

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（FS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	公募 タイプ	II	
		[副領域]			
③研究経費（単位：万円） ※受託金額を記入。	平成25年度 1392.72				
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。） 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 <u>目視困難箇所の点検を想定して、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> 。					

⑥ F S 研究の結果

昨年のヒアリング審査を受けて、本格採択に向けた下記の条件が挙げられた。

再劣化現象の定義及び研究開発の目標値を明確にし、本手法によりの確に再劣化部材の健全度を評価できることを示すこと。

本研究では、RC 桁や RC 床版を繊維シートや鋼板によって補強する際に、コンクリートのひび割れ補修や断面補修が適切に行われることを前提とした上で、補修後に部材に生じる変状を再劣化と定義する。具体的な再劣化を以下に列挙する。

- ①補強材の劣化：鋼板の腐食，繊維シートの破断
- ②補強材とコンクリート境界面の劣化：繊維シートや鋼板の剥離
- ③RC 部材の損傷：鉄筋腐食，疲労ひび割れ，凍結融解による材料劣化とひび割れ

本格研究の開始に先立って、平成 25 年度の FS 研究では、3 つの劣化要因 (塩害，凍害，疲労) に対して、i) 非破壊検査，ii) 劣化部材の構造性能，および iii) 道路橋の現場試験を検討した。成果報告の目次を以下に示す。

- 1. 加振器を用いた RC 部材の周波数スイープ試験
 - (1) 提案技術の原理と測定精度
 - (2) 鋼板および繊維シート補強した RC 部材への応用
- 2. 塩害に関する検討
 - (1) 実験概要
 - (2) 非破壊検査
 - (3) 劣化部材の構造性能
- 3. 凍害に関する検討
 - (1) 実験概要
 - (2) 非破壊検査
 - (3) 劣化部材の構造性能
- 4. 疲労に関する検討
 - (1) 実験概要
 - (2) 非破壊検査
 - (3) 劣化部材の構造性能
- 5. 道路橋の現場試験
 - (1) 鋼板補強された道路橋 RC 主桁の現場試験
 - (2) 繊維シート補強された道路橋 RC 床版の現場試験
- 6. まとめ

1. 加振器を用いた RC 部材の周波数スイープ試験

(1) 提案技術の原理と測定精度

図-1 に示すように、RC 桁や RC 床版に設置した加振器 (sine 波) の周波数を連続的に上昇させ、加振器周りの局所的な縦振動を励起する方法 (以下、局所振動試験) を提示した。提案技術は、検査範囲 (振動が及ぶ範囲) の応答加速度から振動特性を評価し、共振周波数の低下によってコンクリート内部の鋼材腐食やひび割れなどの劣化・損傷を検知する (図-2)。

健全な RC はり供試体 (室内実験) と、外観調査から健全と判断された PC 橋 (現場試験) の実測データを整理し、測定精度を検討した。表-1 に示すように、実 PC 橋の現場試験でも測定値のばらつきは小さく、提案技術の高い精度が確認できた。健全状態で測定した表-1 の統計処理を参照すると、共振周波数の測定値のばらつき (95 % 信頼区間) は、標本平均からわずか ±2 % の範囲に収まった。

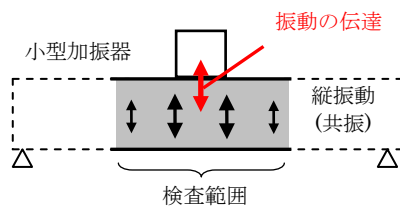


図-1 局所振動試験

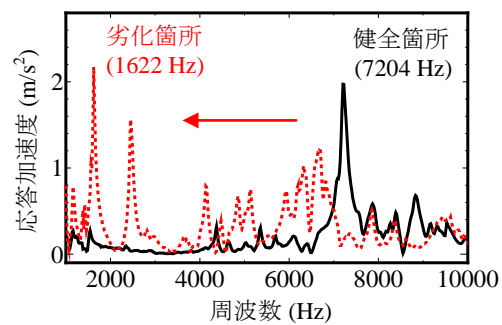


図-2 損傷による共振周波数の低下

表-1 測定精度の検証

測定対象		はり供試体 (長さ 2.6 m)	PC 橋の主桁 (スパン 25 m)	PC 橋の床版 (スパン 25 m)
測定概要		1 箇所を同一条件で 50 回測定	16 箇所を各 2 回 あるいは 4 回測定	8 箇所を 各 2 回測定
サンプル数		50	44	16
標本平均 (Hz)		5345	2401	13695
不偏分散 (Hz ²)		21	9443	235200
変動係数 (%)		0.1	4.0	3.5
95 % 信頼区間 (Hz)	下限	5344	2371	13437
	上限	5346	2431	13953
標本平均で基準化した 95 % 信頼区間	下限	1.00	0.99	0.98
	上限	1.00	1.01	1.02

(2) 鋼板および繊維シート補強した RC 部材への応用

提案技術を用いた鋼板および繊維シートの上からの点検の可能性を検討する。基礎的検討として、荷重による曲げひび割れを損傷とした。供試体概要を表-2と図-3に示す。FS研究では、RCはり供試体を基準として、劣化後の補修・補強を模擬して、引張鉄筋量を50%に減じた上で、同程度の耐力まで回復するように繊維シートおよび鋼板を供試体下面に接着させた。実験パラメータは、補強材の種類(補強なし、鋼板補強、シート補強)と供試体寸法(中型はり2.6m、大型はり5.0m)である。これらの6体のはり供試体の曲げ荷重によって、曲げひび割れを導入した。

荷重実験では、降伏変位 δ_y を基準として δ_y の整数倍ごとに $6\delta_y$ まで除荷・再荷重を継続し、それぞれの除荷時にはり供試体の全体振動(写真-1(a))および局所振動(写真-1(b),(c))を測定した。全体振動では、供試体全体の平均剛性を評価する。下面からの局所振動試験は、道路橋の桁下からの点検を想定しており、鋼板と繊維シートの上から内部のRC部材の劣化性状を評価する。上面からの局所振動試験は、道路上(舗装上)からの点検を想定している。

表-2 はり供試体の諸元一覧

供試体名		部材長さ (mm)	断面幅 (mm)	断面高さ (mm)	補強材
中型はり 供試体	RC	2600	150	350	なし
	鋼板				鋼板(厚さ2.3mm)
	シート				繊維シート(1枚)
大型はり 供試体	RC	5000	270	630	なし
	鋼板				鋼板(厚さ4.5mm)
	シート				繊維シート(2枚)

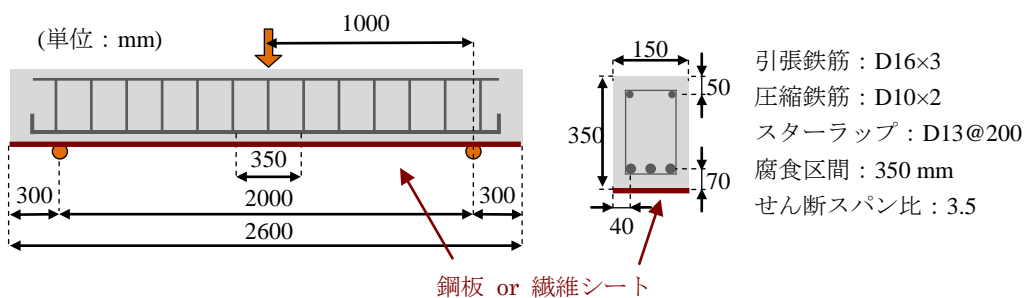


図-3 供試体の概略図(中型はり供試体)

図-4より、はり供試体の全体振動試験では、鋼板や繊維シートの影響なく、共振周波数の低下に着目して部材全体の損傷レベル(変形量)を評価できた。さらに、図-5~図-7の局所振動試験でも、鋼板や繊維シートの影響なく、共振周波数の低下とひび割れ位置が良好に対応しており、上面と下面のいずれからの点検でも損傷位置同定が可能であった。本研究は、鋼板や繊維シート補強されたRC部材の再劣化に対する点検技術を目的としており、鋼板や繊維シートの上からでも内部のコンクリート部材の劣化性状を評価できた。また、鋼板や繊維シートが剥離している場合であっても、道路上(舗装上)からRC部材の劣化性状を評価できる。

このように提案技術は全体振動試験と局所振動試験を組み合わせることによって、部材全体の平均的な損傷度(図-4)の評価に加えて、詳細なRC部材の劣化分布(図-5~図-7)を把握することができる。

部材全体の平均的な剛性を評価する

鋼板と繊維シートの上から加振する

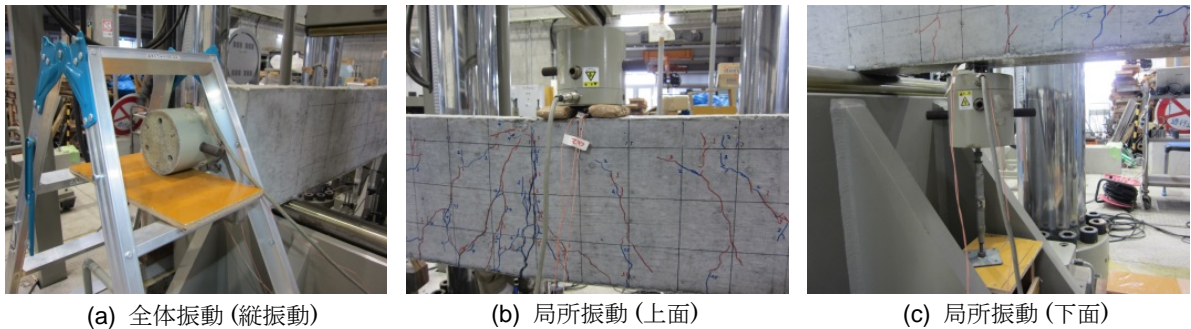


写真-1 振動試験の状況

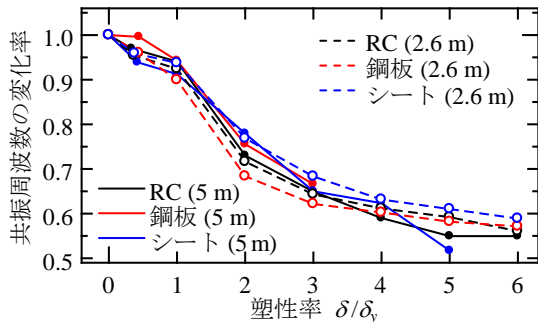


図-4 損傷レベルと共振周波数(全体振動)

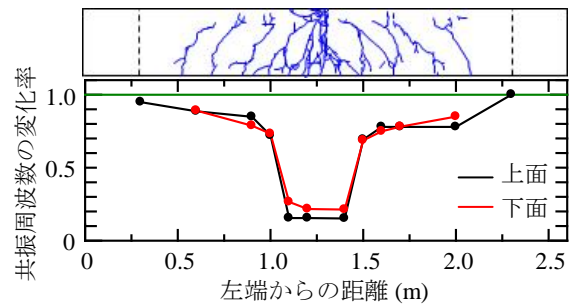


図-5 RC 供試体の局所振動試験 (6 δ_y)

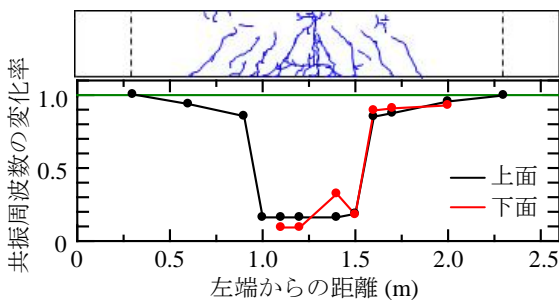


図-6 鋼板供試体の局所振動試験 (6 δ_y)

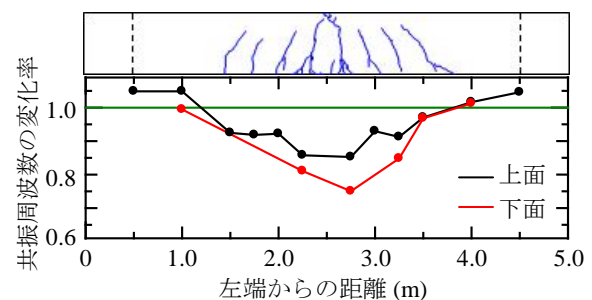


図-7 シート供試体の局所振動試験 (3 δ_y)

2. 塩害に関する検討

(1) 実験概要

図-3 に示した中型はり供試体(無補強, 鋼板補強, シート補強) に対して, 表-3 に示すように再劣化を模擬してコンクリート内部の鉄筋を腐食させた. 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. なお, 鋼板補強した実際の RC 桁では鋼板にも腐食が生じるが, FS 研究では, 提案技術の点検精度に及ばず鋼板の影響を検討するため, 鋼板は腐食させていない. 本実験では, 写真-2 に示すように直流電気を継続的に流すことによって, コンクリート中の鉄筋腐食を促進させた. 鉄筋腐食率は積算電流量によって管理し, 目標値に達するまで段階的にスパン中央において上面および下面から局所振動試験を行い, 鉄筋腐食率と共振周波数の関係を整理した.

積算電流量から計算される鉄筋腐食率が目標値に達した後に, 図-3 の曲げ載荷実験によって劣化供試体の構造性能(剛性, 耐荷力, 変形性能)を確認した. さらに曲げ載荷試験後には供試体を解体し, 鉄筋の採取および除錆と質量測定によって実際の腐食率を確認した.

表-3 はり供試体の諸元一覧

供試体名		部材長さ (mm)	断面幅 (mm)	断面高さ (mm)	補強材	実際の腐食率 (%)	腐食区間
電食はり供試体	RC_0	2600	150	350	RC	0	引張鉄筋 スパン中央の 350 mm 区間
	RC_10					14	
	RC_20					25	
	鋼板_0				鋼板 (厚さ 2.3 mm)	0	
	鋼板_10					4	
	鋼板_20					11	
	シート_0				繊維シート (1 枚)	0	
	シート_10					12	
	シート_20					23	



写真-2 電食試験 (鋼板供試体)

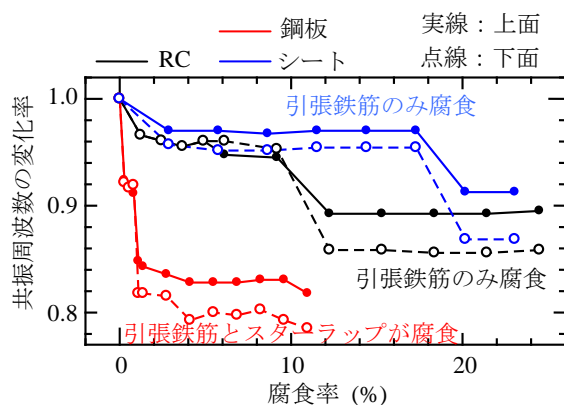


図-8 鉄筋腐食率と共振周波数の関係

(2) 非破壊検査

鉄筋腐食率と共振周波数の関係を整理した。図-8 より、RC 供試体とシート供試体では、それぞれ腐食率 10% と 20% 程度に達すると、局所振動試験による共振周波数が大きく低下した。引張鉄筋周辺に生じた腐食ひび割れを検知して共振周波数が低下するため、シート供試体では、繊維シートが鉄筋周辺のひび割れ進展を抑制したものと推察される。

一方、鋼板供試体では腐食率 1% で共振周波数が大きく低下した。これらの供試体を解体したところ、RC 供試体とシート供試体ではスターラップの腐食は見られなかったが、鋼板供試体では結果としてスターラップにも引張鉄筋と同程度の腐食が生じていた。このため、鋼板供試体では引張鉄筋とスターラップの両方から腐食ひび割れが生じるため、腐食率 1% で共振周波数が大きく低下したと考えられる。実際の RC 桁の塩害でも引張鉄筋とスターラップの両方に腐食が生じるため、今後は RC 供試体やシート供試体でもスターラップと引張鉄筋の両方を腐食させた検討が必要である。

特に、図-8 の上面と下面からの測定結果が概ね一致していることから、提案技術は鋼板や繊維シートの上から点検が可能であり、さらに鋼板や繊維シートが剥離している場合でも、道路上(舗装上)から点検してコンクリート内部の鉄筋腐食が評価できる可能性が示唆された。

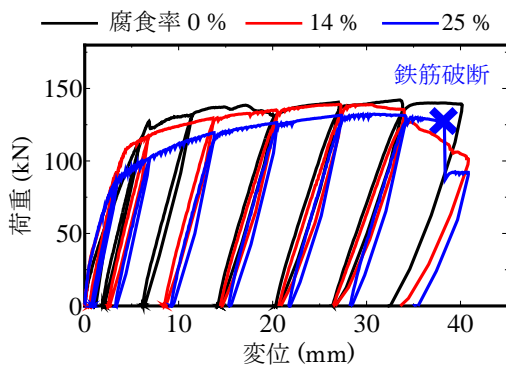


図-9 荷重-変位関係 (RC・補強なし)

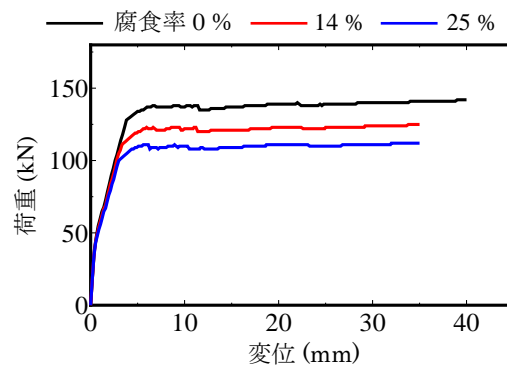


図-10 FEM 解析 (RC・補強なし)

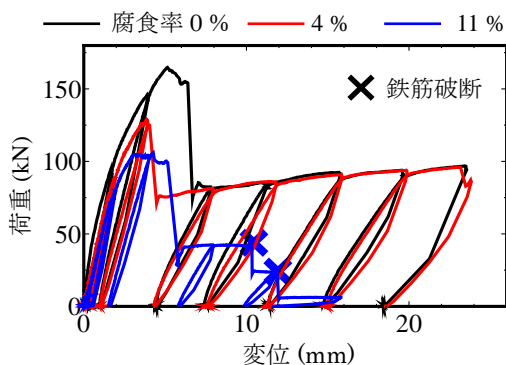


図-11 荷重-変位関係 (鋼板補強)

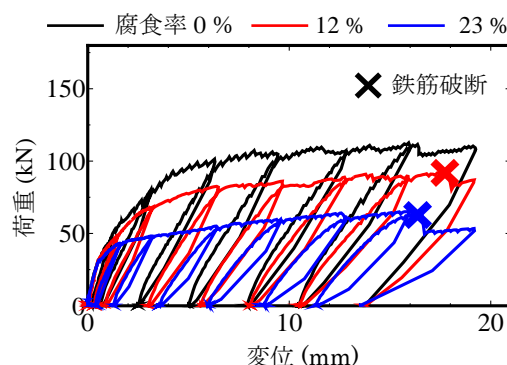


図-12 荷重-変位関係 (シート補強)

(3) 劣化部材の構造性能

鉄筋腐食が生じた劣化供試体の曲げ荷重試験を行った。図-9より、RC 供試体(補強なし)では鉄筋腐食率に応じて耐荷力の低下が確認できた。さらに、腐食率 25% の RC 供試体では、 $5\delta_y$ の荷重において引張鉄筋が破断し、変形性能も低下した。図-10 に示す FEM 解析と実験結果の比較より、本実験の条件については、鉄筋の断面欠損のみを考慮して妥当に構造性能(荷重-変位関係)を評価できた。一方、RC 供試体と比較して、鋼板供試体とシート供試体では腐食率の増加に伴って耐荷力が著しく低下した。本実験では、鉄筋を腐食させない健全な供試体であっても荷重に伴って鋼板や繊維シートが徐々に剥がれるため、目標の耐荷力まで性能が発揮されなかった。鋼板供試体やシート供試体では、引張鉄筋の腐食によって供試体下面(補強材とコンクリートの接着面)にひび割れが生じるため、補強材の剥離が早期に生じて耐荷力が低下したと推察される。今後、補強材とコンクリートの付着劣化を考慮した解析モデルを構築し、耐荷力や変形性能を評価する。

なお、RC 供試体、鋼板供試体、シート供試体のいずれについても、腐食率による荷重-変位関係の初期剛性に大きな変化はない。部分的な鉄筋腐食がはり全体の剛性に及ぼす影響は小さく、車両荷重による主桁のたわみ計測や重錐落下試験による剛性評価では、塩害による鉄筋腐食を評価できないことが示唆された。塩害の初期段階において構造物の劣化性状と構造性能を評価するためには、局所振動試験などが必要である。

3. 凍害に関する検討

(1) 実験概要

図-13 に示す RC はり供試体 10 体の凍結融解試験を行った。特に、凍結融解によるコンクリートの材料劣化に対する非破壊検査と、耐荷力(せん断耐力)に及ぼす影響を検討する。なお、FS 研究は基礎検討の段階であり、鋼板や繊維シート補強した場合の検討は本格研究にて行う。

はり供試体の凍結融解試験は水中 A 法とし、 $-18\sim+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ の温度履歴を目標の劣化レベルまで与えた。写真-3 に示すように、加振器を用いて軸方向の縦振動を励起し、はり供試体の共振周波数を測定した。相対動弾性係数は共振周波数から計算することができる。

凍結融解 20 サイクルごとに振動試験を行い、図-13 の図中に示す周波数変化率に達した時点で、曲げ載荷試験によって劣化供試体の耐荷力を確認した。

(2) 非破壊検査

図-14 に示すように、繰返し凍結融解が作用することによってコンクリートの材料劣化が生じ、はり供試体の共振周波数が低下した。提案技術の原理は、コンクリートの耐久性試験に用いられる一般的な共鳴振動試験と同じである。提案技術は加振器を用いて共鳴振動試験を大型化し、構造物の点検に応用するものであり、RC はり供試体に対しても凍害による材料劣化を評価できた。

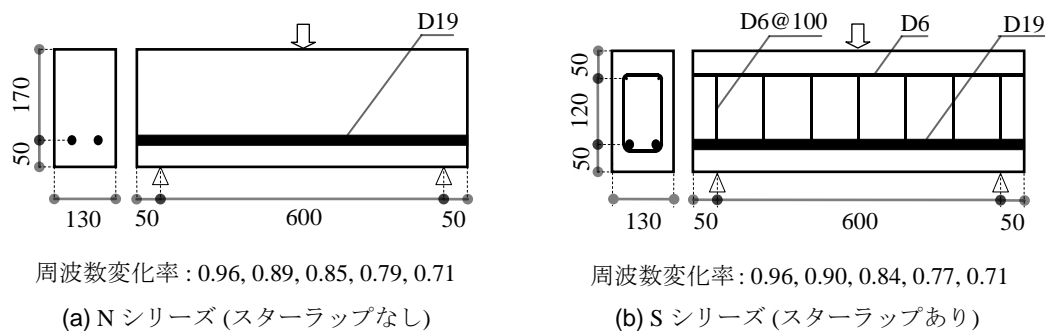


図-13 凍結融解試験のはり供試体の概略図



写真-3 振動試験の状況

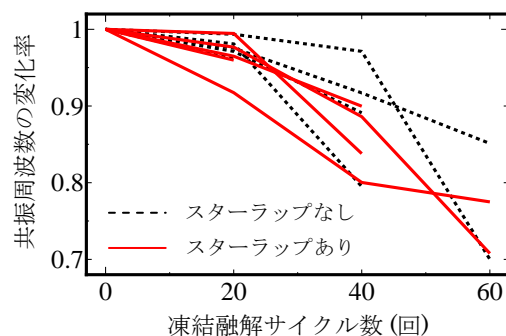


図-14 凍結融解サイクル数と共振周波数の関係

(3) 劣化部材の構造性能

コンクリートの材料劣化(共振周波数の低下)とせん断耐力の関係を図-15に示す。スターラップの有無によらず、凍結融解を受けて RC はり供試体のせん断耐力が著しく低下することが示された。特に劣化が著しい供試体では、健全時の 60% 程度まで耐荷力が低下する場合があった。一般的に、凍害は構造物の美観上の観点から問題となることが多いが、せん断スパン比が小さい桁受部などは、せん断耐力の低下によって構造物の安全性が損なわれる可能性も指摘される。凍害を受けたコンクリートはりのせん断耐力を評価する。载荷試験後の供試体からコア試験片を採取し、相対動弾性係数と引張強度の関係を図-16に整理した。図中には、既往の評価式も併せて示す。凍害を受けたコンクリートは引張強度が低下することが、本実験でも示された。

そこで、提案技術によって得られる共振周波数の測定値から相対動弾性係数とコンクリートの引張強度を求め、現行の設計規準式を用いてはり供試体のせん断耐力を算定した。なお、スターラップが受け持つせん断耐力については、健全時と同様に、降伏応力を仮定したトラス理論によって算定した。図-15の実験結果と提案式の比較より、共振周波数をパラメータとした評価式によって、凍結融解によって劣化した RC はり供試体のせん断耐力を良好に再現できた。なお、スターラップを有する RC はり供試体では、著しい劣化(周波数変化率 0.71)に対してせん断耐力を過大評価しており、今後の見直しが必要である。



(a) スターラップあり，周波数変化率 0.90



(b) スターラップあり，周波数低下率 0.71

写真-4 载荷試験後の供試体の損傷状況

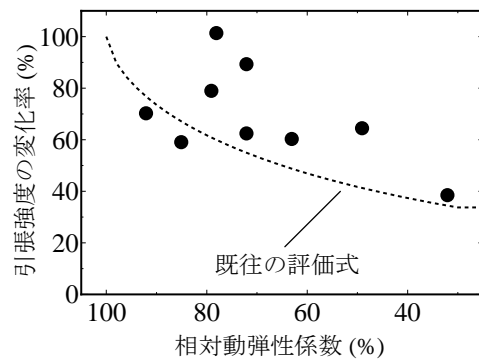


図-16 コンクリートの引張強度の低下

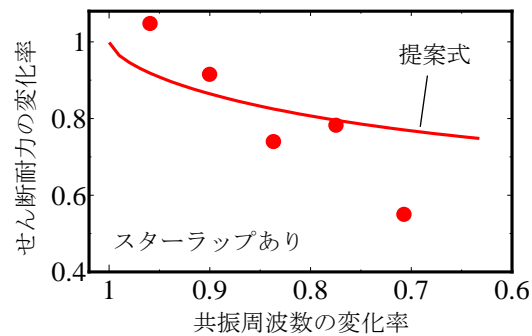
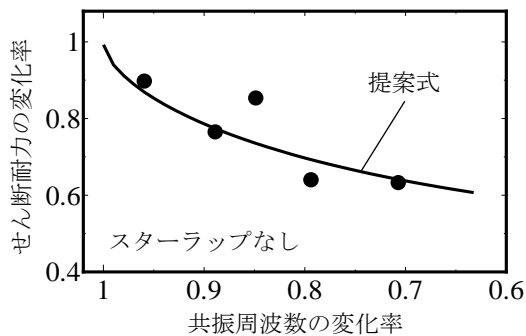


図-15 共振周波数とせん断耐力の関係

4. 疲労に関する検討

(1) 実験概要

RC 床版供試体の輪荷重走行試験において、加振器を用いた局所振動試験を行った。供試体寸法と輪荷重位置、および局所振動試験の測定位置を図-17 に示す。輪荷重は 98kN を基本として、所定の走行回数に達すると段階的に増加させる载荷方式を採用した。以降は 98kN の等価繰返し回数に換算して、実験データを整理した。局所振動試験は床版上面から行った。

なお、FS 研究は基礎検討の段階であり、鋼板や繊維シート補強した場合の検討は、本格研究にて実施する。

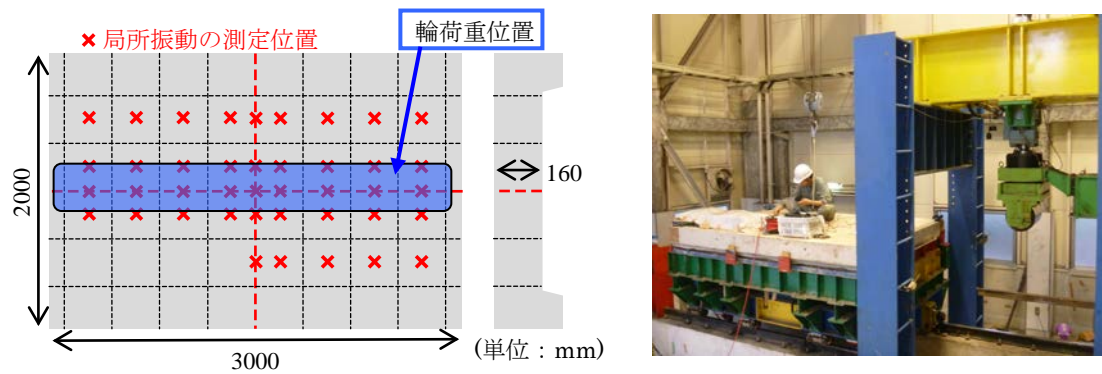


図-17 輪荷重走行試験

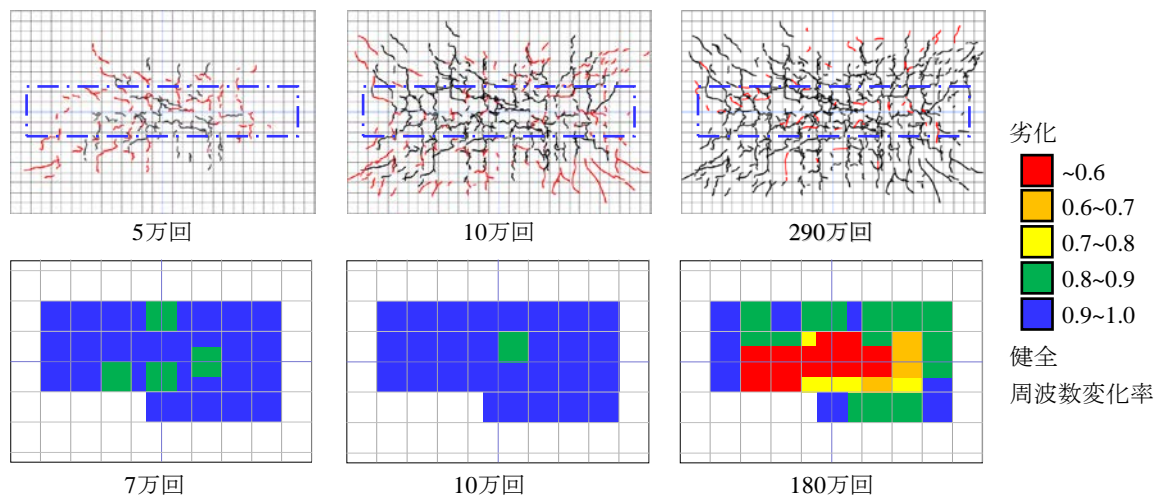


図-18 床版下面のひび割れ性状と共振周波数の分布

(2) 非破壊検査

図-18 に示すように、提案する局所振動試験によって床版の共振周波数の分布が得られ、床版内部の疲労損傷の発生と進展を追従することができた。このような測定手法を道路橋の点検に応用すれば、疲労損傷の分布を時系列でマッピングした床版の維持管理が可能となる。

床版中央で測定された共振周波数の変化と、活荷重たわみ曲線の関係を図-19 に示す。活荷重たわみが急増して終局(抜け落ち)に至る1000万回の輪荷重に対して、共振周波数は10~100万回の段階で明確な低下が表れている。提案技術は、床版内部に生じた疲労損傷を定量的に評価するものであり、床版の終局(抜け落ち)に対して事前に劣化の兆候を検知でき、時間的余裕をもって予防保全対策が可能になる。特に、提案技術は、鋼板や繊維シート補強によって下面が目視できない場合、さらにアスファルト舗装によって上面の変状が確認できない場合でも、床版内部の疲労損傷を評価できる点検手法として極めて有用である。

鋼板や繊維シート補強によって下面が目視できない場合、さらにアスファルト舗装によって上面の変状が確認できない場合でも、床版内部の疲労損傷を評価できる点検手法として極めて有用である。

(3) 劣化部材の構造性能

実際の道路橋では水や塩分の供給、車両走行位置と主桁間隔の関係など、疲労損傷が様々な場所で生じている。このような疲労損傷が離散的に生じている道路橋床版の使用性や安全性を評価するためには、構造解析による評価が不可欠である。現在、図-18 に示すような疲労損傷のマッピングを考慮した床版の FEM モデルを構築している。今後、劣化部材の耐荷力や疲労に対する余寿命評価に繋げていく。

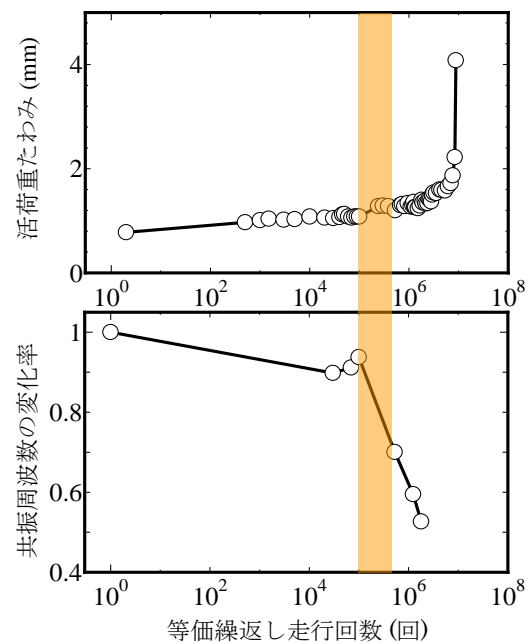


図-19 活荷重たわみと共振周波数

5. 道路橋の現場試験

(1) 鋼板補強された道路橋RC主桁の現場試験

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桁橋である。道路橋の全景を写真-5(a)に示す。本橋では3本の主桁のうち、両外側のG1およびG3桁の下面に厚さ8mmの鋼板が接着補強されている。主桁高さは920mmを基準として、橋軸方向に変化している。目視と叩き点検では、鋼板補強したG1とG3桁において著しい鋼板の腐食が見られ、広範囲にわたって鋼板の剥離が確認された。また、主桁と補修コンクリートの境界部にも顕著なひび割れが見られた(写真-5(b))。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・変状は見られなかった。

本実験では、写真-5(c)に示すように、第1径間(スパン12.6m)に対して3本の主桁下面から鋼板を介して局所振動試験を行った。局所振動試験による主桁の共振周波数の分布を図-20に示す。ここでは、理論によって求めた健全時の共振周波数を基準とする周波数変化率を示した。これまでの現場試験の経験および表-1の健全部材に対する測定精度を踏まえて、ここでは暫定的に周波数変化率0.9以下を劣化と判定した。なお、鋼板が剥離した箇所では、RC主桁まで振動が伝達せずに鋼板の動的応答を測定するため、健全箇所と比較して10倍以上の応答加速度が得られた。このような箇所では、叩き点検でも容易に鋼板の剥離が判断できた。

局所振動試験から推定される橋の劣化性状のマッピングを図-20に示す。図-20より、G1桁の全長およびG3桁のA1橋台側は鋼板が剥離しており、また、G3桁の第2径間側では、鋼板は接着しているが内部のコンクリートに再劣化が生じていると推定された。

以上より、提案技術によって鋼板補強された道路橋RC主桁の劣化分布(鋼板の剥離箇所とコンクリート内部の損傷箇所)が示せた。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FEM解析と差異はなかった。すなわち、本橋のように主桁下面が広範囲に再劣化した場合でも、車両載荷による主桁のたわみ計測では健全性を評価することは難しい。



(a) 橋梁の全景

(b) 主桁の劣化性状

(c) 局所振動試験の状況

写真-5 鋼板補強した道路橋RC主桁の現場試験

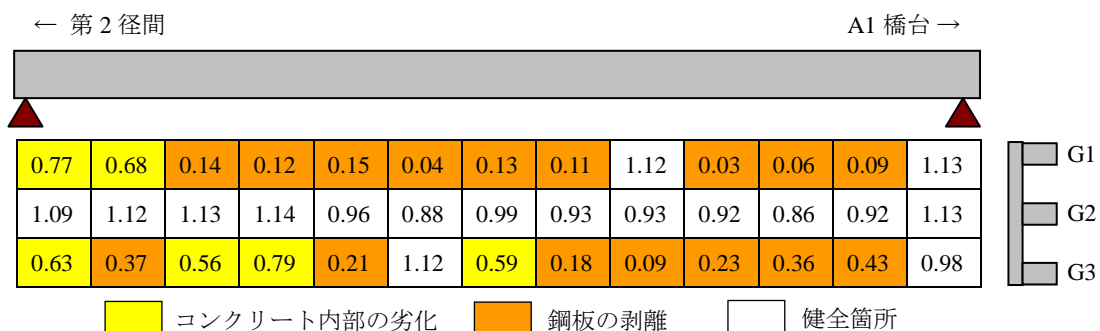


図-20 共振周波数(周波数変化率)の分布に基づく主桁の劣化性状の推定

6. まとめ

昨年のヒアリング審査を受けて、本格採択に向けた下記の条件が挙げられた。

再劣化現象の定義及び研究開発の目標値を明確にし、本手法によりの確に再劣化部材の健全度を評価できることを示すこと。

本研究では、RC 桁や RC 床版を繊維シートや鋼板によって補強する際に、コンクリートのひび割れ補修や断面補修が適切に行われることを前提とした上で、補修後に部材に生じる変状を再劣化と定義する。具体的な再劣化現象を以下に列挙する。

- ①補強材の劣化：鋼板の腐食，繊維シートの破断
- ②補強材とコンクリート境界面の劣化：繊維シートや鋼板の剥離
- ③RC 部材の損傷：鉄筋腐食，疲労ひび割れ，凍結融解による材料劣化とひび割れ

上記の再劣化現象を想定して、提案技術の実用可能性と研究開発の目標値を整理した。

(1) 加振器を用いた RC 部材の周波数スイープ試験

- 試験精度の検証(ばらつきの評価；表-1)とこれまでの現場試験の結果を踏まえて、共振周波数が健全時の 90 % まで低下したときを劣化判定の閾値とした。以降は この閾値を基準として研究開発の目標値を設定した。
- 鋼板および繊維シートの上からでも局所振動試験が可能であり、補強材の剥離や内部コンクリートの損傷を評価できた。(図-5～図-7)

(2) 塩害を受けた RC 桁の点検への応用の可能性

- 鋼板および繊維シートの上からでもコンクリート内部の腐食ひび割れを検知することができた。(図-8)
- 引張鉄筋とスターラップが同程度に腐食した場合には、腐食率 1 % 程度の段階で腐食ひび割れを検知できた。(図-8)
- 一方、引張鉄筋のみを腐食させた場合には、腐食率 10～20 % の著しい劣化でなければ、鉄筋腐食を検知できない。(図-8)
- 鋼板や繊維シートで補強した場合は、鉄筋の腐食ひび割れによって補強材とコンクリートの付着低下が生じるため、鉄筋の断面欠損以上に耐荷力や変形性能が低下した。構造性能の観点からも、鋼板や繊維シートで補強した RC 桁の早期点検は重要である。(図-9～12)

塩害に対する目標値の設定：本格研究では、引張鉄筋とスターラップが腐食する場合に対して腐食率 1 % の検知を目標値とする。このとき、構造性能の低下はほとんどない。また、引張鉄筋あるいはスターラップのみが腐食する場合については、本格研究において検知可能な損傷レベルと構造性能に及ぼす影響を明らかにする。

(3) 凍害を受けた RC 桁の点検への応用の可能性

- 凍結融解によるコンクリートの材料劣化を評価することができた。(図－14)
- 共振周波数の測定値を用いて、コンクリートの材料劣化を考慮したせん断耐力算定式を提示し、実験結果と良好に整合することを示した。(図－15)

凍害に対する目標値の設定：本格研究では、実構造物の現場試験において、材料の耐久性の劣化基準である相対動弾性係数 80 % を検知の目標値とする。このとき、スターラップを有する RC はりでは、健全時の 90 % の耐荷力を保持している。(図－15)

(4) 疲労損傷を受けた RC 床版の点検への応用の可能性

- 輪荷重走行試験によって生じる床版内部の疲労損傷の発生・進展をマッピングできた。(図－18)
- 共振周波数を指標として、終局(抜け落ち)に至る走行回数の 1/10 の段階で疲労損傷を検知できる可能性が示唆された。(図－19)

疲労に対する目標値の設定：終局に至る走行回数の 1/10 の段階で疲労損傷の発生を検知し、その後の損傷進展を追従できることを目標値とする。さらに、本格研究では、疲労損傷の空間的分布を考慮した床版の耐荷力や疲労寿命の評価に繋げる。

(5) 道路橋の現場試験への応用の可能性

- 交通規制を必要とせずに、供用中の道路橋の現場試験が可能であった。
- 鋼板および繊維シート補強を介した桁下あるいは床版下面からの点検が可能であり、補強材の剥離、コンクリート内部の劣化、およびアスファルト舗装の剥離などを推定した橋の劣化性状のマッピングを示せた。

現場試験に対する目標値の設定：道路橋の現場試験において、測定精度の信頼区間(ばらつきの評価)を標本平均から $\pm 10\%$ の範囲に収めることを目標値とする。さらに作業性や可搬性の観点から、加振器の重量を 2 kg に軽量化することや、測定時間 1 点あたり 20 秒に短縮する。

⑦本格研究の見通し

※ FS 研究を踏まえて、提案書(当初計画)からの大きな変更点はない。

1. FS 研究の結果を踏まえた本格研究における研究成果の見通し

提案技術は、特に、鋼板や繊維シートで補強された RC 部材に対して、補強材の上からでもコンクリート内部の再劣化現象を評価できる点に新規性と有用性が認められる。FS 研究では、供試体実験による基礎的検討や道路橋の現場試験によって、鋼板や繊維シートの上からでもコンクリート内部の劣化を検知することができ、塩害・凍害・疲労に対して構造性能が大きく低下する前段階での健全性評価の可能性が示唆された。特に、寒冷地において複合劣化が生じた道路橋(鋼板補強した RC 桁、および繊維シート補強した RC 床版)の 現場試験でも実測が可能であり、橋の劣化性状のマッピングを示せたことから、提案技術の早期実用化が期待される。

一方、FS 研究では、研究の枠組みを示すこと、および実用可能性と研究開発の目標値を推し量るため、限られた実験条件での検討に留まっている。道路橋の健全度評価手法に繋げるためには、様々な劣化性状に対する基礎的データの収集と、より高度な解析モデルの構築が必要であり、本格研究によってこれらの課題を解決し、汎用的な道路橋の健全性評価手法に発展できると考えている。

2. 今後の研究目標の達成見込み

塩害、凍害、疲労に対してそれぞれ設定した研究開発の目標値は、FS 研究において達成できた数値を示しているため、本格研究でも研究目標を達成できる可能性は高い。

一方、FS 研究の成果は限られた実験条件(劣化分布が一様であるなど)に限定されるため、本格研究では、特に劣化分布をパラメータとした実験および解析を行い、様々な劣化性状や構造諸元に対する点検精度と健全性評価の信頼度を明らかにする必要がある。

3. 成果の活用方法、手段、今後の展開

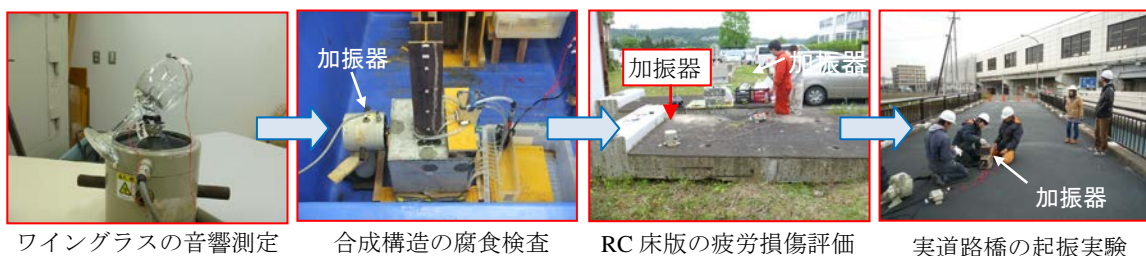
補修により見えない部分のコンクリート部材の健全度評価は時宜を得た重要なテーマであり、社会的ニーズは十分に見込める。研究成果の実用化に向けて、本格研究の採択と同時に外部委員による意見交換会を設置する。本委員会は、東北地方の橋梁管理者(国、自治体、高速道路)、調査設計会社、大学の研究者らによって組織する。本委員会において、提案技術の紹介と課題について意見交換を行うほか、橋梁管理者に現場試験のフィールド提供を依頼し、提案技術の実証試験(現場試験)を広く一般公開する。このような提案技術のデモンストレーションを重ね、現場試験での課題を整理することにより、提案技術のさらなる高度化に取り組む。

本格研究の最終年度(平成 28 年度)には、一連の研究成果を取りまとめた道路橋の簡易点検法を提案し、今後の現場試験での試行に繋げていく。提案技術の橋梁点検における実績と有用性が確認できれば、今後の全国展開に向けた大きな礎を築くことができる。

⑧特記事項

1. 提案技術の特筆すべき点

- 申請課題は、楽器・オーディオの品質評価や機械部品の精密検査などに用いられる精緻な周波数スイープ試験を大型化し、道路橋の点検に応用するものである。これは構造物の維持管理マニュアルなどに紹介されていない 新たな技術開発に取り組む ものであり、超音波法や衝撃振動試験などの既存技術と比較して、飛躍的な試験精度の向上と汎用性が期待できる。
- FS 研究の成果として、鋼板や繊維シートの上から加振器を用いてコンクリート内部の劣化性状を推定することができた。本研究課題は、様々な目視困難箇所の点検において革新的な技術提案となる。



2. 研究の目的・目標からみた、研究成果の見通しや進捗の達成度

申請課題の革新性および挑戦的要素は、鋼板や繊維シートの上から補強したコンクリート内部の再劣化現象を非破壊試験によって評価する点であり、構造物の健全度評価の根幹でもある。FS 研究では、鋼板や繊維シートによって測定精度が低下することなく、補強したコンクリート内部の再劣化現象を評価できる可能性が示唆された ことから、研究の根幹でもある 挑戦的要素に達成の見通しがついた。

また、FS 研究の実験データを基にして、劣化部材の構造性能評価の検討にも着手できた。これによって、塩害・凍害・疲労に対して抑えるべき劣化指標を明らかにし、点検から構造性能評価までの枠組みを築くことができた。自己評価では FS 研究の達成度は満点である。

なお、本格研究では、多様な供試体諸元と劣化性状の組み合わせに対して基礎的データを収集するとともに、現場試験を継続的に行うことによって作業性や測定精度のさらなる向上を目指す。さらに、研究代表者らがこれまでに構築してきた構造信頼性評価手法に点検および構造性能評価の成果を組み込むことにより、研究課題「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」が達成できる。