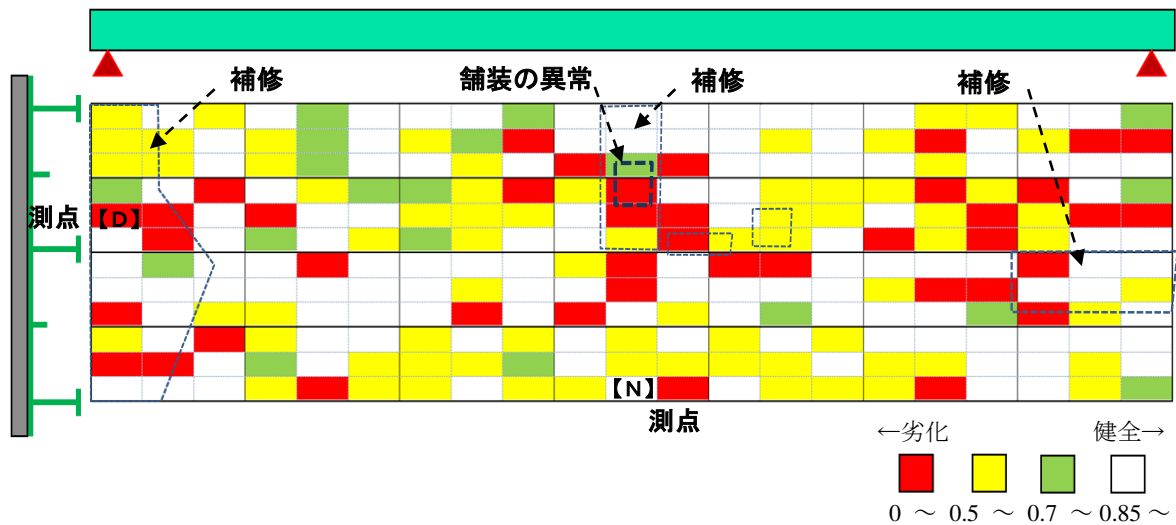


図-5.3 道路橋 RC 床版の剛性分布 (共振周波数比による損傷マップ)

⑦研究成果の発表状況

査読付き論文

- 1) 杉山涼亮, 内藤英樹, 山口恭平, 早坂洋平, 鈴木基行: ランダム加振による RC 床版の非破壊試験法, 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, Vol. 15, pp. 471-476, 2015.10
- 2) Hideki Naito, Hiroyuki Ueta, Seiji Abe, Takumi Morohashi, Motoyuki Suzuki and Takao Endo: DAMAGE IDENTIFICATION FOR RC BEAMS REINFORCED BY STEEL PLATE OR CARBON FIBER SHEET, ConMat'15, *Proceedings of the 5th International Conference on Construction Materials*, USB memory, August, 2015, Whistler
- 3) 安部誠司, 上田博之, 諸橋拓実, 内藤英樹, 鈴木基行: 鋼板および繊維シートによって補強された RC はりの再劣化に対する損傷評価, 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, Vol. 14, pp. 433-438, 2014.10

学会発表

- 1) 内藤英樹, 上田博之, 安部誠司, 諸橋拓実, 鈴木基行: 鋼板および繊維シート補強した RC はりの損傷評価, 土木学会第 69 回年次学術講演会, V-121, pp. 241-242, 2014.9
- 2) 安部誠司, 上田博之, 内藤英樹, 鈴木基行: 鋼板および繊維シート補強した RC はりの鉄筋腐食と耐荷特性, 土木学会第 69 回年次学術講演会, V-122, pp. 243-244, 2014.9
- 3) 杉山涼亮, 八嶋宏幸, 内藤英樹, 山口恭平, 早坂洋平, 鈴木基行: ホワイトノイズを用いた強制加振試験による RC 床版の損傷評価, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, V-4, 2015.3.
- 4) 諸橋拓実, 安部誠司, 高田瞬, 内藤英樹, 中村定明, 楊威, 鈴木基行: 補修後に再劣化した RC はりの耐荷力特性に関する研究, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, V-20, 2015.3
- 5) 高田瞬, 安部誠司, 諸橋拓実, 内藤英樹, 鈴木基行: 繊維シート巻立てした RC はりの損傷評価手法, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, V-21, 2015.3
- 6) 杉山涼亮, 八嶋宏幸, 内藤英樹, 山口恭平, 早坂洋平, 鈴木基行: ホワイトノイズを用いた強制加振試験による RC 床版の非破壊検査, 土木学会第 70 回年次学術講演会, I-208, pp. 415-416, 2015.9
- 7) 古賀秀幸, 安倍敦, 内藤英樹, 鈴木基行: 鋼板補強された鋼道路橋 RC 床版の健全性点検技術, 土木学会第 70 回年次学術講演会, I-209, pp. 417-418, 2015.9
- 8) 諸橋拓実, 安部誠司, 高田瞬, 内藤英樹, 中村定明, 楊威, 鈴木基行: 断面補修後に再劣化した RC はりの点検と耐荷力特性に関する検討, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-146, pp. 291-292, 2015.9
- 9) 内藤英樹, 高田瞬, 安部誠司, 諸橋拓実, 鈴木基行: 繊維シートによって巻立て補強された RC はりの点検技術, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-147, pp. 293-294, 2015.9

受賞

- 1) 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 優秀論文賞, 2014年10月
「鋼板および繊維シートによって補強された RC はりの再劣化に対する損傷評価」
- 2) 土木学会第 70 回年次学術講演会優秀講演者表彰, 2015年9月
「断面補修後に再劣化した RC はりの点検と耐荷力特性に関する検討」

⑧研究成果の活用方策

実務への適用に向けた活用方法・手段・今後の展開等

提案技術は、加振器を用いた構造物の非破壊試験方法を新たに提示するものであり、特に道路橋 RC 床版の損傷同定において高い精度を有している。平成 27 年度までに加振器の軽量小型化や測定時間の短縮を図ることができ、現場試験の実施例も充実してきた。このような研究・開発の進捗に対して、実務への適用に関する取り組みを列挙する。

- 新設道路橋の竣工時の性能確認試験の依頼を受けて、現場試験を実施した。
- 高速道路管理会社の点検業務において、提案技術が試行的に取り入れられた。
- 高速道路管理会社と振動試験メーカー、東北大学の 3 社によって、提案技術の商品化に向けた打合せを重ねている。
- 道路橋 RC 床版の点検・評価マニュアルを早々に整備する予定である。

研究期間終了後の研究の継続性や成果活用の展開等

道路橋 RC 床版の点検ニーズは高く、研究期間終了後も産学官の連携体制によって実務への適用を推し進めていく。また、道路橋床版や主桁以外にも、カルバート、橋台、水路などの背面や側面が目視できない RC 構造物や、鋼コンクリート複合構造などに対しても提案技術の適用性の検討を開始しており、研究の応用・発展は多岐にわたる。

⑨特記事項

本研究から得られた知見

機械部品の精密検査などに用いられる高精度の振動試験方法を応用し、構造物の非破壊試験に新たな手法を投じた。提案技術は、部材厚さが大きい場合や、舗装、炭素繊維シート、鋼板に覆われた RC 部材に対しても、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た。塩害、凍害、疲労、地震に対する RC 部材の損傷評価に有用である。

研究としての新規性、アピールポイント

本研究は、加振器を用いて構造部材のローカルな剛性を非破壊評価するものであり、国内外でも前例のない研究の新規性が認められる。特に、既存の非破壊試験法と比較して、汎用性の高さと測定精度に優位性がある。また、劣化・損傷状態の把握のみならず、測定した構造部材のローカルな剛性を構造解析 (FEM) の入力値に用いることができ、劣化部材の構造性能評価や破壊確率の算定など、既設構造物の安全性評価にも容易に繋がる。

研究の見通しや進捗についての自己評価

提案技術によって、炭素繊維シートや鋼板で補強された RC 部材の再劣化を捉えられることが示唆された。応用研究として、測定機材の軽量小型化や測定時間を短縮できたことにより、提案技術は実務でも試行的に取り入れられている。さらに平成 27 年度の検討では、経年劣化した RC 部材の構造性能評価や、点検・評価のばらつきを考慮した信頼性評価フローと破壊確率の試算例を示すなど、研究全体の枠組みも整理できた。

以上のように、本研究は当初の予定以上に進捗している。